



SEPTIEMBRE 19 al 22 2023
CARTAGENA DE INDIAS, COLOMBIA



Sistema IoT para el monitoreo y control de una microrred eléctrica experimental: diseño para la investigación y la enseñanza

**Jonathan Gómez, Juan M. Rey, María A. Mantilla, Óscar Díaz, Bryan López,
Felipe Rubio, Alejandro Ortiz**

**Universidad Industrial de Santander
Bucaramanga, Colombia**

Resumen

La formación en competencias de la industria 4.0, el internet de las cosas (IoT), la inteligencia artificial (IA) y otras tendencias tecnológicas actuales es una necesidad apremiante para las universidades que buscan mejorar las posibilidades de inserción en el mercado laboral de sus ingenieros. Dentro de los desafíos que conlleva la enseñanza del IoT, se encuentra el de adecuar laboratorios y plataformas que permitan el desarrollo de actividades prácticas con equipos y software usados en la industria. En busca de afrontar este reto, la Universidad Industrial de Santander (UIS), con un equipo interdisciplinar liderado por el Grupo de Investigación en Sistemas de Energía Eléctrica (GISEL), se encuentra desarrollando un sistema IoT para el monitoreo y control de una microrred eléctrica experimental, que permitirá realizar investigaciones en técnicas de control y respuesta a la demanda en sistemas eléctricos, así como aprovechar su uso como un caso de estudio en el marco de una plataforma IIoT (internet industrial de las cosas) para formar estudiantes y profesionales en competencias de la industria 4.0. Para esto, se ha realizado una alianza estratégica con la empresa santandereana Diseño y Automatización Industrial SAS (DAUTOM), que cuenta con amplia experiencia en la automatización de procesos industriales, con el fin de incorporar en la plataforma aspectos técnicos relevantes que permitan plantear prácticas de enseñanza de acuerdo a las necesidades y requerimientos de la industria regional y nacional. Actualmente, el sistema de monitoreo y control IoT se encuentra en etapa de implementación, por lo que este documento presenta una caracterización del caso de estudio, la descripción de sus componentes a nivel hardware, software y sistemas de comunicaciones, y su integración con la plataforma educativa IoT mediante el diseño de prácticas pedagógicas. Finalmente, se describen las etapas futuras que permitirán la puesta en operación del sistema.

Palabras clave: industria 4.0; internet de las cosas (IoT); microrred eléctrica; plataforma de enseñanza

Abstract

The universities have the challenge of training their engineers in Industry 4.0, Internet of Things (IoT) and Artificial Intelligence (AI) skills to improve their employability. One of the main challenges of teaching IoT is the need for laboratories and platforms to develop practical activities with hardware and software used in the industry. To face this challenge, the Industrial University of Santander (UIS), with an interdisciplinary team led by the Electrical Energy Systems Research Group (GISEL), is developing an IoT system for monitoring and controlling an experimental electrical microgrid. This system will allow research in control and demand response techniques in electrical systems and will be used as a case study in an IIoT (industrial internet of things) platform for training students and professionals in industry 4.0. The company "Diseño y Automatización Industrial SAS" (DAUTOM) will be a strategic partner of the project to incorporate industrial technical aspects into the teaching practices of the platform based on their experience in process automation. Since the IoT monitoring and control system is the implementation stage, this document presents a characterization of the case study, the description of its hardware, software and communications systems components, and its integration into the educational IIoT platform by designing pedagogical practices. Finally, the future stages that will allow the operation of the system are described.

Keywords: industry 4.0; internet of things (IoT); electrical microgrid; educational platform

1. Introducción

El Internet de las Cosas (IoT, por sus siglas en inglés) es un sistema que tiene la capacidad de permitir a sensores, dispositivos y diferentes elementos compartir datos para crear una red de información que interactúa entre sí y puede llegar a ejecutar acciones de control (Minoli, 2013). Las potencialidades de esta tecnología en múltiples campos de aplicación como la agricultura, la medicina, la movilidad, e incluso la astronomía, le añaden una especial importancia, al punto de ser catalogada como uno de los pilares de la industria 4.0 junto con la automatización industrial y los sistemas ciber físicos (Jacob, 2020).

La rápida evolución de este tipo de tecnologías ha generado que las universidades tengan problemas para ajustar y adaptar la infraestructura necesaria para formar a sus estudiantes en habilidades relacionadas a estas temáticas de relevancia actual. A su vez, esto repercute en la dificultad de la industria colombiana para encontrar profesionales que tengan las habilidades necesarias para desarrollar proyectos aplicando estas tecnologías, generando pérdida de competitividad frente a otros países, al requerir grandes inversiones en la formación del talento humano (Solano, 2021).

Plataformas como Coursera, Platzi y Cisco presentan una variedad de cursos online que buscan enseñar acerca de IoT, sus conceptos y solución de problemas. También, la Universidad del Rosario, ofrece cursos a través de edX.org que exhiben algunas herramientas de desarrollo, identificación de componentes y casos de estudio entre otros. A nivel de posgrados, la Pontificia Universidad Javeriana cuenta con un programa denominado *Maestría en Ingeniería del Internet de las Cosas* donde se permite la elección entre cerca de 5 campos de profundización según los intereses del estudiante.

Estos cursos mencionados, hacen parte de la oferta educativa disponible para la formación en IoT con distintos niveles de intensidad y costos, pero que, en su mayoría, presentan una debilidad en común: la dificultad de brindarle al estudiante una componente práctica durante el desarrollo de los contenidos. A su vez, debido a la variedad de dispositivos en el mercado, se observa que cuando se opta por incluir actividades prácticas, se suelen utilizar dispositivos de bajo costo y complejidad, que son diferentes a los usados comúnmente en la industria, por lo que la experiencia de aprendizaje resulta menos enriquecedora.

Por estas razones, el grupo de investigación GISEL de la UIS en cooperación con la empresa santandereana DAUTOM SAS¹ se encuentra desarrollando una plataforma IIoT para formar estudiantes y profesionales en competencias de la industria 4.0. En este documento se describe un sistema IoT para el monitoreo y control de una microrred eléctrica experimental, que corresponde a un caso de estudio de dicha plataforma. El resto de este documento presenta una breve descripción de una plataforma IIoT, se presenta el caso de estudio de la microrred eléctrica experimental, para continuar con la descripción del sistema IoT diseñado y en proceso de implementación. Finalmente, se detallan los pasos a seguir para la integración del caso de estudio a la plataforma de enseñanza IIoT.

2. Plataforma de enseñanza IIoT.

La plataforma de la cual hace parte el proyecto descrito en este artículo fue presentada como una iniciativa para la formación de competencias en estudiantes de pregrado y posgrado, relacionadas con tecnologías como el IIoT, la automatización industrial y la computación en la nube. Esta plataforma busca abordar la debilidad presente en la mayoría de la oferta educativa relacionada con estas temáticas, incorporando aspectos técnicos y formativos, que permitan ofrecer experiencias de aprendizaje con un alto contenido práctico, y utilizando elementos hardware y software relevante de acuerdo a los requerimientos de la industria de automatización nacional (Solano, 2021).

Esta iniciativa fue seleccionada dentro de la convocatoria 890 de MinCiencias que buscaba fortalecer las capacidades científicas, tecnológicas y de innovación en Instituciones de Educación Superior (IES) públicas, proyecto que se encuentra en ejecución. Dentro de los avances del proyecto se encuentra la definición de tres casos de estudio, cada uno de estos cuenta con temáticas y campos de aplicación diferentes. La figura 1 presenta un diagrama de algunas de las componentes de la plataforma.

¹ <https://www.dautom.com.co/>

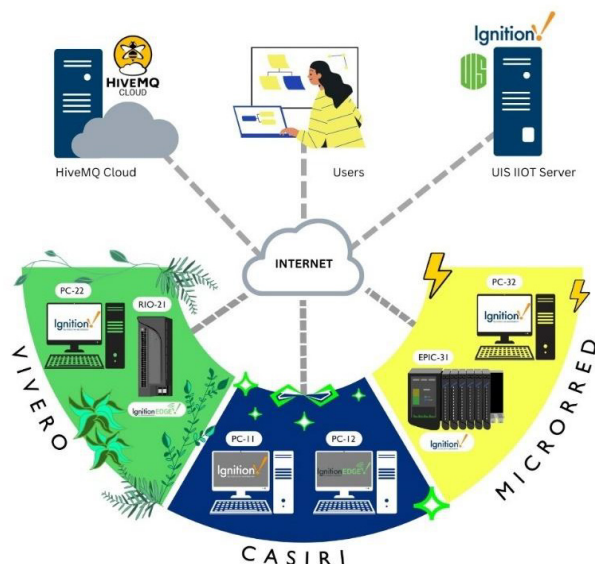


Figura 1. Esquema de la plataforma IIoT

El primer caso de estudio hace referencia a un sistema IIoT para la monitorización y control de un vivero de propagación de plantas ubicado en la UIS, allí se centrarán esfuerzos en torno a variables ambientales como la humedad y la temperatura. La estación radio astronómica CASIRI corresponde al segundo caso de estudio, la cual es una estación utilizada para caracterizar cielos con el fin de identificar locaciones para la construcción de radio-observatorios. Esta cuenta con una cámara, sensores para medición de ondas electromagnéticas, entre otras variables atmosféricas, además, presenta un desafío para el monitoreo a distancia sin ocasionar perturbaciones en los sensores instalados. Finalmente, el caso de estudio relacionado con la microrred será detallado en la siguiente sección al ser el foco principal de este artículo.

3. Caso de estudio

Según el Departamento de Energía de los Estados Unidos (DOE), una microrred eléctrica puede definirse como “un grupo de cargas interconectadas y recursos de energía distribuidos dentro de límites eléctricos claramente definidos que actúa como una sola entidad controlable con respecto a la red” (Ton, 2012). Este tipo de redes, ofrecen múltiples ventajas operativas que permiten adaptarlas como soluciones energéticas en proyectos urbanos y rurales (Rey, 2015) (Vergara, 2019). Para este segundo caso, pueden impactar positivamente en zonas donde la conexión a las redes de transmisión y distribución es compleja, como es el caso de las Zonas no Interconectadas colombianas (ZNI). Por estas razones, su estudio ha despertado el interés de muchas universidades, las cuales han construido laboratorios de investigación. Se destacan la Universidad Internacional de Florida (USA) (Salehi, 2012), la Universidad de Aalborg (Dinamarca) (Lexuan, 2016) y La Universidad de Tianjin (China) (Wang, 2016), entre muchas otras.

En la figura 2 se presenta el esquema simplificado de la microrred experimental que se encuentra en construcción en el Laboratorio de Integración Energética (LIE) del Parque Tecnológico de Guatiguará de la UIS. Esta microrred tendrá una capacidad de 12 kVA, contará con fuentes AC y DC programables para la emulación de la red de distribución y sistemas de almacenamiento o generación de energía eléctrica, tarjetas de control dSPACE 1104 asociados a inversores trifásicos para la emulación de generadores distribuidos, entre otros elementos.

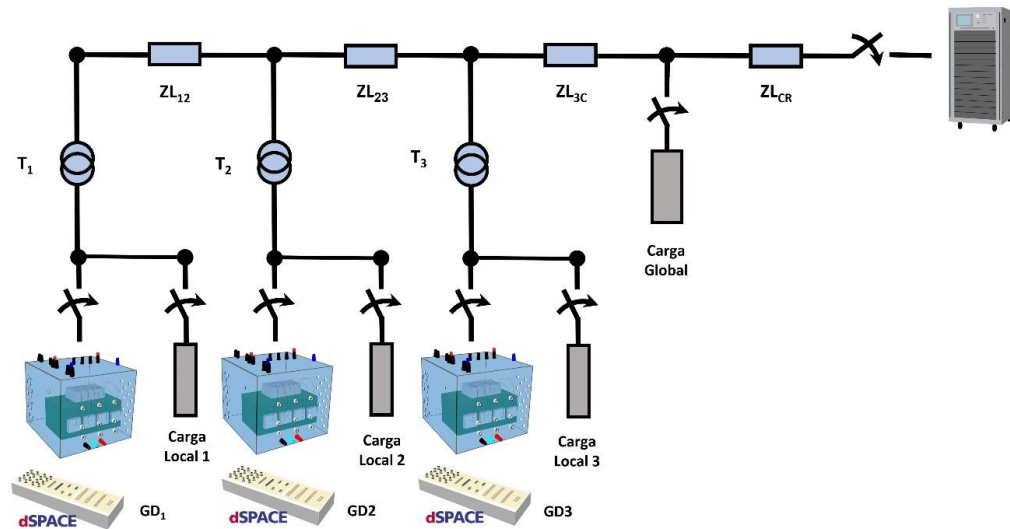


Figura 2. Esquema simplificado de la microrred en construcción.

El grupo GISEL de la UIS planea el uso de esta infraestructura para la realización de pruebas de control y evaluación de respuesta a la demanda. Actualmente, se encuentran en desarrollo cinco proyectos de posgrado entre maestría y doctorado que apoyan los desarrollos necesarios para poner en operación la microrred, número que continuará creciendo en la medida que se avance en su construcción.

4. Sistema IoT

Teniendo en cuenta los requerimientos del caso de estudio (microrred experimental enfocada a la investigación) y recopilando las necesidades tanto del equipo de construcción de la microrred como del equipo de desarrollo de la plataforma IIoT, se definió la estructura del sistema IoT el cual es presentado en la figura 3.

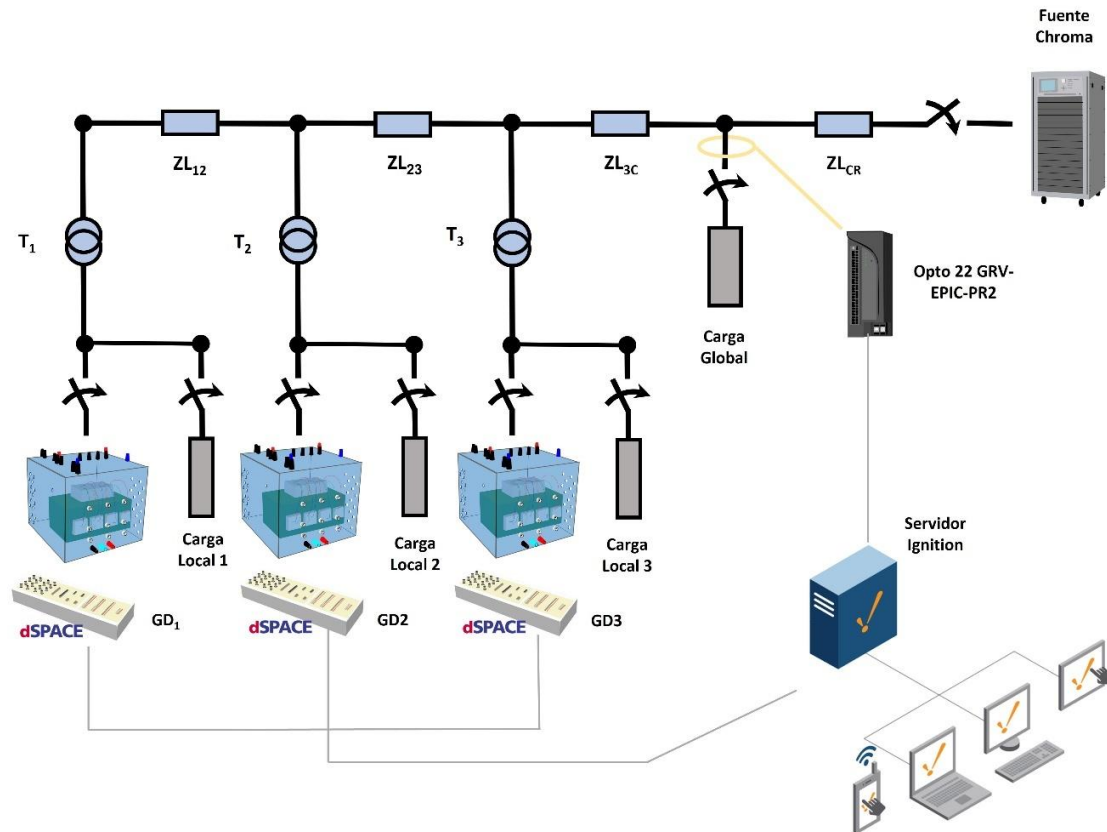


Figura 3. Esquema del sistema IoT de monitoreo y control

Los elementos que componen el sistema IoT de monitoreo y control para la microrred eléctrica experimental fueron elegidos con apoyo de la empresa DAUTOM SAS, garantizando el uso de software y hardware de carácter industrial. A continuación, se detallan los componentes usados y el sistema de comunicaciones:

- 1) **Hardware:** El control de los inversores trifásicos requiere una tarjeta que permita el ajuste de múltiples parámetros, con el objetivo de evaluar diferentes estrategias de control y operación. Además, debe tener un tiempo de muestreo acorde con el tipo de variables eléctricas sensadas para ejecutar dichos algoritmos. Teniendo en cuenta lo anterior, se seleccionaron tarjetas de control dSPACE 1104 que se caracterizan por su gran versatilidad, robustez y facilidad de uso. Adicionalmente, fue añadido al diseño un computador industrial de la marca Opto 22 denominado *Edge Programmable Industrial Controller* (EPIC) (figura 4) con periféricos que incluyen una unidad de monitoreo de energía presente en el punto de conexión de la carga global a la microrred, y unidades de salidas AC y DC para la futura expansión del sistema.



Figura 4. Computador industrial EPIC y periféricos en el tablero IoT

- 2) Software:** La componente de software del sistema IoT la integran tres entornos. El primero de ellos lo conforman *Matlab* y *Simulink*, desarrollados por la empresa Mathworks, populares entre ingenieros e investigadores debido a su facilidad para el uso de expresiones matemáticas complejas. Este conjunto de aplicaciones permite la creación de las rutinas de control que posteriormente son cargadas en las tarjetas dSPACE para su ejecución.

El siguiente entorno en el sistema IoT es *Node-red*, esta es una herramienta de programación visual basada en Node.js que actualmente ha sido adoptada por muchas empresas, dentro de las cuales se encuentra Opto22, debido a su entorno de ejecución ligero y fácil uso. En este proyecto, *Node-red* se encarga de la gestión de los datos, las rutinas de monitoreo, el envío de los datos y la comunicación entre dispositivos. Se encuentra instalada en el ordenador que gestiona las tarjetas dSPACE y en el EPIC.

Finalmente, para lograr la interacción con el usuario o estudiante, se hace necesario el uso de un aplicativo que permita la visualización de los datos, la ejecución de acciones, elaboración de informes, entre otros atributos. Partiendo de esos requisitos y teniendo presente la finalidad de la plataforma de enseñar sobre IoT con herramientas usadas en la industria, fue seleccionada para este fin *Ignition 8.1*, una plataforma para sistemas SCADA desarrollada por la empresa *Inductive Automation*. Dentro de los clientes de esta empresa se pueden encontrar grandes compañías como Coca-Cola, Shell, Pfizer, adicionalmente, DAUTOM SAS es uno de los integradores de esta empresa en el país (Our customers | Inductive Automation, 2023).

- 3) Sistema de comunicaciones:** La gestión de los datos se dividió en el uso de dos protocolos de comunicación, como se puede observar en la figura 5. Para la comunicación de las tarjetas dSPACE fue usado el protocolo Modbus, que es un protocolo de comunicación

serial basado en la arquitectura maestro/esclavo. Como se menciona en (Yue, 2020) este protocolo se basa en un formato de mensaje predefinido y códigos de funciones que indican el proceso a realizar. En este caso, fue implementado usando el estándar RS-232 de comunicación punto a punto. Su desarrollo se hizo mediante el uso de Simulink y Node-red.

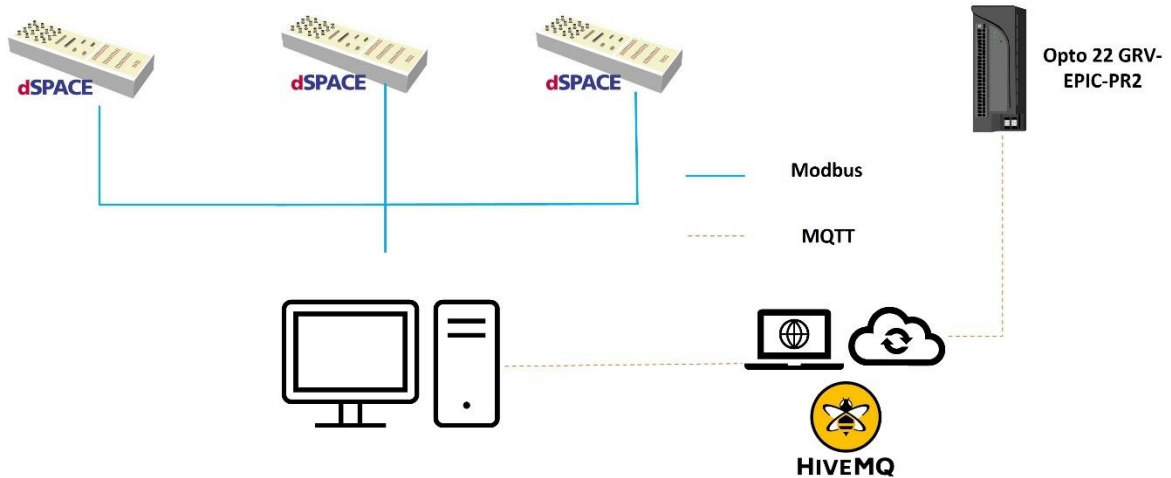


Figura 5. Diagrama de comunicaciones sistema IoT

El uso de MQTT, un protocolo de red ideal para aplicaciones IoT con pocos recursos de red, permite la conexión del caso de estudio a un servidor de HiveMQ, al cual pueden acceder fácilmente los usuarios desde cualquier ubicación e interactuar con los dispositivos asignados para tal fin. La implementación de este protocolo se realizó en Node-red tanto en el ordenador asociado a las tarjetas dSPACE como en el EPIC.

4) Integración a la plataforma: La integración del sistema IoT de monitorización a la plataforma de enseñanza IIoT se realizará de forma progresiva en la medida que se finalice la implementación del sistema presentado anteriormente. Actualmente, se han desarrollado algunas pruebas que permiten validar el intercambio de datos entre tarjetas dSPACE, así como la visualización en Ignition 8.1. Estas pruebas hacen parte de una tesis de pregrado y han incluido, por ejemplo, el sensado de voltajes, control de intensidades en un led RGB desde Ignition 8.1 y la activación de relés desde esta misma plataforma (López & Díaz, 2023).

Las siguientes actividades por desarrollar incluyen la configuración del envío de datos usando el protocolo MQTT. Esto permitirá la repetición de los experimentos de validación mencionados anteriormente, realizando la conexión al caso de estudio desde una ubicación distinta al LIE. Adicionalmente, se hará uso de una base de datos para el almacenamiento de los valores registrados durante cada uno de los experimentos realizados. Conforme avance la construcción de la microrred eléctrica, podrá utilizarse parcial o totalmente el sistema IoT para el monitoreo de variables eléctricas, la activación de cargas, la implementación de estrategias centralizadas y la visualización remota.

Finalmente, serán elaboradas guías de enseñanza con el objetivo de orientar a los usuarios de la plataforma en el aprendizaje de herramientas como Node-red, Ignition y el protocolo MQTT. Estas actividades, que se encuentran en proceso de construcción, buscan validar el sistema IoT presentado en este artículo para su posterior adición a la plataforma de enseñanza.

5) Referencias

- Jacob, J. J., & Meshach, W. T. (2020). Industrial Internet of Things (IIoT) - An IoT Integrated Services for Industry 4.0: A Review. *International Journal of Applied Science & Engineering*, 8(1), 37-42. <https://doi.org/10.30954/2322-0465.1.2020.5>
- Lexuan Meng, Luna, A., Rodriguez Diaz, E., Bo Sun, Dragicevic, T., Savaghebi, M., Vasquez, J. C., Guerrero, J. M., Graells, M., & Andrade, F. (2016). Flexible System Integration and Advanced Hierarchical Control Architectures in the Microgrid Research Laboratory of Aalborg University. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 52(2), 1736-1749.
- López, B. & Díaz, O. (2023). Diseño de un sistema IoT para la monitorización de una microrred eléctrica experimental (tesis de pregrado). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.
- Minoli. (2013). Internet of Things Definitions and Frameworks. In *Building the Internet of Things with IPv6 and MIPv6* (1st ed., pp. 28-47). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781118647059.ch2>
- Our customers | Inductive Automation. (2023). Industrial Automation Software Solutions by Inductive Automation. Consultado el 17 de mayo de 2023 en <https://inductiveautomation.com/about/customers>
- Rey, J. M., Vergara, P. P., Osma, G. A., & Ordóñez, G. (2015). Generalities about design and operation of microgrids. *Dyna*. 82(192), 109-119. <https://doi.org/10.15446/dyna.v82n192.48586>
- Salehi, Mohamed, A., Mazloomzadeh, A., & Mohammed, O. A. (2012). Laboratory-Based Smart Power System, Part I: Design and System Development. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 3(3), 1394-1404. <https://doi.org/10.1109/TSG.2012.2194518>
- Solano, J., Hernández, I., Duarte, N., & Rey, J. M. (2021). Diseño, desarrollo e implementación de una plataforma IIoT para la formación de profesionales en tecnologías de la cuarta revolución industrial. *Encuentro Internacional De Educación En Ingeniería EIEI ACOFI*. <https://doi.org/10.26507/ponencia.1940>
- Ton, & Smith, M. A. (2012). The U.S. Department of Energy's Microgrid Initiative. *The Electricity Journal*, 25(8), 84-94. <https://doi.org/10.1016/j.tej.2012.09.013>
- Vergara P.P., Lopez J.C., Rey J.M., da Silva L.C., & Rider M.J. (2019) Energy management in microgrids. In: *Microgrids Design and Implementation*. Springer, 195-216. https://doi.org/10.1007/978-3-319-98687-6_7
- Wang, Yang, X., Wu, Z., Che, Y., Guo, L., Zhang, S., & Liu, Y. (2016). A Highly Integrated and Reconfigurable Microgrid Testbed with Hybrid Distributed Energy Sources. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 7(1), 451-459. <https://doi.org/10.1109/TSG.2014.2360877>
- Yue. (2020). Design of Intelligent Monitoring and Control System Based on Modbus. *2020 5th International Conference on Communication, Image and Signal Processing (CCISP)*, 149-153. <https://doi.org/10.1109/CCISP51026.2020.9273500>

Los autores agradecen el apoyo brindado por la Universidad Industrial de Santander a través del proyecto de investigación código VIE-UIS 2824 titulado “Plataforma IIoT para formación de profesionales en tecnologías de la cuarta revolución industrial” código y a Minciencias a través del proyecto de investigación código 82273, contrato 719-2022 titulado “Diseño, desarrollo e implementación de una plataforma IIoT para formación de profesionales en tecnologías de la cuarta revolución industrial”.

Sobre los autores

- **Jonathan Stiven Gómez Zuluaga:** Ingeniero Electrónico de la Universidad Industrial de Santander. Estudiante de maestría en Ingeniería de Telecomunicaciones en la Universidad Industrial de Santander. jonathan2218424@correo.uis.edu.co
- **Juan Manuel Rey López:** Ingeniero Electricista y Especialista en Docencia Universitaria de la Universidad Industrial de Santander, Doctor en Ingeniería Electrónica de la Universidad Politécnica de Cataluña. Profesor Asistente de la Universidad Industrial de Santander. juanmrey@uis.edu.co
- **María Alejandra Mantilla Villalobos:** Ingeniera Electrónica, Magíster en Ingeniería Electrónica, Doctora en Ingeniería Electrónica de la Universidad Industrial de Santander. Profesora Titular de la Universidad Industrial de Santander. marialem@uis.edu.co
- **Óscar Díaz:** Ingeniero Electrónico de la Universidad Industrial de Santander. diazsanchezoscar@gmail.com
- **Bryan López:** Ingeniero Electrónico de la Universidad Industrial de Santander. bjesuslopezg@gmail.com
- **Felipe Rubio:** Ingeniero Electrónico de la Universidad Industrial de Santander. Estudiante de maestría en Ingeniería de Telecomunicaciones en la Universidad Industrial de Santander. andres2218426@correo.uis.edu.co
- **Alejandro Ortiz Suárez:** Ingeniero Electrónico de la Universidad de los Llanos, Estudiante de maestría en Ingeniería Electrónica en la Universidad Industrial de Santander. alejandro2218238@correo.uis.edu.co

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

Copyright © 2023 Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería (ACOFI)