

Modelado y simulación de un sistema fotovoltaico mediante la metodología del aprendizaje basado en proyectos

Modeling and simulation of a photovoltaic system through the project-based learning methodology

FRANCO-CANO, Alejandro
SALDARRIAGA ZULUAGA, Sergio D.¹
LÓPEZ-LEZAMA, Jesús M.²

Resumen

En este artículo se presenta una metodología para la enseñanza de los conceptos fundamentales del modelado y simulación de sistemas fotovoltaicos acoplados a la red eléctrica. La metodología se basa en un enfoque paso a paso en el que los conceptos fundamentales son enseñados con la ayuda de software de simulación y luego se propone un caso de estudio a los estudiantes para su simulación y posterior análisis. El proyecto de aula corresponde a la aplicación en un caso real.

Palabras clave: enseñanza, sistemas fotovoltaicos, simulación, modelado

Abstract

This paper presents a methodology for teaching the fundamental concepts of the modeling and simulation of photovoltaic systems coupled to the electrical network. The methodology is based on a step-by-step approach in which initially the fundamental concepts are taught with the aid of commercial simulation software and then a study case is proposed to the students for its simulation and subsequent analysis. The project corresponds to the application in a real-life case.

key words: teaching, photovoltaic systems, simulation, modeling

1. Introducción

El consumo energético mundial sigue en un constante aumento; de acuerdo con la Agencia Internacional de Energía, las necesidades mundiales de energía crecerán en un 30 % para 2040 (AIE, 2017). En este escenario, la concepción de la industria eléctrica tradicional no será suficiente para atender las nuevas necesidades energéticas, principalmente por las dificultades para construir grandes proyectos de generación y líneas de transmisión (Zia et. al, 2020). Por otro lado, todavía existen grandes desafíos para garantizar el acceso a la energía eléctrica. De acuerdo con Robert, Sisodia y Goplan (2018), hay alrededor de 1.200 millones de personas en el mundo que no tienen acceso a la electricidad. Una forma de abordar este problema es mediante la generación de energía eléctrica a pequeña escala ubicada cerca de los usuarios finales conocida como generación distribuida

¹ Profesor. Departamento de Eléctrica . Intitución Universitaria Pascual Bravo. Email: s.saldarriagazu@pascualbravo.edu.co

² Docente Investigador. Facultad de Ingeniería. Universidad de Antioquia. Ingeniero Electricista- MSc y Ph.D en Ingeniería Eléctrica. jmaria.lopez@udea.edu.co

(GD) (Zia et. al,2020). En los últimos años, la GD basada en energías renovables como solar fotovoltaica, eólica y biomasa han aumentado su presencia en las redes de distribución (Gayatri, Parimi, Kumar, 2018). Un sistema solar fotovoltaico es el conjunto de componentes mecánicos, eléctricos y electromecánicos que se entrelazan para captar la energía solar disponible y transformarla en energía eléctrica (Cortés et. al, 2020). Estos sistemas pueden ser aislados, con baterías o sin baterías, conectados a la red o híbridos, que combinan otros tipos de generación de energía eléctrica (López, Parnás, Cataldo 2019). Un sistema solar fotovoltaico se compone del generador fotovoltaico, baterías, regulador de carga, inversor o acondicionador y elementos de protección del circuito (Cortés et. al, 2020).

Los sistemas aislados captan la energía solar mediante paneles solares fotovoltaicos y pueden almacenar la energía eléctrica generada en baterías (Zia et. al,2020). Con el uso de sistemas de este tipo es posible disponer de electricidad en lugares que no se encuentran conectados a la red de distribución eléctrica (Marín-Jiménez y González-Cruz, 2020). Por su parte, los sistemas fotovoltaicos conectados a la red de distribución pueden vender sus excedentes o realizar la actividad de autogeneración; los autogeneradores pueden consumir energía o inyectar la energía sobrante a la red de distribución (Hernández García, 2020).

Un paradigma que ha venido cambiando en la industria eléctrica es la posibilidad de almacenamiento de energía de forma eficiente y el papel del usuario final que está tomando un rol más activo. Estas nuevas tendencias se pueden agrupar en el concepto de «microrred» (Hosseini et al., 2016). Una microrred se puede definir como un sistema de generación bidireccional, que agrupa a un conjunto de recursos energéticos distribuidos como generación, almacenamiento y carga, los cuales pueden operar de forma aislada o estar conectados a una red principal (Gamarra y Guerrero, 2015). Entre los recursos energéticos distribuidos más utilizados en las microrredes se tienen los sistemas fotovoltaicos.

La implementación de estas tecnologías presenta flujos de potencia bidireccional, lo que cambia las condiciones de funcionamiento de la instalación eléctrica y, por ende, las características de calidad de energía (Vergara et. al, 2018). Se debe entonces garantizar el desempeño adecuado de los componentes de la instalación. El uso de programas de modelado y simulación de sistemas eléctricos es necesario para garantizar el buen funcionamiento de los sistemas fotovoltaicos. Las plantas solares fotovoltaicas han presentado una rápida incorporación a la red eléctrica en los últimos años; por lo tanto, el estudio de estos sistemas es fundamental en programas de ingeniería eléctrica, electrónica y afines. Los futuros ingenieros en estas áreas deben estar familiarizados con la simulación y el modelado de los sistemas fotovoltaicos, ya que hay una creciente fuente de empleo asociada con los mismos (Ramírez et. al, 2019).

El «aprendizaje basado en proyectos» (ABP) es un método de enseñanza ordenado, que permite a los estudiantes obtener conocimientos y destrezas por medio de un proceso de investigación estructurado a través de asuntos complejos y reales que se forman en tareas y productos (Pujol-Cunill, 2017; Romero, Forero y Rofriguez, 2018). El ABP es un método de enseñanza integral, que permite a los profesores individualizar el proceso de aprendizaje y permite a los estudiantes ser independientes en la planificación, distribución y supervisión de sus actividades (Anyushenkova et. al, 2020).

De acuerdo con (Pujol-Cunill, 2017), en el ABP, el conocimiento no es transmitido por el docente a los estudiantes, sino que es el resultado de un trabajo conjunto entre estudiantes y profesores en el que se plantean inquietudes, se realiza una exploración de la información y se obtienen conclusiones. En el ABP, los estudiantes planean, implementan y evalúan proyectos que tienen aplicación en el mundo real más allá del aula de clase; es una estrategia metodológica que surge para suplir las dificultades de los procesos de enseñanza-aprendizaje, basados en la memoria y la repetición de tareas (Lambraño Ramos y Robles González, 2019).

El objetivo de la investigación fue aplicar el ABP para el modelado y simulación de un sistema fotovoltaico como metodología didáctica en programas de ingeniería eléctrica, energética, electrónica y afines. Este proyecto de aula se desarrolló en el curso de Sistemas de potencia de una institución de educación superior colombiana y considera un caso de estudio real; se tomó como objeto de estudio la instalación solar fotovoltaica ubicada en las instalaciones de la Bodega Vulcano, en la ciudad de Medellín, en Colombia.

2. Metodología

La metodología propuesta consiste en los siguientes pasos: 1) presentación de los conceptos fundamentales a los estudiantes; 2) asignación del proyecto de aula basado en un caso de estudio real; 3) recolección de información de acuerdo con el proyecto asignado; 4) modelado de los elementos de la instalación en el *software* de simulación; y 5) análisis de flujo de carga y cortocircuito.

2.1. Presentación de los conceptos fundamentales

Sistemas fotovoltaicos

Inicialmente, se deben dar en clase los conceptos fundamentales relacionados con los sistemas fotovoltaicos. Un sistema solar fotovoltaico se compone principalmente del generador fotovoltaico, baterías, regulador de carga, inversor o acondicionador y elementos de protección del circuito. A continuación se presentan brevemente algunos de estos conceptos, los cuales pueden ser consultados con mayor detalle en (Cruceira, 2020) y (Cortes et. al, 2020).

Paneles solares: Los paneles fotovoltaicos son dispositivos eléctricos que para su funcionamiento utilizan luz solar en forma directa, la misma que al caer en la celda libera electrones que pueden ser atrapados por el campo eléctrico denominado “efecto fotovoltaico”. Un módulo o panel es un conjunto de celdas conectadas en serie para aumentar el voltaje y en paralelo para aumentar la corriente.

Regulador de carga solar: El regulador de carga es un dispositivo electrónico que controla la entrada de electricidad a la batería y evita las sobrecargas, permitiendo conectar la energía eléctrica de la batería a la carga. Estos controladores permiten que las baterías tengan una vida útil larga, ya que incorporan un sistema que permite desconectar la batería por bajo voltaje de descarga y máximo voltaje de carga.

Baterías: Estos elementos acumulan la energía eléctrica generada por los paneles durante el día para su posterior utilización en la noche. Además, las baterías ayudan al sistema proporcionando la energía necesaria cuando se tiene días oscuros y no se puede generar suficiente electricidad. Algunas plantas fotovoltaicas no cuentan con baterías para su funcionamiento, debido al costo que están presentando.

Inversores: Los inversores fotovoltaicos para conexión a la red eléctrica son dispositivos electrónicos que se caracterizan por operar directamente con el generador fotovoltaico y también permiten suministrar la potencia generada a la red comercial. Su función principal es convertir la corriente continua producida por el generador fotovoltaico en corriente alterna.

Flujo de carga

Los flujos de carga son una herramienta para analizar el comportamiento de un sistema de potencia en estado estable. Los estudios de flujo de carga se utilizan en el planeamiento de la expansión y para la operación de los sistemas eléctricos de potencia. La principal información que se obtiene del análisis de flujo de carga es la magnitud y ángulo de la fase del voltaje en cada nodo, así como la potencia activa y reactiva que fluye por cada línea. Los flujos de carga se resolvieron utilizando el método numérico de Newton Raphson. Por medio del flujo de carga se quiere garantizar que la instalación eléctrica analizada opere en condiciones seguras. Para garantizar

una operación segura se debe verificar que los voltajes estén entre valores aceptables y que los equipos no presenten sobrecargas.

Cortocircuito

Por su parte, el análisis de cortocircuito se necesita para especificar las dimensiones de los equipos en el diseño de sistemas eléctricos. La selección de los equipos que conforman el sistema no sólo depende de los requerimientos en tensión y corriente en estado estable, sino de los requerimientos en tensión y corriente durante eventos de cortocircuito (Mujal Rosas, 2014).

La inclusión del sistema fotovoltaico cambia las características de cortocircuito del sistema, por lo que se hace necesario realizar la simulación de diferentes escenarios, con el fin de constatar que los equipos podrán soportar las corrientes de falla. El programa de simulación Digsilent Power Factory tiene incorporados diferentes métodos de cálculo de cortocircuito, los cuales están basados en normas aplicadas a sistemas con topologías específicas.

El método seleccionado para calcular los valores de cortocircuito está basado en la norma internacional IEC60909. Este método es usado con el fin de calcular corrientes de cortocircuito en sistemas trifásicos de corriente alterna. La simbología utilizada en IEC (2001) se presenta en el Cuadro 1.

Cuadro 1
Simbología método de cortocircuito de la norma IEC 60909

Símbolo	Descripción	Concepto
I_k''	Corriente inicial simétrica de cortocircuito.	Es el valor eficaz de la corriente simétrica de cortocircuito en el instante en que se produce el cortocircuito.
S_k''	Potencia inicial simétrica de cortocircuito.	Es el valor de la potencia asociada a la corriente inicial simétrica de cortocircuito.
I_p	Corriente pico de cortocircuito.	Es el valor máximo posible de la corriente simétrica de cortocircuito.
I_b	Corriente de interrupción de cortocircuito (100 ms).	Es el valor eficaz de la corriente simétrica de cortocircuito que circula por un interruptor en el instante en que se inicia la separación de los contactos; en este caso, a los 100 ms después de iniciado el cortocircuito.
S_b	Potencia de interrupción de cortocircuito (100 ms).	Es el valor de la potencia asociada a la corriente de interrupción de cortocircuito.
I_k	Corriente de cortocircuito de estado estable.	Es el valor eficaz de la corriente simétrica de cortocircuito que perdura una vez terminados todos los fenómenos transitorios.

Fuente: Elaboración propia

Una vez se haya dado en clase los conceptos fundamentales, se asigna un proyecto de aula, basado en un sistema real. El siguiente paso consiste en recolectar los datos del sistema.

2.2. Asignación del proyecto

En esta parte se debe seleccionar una instalación fotovoltaica de una empresa o residencia. La idea es que sea un caso de estudio real sobre el cual se pueda hacer la recolección de información para su posterior simulación y análisis. Los proyectos se pueden asignar por grupos de estudiantes y en instalaciones de gran tamaño los grupos se pueden enfocar en una parte de la misma para el desarrollo del proyecto.

2.3. Recolección de información

La recolección de información se debe hacer en campo. En este caso es importante que los estudiantes cumplan con las normas de protección necesarias. En todo caso, los estudiantes no deberán tomar medidas in situ ni

manipular las instalaciones. Gran parte de la información se puede conseguir a través de terceros y basados en los planos de las instalaciones.

2.4. Modelado con el software de simulación

Una vez se tienen los parámetros de los elementos de la instalación, se procede a realizar el modelado en el programa de simulación. Las simulaciones de flujo de potencia y cortocircuito se llevaron a cabo con el software especializado de modelamiento y simulación de sistemas eléctricos Digsilent Power Factory; El procedimiento para realizar el modelado de la microrred se presenta en Ramírez et. al. (2019). Adicionalmente, en la dirección <https://youtu.be/7U1RDlnK1rY> se puede consultar un video tutorial donde se presentan los pasos para realizar el modelado de la instalación.

En las instalaciones fotovoltaicas es recomendable considerar tres escenarios de operación con el objetivo de valorar mejor el impacto de la generación en la red. Los escenarios propuestos se detallan a continuación:

- Escenario 1: Máxima demanda con máxima generación solar fotovoltaica.
- Escenario 2: Máxima demanda con mínima generación solar fotovoltaica.
- Escenario 3: Mínima demanda con máxima generación solar fotovoltaica.

Por otro lado, para los cálculos de cortocircuito se deben considerar dos escenarios de estudio: con y sin la generación solar fotovoltaica en servicio. En cada uno de los escenarios analizados, se deben calcular cortocircuitos trifásicos, bifásicos, bifásicos a tierra y monofásicos. Los cortocircuitos se realizan en la barra principal de baja tensión de la instalación.

3. Resultados

Una vez se presetaron los conceptos fundamentales en clase relacionados con los temas de flujo de carga y cálculo de corto circuito se desarrollaron los pasos indicados a continuación.

3.1. Asignación del proyecto

En este caso, se asignó como proyecto de aula el modelado y simulación de un sistema fotovoltaico ubicado en la bodega Vulcano S.A.S. en Medellín, Colombia. Los datos que se presentan a continuación se dan a manera de ejemplo, pues se puede seleccionar cualquier otra instalación (con previo consentimiento del propietario de la misma) y seguir la metodología descrita. La bodega Vulcano es una compañía reconocida en el sector industrial enfocada en la comercialización de equipos eléctricos para la construcción y minería. Se seleccionó para este trabajo debido a que recientemente se realizó la construcción de una planta solar Fotovoltaico en las instalaciones de la compañía. El estudio realizado en este trabajo era un requisito para garantizar la seguridad y confiabilidad de la instalación eléctrica ante el operador de red.

3.2. Recolección de información

Inicialmente se debe obtener el diagrama unifilar y los parámetros de cada elemento de la instalación eléctrica; en caso de que la instalación no cuente con esta información, se debe realizar el siguiente procedimiento:

Paso 1: Solicitar al operador de red las características eléctricas del punto de conexión, lo cual incluye los valores de cortocircuito (monofásico y trifásico) y las impedancias de cortocircuitos de secuencia positiva, negativa y cero.

Paso 2: Identificar los datos de placa del transformador de potencia de la instalación; para tal fin se puede visitar el sitio y se realiza un registro fotográfico del transformador de potencia y de sus datos de placa. La información contenida en la placa es clave para el modelado de la microrred en *DigSilent Power Factory*.

En la Figura 1 se ilustra la imagen del transformador presente en la instalación de la bodega Vulcano S.A.S. En la vista, se identificó que el transformador no tiene la placa de características debido a la antigüedad de este. Por lo tanto, se tuvo que contactar a la empresa fabricante del equipo para obtener la información técnica de un transformador de las mismas características. En el Cuadro 2 se presentan los datos de placa suministrados por el fabricante del equipo.

Figura 1
Transformador de potencia de 30kVA



Fuente: Elaboración propia

Cuadro 2
Datos de placa transformador de potencia 30kVA

Parámetro	Unidades	Valor
Potencia	kVA	30
Tipo		ACEITE
Tensión primaria nominal	V	13.200
Tension secundaria nominal	V	208/120
Regulación en alta tensión	%	(+1 -3) x 2,5 %
Frecuencia	Hz	60
Corriente primaria nominal	A	1,31
Corriente secundaria nominal	A	78,72
Impedancia de corto circuito a 85°C	% Vn	3
Grupo de conexión		Dyn5
Refrigeración		ONAN

Fuente: Elaboración propia

Paso 3: Caracterizar la acometida que viene del transformador de potencia y cada uno de los tableros de distribución presentes en la instalación. Una vez caracterizados, en los tableros de distribución se deben identificar las características de cada circuito ramal: calibres del conductor, longitud, equipo de medida y protección asociada.

Paso 4: Se deben identificar las características de la instalación fotovoltaica. En el caso particular de la bodega Vulcano S.A.S, se tienen 48 paneles solares policristalinos de referencia GPP 310 W con una potencia máxima de

310 W y corriente de cortocircuito (I_{cc}) de 9,21 A. Se cuenta con un microinversor por cada 4 paneles solares, en total son 12 microinversores YC1000-3 con una potencia máxima de 900 W y corriente nominal de 2,50 A, voltaje AC de 120 V o 208 V y una corriente de cortocircuito de 7,5 A. En la Figura 2 se muestra la imagen de los paneles fotovoltaicos presentes en la instalación.

Figura 2

Paneles fotovoltaicos de la instalación bajo estudio



Fuente: Elaboración propia

Paso 5: Realizar la estimación de las cargas mediante mediciones en los tableros de distribución. En el Cuadro 3 se presentan los datos de potencia activa de cada una de las cargas presentes en la instalación.

Cuadro 3

Cuadro de cargas

Cargas	Potencia (W)
Control numérico por computadora	5.000
Garaje	600
Aire acondicionado	600
Salón central	2.000
Salón sur	2.000
Taller	10.000
Cuarto genérico	800
Taller auxiliar	1000

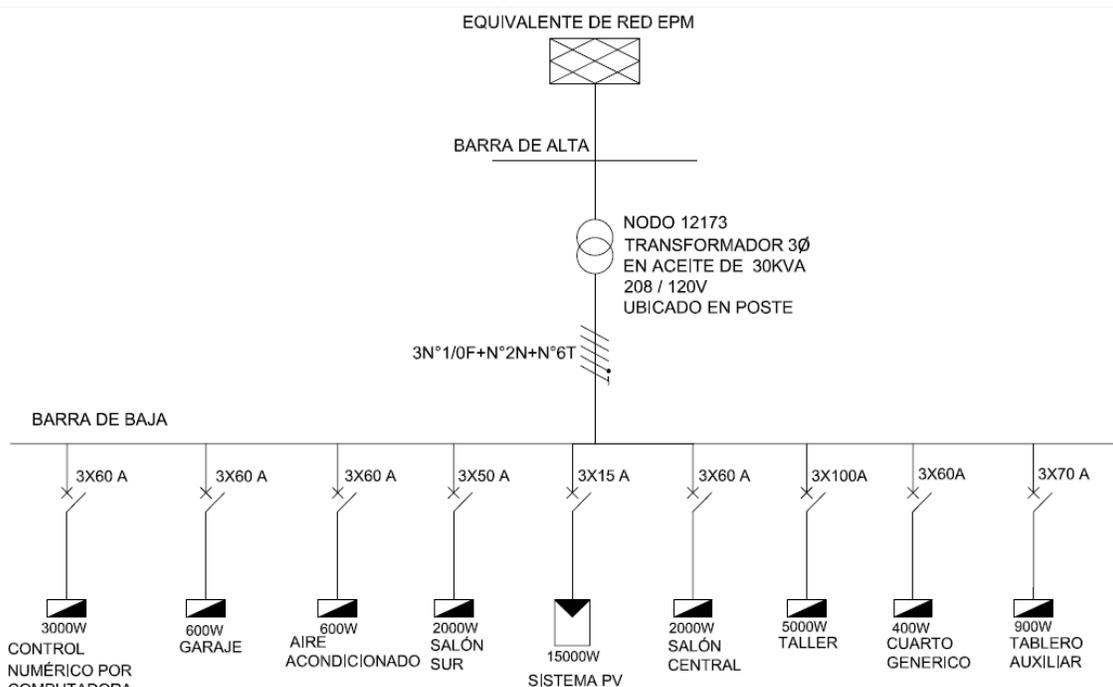
Fuente: Elaboración propia

Paso 6: Realizar el diagrama unifilar de la instalación. En este caso, el diagrama unifilar de la bodega Vulcano S.A.S. se ilustra en la Figura 3.

3.3. Modelado con el software de simulación

Como se mencionó anteriormente se utiliza el *software* especializado de modelamiento y simulación de sistemas eléctricos Digsilent Power Factory. En la Figura 3 se presenta el modelo de la instalación.

Figura 3
Diagrama unifilar de la bodega Vulcano S.A.S.



Fuente: Elaboración propia

3.4. Análisis de flujo de carga y de cortocircuito

El resumen de los resultados del flujo de carga se presenta en el Cuadro 4. La carga en cada elemento del sistema eléctrico se presenta en porcentaje [%], el voltaje de las barras se presenta en por unidad [p.u.].

Cuadro 4
Resultados del flujo de carga

Carga en cada elemento [%]			
Elemento	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
Transformador de potencia	57,2 %	81,6 %	24,2 %
Generación solar fotovoltaica	94,1 %	8,93 %	94,1 %
Tensión en barras [p.u.]			
Barra	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
Alta tensión transformador de potencia	1 p.u.	1 p.u.	0,999 p.u.
Baja tensión transformador de potencia	0,987 p.u	0,987 p.u	0,987 p.u

Fuente: Elaboración propia

A partir de los resultados de flujo de carga presentados en el Cuadro 4, se logra identificar que los elementos presentes en la instalación no presentarían problemas debido a la planta de generación solar fotovoltaica. En ningún caso se presentan sobrecargas en los elementos del sistema. Por otro lado, las tensiones del sistema siempre están en un rango seguro. También se observa que la carga del transformador se reduce considerablemente cuando la planta de generación solar está en servicio. Finalmente, se evidencia que en ningún escenario la instalación podría exportar energía a la red de distribución, pues la demanda siempre es mayor a la generación.

En Cuadro 5 se presentan los resultados del análisis de cortocircuito realizado a en la Bodega Vulcano con y sin la generación solar en servicio.

Cuadro 5
Resultado de cortocircuito

Tipo de Falla	Fases	Generación solar en servicio (kA)	Generación solar fuera de servicio (kA)
Trifásica	A-B-C	2,41	2,32
Bifásica	B-C	2,05	2,01
Bifásica a tierra	B-C	4,17	4,02
Monofásica	A	3,55	3,48

Fuente: Elaboración propia

A partir de los resultados de cortocircuito presentados en el Cuadro 5, se logra identificar que los elementos presentes en la instalación no presentarían problemas debido a la planta de generación solar fotovoltaica. En ningún caso los niveles de cortocircuito superan los límites de diseño de los equipos.

4. Conclusiones

En ese artículo se presentó el modelado y simulación de un sistema fotovoltaico mediante la metodología del aprendizaje basado en proyectos. En los resultados se pudo determinar información relevante sobre la instalación, mostrando que la generación fotovoltaica reduce la cargabilidad del transformador de potencia. Adicionalmente, los niveles de cortocircuito se mantienen por debajo de los límites de diseño de los equipos.

Dado que las instalaciones fotovoltaicas son cada vez más comunes en las redes de distribución, los estudiantes de ingeniería eléctrica, electrónica y afines deben familiarizarse con su modelado y simulación. Una estrategia acertada para esto es mediante el aprendizaje basado en proyectos como se propone en este artículo. El ABP brinda a los futuros ingenieros la oportunidad de aplicar los conceptos vistos en clase en una instalación real. La metodología propuesta permite afianzar los conceptos fundamentales de modelado y simulación de sistemas fotovoltaicos mediante el ABP. En el proyecto de aula se tomó como objeto de estudio una instalación solar fotovoltaica real. Se ilustró el paso a paso para recolección de datos en campo, así como también la simulación de flujos de carga y cortocircuito mediante el uso de un programa especializado de modelamiento y simulación. En este caso, el ABP se evidencia como una herramienta esencial en la formación de futuros ingenieros, ya que les permite aplicar directamente los conceptos de clase en problemas de la vida real.

Referencias bibliográficas

- AIE International Energy Agency. (2017). *Energy Access Outlook 2017*. Recuperado de https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/WEO2017SpecialReport_EnergyAccessOutlook
- Anyushenkova, O. N., Digtyar, O. Y., Karpova, T. A., Voskovskaya, A. S., & Bottigliero, F. (2020). Project-based learning (PBL) as a tool for teaching foreign languages to students of non-linguistic universities. *Revista ESPACIOS*, 41(06).
- Cortés, C. L., Gómez-Gómez, G. S., Betancur-Londoño, F., Carvajal-Quintero, S. X., & Guerrero-González, N. (2020). Análisis experimental del desempeño de un sistema solar fotovoltaico con inversor centralizado y con microinversores: caso de estudio Manizales. *Tecnológicas*, 23(47), 3-23.
- Crucerira Fueltan, E. P. (2020). *Implementación de un sistema de generación solar fotovoltaica con integración a la red eléctrica en el edificio de la carrera de ingeniería eléctrica de la Universidad Técnica del Norte* (Bachelor's thesis). Universidad Técnica del Norte.

- Gamarra, C., & Guerrero, J. M. (2015). Computational optimization techniques applied to microgrids planning: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 48, 413-424.
- Gayatri, M. T. L., Parimi, A. M., & Kumar, A. P. (2018). A review of reactive power compensation techniques in microgrids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 1030-1036.
- Hernández García, E. (2020). *Estudio de una instalación solar fotovoltaica para una vivienda unifamiliar aislada* (Doctoral dissertation).
- Hosseini, S. A., Abyaneh, H. A., Sadeghi, S. H. H., Razavi, F., & Nasiri, A. (2016). An overview of microgrid protection methods and the factors involved. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 64, 174-186.
- IEC (2001). IEC 60909 Short-circuits currents in three-phase ac systems. Geneva: International Electrotechnical Commission.
- Lambraño Ramos, S. M., & Robles González, J. (2019) Aprendizaje por proyectos y los textos pretextos como estrategia metodológica para el desarrollo del pensamiento crítico y su incidencia en el rendimiento académico. *Revista ESPACIOS*, 40(39).
- López, A., Parnás, V. E., & Cataldo, J. (2019). Experimentos en túnel de viento sobre paneles fotovoltaicos montados en el suelo. *Revista ingeniería de construcción*, 34(1), 15-24.
- Marín-Jiménez, J. D., & González-Cruz, P. J. (2020). Lecciones aprendidas del diseño de parques solares fotovoltaicos: Un enfoque de las características técnicas. *I+ D Tecnológico*, 16(1), 54-60.
- Mujal Rosas, R. M. (2014). *Protección de sistemas eléctricos de potencia*. Universitat Politècnica de Catalunya. Iniciativa Digital Politècnica.
- Pujol-Cunill, F. (2017). *El Aprendizaje Basado en Proyectos y el Aprendizaje por Descubrimiento Guiado como estrategias didácticas en Biología y Geología de 4º de ESO* (Master's thesis).
- Ramírez, J. S., Martínez, S., Gil, S., Saldarriaga-Zuluaga, S. D., & López-Lezama, J. M. Diseño de una Microrred como Estrategia de Formación Práctica en Ingeniería Eléctrica. *Revista ESPACIOS*, 40(44).
- Robert, F. C., Sisodia, G. S., & Gopalan, S. (2018). A critical review on the utilization of storage and demand response for the implementation of renewable energy microgrids. *Sustainable cities and society*, 40, 735-745.
- Romero-Valderrama, A. C., Forero-Romero, A., & Rodriguez-Hernandez, A. A. (2018). Análisis comparación del aprendizaje basado en proyectos de forma tradicional y con mediación de las TIC. *Revista ESPACIOS*, 39(52).
- Vergara, P. P., Rey, J. M., Shaker, H. R., Guerrero, J. M., Jørgensen, B. N., & Da Silva, L. C. (2018). Distributed strategy for optimal dispatch of unbalanced three-phase islanded microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 10(3), 3210-3225.
- Zia, M. F., Benbouzid, M., Elbouchikhi, E., Muyeen, S. M., Techato, K., & Guerrero, J. M. (2020). Microgrid transactive energy: Review, architectures, distributed ledger technologies, and market analysis. *Ieee Access*, 8, 19410-19432.