

Implementación del Laboratorio de Energía Solar Fotovoltaica en la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Implementation of the Photovoltaic Solar Energy Laboratory at the Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

JAVIER ANDRÉS RUIZ GARZÓN¹ - DANIEL JOSÉ GONZÁLEZ TRISTANCHO¹ -
MARÍA FERNANDA BENÍTEZ RINCÓN² - DANIELA BARRERA ARIZA²

1. Profesores del programa de Ingeniería Eléctrica de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
2. Estudiantes del programa de Ingeniería Eléctrica de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

javier.ruiz@escuelaing.edu.co – daniel.gonzalez@escuelaing.edu.co
maria.benitez@mail.escuelaing.edu.co – daniela.barrera@mail.escuelaing.edu.co

Recibido: 15/10/2018 Aceptado: 26/10/2018

Disponible en http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista
<http://revistas.escuelaing.edu.co/index.php/reci>

Resumen

En el presente artículo se muestra el sistema de generación de energía eléctrica solar fotovoltaica y su implementación en el Laboratorio de Energía de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. El sistema fotovoltaico cuenta con las configuraciones empleadas para autoconsumo dentro de la red eléctrica y suplencia en zonas no interconectadas; adicionalmente, se utilizan los tres tipos de tecnologías fotovoltaicas más usadas: paneles monocristalinos, policristalinos y amorfos, que brindan la posibilidad de realizar diversos estudios. La energía eléctrica inyectada a la red proveniente de la puesta en marcha del sistema consolida la implementación del Laboratorio de Energías Renovables en el Laboratorio de Energía de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

Palabras claves: fuentes no convencionales de energía renovable, tecnologías fotovoltaicas, configuraciones de sistemas fotovoltaicos, prosumidores.

Abstract

This article shows the photovoltaic solar electric energy generation system and its implementation in the Energy Laboratory of the Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. The photovoltaic system has the configurations used for self-consumption within the electrical network and energy delivery in non-interconnected areas, additionally the three most used types of photovoltaic technologies are used: monocrystalline, polycrystalline, and amorphous panels, which offer the possibility of carrying out various studies. The electrical energy injected into the network from the start-up of the system consolidates the implementation of the Renewable Energy Laboratory in the Energy Laboratory of the Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

Keywords: Non-conventional sources of renewable energy, photovoltaic technologies, configurations of photovoltaic systems, prosumers.

INTRODUCCIÓN

Como parte de la diversificación de la matriz energética colombiana, se ha planteado una estrategia de inclusión de fuentes no convencionales de energías renovables (FNCER) para autoconsumo, mediante la expedición de la Ley 1715 de 2014 (UPME, 2014), la cual plantea beneficios económicos y tributarios para los inversionistas. Teniendo en cuenta las condiciones del recurso primario, la madurez de la tecnología y los beneficios económicos, en este artículo se presenta la implementación de sistemas solares fotovoltaicos.

La energía solar fotovoltaica consiste en la transformación directa de la radiación solar en energía eléctrica. Existen dos efectos físicos que permiten el aprovechamiento de la radiación solar: el termosifónico y el fotovoltaico. En este último es en el que se aprovecha la energía de los fotones para producir electricidad.

Una de las formas de aplicación de los sistemas fotovoltaicos es la autogeneración a pequeña escala (AGPE), la cual se ha convertido en clave fundamental en el nuevo modelo energético para los sistemas de distribución. La AGPE es un concepto que se basa en la producción de energía eléctrica por medio de pequeñas fuentes de energía próximas al lugar de consumo. Sus beneficios son muchos, pero se destacan la reducción de pérdidas en la distribución de energía por la red, una necesidad menor de desarrollar nuevas redes y un menor impacto medioambiental por parte de las infraestructuras eléctricas en el entorno (World Energy Council, 2014).

Con esta generación se presentan dos modos de empleo: por un lado, el autoconsumo, que abarca a todos aquellos usuarios que consumen la energía que producen, y por otro lado, la producción de excedentes de energía, para todos aquellos usuarios que no sólo autoconsumen, sino que también le venden al mercado la energía que no utilizan (prosumidores). Para este último la red eléctrica se verá enfrentada a retos técnicos debido al cambio de dirección del flujo de energía, puesto que éste tomará ambas direcciones.

La legislación actual en gran parte del mundo permite la inyección de potencia a la red que sobra del autoconsumo. Cuando el usuario no tiene baterías para almacenar la energía y cuenta con la red eléctrica como soporte cuando no logre cumplir con su propia demanda, se utilizan esquemas que reconocen una mayor tarifa con respecto al costo unitario de la energía, como el de

feed-in tariff, la venta de energía al mismo costo unitario como el *net-metering* (Sedghisigarchi, 2009) o la compra de energía a un costo inferior al costo unitario *net-billing* (Chakraborty, 2018). Para estos sistemas se requiere la implementación de un contador bidireccional, con el cual, finalizado cada día (o el periodo establecido), se contabiliza la diferencia entre la energía que ha inyectado el usuario a la red y la que ha tomado de ésta.

Colombia es un país con una ubicación geográfica muy favorable para los sistemas de energía renovable; por ejemplo, el potencial solar que tiene la región Caribe es muy alto, tomando en cuenta su radiación solar. De acuerdo con información del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam, 2018), esta región tiene un promedio diario anual de brillo solar de siete a nueve horas, y es la región con mayor radiación solar en el país, mientras que en Bogotá se tiene un promedio entre 3,5 y 4,5 horas de brillo solar.

Colombia se divide energéticamente en dos tipos de zonas: el sistema interconectado nacional (SIN) y las zonas no interconectadas (ZNI); el SIN corresponde a las zonas que tienen fácil acceso al servicio de energía eléctrica y las ZNI son aquellos lugares para los que el servicio de energía eléctrica es menos asequible.

Las ZNI están ubicadas en lugares de difícil acceso, a largas distancias de los centros urbanos; por lo general, carecen de infraestructura física y no cuentan con vías de acceso apropiadas. Para estas zonas, los sistemas de autogeneración de energía eléctrica serían la opción más viable no sólo económica sino socialmente, y su implementación puede estar influenciada por la Ley 1715 de 2014 (UPME, 2014). Esta ley tiene como objetivo promover la realización y el desarrollo de proyectos que utilicen fuentes no convencionales de energía renovable (FNCER) (energía solar, eólica, biomasa, mareomotriz, geotérmica, entre otras), con los cuales se reducen las emisiones de gases de efecto invernadero, obteniendo una economía sostenible y una mayor seguridad del abastecimiento energético nacional.

Todo esto se llevará a cabo por medio de la implementación de incentivos que fomenten este desarrollo, tales como:

- *Artículo 11.* Reducción de 50 % en impuesto sobre la renta durante los primeros cinco años gravables del proyecto.

- *Artículo 12.* Los equipos, elementos, maquinaria y servicios nacionales o importados que se destinen a la preinversión e inversión, o producción y utilización de energía a partir de FNCER, estarán excluidos de IVA.
- *Artículo 13.* La importación de maquinaria, materiales e insumos destinados a labores de preinversión e inversión de proyectos FNCER estará exenta de aranceles.
- *Artículo 14.* La actividad de generación a partir de FNCER gozará del régimen de depreciación acelerada. La tasa anual de depreciación no será mayor del 20 % como tasa global anual.

CONFIGURACIONES DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

La energía solar fotovoltaica es una fuente de energía que produce electricidad de origen renovable, obtenida directamente a partir de la radiación solar mediante un dispositivo semiconductor denominado célula fotovoltaica. Los sistemas fotovoltaicos pueden estar aislados (*off grid*), conectados a la red (*on grid*) o ser híbridos.

Sistemas fotovoltaicos *on grid*

Un sistema conectado a la red de suministro eléctrico es una forma de generación que amortigua la dependencia energética de otras fuentes (figura 1). En este tipo de instalaciones durante el día el usuario consume la energía solar producida, y la energía sobrante es inyectada a la red para la utilización en horas donde no se está pro-

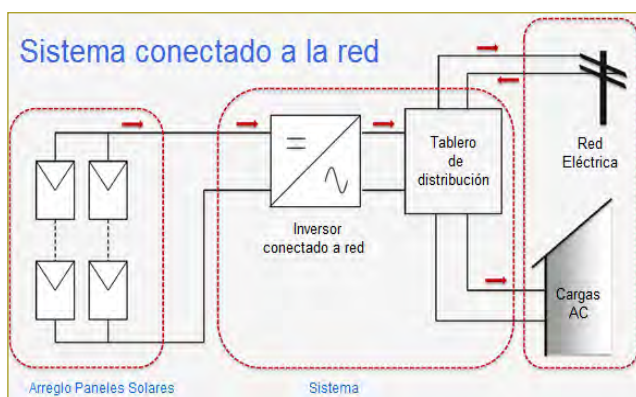


Figura 1. Sistema conectado a la red.

Fuente: Modificado de PV Systems - Applications and Design. Arno Smets, Nishant Narayan. Delft University of Technology, 2014.

duciendo energía solar. Para este tipo de instalaciones es indispensable tener acceso a la red eléctrica, por lo que no funciona en zonas aisladas.

Un sistema *on grid* está compuesto por:

- *Paneles solares.* Conformados por un conjunto de células fotovoltaicas que producen electricidad a partir de la luz que incide sobre ellos mediante el efecto fotoeléctrico.
- *Inversor.* Encargado de convertir la energía que entregan los paneles solares (voltaje DC) en energía útil para alimentar los electrodomésticos y equipos eléctricos (voltaje AC).
- *Contador bidireccional.* Encargado de medir los excedentes de energía a la red eléctrica y el suministro de energía desde la red.

Sistemas fotovoltaicos *off grid*

Un sistema *off grid* se utiliza para el autoconsumo. Este sistema aprovecha la radiación solar para cargar un banco de baterías que son las encargadas de generar energía eléctrica cuando no haya radiación solar presente (figura 2). Para implementarlo se requiere calcular el consumo diario, y con esto determinar la cantidad de paneles fotovoltaicos y baterías necesarias para suplir la demanda.

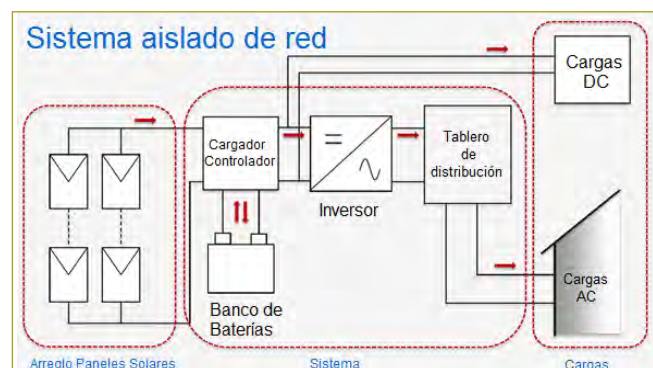


Figura 2. Sistema *off grid*.

Fuente: Modificado de PV Systems - Applications and Design. Arno Smets, Nishant Narayan. Delft University of Technology, 2014.

Este sistema está compuesto por:

- Paneles solares.
- Inversor.
- Baterías (encargadas de almacenar la energía).

- Controlador de carga (regula constantemente el estado de carga de las baterías y su intensidad de carga, con el fin de alargar la vida útil de las baterías).

Su principal ventaja es que no es necesario estar conectados a la red eléctrica, ya que el sistema es 100 % autónomo; su principal desventaja es el mayor costo de implementación, ya que es necesario agregar baterías y el controlador de carga.

Sistemas híbridos

Un sistema híbrido consiste en una combinación de la tecnología *off grid*, diversas fuentes de generación y la red eléctrica, para así lograr beneficiarse de lo mejor que estos sistemas pueden ofrecer. Entonces, si la energía producida a través de las fuentes es suficiente para el consumo del usuario, ésta se utiliza y el excedente se almacena en las baterías. Del mismo modo, si el consumo del usuario es superior a la energía producida, el inversor tomará la energía necesaria de la red eléctrica. El controlador decidirá si toma la energía que necesita de las baterías (previamente cargadas), de un grupo electrógeno o si la toma de la red eléctrica (figura 3).

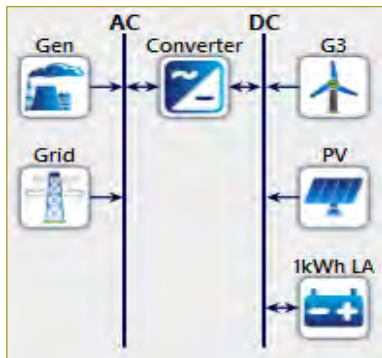


Figura 3. Sistema híbrido.
Fuente: Elaboración propia, programa computacional Homer Energy.

TECNOLOGÍAS MAYORMENTE USADAS PARA LA GENERACIÓN FOTOVOLTAICA

Los paneles fotovoltaicos mayormente utilizados, en función de los materiales semiconductores que se empleen para su fabricación, se dividen en:

- *Monocristalinos.* Basados en secciones de una barra de silicio perfectamente cristalizado en una sola pieza. Se caracterizan por ser los más eficientes, registran eficiencias en rangos del 15 al 21 %.
- *Policristalinos.* Los materiales son semejantes a los del tipo anterior, aunque en este caso el proceso de cristalización del silicio es diferente. Los paneles policristalinos se basan en secciones de una barra de silicio que se ha estructurado desordenadamente en forma de pequeños cristales. Su costo de fabricación es inferior a los monocristalinos y su eficiencia es del orden del 16 %.
- *Amorfos.* Basados también en el silicio, pero a diferencia de los dos anteriores, este material no sigue aquí estructura cristalina alguna. Son los más económicos, pero de alta degradación respecto a la potencia generada; su eficiencia está entre el 6 y 10 %.

El efecto de la temperatura de trabajo de los módulos, junto con la radiación incidente, son los factores que más afectan su rendimiento. Dicho efecto se puede evidenciar en las figuras siguientes, donde a mayor temperatura, menor tensión y potencia; por otro lado, a mayor irradiación, mayor corriente y potencia (figuras 4 y 5).

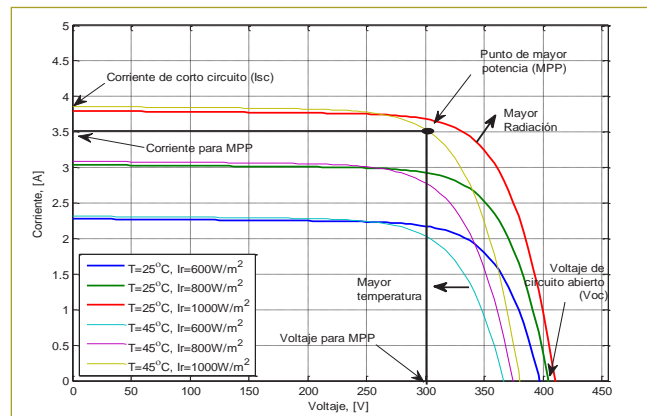


Figura 4. Curva corriente vs. tensión (I-V) en diferentes condiciones de temperatura e irradiación.
Fuente: González, 2016.

APLICACIÓN EN LA ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

La Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito cuenta con un sistema fotovoltaico *off grid* y otro *on grid* (figura 6).

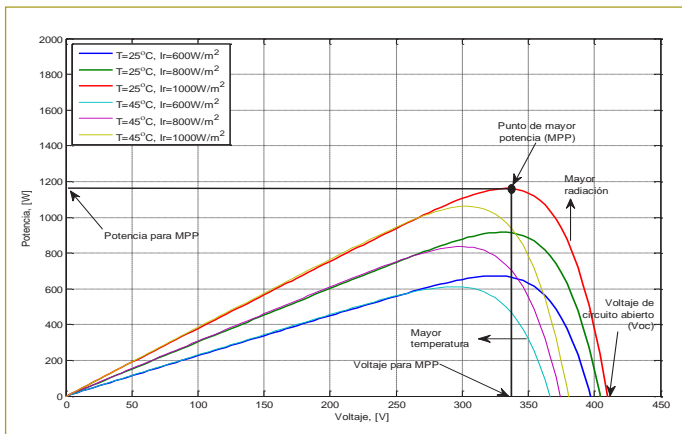


Figura 5. Curva corriente vs. tensión (I-V) en diferentes condiciones de temperatura e irradiación.

Fuente: González, 2016.



Figura 6. Sistemas fotovoltaicos off grid y on grid de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

Sistema off grid

En la figura 7 se muestra el diagrama unifilar del sistema *off grid*, el cual soporta hasta 180 W de cargas tipo AC o DC; consta de dos paneles de 87 Wp cada uno, conectados en paralelo, encargados de captar la radiación; cuenta con un banco de baterías de descarga profunda de 12 V y 105 Ah. El sistema tiene un regulador y un inversor con capacidad de 1000 W.

El sistema cuenta con la disponibilidad para conectar cargas de tipo AC o DC, el regulador es el que permite el paso de corriente al inversor para alimentar cargas AC o directamente al barraje para alimentar cargas DC, controlando además el estado de carga del banco de baterías. En la figura 8 se presenta el sistema *off grid* de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Este sistema está implementado con el objetivo de servir de apoyo para los cursos y asignaturas relacionadas con las energías renovables no convencionales; está ubicado en el Laboratorio de Energía, en el edificio I.

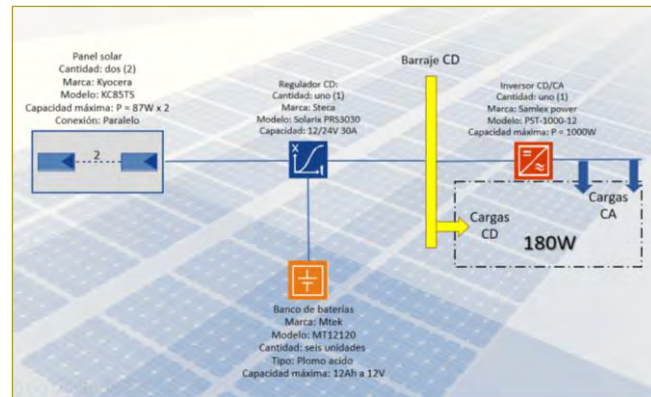


Figura 7. Diagrama unifilar de sistemas *off grid*.

Fuente: Manual de sistemas de energía solar de la Escuela Colombiana de Ingeniería.



Figura 8. Sistema *off grid* de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

Fuente: González, 2016.

Sistema on grid

En la figura 9 se muestra el diagrama unifilar del sistema *on grid* que soporta 4024 Wp y consta de 18 paneles de diferentes tecnologías: policristalino, monocristalino y amorfo. Los paneles policristalinos cuentan con dos microinversores con capacidad de 250 W cada uno. Los monocristalinos y amorfos cuentan con un MPPT con una capacidad de 3000 W.

El sistema cuenta con una plataforma de monitoreo virtual, Plant Viewer, que es una solución de supervisión basada en un navegador, que también permite llevar a cabo un seguimiento de la energía producida. En Plant Viewer es posible seguir los principales parámetros energéticos, así como la energía generada a lo largo de la vida útil del sistema. Para su funcionamiento requiere un microinversor o inversor y un concentrador (CDD).

En la figura 10 se halla el diagrama de conexión del microinversor ABB y CDD, y en la tabla 1 están las ventajas y desventajas que presenta.

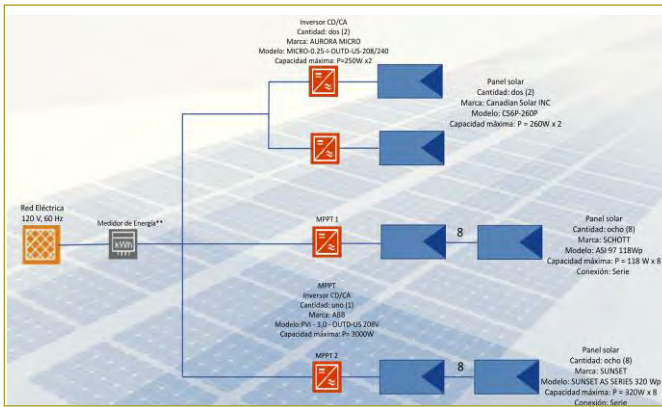


Figura 9. Diagrama unifilar del sistema *on grid*.

Fuente: Manual de sistemas de energía solar, Escuela Colombiana de Ingeniería.



Figura 11. Diagrama de conexión del inversor centralizado (sistema de monitoreo).

Fuente: Manual de sistemas de energía solar, Escuela Colombiana de Ingeniería.

La disposición física y el plano del sistema *on grid* se presentan en las figuras 12 y 13, donde se observan las tecnologías de paneles y la localización del sistema dentro del campus de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

Este sistema está implementado con fines académicos; al tener diferentes tipos de tecnologías y monitoreo en tiempo, real es útil como herramienta pedagógica, además de que alimenta la red eléctrica del Laboratorio de Energía en el edificio I.

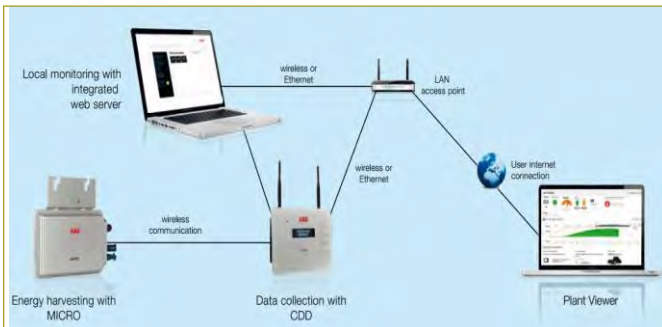


Figura 10. Diagrama de conexión microinversor ABB y CDD (sistema de monitoreo).

Fuente: Manual de sistemas de energía solar, Escuela Colombiana de Ingeniería.

Tabla 1

Ventajas y desventajas del microinversor ABB y CDD

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> Se puede controlar cada panel de manera individual. Su energización requiere menor nivel de tensión para sincronizarse a la red eléctrica. 	<ul style="list-style-type: none"> Manejan menor potencia Ausencia de fabricantes en el mercado (por costos de fabricación e instalación versus centralizados).

En la figura 11 se observa el diagrama de conexión del inversor centralizado con más de un MPPT, así como sus ventajas y desventajas (tabla 2).

Tabla 2

Ventajas y desventajas del MPPT

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> Está centralizado. Maneja mayor potencia. Muy comercial. 	<ul style="list-style-type: none"> No se puede medir de manera individual cada panel (mide la cadena completa). Requiere un número mínimo de paneles para poder energizarse



Figura 12. Paneles instalados en el Laboratorio de Energía en el edificio I.

PROYECTOS FUTUROS

En Colombia se espera que para un tiempo de diez años las FNCER representen el 15 % de la capacidad instalada (Cámara de Comercio de Bogotá, 2017).

La estrategia propuesta por la Unidad de Planeamiento Minero Energética (UPME) para la integración de las FNCER al sistema energético nacional colombiano debe fundamentarse en el marco legal establecido por las leyes 142 y 143 de 1994 (ley de servicios públicos domiciliarios y ley de energía eléctrica) (CREG, 1994),

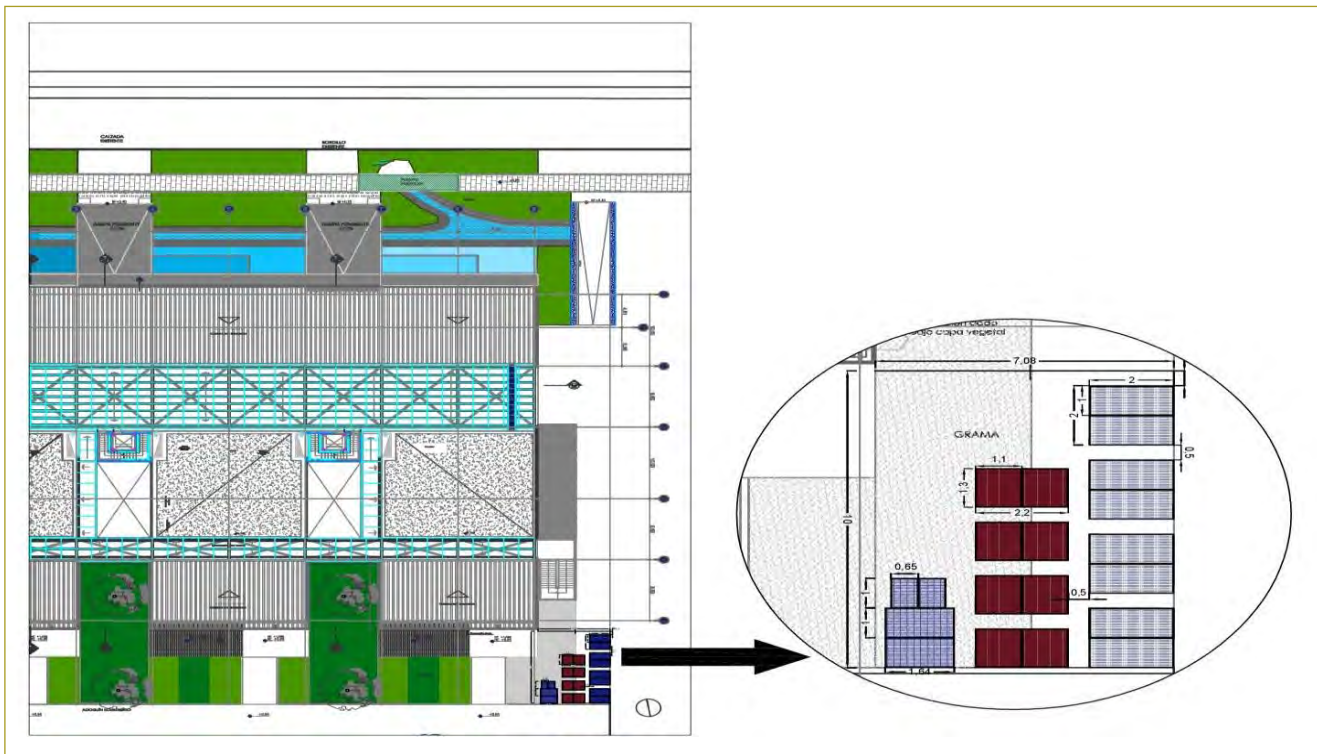


Figura 13. Planos del sistema *on grid*. Ubicación en el campus de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, edificio I.

la Ley 1665 de 2013 (aprobación del estatuto de la Agencia Internacional de Energía Renovable, IrenaA) (República, 2013) y la Ley 1715 de 2014 (UPME, 2014), para así lograr la diversificación de la canasta energética nacional, reducir las externalidades negativas del sector, minimizar la emisión futura de GEI (gases de efecto invernadero), y lograr un desarrollo sostenible de los sectores energético y productivo del país.

Para poder llevar a cabo estos propósitos hay que: reglamentar los incentivos dispuestos por la Ley 1715 (UPME, 2014) a través de un trabajo conjunto interinstitucional en el que participen el Ministerio de Minas y Energía (MME), el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), el Ministerio de Hacienda y Crédito Público (MHCP), el Ministerio de Comercio, Industria y Turismo (MCIT), y entidades como la UPME, la Agencia Nacional de Licencias Ambientales (ANLA) y la Dirección de Aduanas Nacionales (DIAN); expedir procedimientos sencillos, ágiles, claros y con los debidos controles, que resulten asequibles tanto a pequeños como a grandes inversionistas (Congreso de la República de Colombia, 2014).

Para el caso de proyectos que se van a financiar con recursos públicos como los del Fondo de Apo-

yo Financiero para la Energización de las Zonas no Interconectadas (Fazni) y el Fondo de Energías No Convencionales y Gestión Eficiente de la Energía (Fenoge), se recomienda realizar evaluaciones y análisis de optimización de los proyectos a través del empleo de herramientas diseñadas para tal propósito, con el fin de lograr un uso eficiente de éstos (IPSE, 2014).

El programa de Ingeniería Eléctrica planea continuar su trabajo en el campo de las energías renovables con futuros proyectos como la implementación de un sistema híbrido con un esquema como el que se muestra en la figura 14 y que cuenta con los siguientes componentes:

- Un (1) aerogenerador de eje vertical de 400 W, 24 Vdc.
- Un (1) controlador de carga para aerogenerador (puede ser externo o interno al aerogenerador).
- Un (1) controlador de carga para paneles solares 24 V, compatibilidad y comunicación con inversor Studer.
- Un (1) inversor híbrido Studer XTS 24 Vdc, 1200 W-120 Vac o equivalente con las mismas características.
- Un (1) sistema de programación y control remoto RCC-03.

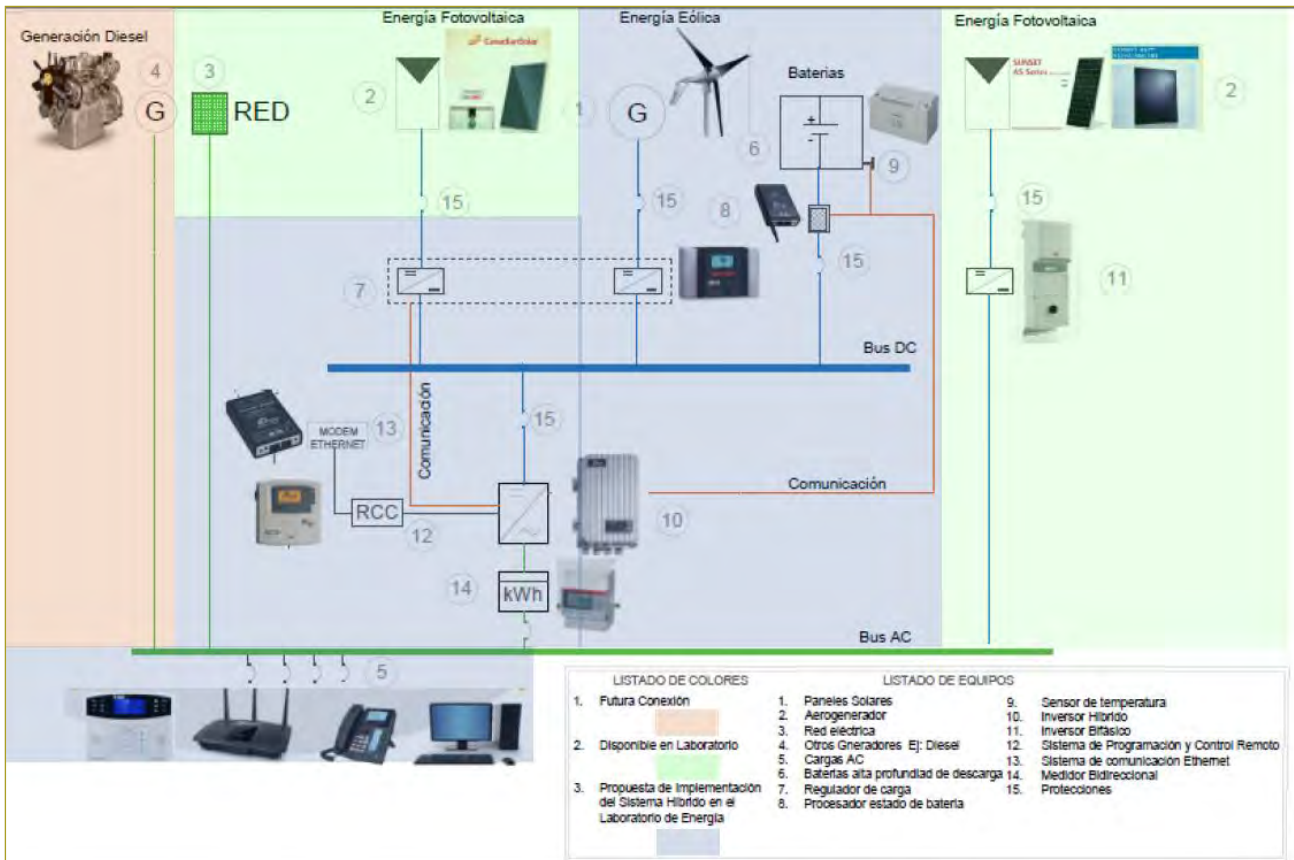


Figura 14. Esquema del sistema híbrido.

- Un (1) sistema de comunicación por internet con puerto Ethernet –Xcom-LAN.
- Dos (2) baterías Hoppecke 12V –58.1500 ciclos, 50 % de profundidad de descarga o equivalente.
- Un (1) procesador de estado de batería con Shunt 500 A, que cuente con comunicación con inversor Studer.
- Un (1) sensor de temperatura de batería.
- Un (1) medidor bidireccional.
- Un (1) tablero que incluya protecciones, interruptores de encendido y apagado del sistema y puntos de medición

Adicionalmente, el Laboratorio de Energía opera el sistema fotovoltaico *on grid* con capacidad de 102 kW_p, ubicado en el edificio H, Alejandro Sandino, el cual sule parte de la demanda eléctrica y se diseñó para autoconsumo; suministra el 10 % de la demanda eléctrica de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Actualmente, este sistema constituye el proyecto más

grande de esta naturaleza en instituciones educativas ubicadas en la sabana de Bogotá.

CONCLUSIÓN

Como resultado se implementó el Laboratorio de Energías Renovables de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, el cual cuenta con los diferentes tipos de tecnologías de paneles solares y configuraciones de sistemas fotovoltaicos.

Con la implementación del sistema solar fotovoltaico *on grid*, se puede evaluar el impacto en la producción eléctrica de cada una de las tecnologías ante la radiación solar incidente en Bogotá. Así mismo, es posible evaluar el efecto de la variación de la orientación de los módulos y el grado de inclinación de éstos con respecto a su producción de energía y su impacto económico.

El sistema solar fotovoltaico *off grid* permite conocer en detalle los flujos de energía eléctrica entre cada uno de sus componentes, así como las conversiones DC -

AC, el impacto de armónicos en las señales generadas y el comportamiento de los sistemas de almacenamiento de energía.

REFERENCIAS

- Cámara de Comercio de Bogotá (2017). Panorama de las energías renovables en Colombia. Disponible en <https://www.ccb.org.co/Clusters/Cluster-de-Energia-Elctrica/Noticias/2017/Julio/Panorama-de-las-energias-renovables-en-Colombia>.
- Chakraborty, P., Baeyens, E., Khargonekar, P. P., Poolla, K., & Varaiya, P. (2018). Analysis of Solar Energy Aggregation under Various Billing Mechanisms. *IEEE Transactions on Smart Grid*. Austin, Texas, Estados Unidos: IEEE.
- Congreso de la República de Colombia (13 de mayo de 2014). Archivo de la Presidencia 2010-2014. <http://wsp.presidencia.gov.co/Normativa/Leyes/Documents/LEY%201715%20DEL%2013%20DE%20MAYO%20DE%202014.pdf>.
- CREG (1994). Comisión de Regulación de Energía y Gas. Obtenido de <http://www.creg.gov.co/index.php/noticias/1204-las-leyes-142-y-143>.
- González, D. (2016). Prototipo de energía eléctrica fotovoltaica para el Laboratorio de Energía de la Escuela Colombiana de Ingeniería. <https://repositorio.escuelaing.edu.co/handle>.
- Ideam (2018). Atlas de Radiación Solar, Ultravioleta y Ozono de Colombia [online]. Disponible en <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasRadiacion.html>.
- IPSE (2014). Soluciones energéticas para las zonas no interconectadas de Colombia. Disponible en <https://www.minminas.gov.co/documents/10180/742159/09C-SolucionesEnergeticasZNI-IPSE.pdf/2871b35d-eaf7-4787-b778-ee73b18dbc0e>.
- República, C.D. (2013). Presidencia de la República. Disponible en <http://wsp.presidencia.gov.co/Normativa/Leyes/Documents/2013/LEY%201665%20DEL%2016%20DE%20JULIO%20DE%202013.pdf>.
- Sedghisigarchi, K. (2009). Residential solar systems: Technology, net-metering, and financial payback. *IEEE Electrical Power & Energy Conference (EPEC)*. Montreal, Canadá: IEEE.
- UPME (2014). Ley 1715. Colombia [online]. Disponible en http://www.upme.gov.co/normatividad/nacional/2014/ley_1715_2014.pdf.
- World Energy Council (2014). Consejo Mundial de la Energía. Disponible en https://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2014/04/WEC_16_page_document_21.3.14_ES_FINAL.pdf.