

Plataforma didáctica para la educación en ingeniería aplicada al control de generadores

Jorge Eliécer Quintero Calvache, José Alex Restrepo, José Miguel Ramírez, Martha Lucía Orozco

CÓMO REFERENCIAR ESTE ARTÍCULO:

J. E. Quintero Calvache, J. A. Restrepo Zambrano, J. M. Ramírez Scarpetta and M. L. Orozco Gutiérrez, "Test-Rig for Engineering Education Applied to the Control of Synchronous Generators," in IEEE Revista Iberoamericana de Tecnologías del Aprendizaje, vol. 16, no. 4, pp. 337-345, Nov. 2021, doi: 10.1109/RITA.2021.3137375.

Title— Test-rig for engineering education applied to the control of synchronous generators.

Abstract— This work presents the result of employing a custom test-rig, designed for education and research, for teaching the control of synchronous generators in interconnected micro-grids. The teaching approach used allows implementing innovative teaching activities with experimental experiences, useful as support tool for courses in control, electronics, power electronics, and control of electrical machines. The developed test-rig was used in a postgraduate and undergraduate power electronics courses, with two different approaches: as student-run platform, and demonstrative practices managed by professors. The training activities using the test-rig platform has been evaluated by a own designed surveys. The results shown satisfactory effectiveness in aspects as relevance, learning assistance, contextualization of real problems, among others.

Index Terms— Electrical engineering education, Student experiments, Power Electronics, Synchronous generators control.

I. INTRODUCCIÓN

LA implementación de nuevas estrategias pedagógicas para la enseñanza de la ingeniería es el resultado de la discusión entre los roles profesor-estudiante y la necesidad de incorporar métodos de aprendizaje activos en los procesos de formación. Cada estrategia debe ser cuidadosamente seleccionada para una temática específica, en un ambiente de aprendizaje específico e incluso en grupos de estudiantes específicos [1]. La forma en que el alumno interactúa con las actividades de enseñanza, su nivel de motivación y su participación, proporcionan un indicador útil para seleccionar las actividades de aprendizaje y medir la calidad de la estrategia de enseñanza aplicada. Otro aspecto a considerar es lo inherente de los componentes teóricos y experimentales en los programas de formación de ingeniería eléctrica y

electrónica. Las clases presenciales han evolucionado y los métodos de enseñanza se han convertido en una parte importante del paradigma educativo, tal como se muestra en la Fig.1.



Fig. 1. Estrategias de enseñanza-aprendizaje.

En los procesos formativos las herramientas didácticas constituyen un recurso útil para fortalecer el aprendizaje. Estas proveen y contienen elementos que ayudan al estudiante a entender, aprender y adquirir habilidades y destrezas de manera efectiva, incluso en estrategias de enseñanza que utilizan el contacto ocasional con el profesor [2]. No es recomendable que los recursos empleados para la enseñanza utilicen tecnologías para resolver problemas específicos, por el contrario, estos recursos deben apoyar completamente el proceso de formación. Este apoyo va desde la comprensión de los principios y fenómenos físicos, hasta el logro de habilidades y competencias que permitan al estudiante resolver problemas de diversa índole en su área de formación [3]–[5]. El cambio del enfoque didáctico asumido en este trabajo ha llevado al desarrollo de herramientas hardware y software que permiten implementar tareas interactivas, flexibles e interdisciplinarias necesarias en los procesos de enseñanza. Estas herramientas apoyarán los procesos de análisis, diseño, simulación y el desarrollo de actividades esenciales y necesarias para el aprendizaje [6]–[9]. Cuando no se disponen de herramientas didácticas, los estudiantes deben construir sus propios circuitos o prototipos, lo que genera dificultades para alcanzar los objetivos de aprendizaje. Además, las herramientas que se utilizan durante un período académico tienen pocos cambios con respecto a las requeridas para el próximo período académico. Asimismo, los estudiantes

Jorge E. Quintero Calvache, Universidad del Valle, Cali, Colombia.
jorge.quintero@correounivalle.edu.co, <https://orcid.org/0000-0003-4209-946X>.

José Alex Restrepo, Universidad Simón Bolívar, Caracas, Venezuela.
restrepo@usb.ve; <https://orcid.org/0000-0001-8608-8442>.

José Miguel Ramírez, Universidad del Valle, Cali, Colombia.
jose.ramirez@correounivalle.edu.co; <https://orcid.org/0000-0003-1763-6702>.

Martha Lucía Orozco, Universidad del Valle, Cali, Colombia.
martha.orozco@correounivalle.edu.co; <https://orcid.org/0000-0002-5458-2427>.

necesitan un acceso flexible de estas herramientas para desarrollar sus prácticas experimentales. En la actualidad, los límites de ocupación en espacios cerrados, debido a las pandemias, dificultan la presencia de grandes grupos de estudiantes en el laboratorio. Entonces, el acceso distribuido a los recursos del laboratorio permitirá a los estudiantes realizar sus experimentos manteniendo el distanciamiento social. Por lo tanto, como apoyo a la docencia, este trabajo propone el desarrollo de un sistema flexible, para ser usado como plataforma de soporte a la enseñanza [10].

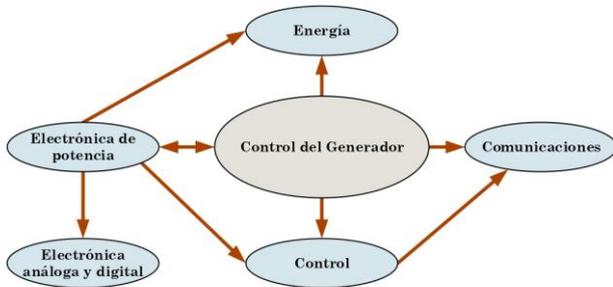


Fig. 2. Áreas de apoyo para el control de los generadores.

En la actualidad, el control electrónico de la energía toma importancia como un área fundamental en la ingeniería eléctrica y electrónica. El uso de sistemas electrónicos que gestionan y controlan la energía de pequeños y grandes sistemas de generación se ha convertido en una práctica generalizada. Los avances en la computación, las comunicaciones, los métodos de control y la electrónica de potencia (Fig. 2), sirven como soporte para que los sistemas de generación de energía eléctrica puedan lograr una mejor eficiencia, calidad de la energía y confiabilidad [11].

Actualmente, las sociedades industrializadas demandan grandes cantidades de energía eléctrica para hacer funcionar los procesos de producción. El estilo de vida moderno requiere de una cantidad abundante de energía eléctrica a bajo costo y su consumo se ha incrementado paralelamente con los cambios en los hábitos de vida y el crecimiento económico de las sociedades [12]. Las fuentes alternas de energía permiten suplir estas necesidades reduciendo el impacto ambiental, de las emisiones de carbono aportado por las plantas térmicas. Según [13], las energías renovables crecen rápidamente en todos los escenarios; este crecimiento es liderado desde la investigación y la educación en las redes de distribución, conocidas como redes inteligentes [14]. Por lo tanto, los contenidos actuales de los cursos en sistemas de energía incluyen el control de estas fuentes, particularmente el control de generadores de energía eléctrica. Asimismo, se hace necesario desarrollar una herramienta que ayude a promover la educación en este campo. El generador síncrono es una máquina capaz de transformar la energía mecánica en energía eléctrica. Un caso especial de generadores, considerados en este estudio son las Pequeñas Centrales Hidroenergéticas (PCH's), que se encuentran en el rango de kW's a pocos MW's. Estas máquinas requieren de un control de su voltaje y frecuencia, para operar adecuadamente. El control de la frecuencia se relaciona con el control de velocidad de máquina, mientras que el control de voltaje proviene de un controlador del sistema de excitación. Este trabajo utiliza el sistema de excitación como un ejemplo aplicado con la plataforma

educativa propuesta. Esta posee un conjunto de componentes encargados de definir las condiciones de operación y las variables de estado en el generador síncrono, manteniendo la estabilidad entre la máquina y la carga, como se muestra en la Fig. 3 [15].

La organización de este documento continúa con la Sección II la cual presenta la selección de la topología de la plataforma didáctica, el desarrollo de los circuitos que la integran, la instrumentación y el software empleado.

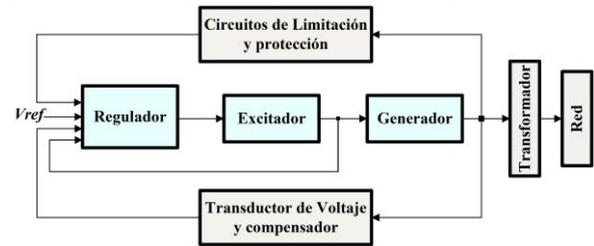


Fig. 3. Elementos del sistema de Excitación.

Se considera también la construcción y puesta en servicio en el Laboratorio de Electrónica de Potencia de la Universidad del Valle. En la Sección III se presentan las actividades de aprendizaje desarrolladas con la herramienta de apoyo, su efectividad, la retroalimentación por parte de los estudiantes y el impacto de la herramienta en un curso de posgrado a través de una encuesta como instrumento de medición. Finalmente, en la sección IV se presentan las conclusiones, recomendaciones y los trabajos futuros.

II. METODOLOGÍA

Inicialmente, esta sección presenta una revisión de los desarrollos realizados en diferentes universidades o institutos, relacionados con el control del generador síncrono. Un análisis de esta revisión permite definir las características pedagógicas y técnicas que deben tener la herramienta didáctica de soporte. Finalmente, se muestra el desarrollo del prototipo considerando las características anteriormente definidas.

A. Revisión de trabajos relacionados con la enseñanza en el control de generadores de energía eléctrica.

Son pocos los equipos desarrollados por los fabricantes comerciales para la enseñanza en el control de generadores síncronos, los disponibles son demasiado costosos para las universidades de los países en desarrollo. Conscientes de esta necesidad, algunas universidades y centros de investigación han construido sus propias plataformas de apoyo a los cursos de laboratorio e investigación [16], [17]. En la literatura se reportan algunos equipos de relevancia, utilizados para la enseñanza en esta área:

- El laboratorio de micro-centrales hidroeléctricas a escala reducida, también denominado Sistema de Generación de Energía Hidroeléctrica (SGEH), ubicado en el laboratorio de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas (PCH's) de la Universidad del Valle (Colombia). El sistema cuenta con un conjunto de elementos hidráulicos, eléctricos, electrónicos y electromecánicos. Los subsistemas de generación y el sistema de interconexión a la red eléctrica son fácilmente identificables en esta configuración [18]. Este equipo es una representación a escala del sistema

real, pero necesita un gran espacio y tiene altos costos de instalación, operación y mantenimiento.

- La Universidad Técnica de Cotopaxi en Ecuador [19] ha desarrollado un banco de pruebas que consta de dos máquinas de corriente alterna de 5 kW. Este desarrollo incluye manuales de operación para la realización de prácticas demostrativas, implementadas en el laboratorio de máquinas eléctricas. Es un banco de pruebas simple, económico, compacto y ocupa poco espacio. La configuración tiene un controlador de velocidad y de voltaje usado regularmente en máquinas reales. El equipo, tal como se presenta, no permite modificaciones importantes.
- Los autores en [20] presentan un laboratorio que emula el sistema de control de una amplia zona de generación de un sistema multigenerador. También presentan un amplio estudio para la selección de materiales, componentes, su instalación, los mecanismos de control y comunicación. La construcción permite probar las características de su configuración, comunicación y latencia, compartimento de carga, variación de potencia en los circuitos en un área de generación de la red eléctrica Noruega. Aunque presenta un amplio abanico de opciones en su configuración y funcionamiento, resulta demasiado costoso y supera los presupuestos de docencia e investigación en el entorno local.

B. Características de la herramienta didáctica para la enseñanza en generadores síncronos.

La plataforma didáctica desarrollada en este trabajo es flexible, se adapta a los diferentes estilos de enseñanza-aprendizaje y a las necesidades de los distintos cursos y profesores asociados al control de los generadores síncronos. Por lo tanto, los cambios de la plataforma relacionados con su topología y orientados a las actividades de aprendizaje se deben realizar con facilidad. Para el presente trabajo, algunas de estas actividades se relacionan con la máquina operando en diferentes modos, tales como el control en modo manual y automático, el arranque en vacío, la conexión y desconexión de la carga, entre otros. Esta flexibilidad permitirá ampliar la utilización de la plataforma en otras tareas relacionadas con la electrónica de potencia y los sistemas de potencia. Un desafío en el diseño de la plataforma es la de brindar flexibilidad a un costo menor que los enfoques comerciales. El mantenimiento y operación de la plataforma se realizan con facilidad para permitir el trabajo independiente por parte de los estudiantes. Para los cursos de pregrado, las actividades de aprendizaje relacionadas con la plataforma deben ser lo suficientemente sencillas, para que los estudiantes las puedan comprender con sus propios conocimientos [21], [22].

De las *especificaciones generales*, la herramienta reúne las siguientes características:

- **Robusta:** Que sea fuerte, duradera, que no se dañe y resista el trato de los estudiantes,
- **Flexible:** Que permita programar varios tipos de experimentos y laboratorios,
- **Modular:** Que se basa en partes que se puedan intercambiar,
- con funciones de comunicación y conectividad a

Internet,

- Operada por estudiantes que usan sus computadoras personales sin requerir hardware de interconexión especializado,
- Permite alternar simulación y experimentación para probar controladores reales en modelos simulados y luego ejecutarlos en la máquina real,
- La instalación la plataforma debe ocupar poco espacio y ser fácilmente transportable. Al tener bajos requisitos de construcción y mantenimiento, la hará apropiada para cursos con un gran número de estudiantes,
- La plataforma debe utilizar un lenguaje de programación de nivel medio o alto para el control y/o gestión de datos.

Y los siguientes *requerimientos pedagógicos*:

- Apoyar al profesor en la clase,
- La herramienta debe ser accesible por todos los estudiantes para utilizarla en clase o fuera de ella,
- Permitir el aprendizaje activo del alumno,
- Estimular el interés del alumno por la asignatura,
- Desarrollar en el estudiante las competencias propias de esta disciplina,
- Apoyar el trabajo interdisciplinar.

C. Desarrollo de la herramienta didáctica de apoyo a la enseñanza en el control de generadores síncronos.

Considerando la revisión previa de los equipos existentes y las características técnico-pedagógicas, la plataforma construida está conformada por las siguientes partes:

- La plataforma controla un generador síncrono de 3 kW, 220 Vrms, 8 Arms.
- **La unidad central de procesamiento (CPU)** utiliza un procesador digital de señales (**DSP**) EzKit-21369 de Analog Devices [23].
- **Una tarjeta de interfaz**, que utiliza una FPGA-Xilinx la cual permite la interconexión entre la CPU y los periféricos externos (etapa de potencia, sensores, módulo de comunicación, etc.).
- **Un módulo para comunicación** basado en un minicomputador de placa única **Raspberry PI**.
- **Una tarjeta de medidas** con 8 canales analógicos de entrada “analog input” (AI), para medida de tensión y corriente [24], [25].
- **Dos tarjetas de señales digitales** con 7 entradas y 7 salidas digitales (DI/DO), encargadas de intercambiar la información digital entre los actuadores y la CPU.
- **Un módulo de potencia**, que es un convertidor CC-CC tipo troceador asimétrico, el cual se encarga de suministrar la corriente necesaria al campo del generador para mantener regulada su tensión. El módulo tiene una capacidad nominal de 300 Vcc y 3 A, suficiente para controlar el devanado de campo del generador.
- **Un grupo de relevos, contactores (actuadores de encendido/apagado) y pulsadores**, elementos de maniobra controlados desde la CPU, permiten conectar los circuitos de potencia de la máquina con la carga y/o a la microred.

La Fig.4 muestra el diagrama de bloques de la plataforma propuesta, la Fig.5 su configuración y la Fig.6 muestra la distribución interna y la conectividad de las tarjetas electrónicas que la componen, utilizadas para implementar el regulador automático de voltaje (AVR) para el generador sincrónico. Con la plataforma propuesta se realizan tareas que cambian con frecuencia y son desarrolladas con los programas existentes en la CPU.

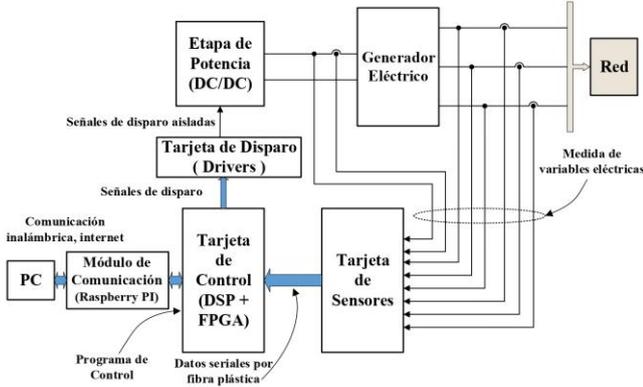


Fig. 4. Diagrama de bloques de la plataforma.



Fig. 5. Plataforma de soporte.

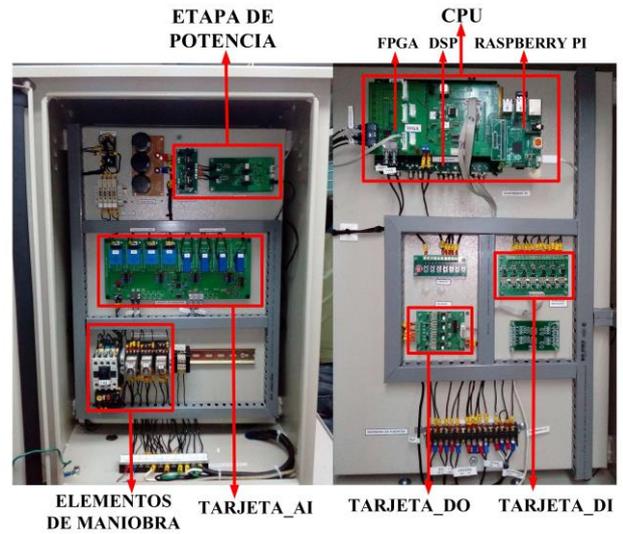


Fig. 6. Distribución de los elementos del sistema AVR construido usando la plataforma de prueba propuesta.

Otras tareas que cambian con menos frecuencia se encuentran en la tarjeta FPGA. En la CPU ejecutan operaciones de mando, funciones de control y de protección. La FPGA contiene tareas relacionadas con el intercambio de datos entre la CPU y los periféricos, el control de la etapa de potencia, las entradas analógicas, las entradas/salidas digitales y funciones opcionales como la medición de velocidad. El programa de la FPGA incluye la modulación de ancho de pulso (PWM) para operar los dispositivos de potencia, con un algoritmo opcional de modulación del vector espacial (SVM). De manera simplificada la tarjeta FPGA conecta al minicomputador Raspberry PI con la CPU, lo que permite la programación completa de la CPU desde una ubicación remota a través de Internet. Además, la conexión a Internet permite recopilar datos de la CPU desde la ubicación remota para un procesamiento fuera de línea.

D. Funcionalidades de la herramienta didáctica en el control de generadores síncronos.

Las altas capacidades de procesamiento de la DSP la convierten en una buena opción para realizar las tareas de coordinación y control propias de la plataforma. Esta capacidad de procesamiento, aprovechada con la conectividad a Internet de la Raspberry PI, permite ejecutar actividades de aprendizaje, ya sea con simulaciones o la ejecución en tiempo real de tareas de control utilizando hardware de potencia en el lazo (PHIL), como se muestra en la Fig. 7 [26]–[28]. El programa de la DSP para las tareas de control utiliza el estándar C/C++, cuyo aprendizaje es parte de los programas de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad del Valle.



Fig. 7: Tipo de actividades que se realizan con la plataforma propuesta.

De otro lado, tal como se muestra en la Fig.8, varios estudiantes pueden acceder a la plataforma a través de internet. Para lograr esta tarea, se utilizan como soporte dos programas sin licencia los cuales se ejecutan en el computador personal (PC) del estudiante, un programa personalizado desarrollado en la Raspberry PI y otro programa monitor que vincula el código DSP. Los siguientes programas se ejecutan en el PC del estudiante: un servidor de Windows X de Cygwin y el cliente SSH de Bitvise [29]. En la Raspberry PI se ejecuta un programa personalizado desarrollado internamente para intercambiar datos con la DSP.

Finalmente, un programa monitor desarrollado para la DSP se ejecuta en segundo plano como parte de un kernel modificado, vinculando el programa de control durante cada proceso de compilación. Aunque solo un estudiante puede programar la CPU una vez este ingrese a la plataforma; el esquema se concibe para que al ser liberada, otro estudiante pueda ingresar a ella, de esta manera una sola plataforma

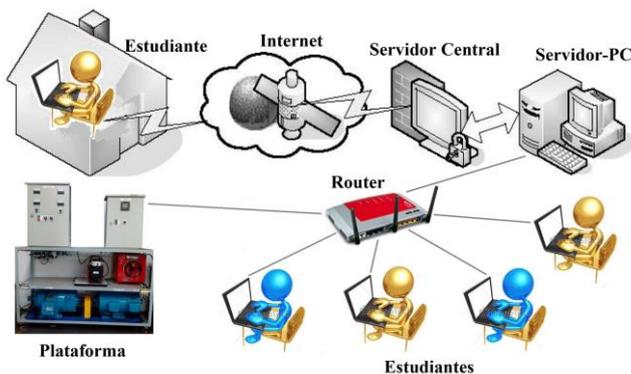


Fig. 8. Estructura de comunicación. Fuente: Autores.

puede servir como recurso de aprendizaje para varios estudiantes. En este caso, el acceso para programar la CPU la otorga el profesor. A futuro, se desarrollará el acceso automático dentro y fuera de la Universidad, permitiendo el acceso remoto a la plataforma, así como el almacenamiento de la información en la nube [14].

III. VALIDACIÓN DE LA HERRAMIENTA DIDÁCTICA

La Herramienta didáctica desarrollada se utilizó en dos cursos de la Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de Universidad del Valle (Colombia), teniendo las siguientes aplicaciones:

- Como herramienta de soporte para el curso de Sistemas Electrónicos de potencia (CSEP) del programa de posgrado de Ingeniería Eléctrica y Electrónica en el año

2018, con una participación de 12 estudiantes y

- Como caso de aplicación en dos prácticas demostrativas para el laboratorio de Electrónica de Potencia, en el pregrado de Ingeniería Electrónica, año 2019, para una población de 20 estudiantes.

En este trabajo se detalla el primer caso de validación, aquí la herramienta se utiliza en varias etapas del aprendizaje cumpliendo diferentes roles en la formación. La Fig.9 muestra la herramienta de soporte como eje conector, articulado con las 6 fases del ciclo de aprendizaje definidos para el curso de Sistemas de Electrónica de Potencia (CSEP). En el curso CSEP se tratan temas que incluyen las características de los dispositivos de conmutación, el modelado estático y dinámico de los convertidores de potencia AC/DC, DC/DC y DC/AC. Además del modelado dinámico de las fuentes de generación de energía tales como sistemas hidráulicos, solar fotovoltaico, eólico y baterías. Estos modelos son útiles para la etapa del diseño de controladores para gestionar la energía entre las fuentes y las cargas. El curso también introduce el diseño y la implementación de los circuitos típicos que se encuentran comúnmente en estos sistemas. Los convertidores de potencia estudiados en este curso son el convertidor de dos niveles, el convertidor multinivel, el convertidor cuasi-boost, el convertidor Z y el convertidor asimétrico, entre otros. En la metodología del curso, estas temáticas se tratan mediante clases guiadas por el profesor, acompañadas de prácticas de simulación y experimentación realizadas con la plataforma de soporte. Finalmente, los estudiantes deben realizar un proyecto que involucra simulación y experimentación utilizando la herramienta de soporte.



Fig. 9. Ciclo de integración enseñanza-aprendizaje basado en el uso de la herramienta didáctica.

Para este proyecto, los estudiantes deben poner en práctica los conocimientos adquiridos en el curso [6] [30].

En la formación teórica se examinan conceptos y métodos para el análisis de los sistemas convertidores presentados en el curso. La etapa de simulación permite al estudiante interactuar con el modelo del sistema (modelo de la máquina eléctrica como generador). La simulación se ejecuta con la herramienta de soporte y los estudiantes pueden visualizar las variables de estado para diferentes condiciones de operación. En la formación experimental, la plataforma de soporte permite verificar la respuesta real del sistema. Se utilizan los circuitos de medida, la CPU/FPGA, la etapa de potencia y la carga para observar las formas de onda de

corriente y voltaje presentes en el sistema durante la experimentación. En la etapa final, el proyecto integrador permite que los estudiantes verifiquen los conceptos aprendidos en el curso. Además, los estudiantes pueden integrar y desarrollar nuevos conocimientos que no están cubiertos en el curso, como el procesamiento de digital de señales y los protocolos de comunicación presentes en la tarjeta DSP.

A. Actividades formativas desarrolladas con la herramienta de soporte para el CSEP.

En la Tabla I se definen las competencias generales del CSEP y para su logro se construye el mapa de aprendizaje mostrado en la Figura 10. Además, La Figura 10 también muestra la relación entre las fases del ciclo de aprendizaje y los temas teóricos desarrollados, incluyendo las actividades formativas, la Tabla II muestra detalladamente estas actividades formativas. El curso consta de seis temas principales cubiertos en 16 semanas, la Tabla III muestra estos temas, así como las actividades de aprendizaje y el uso de la herramienta de soporte. Se definen las siguientes actividades de aprendizaje desarrolladas con la plataforma de soporte:

- Para el **Tema 1**: El alumno identifica cada elemento de la herramienta de soporte, utiliza la CPU y la aplica a casos básicos de su formación. Las actividades propuestas le permiten desarrollar la capacidad de utilizar la DSP, el lenguaje de programación, el módulo de comunicación (Raspberry PI) y los programas asociados. Los alumnos utilizan la tarjeta DSP y la Raspberry PI durante el modelado y simulación, a través de los siguientes ejercicios realizados en el aula:
 - ✓ Generación de onda sinusoidal pura y onda sinusoidal con ruido,
 - ✓ Filtro Paso Bajo, ajuste de las constantes con funciones en Matlab y su aplicación para una onda sinusoidal con ruido.
 - ✓ Modelado y simulación de un panel fotovoltaico.

TABLA I: COMPETENCIAS GENERALES PARA EL CURSO CSEP.

Criterio	Descripción
1	Competencia en el uso de conceptos y teorías discutidos en clase para determinar la estrategia de control más adecuada que cumplan con los requisitos del proyecto.
2	Competencia en el uso de nuevas y avanzadas conceptos, técnicas y algoritmos de control, comparados con los discutidos en clase.
3	Competencia en el uso de métodos analíticos para el diseño y clasificación adecuada de los componentes, así como sus parámetros técnicos.
4	Competencia en la búsqueda de los componentes, circuitos y elementos adecuados y disponibles que cumplan los requisitos de diseño, y los proveedores en los sitios web.
5	Competencia en repetir los pasos anteriores para determinar si los elementos presentes en la plataforma cumplen con los calculados en el diseño del proyecto.
6	Competencia en modelar el sistema diseñado y su implementación en el ambiente de desarrollo de la CPU.
7	Competencia en el eficiente y exitoso trabajo de equipo y la gestión de proyectos.
8	Competencia en la documentación del procedimiento de diseño, resultados, validación de resultados y contribución personal.

Para el *Laboratorio 1* denominado “*Reconocimiento de la plataforma*”, el estudiante realiza las siguientes actividades:

- ✓ Reconocimiento de la CPU, conexiones con las tarjetas DSP, FPGA y Raspberry PI.
 - ✓ Reconocimiento y manejo del software de programación para la DSP, FPGA y el Raspberry PI.
- Para el **Tema 2**: Se realiza el laboratorio 2 y se exponen los resultados de la primera fase del proyecto integrador. Además, se resuelve en clase el ejercicio para el *modelado y simulación de un troceador reductor Buck converter*. Se utiliza la CPU de la plataforma para realizar las siguientes tareas:
 - ✓ Solución de las ecuaciones diferenciales del convertidor y su implementación en lenguaje C++, se programa la CPU,
 - ✓ Implementación del controlador para la regulación del voltaje de salida del convertidor con carga pasiva,
 - ✓ Solución de las ecuaciones integro diferenciales mediante el método de Euler y la programación en la CPU,
 - ✓ Visualización de las variables de estado, y la respuesta de los controladores ante una perturbación de carga.

Para el *Laboratorio 2*, llamado “*Manipulación de señales análogas y digitales*” el estudiante desarrolla las siguientes actividades:

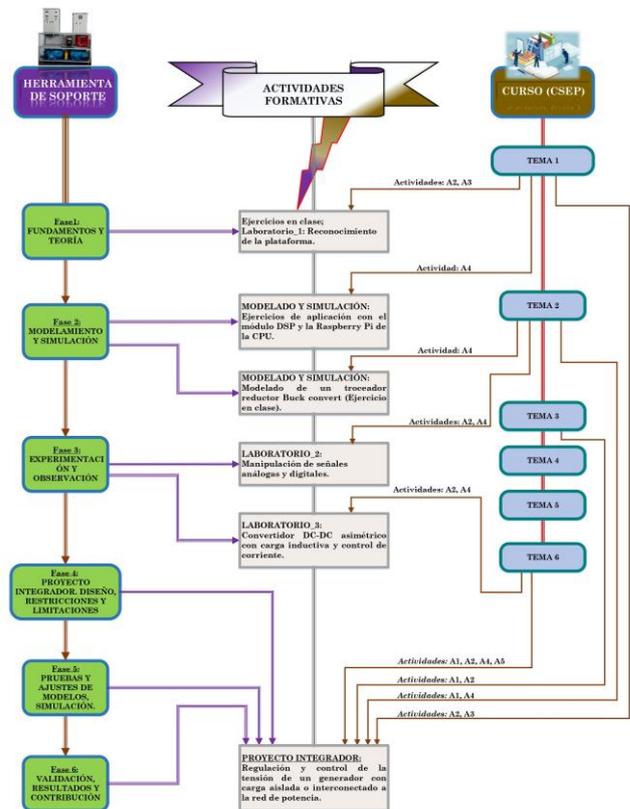


Fig. 10. Uso de la plataforma de soporte en el curso de CSEP con las actividades de Aprendizaje.

- ✓ Identificación de los módulos de entrada y salida digital (DI/DO) y salidas PWMs. El programa

tipo plantilla denominado “Controles DI/DO y PWM” utiliza las tarjetas DI, DO, la DSP, la FPGA y la Raspberry PI, para que el alumno comprenda, manipule y calibre las señales digitales.

- ✓ Reconocimiento del módulo de entrada análoga AI. El programa tipo plantilla llamado “*Calibración AI*” utiliza la tarjeta de entrada análoga, las tarjetas de medida de voltaje y corriente, la DSP, la FPGA y la Raspberry PI para ayudar al estudiante a comprender, manipular y calibrar la compensación y la ganancia de los canales analógicos.
- Para el **Tema 6**: Se realiza el laboratorio 3 y se finaliza el proyecto integrador. En el *Laboratorio 3*, con título “*Convertidor DC-DC asimétrico con carga inductiva y control de corriente*” el estudiante realiza las siguientes actividades:
 - ✓ Programación de los controladores para el arranque, paro, subir, bajar y los ajustes de las protecciones de la corriente de carga.
 - ✓ Ajuste de los controladores para la regulación de corriente de salida ante perturbaciones de carga y variaciones de voltaje en la fuente principal de alimentación.

El *proyecto integrador* denominado “*control y regulación de la tensión de un generador con carga aislada e interconectado a una microred de potencia*”, desarrollado durante el curso, utiliza los conocimientos adquiridos en los temas 1, 2, 3 y 6.

TABLA II: RESULTADOS ESPERADOS DE LAS ACTIVIDADES DESARROLLADAS EN EL CURSO DE CSEP RELACIONADAS CON LA HERRAMIENTA DE SOPORTE.

Actividades formativas o de aprendizaje.	Resultados o logros de aprendizaje del estudiante apoyados con la herramienta didáctica de soporte.
A1: Diseño e implementación de circuitos para convertidores de Electrónica de Potencia (EP) aplicados en sistemas eléctricos.	<i>Desarrolla procedimientos</i> para evaluar el comportamiento ante variación de los parámetros de los elementos en un circuito convertidor de EP, con el fin de aplicarlos en sus diseños. <i>Desarrolla enfoques analíticos</i> para determinar las especificaciones de los parámetros técnicos y la selección de componentes en la EP, con el fin de aplicarlos en sus diseños. <i>Verifica</i> el tamaño, costo y disponibilidad de los componentes de un convertidor de EP, para incluirlo en el diseño de un sistema experimental.
A2: Lectura e interpretación de hojas de datos y notas de aplicación de dispositivos y circuitos para convertidores de EP.	<i>Aprende a utilizar los recursos existentes</i> en la web para encontrar las hojas de datos y las notas de aplicación de los componentes de la EP. <i>Aprende a obtener los parámetros</i> técnicos de un componente a partir de la hoja de datos, con el fin de que sea seleccionado y operado adecuadamente. <i>Aprende las consideraciones y limitaciones</i> más relevantes de un componente a partir de sus notas de aplicación, con el fin de tener una correcta selección cuando se utiliza en un convertidor de EP.
A3: Lectura y comprensión de la información existente en catálogos y folletos de fabricantes de convertidores de EP aplicados en sistemas eléctricos.	<i>Identifica la información</i> técnica de los proveedores de equipos, componentes y materiales de sistemas que utilizan convertidores de EP, con el fin de conocer sus limitaciones y aplicaciones. <i>Identifica topologías</i> , estructuras de control y características técnicas en diferentes convertidores de EP, los compara con diferentes fabricantes, con el fin de conocer sus diferencias.
A4: Análisis, modelación y solución de problemas en convertidores de EP.	<i>Analiza el comportamiento</i> de un convertidor como parte de un sistema eléctrico a partir de las leyes físicas, para obtener las expresiones matemáticas que lo representan. <i>Implementa las ecuaciones</i> que determinan el modelo de un sistema en general, con instrucciones del lenguaje de programación de sistemas digitales de alto desempeño con el fin de analizar su respuesta. <i>Reconoce el comportamiento</i> adecuado de un sistema electrónico de potencia mediante el análisis de las formas de onda de voltaje y corriente, con el fin de identificar y resolver los problemas de un mal funcionamiento.
A5: Lectura y comprensión de artículos relacionados con convertidores de EP aplicados a sistemas eléctricos.	<i>Reconoce y valora</i> la información contenida en artículos de revistas, como un medio para la construcción del conocimiento sobre las áreas de investigación de la EP en la actualidad. <i>Por medio de la lectura</i> de artículos, <i>identifica nuevas y avanzadas</i> topologías, técnicas de control y métodos de modulación en convertidores con EP, con el fin de mejorar los diseños y desarrollar nuevas implementaciones.

TABLA III: CONTENIDO DEL CURSO DE CSEP Y LAS ACTIVIDADES DE APRENDIZAJE RELACIONADAS CON LA HERRAMIENTA DE SOPORTE.

Tema (duración en semanas)	Contenido	Actividades de Aprendizaje	Actividades relacionadas con la herramienta de soporte
Tema 1 (5)	Dispositivos de potencia, convertidores de potencia y calidad de la energía.	A2, A3, A4	Ejercicios en clase, laboratorio 1 y asignación de un proyecto integrador.
Tema 2 (4)	Modelado de convertidores de potencia	A1, A4, A5	Ejercicios en clase, laboratorio 2 y resultados de la primera fase del proyecto integrador.
Tema 3 (1)	Elementos magnéticos	A2, A3	
Tema 4 (1)	Aspectos térmicos y disipación de calor	A3	
Tema 5 (1)	Interferencia electromagnética y filtrado	A2, A3	
Tema 6 (3)	Convertidores modernos	A1, A2, A4, A5	Laboratorio 3, finalización del proyecto integrador.

Durante su ejecución los alumnos desarrollan las siguientes actividades:

- ✓ Identificación del sistema, verificación de la calidad de las señales analógicas y digitales, límites de las variables de tensión y corriente utilizadas para las protecciones.
- ✓ Identificación y desarrollo de funciones de mando, protección y regulación.
- ✓ Implementación de funciones de mando, control y regulación mediante lenguaje C/C++, programadas en la CPU de la plataforma de prueba.
- ✓ *Desarrollo del modelo del generador:* El estudiante desarrolla el modelo en espacio de estados del circuito de campo del generador, para controlar la magnitud del voltaje de salida del generador. El alumno programa este modelo en la CPU de la plataforma de prueba.
- ✓ Interconexión de las funciones de control con el modelo del generador para la configuración de los controladores y limitadores en la CPU.
- ✓ Observación y análisis de la respuesta del control de voltaje debido a las perturbaciones de carga, utilizando los controladores ajustados en el

modelo del generador.

- ✓ Implementación del controlador del modelo, aplicado al generador real.
- ✓ *Pruebas de desempeño en la máquina real:* Prueba de arranque y parada en vacío, ajuste de la referencia de tensión, prueba de inyección y rechazo de carga en modo aislado, prueba de conexión a la red eléctrica, control de potencia reactiva.
- ✓ Recogida de señales, dibujo de los esquemas del sistema y redacción del informe final.

B. Efectividad de las actividades formativas desarrolladas con la herramienta de soporte.

Antes del 2018 el CSEP del posgrado incorpora algunos elementos de la plataforma de pruebas y a partir de este año se integra completamente. Los buenos resultados obtenidos de esta experiencia, sirvieron para incorporar la plataforma en los cursos del pregrado. En pregrado los estudiantes emplean la plataforma para prácticas demostrativas, esta interacción les da la experiencia para su posterior uso en proyectos relacionados. Además, la robustez y desempeño de la plataforma en su funcionamiento la hacen apropiada para ser utilizada en tesis de maestría.

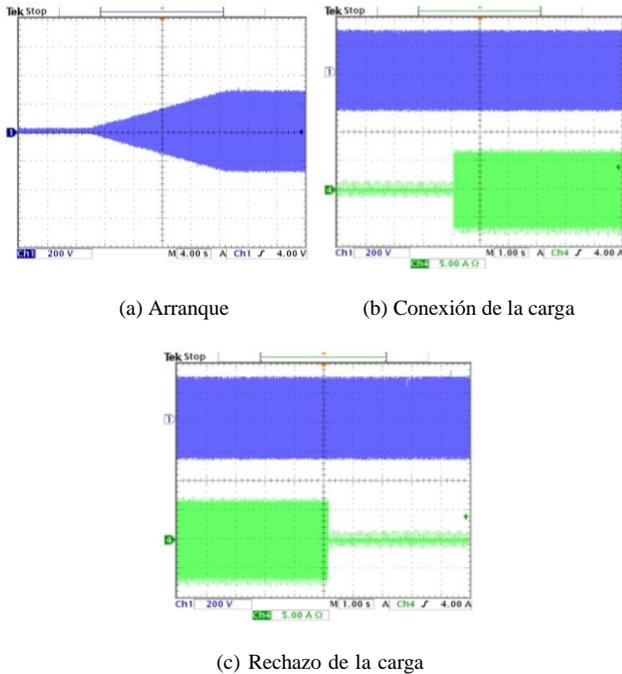


Fig. 11: Respuesta del generador real para una carga aislada.

Los resultados de evaluar las actividades de la Tabla II sirven para medir la efectividad de la metodología aplicada al curso y la relación de esta con la plataforma de soporte, aspecto relevante en este trabajo. Además, las rúbricas desarrolladas permiten medir la efectividad de la plataforma en términos de su construcción, usabilidad e interdisciplinariedad, como se muestra en la Tabla IV.

TABLA IV: PREGUNTAS DE LA ENCUESTA, PARA MEDIR EL IMPACTO DE LA HERRAMIENTA DE SOPORTE EN EL CURSO DE CSEP.

Pregunta	Grupo 1: Relacionada con el uso y construcción	Grupo 2: Relacionada con el aspecto disciplinar
P1	El diseño de la plataforma facilitó la comprensión de su funcionamiento.	La herramienta es pertinente para el aprendizaje del control electrónico de potencia.
P2	La herramienta de apoyo funcionó adecuadamente durante las prácticas.	La herramienta permite contextualizar un problema real de control en un ambiente de laboratorio.
P3	Las interfaces de usuario facilitaron favorablemente la interacción con la herramienta.	La herramienta facilitó la comprensión de los conceptos en temas como el modelado de sistemas.
P4	La herramienta fue fácil de utilizar y la visualización de los fenómenos estudiados en las prácticas de laboratorio fue adecuada.	La herramienta facilitó la comprensión de conceptos en temas como el análisis de estabilidad de los sistemas.
P5	Las guías se encuentran adecuadamente estructuradas para facilitar el aprendizaje sobre el uso de la herramienta.	La herramienta facilitó la comprensión de conceptos en temas relacionados con estrategias de control.
P6	Los ejercicios planteados facilitaron la comprensión de los conceptos.	

Se evidencia que los estudiantes evaluaron de manera efectiva las actividades relacionadas con la construcción del modelo del generador y las pruebas de los programas de

control. Con este procedimiento se reduce ostensiblemente la presencia de fallas, cuando los programas de control se incorporan a la máquina real. La Fig. 11 muestra la respuesta del control aplicado al generador real.

C. Reporte de los estudiantes.

Los estudiantes dan su opinión por medio de una encuesta, al final del curso y después de presentar el proyecto integrador. La encuesta se aplicó a una población de 12 estudiantes del CSEP en el año 2018. La encuesta mide dos aspectos relacionados con la plataforma de soporte, el primer grupo de preguntas trata lo relacionado con su construcción y el segundo grupo los aspectos disciplinares para el CSEP. Esta sección resume los resultados de la encuesta. En ella el estudiante califica el nivel de cumplimiento de cada afirmación utilizando una escala de 1 a 5, donde 1=no se cumple, 2=bajo, 3=medio, 4=alto y 5=excelente nivel de cumplimiento. Las preguntas y su respectivo grupo se muestran en la Tabla IV. Los resultados de la encuesta se muestran en la Fig.12 y 13.

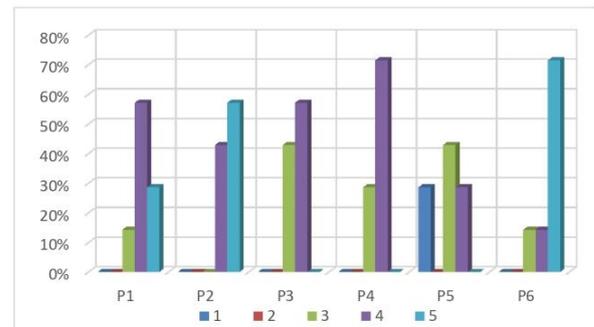


Fig. 12. Resultados de la encuesta relacionados con la construcción y uso de la herramienta de la Tabla IV, Grupo 1. Fuente: Autores.

La Figura 12 muestra que el 71% de los estudiantes encuestados consideran que la plataforma de prueba es fácil de usar, pregunta P4, además permite visualizar los fenómenos realizados en la práctica y facilita la comprensión de los conceptos. El 57% y el 27% de los estudiantes encuestados consideran que el diseño de la plataforma es excelente y satisfactorio; su robustez y la estructura hardware facilitan la interacción con la herramienta. Aunque la encuesta reporta buenos resultados en la introducción de la plataforma para el curso, el material instructivo es un elemento que necesita mejoras.

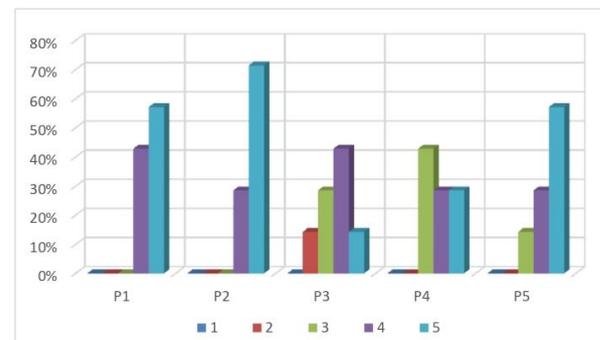


Fig. 13. Resultados de la encuesta relacionados con la disciplina de la Tabla IV, Grupo 2. Fuente: Autores

Respecto a la disciplina de estudio mostrada en la Fig.13

el 71% de los estudiantes encuestados considera que la herramienta contextualiza un problema real de control. Asimismo, el 57% dice que es pertinente para el aprendizaje del control electrónico de potencia y facilita la comprensión de las estrategias de control. Aunque la plataforma permite realizar análisis de los modelos y otros estudios, estos temas no forman parte del curso CSEP, como lo manifiesta el 14% de los estudiantes encuestados.

IV. CONCLUSIONES

Este trabajo resume los resultados del diseño, construcción y uso de una plataforma de prueba para aplicaciones multidisciplinarias. La plataforma de prueba fue utilizada en el curso CSEP, enfocada al control de voltaje de generadores sincrónicos y la enseñanza de Electrónica de Potencia en la conversión de energía electromecánica. La principal contribución de este trabajo ha sido proponer una herramienta innovadora y de fácil acceso para la formación en laboratorio. Este trabajo también muestra que el uso de nuevas tecnologías aplicadas a la docencia, ayudan y motivan al alumno a realizar trabajos experimentales con efectividad. Los ejercicios propuestos muestran la flexibilidad que posee la plataforma para adaptarse al desarrollo de nuevos métodos de enseñanza-aprendizaje.

La herramienta, se utilizó para desarrollar varios temas del curso CSEP y contribuye a mejorar la calidad de la formación en comparación con los métodos de enseñanza tradicionales. Los nuevos temas del curso se desarrollaron utilizando cinco tipos diferentes de actividades, orientadas al diseño de nuevos experimentos, aplicaciones, lectura de hojas de datos, catálogos y folletos, lectura de artículos, modelamiento y resolución de problemas. Estas actividades fueron fundamentales para mejorar la experiencia de aprendizaje del alumno.

La plataforma utilizada para controlar el circuito de campo del generador brinda la flexibilidad para probar nuevas topologías de convertidores de energía, como el convertidor DC-DC asimétrico. La potencia de procesamiento de la CPU facilita la realización de algoritmos de control complejos. La herramienta es fácil de usar, porque los estudiantes poseen un buen dominio del lenguaje C, que los motiva a desarrollar los ejercicios y el proyecto integrador del curso.

Asimismo, las opiniones de los estudiantes acerca del curso muestran que la mayoría de ellos no tenían experiencia previa con este tipo de equipos. Con la disponibilidad de la herramienta, los estudiantes permanecieron activos y bien preparados antes de realizar los ejercicios con la plataforma. Los alumnos también disfrutaron en gran medida la posibilidad de hacer debates e intervenciones entre ellos y el profesor.

La plataforma de apoyo fue diseñada de forma modular, incrementando su flexibilidad; esto también facilita su mantenimiento y actualización de sus funciones. El diseño modular facilita de forma rápida la detección de fallas y la reparación de la plataforma. Sin embargo, el uso de una arquitectura modular impacta su confiabilidad, pero un estudio de esta índole no se considera en este trabajo.

El banco de pruebas desarrollado se aplicó con éxito en los cursos CSEP de pregrado y posgrado y permite que los estudiantes controlen el circuito de campo de un generador,

proponiendo soluciones independientes a través del proyecto integrador.

V. RECONOCIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo de la Universidad del Valle y Colciencias mediante el Proyecto de Investigación 727-2015.

REFERENCIAS

- [1] J. Viola, Julio; Restrepo, F. Quizhpi, M. I. Giménez, J. Aller, V. Guzmán, and A. Bueno, "A flexible hardware platform for applications in power electronics research and education," *2014 IEEE Electr. Power Energy Conf.*, pp. 226–232, 2014.
- [2] P. Zumel, C. Fernandez, A. Lazaro, A. Borrado, E. Olías, and J. Pleite, "Herramienta interactiva para la enseñanza de la electrónica de potencia," in *XII Congreso Universitario de Innovación Educativa en las Enseñanzas Técnicas, Barcelona, España*, 2014, pp. 1–12.
- [3] S. A. Becker *et al.*, "NMC horizon report: 2018 higher education edition," in *Louisville, CO: EDUCAUSE*, 2018.
- [4] B. Alexander *et al.*, "EDUCAUSE Horizon Report 2019 Higher Education Edition," 2019.
- [5] R. Huang, J. M. Spector, and J. Yang, *Educational Technology: A primer for the 21st century*. Springer, 2019.
- [6] F. Shahnia and H. H. Yengejeh, "Various Interactive and Self-Learning Focused Tutorial Activities in the Power Electronic Course," *IEEE Trans. Educ.*, vol. 62, no. 4, pp. 246–255, 2019.
- [7] S. Wang, J. Hu, and X. Yuan, "Virtual Synchronous Control for Grid-Connected DFIG-Based Wind Turbines," *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.*, vol. 3, no. 4, pp. 932–944, 2015.
- [8] J. O. Campbell, J. R. Bourne, P. J. Mosterman, and A. J. Brodersen, "The Effectiveness of Learning Simulations for Electronic Laboratories," *J. Eng. Educ.*, vol. 91, no. 1, pp. 81–87, 2002.
- [9] L. Shi, "The Exploration and Practice on Experimental Teaching Reform for Power Electronics," *Destech Transactions on Social Science, Education and Human Science*, 2019.
- [10] G. J. I. Muñoz María Isabel., "Aprendizaje de Electrónica de Potencia basado en competencias en el espacio Europeo de Educación Superior," *IEEE-RITA*, vol. Vol. 2, no. 2, pp. 89–97, 2007.
- [11] B. K. Bose, "Power Electronics, Smart Grid, and Renewable Energy Systems," *Proc. IEEE*, vol. 105, no. 11, pp. 2011–2018, 2017.
- [12] R. Nadimi, "Quality of life modelling in terms of energy consumption," *Int. Assoc. Energy Econ.*, 2017.
- [13] "IEA (2020), World Energy Outlook 2020, IEA, Paris." [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020>.
- [14] J. A. Restrepo; Ramírez-Scarpetta, José Miguel; Orozco-Gutiérrez, Martha Lucia; Tenorio-Melo, "Experimental framework for laboratory scale microgrids," *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia*, no. 81, pp. 9–23, 2016.
- [15] J. K. Noland, S. Nuzzo, A. Tessarolo, and E. F. Alves, "Excitation system technologies for wound-field synchronous machines: Survey of solutions and evolving trends," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 109699–109718, 2019.
- [16] Y. Yang, Y. Xu, J. Chen, and Z. Du, "The Design of Excitation Control System based on DSP," in *The Ninth International Conference on Electronic Measurement & Instruments*, 2009, pp. 2637–2641.
- [17] J. R. Smith, B. Aranyostt, and G. Antonopoulost, "Determination of Excitation Control System Settings," in *IEE Colloquium on Generator Excitation Systems and Stability*, 1996, pp. 1–6.
- [18] C. Carlos, G. Edgar, O. Ramiro, and B. Alvaro, "Automatización Y Control De Un Sistema De Generación Hidroeléctrico Didáctico Y Modular," Universidad del Valle - Colombia, 2009.
- [19] O. G. Cisneros Calvopiña and E. P. Yugsi Lanchimba, "Implementación y montaje de un motor - Generador AC - AC trifásico de 5 (kw), en el laboratorio de máquinas eléctricas de la Universidad Técnica de Cotopaxi, con la elaboración de un manual de operación, para realizar prácticas demostrativas," *LATACUNGA / UTC / 2013*, 2013.
- [20] M. R. Jacobsen, D. M. Lavery, D. J. Morrow, and R. J. Best, "Laboratory test of a synchronous island controller in the presence of hydro-electric generation," in *50th International Universities Power Engineering Conference (UPEC). IEEE*, 2015, vol. 2015-Novem, pp. 1–5.
- [21] U. Drogenik, J. W. Kolar, P. J. van Duijsen, and P. Bauer, "New web-based interactive e-learning in power electronics and electrical machines," in *Conference Record of the 2001 IEEE Industry*

- Applications Conference. 36th IAS Annual Meeting (Cat. No.01CH37248)*, 2001, vol. 3, pp. 1858–1865.
- [22] J. E. Quintero, J. Restrepo, J. M. Ramirez, and M. L. Orozco, “An experimental support tool for power electronics education,” in *2019 IEEE Workshop on Power Electronics and Power Quality Applications, PEPQA 2019 - Proceedings*, 2019, pp. 1–6.
- [23] A. Devices, “SHARC Processor,” 2013.
- [24] L. E. M. Components, “Voltage Transducer LV 25-P I PN = 10 mA V PN = 10 .. 500 V Electrical data,” 1997.
- [25] LEM, “Current Transducer LA 55-P, I PN=50 A,” 2018. [Online]. Available: https://www.lem.com/sites/default/files/products_datasheets/la_55-p_e.pdf.
- [26] O. López Santos, “Metodología para la investigación en electrónica de potencia basada en una nueva herramienta didáctica,” *Rev. Educ. en Ing.*, vol. 6, no. 12, pp. 80–89, 2011.
- [27] P. Bauer, V. Fedak, V. Hajek, and I. Lampropoulos, “Survey of distance laboratories in power electronics,” in *2008 IEEE Power Electronics Specialists Conference*, 2008, pp. 430–436.
- [28] O. Lucía, J. M. Burdío, D. Navarro, and J. I. Artigas, “Educational reconfigurable platform for courses on power electronics,” in *2010 4th IEEE International Conference on E-Learning in Industrial Electronics*, 2010, pp. 19–23.
- [29] B. Meister, “PuTTY/Cygwin Tutorial,” 2007. [Online]. Available: <http://the.earth.li/~7B-%7Dsgtatham/putty/latest/x86/putty.exeCygwinhttp://www.cygwin.com/setup.exe>.
- [30] F. Martínez-Rodrigo, L. C. H. Lucas, S. De Pablo, and A. B. Reyboue, “Using PBL to Improve Educational Outcomes and Student Satisfaction in the Teaching of DC / DC and DC / AC Converters,” *IEEE Trans. Educ.*, vol. 60, no. 3, pp. 229–237, 2017.



Jorge Eliécer Quintero Calvache Ingeniero Eléctrico (1992), Magíster en Sistemas de Generación de Energía Eléctrica (1996) y Ph.D. (2021) en la Universidad del Valle UV, Colombia. Profesor asistente en la UV desde 1996. Sus intereses de investigación incluyen el control de sistemas de generación de energía eléctrica, electrónica de potencia, educación en ingeniería y procesadores digitales de señales aplicados al control de sistemas con electrónica de potencia.



José Alex Restrepo Zambrano Es ingeniero Electrónico (1988), Magíster en ingeniería electrónica (1991) de la Universidad Simón Bolívar USB, Venezuela y Ph.D. (1996) en el Instituto de Ciencia y Tecnología de la Universidad de Manchester, Reino Unido. Profesor invitado (2002, 2010) en la Escuela de Ingeniería Eléctrica e Informática, Instituto de Tecnología de Georgia, Atlanta. Sus intereses de investigación incluyen el control avanzado de máquinas eléctricas, inteligencia artificial, calidad de energía y procesadores digitales de señales aplicados al control de movimiento.



José Miguel Ramírez Scarpetta Ingeniero Eléctrico (1986), Magíster en Sistemas de Generación de Energía (1989) de la Universidad del Valle UV, Colombia; DEA (1994) y Ph.D. (1998) en Control Systems del Instituto Politécnico Nacional de Grenoble, Francia. Profesor desde 1988 en la UV. Director del Grupo de Investigación de Control Industrial. Docencia de pre y posgrado en modelización matemática, sistemas de control y accionamientos electromecánicos. Campos de investigación: control óptimo y no lineal, educación en ingeniería.



Martha Lucía Orozco Gutiérrez Ingeniera Electrónica (2000), Magíster en Electrónica (2005) de la Universidad del Valle UV, Colombia y Ph.D. (2016) en la Universidad del Valle y la Universidad de Salerno. Actualmente es profesora asociada de la Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad del Valle. Sus campos de investigación incluyen Electrónica de Potencia, fuentes alternativas de energía eléctrica y control de micro redes eléctricas.