

Modelamiento de módulos fotovoltaicos con programas de análisis de sistemas de potencia en la red de distribución

Modelling of photovoltaic modules with power system analysis software in the distribution network

JAVIER ANDRÉS RUIZ GARZÓN¹ - DANIEL JOSÉ GONZÁLEZ TRISTANCHO¹ - PAOLA ANDREA MORA MORA²

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

javier.ruiz@escuelaing.edu.co - daniel.gonzalez@escuelaing.edu.co -
paola.mora-m@mail.escuelaing.edu.co

Recibido: 14/02/2017 Aceptado: 18/03/2017

Disponible en <http://www.escuelaing.edu.co/revista.htm>

Resumen

En el panorama energético actual se contempla la inclusión de fuentes no convencionales de energías renovables (FNCR) en las redes eléctricas, como estrategia de gestión para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, impulsar el desarrollo económico sostenible, dar robustez al sistema eléctrico y aumentar la eficiencia energética, dando como resultado un mejor aprovechamiento de los recursos energéticos disponibles.

La implementación de estas fuentes alternativas modifica el flujo de energía tradicional en la red, donde el usuario sólo desempeña el rol de consumidor, convirtiéndolo en un agente activo que puede inyectar potencia a la red. Esto conlleva al estudio de problemas como la irregularidad y el almacenamiento de la energía producida, y crea la necesidad de realizar un modelamiento previo, basado en las características propias del recurso energético y su respectiva integración en la red de distribución local, por medio de herramientas de simulación que faciliten la evaluación del impacto y el comportamiento del sistema en diferentes escenarios, teniendo en cuenta la disponibilidad e intermitencia del recurso y la variación de la demanda.

En este artículo se describen las características de un sistema fotovoltaico (PV) conectado a la red de distribución y se determinan los principales parámetros que hay que considerar para su diseño. A partir de esto se hace un análisis comparativo de tres programas de simulación para modelamientos de sistemas de potencia: ETAP, NEPLAN y OpenDSS, identificando en qué parámetros de entrada se basa cada

uno, para realizar simulaciones y su adaptación a la realidad, donde la intermitencia del recurso primario es un factor importante.

Palabras claves: fuentes no convencionales de energía renovable, sistema fotovoltaico, red de distribución, programas de simulación, intermitencia del recurso, radiación solar.

Abstract

The current energy outlook considers the inclusion of non-conventional renewable energy sources (NCREs) into electricity networks, as a management strategy to reduce greenhouse gas emissions, promote sustainable economic development, strengthen the electrical system, and increase efficiency, resulting in a better use of available energy resources.

The implementation of these alternative sources modifies the traditional flow of energy in the network, where the user only played the role of consumer, turning it into an active agent that can inject power back to the network. This leads to the study of problems such as irregularity and storage to perform a preliminary modeling based on the characteristics of the energy resource and its respective integration in the local distribution network, through simulation tools that facilitate the assessment of the impact and behavior of the system in different scenarios considering the availability and intermittence of the resource and the variation of the demand.

This article describes the characteristics of a photovoltaic (PV) system connected to the distribution network and determines the main parame-

ters to be considered in its design. A comparative analysis is performed using three simulation software packages for power systems modeling: ETAP, Neplan, and OpenDSS, identifying which input parameters are required to perform simulations and its adaptation to reality where the intermittence of the primary resource is an important factor.

Keywords: non-conventional renewable energy sources, photovoltaic system, distribution network, simulation software, resource intermittence, solar radiation.

INTRODUCCIÓN

En el ámbito internacional, países líderes en integración de recursos renovables a la red de distribución han impulsado la aplicación de estos recursos mediante incentivos e instrumentos tales como tarifas o primas reguladas (*Feed-in-Tariffs*, FITs) (Boyle, 2012), certificados de energía renovable (RECs), cuotas, subastas y medición bidireccional, los cuales han demostrado ser herramientas para promover la aplicación de tecnologías renovables y se pueden tomar como referencia para el desarrollo incipiente en Colombia.

En el país, la Ley 1715 de 2014 regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional, al establecer el marco legal y los instrumentos para la promoción y aprovechamiento de las fuentes no convencionales de energía, principalmente las de carácter renovable, fomentando la inversión, investigación y desarrollo de tecnologías limpias para producción de energía (Colombia, 2014), tomando en cuenta que ha tenido avances tales como la resolución de la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) 045 del 3 de febrero de 2016, en la cual se establecen el procedimiento y los requisitos para acceder a los beneficios tributarios que se enuncian en los artículos 12 y 13 de la citada Ley 1715 (UPME, 2016), y la Resolución 143 para registro de proyectos de generación de energía eléctrica a partir de las FNCER (UPME, 2016), aún están pendientes:

- Generación distribuida y entrega de excedentes a la red eléctrica.
- Requerimientos técnicos para instalaciones con FNCER → MinMinas.
- Parámetros ambientales de proyectos con FNCER → MinAmbiente.
- Fomento de actividades de investigación científica, desarrollo tecnológico e innovación.
- Formación y capacitación de capital humano.

Sin embargo, cabe destacar que Colombia, debido a su posición geográfica en la zona ecuatorial, posee un gran potencial para la explotación de energías alternativas como la solar, ya que cuenta con radiación con tendencia constante por períodos promedio de doce horas al día en determinadas zonas del territorio nacional, con una radiación media de 4,5 [kWh/m²] (*La República*, 2012). Lo anterior, junto con la disminución en los precios de los paneles solares por su creciente demanda a escala internacional, ha hecho atractiva la utilización de este tipo de energía.

Uno de los requisitos fundamentales para el diseño y dimensionamiento de sistemas fotovoltaicos consiste en un registro o tabla de radiaciones del sector donde se planea instalar uno de estos sistemas. Para esto se pueden utilizar valores registrados por estaciones meteorológicas, las cuales cuentan con un instrumento de medición de radiación solar incidente, denominado piranómetro, que se encarga de medir en tiempo real dicha radiación. Estos registros de datos pueden utilizarse promediados para la zona geográfica de interés y es posible acceder a ellos a través de la herramienta interactiva del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam), llamada Atlas de radiación solar de Colombia (Ideam, 2015).

Teniendo en cuenta la variabilidad de la irradiación en diferentes periodos y la curva de demanda característica de la red a la cual se va a implementar el sistema fotovoltaico, surge la necesidad de encontrar herramientas computacionales con el fin de modelar sistemas fotovoltaicos conectados a la red cada vez más precisos, que consideren dicha variación dentro de su simulación, para la realización de flujos de potencia y análisis dinámicos del sistema, evaluando su comportamiento ante distintos escenarios.

DESCRIPCIÓN DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO A LA RED.

La luz solar es un recurso inagotable y gratuito, a pesar de su intermitencia en términos de disponibilidad en el tiempo; en periodos de irradiación importante, permite generar energía directamente en el lugar de consumo, contribuyendo a la mejora de la calidad del servicio eléctrico, reforzando la respuesta a la demanda.

Un sistema conectado a la red de suministro eléctrico, además, es una forma de generación distribuida que

disminuye la dependencia energética de otras fuentes no renovables y reduce la necesidad de invertir en nuevas líneas de transmisión que amplíen la red existente e involucren grandes obras civiles, ocupación de terrenos extensos y costos de inversión muy superiores a los que se requieren para implementar un sistema de generación fotovoltaico local.

Los sistemas de generación de energía fotovoltaica, a diferencia de los tipos de generación con recurso eólico y fuentes no renovables, se destacan por ser escalables, modulares, fáciles de instalar, tener bajo nivel de contaminación ambiental y acústico, escasa alteración de los ecosistemas, reducido impacto visual, requerir mínimo mantenimiento y no tener ningún tipo de desgastes mecánicos por rozamiento, vibraciones ni esfuerzos.

La radiación solar se define como la energía procedente del Sol en forma de ondas electromagnéticas, en tanto que a la potencia solar incidente en una superficie se le denomina irradiancia, la cual se mide en W/m^2 ; por último, la radiación corresponde a la potencia solar incidente en una superficie en un periodo de tiempo, cuya unidad es Wh/m^2 (NREL, 2010).

La producción de energía con recurso solar es directamente proporcional a la radiación incidente en los paneles fotovoltaicos y depende de la zona geográfica donde se ubiquen, la estación del año, nubosidad, entre otros factores climáticos y ambientales, además de las características técnicas y constructivas de los paneles.

Un esquema típico de generación fotovoltaica para interconexión a red se evidencia en la figura siguiente (figura 1), cuyos principales componentes se describen a continuación (IDAE, 2011):

- *Paneles o módulos solares fotovoltaicos.* Arreglos de células fotovoltaicas conectadas entre sí que generan electricidad en forma continua (DC) directamente, a partir de la radiación incidente sobre su superficie.
- *Inversores fotovoltaicos.* Dispositivos electrónicos que convierten la energía eléctrica DC procedente de la conversión fotovoltaica en energía eléctrica AC para suministrarla al sistema; además, muchos incluyen la función de seguimiento de punto de máxima potencia del sistema fotovoltaico para conseguir el máximo rendimiento de la instalación.
- *Contadores de energía generada.* Medidores de la energía suministrada por la instalación fotovoltaica.

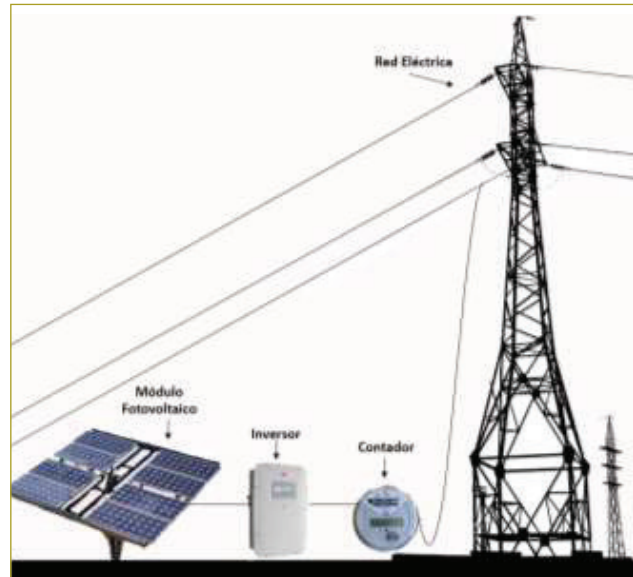


Figura 1. Sistema fotovoltaico conectado a la red. Fuente: Elaboración propia.

DATOS TÉCNICOS DE UN MÓDULO SOLAR FOTOVOLTAICO

Las células solares fotovoltaicas, asociadas en módulos fotovoltaicos, se han desarrollado con diferentes tecnologías, las cuales aportan características adicionales a nivel técnico y económico. Los tipos más comunes de módulos fotovoltaicos son (Carta, Calero, Colmenar, Castro & Collado, 2013):

- *Monocristalinos.* Se caracterizan por ser los más eficientes, ya que registran eficiencias en rangos del 15 al 21 %. Sin embargo, su proceso de fabricación requiere alta pureza y gran cantidad de silicio, lo que incurre en un elevado gasto energético. Su apariencia consiste en un mismo color uniforme a lo largo de la superficie del panel.
- *Policristalinos.* Son los más comunes. Su costo de fabricación es inferior a los monocristalinos y su eficiencia es del orden del 16 %.
- *Amorfos.* Los más económicos, pero de alta degradación respecto a la potencia generada. Su eficiencia está entre el 6 y 10 %.

Parámetros técnicos propios de un módulo fotovoltaico (Carta, Calero, Colmenar, Castro & Collado, 2013):

- *Corriente de corto circuito (I_{sc}).* Describe la corriente máxima producida por el panel en condiciones de

radiación y temperatura específicas, sin caída de tensión; por tanto, en dicho punto la potencia es nula.

- *Tensión de circuito abierto (V_{oc})*. Tensión máxima [V] del módulo, dadas unas condiciones de temperatura y radiación, sin flujo de corriente.
- *Corriente en el punto de máxima potencia (I_{mp})*. Corriente correspondiente a la máxima potencia que puede suministrar el panel en condiciones dadas de radiación y temperatura, utilizada como la corriente nominal del dispositivo. Este parámetro se ubica en el punto de inflexión de la curva característica I-V del panel.
- *Tensión en el punto de máxima potencia (V_{mp})*. Tensión correspondiente a la máxima potencia que puede suministrar el panel en condiciones dadas de radiación y temperatura, utilizado como el voltaje nominal del módulo y que determina cuántas células o módulos son necesarios para una instalación específica; al igual que I_{mp} , este parámetro define el punto de inflexión de la curva I-V del panel.
- *Punto de máxima potencia (P_{mp})*. Máxima potencia de suministro del panel a determinadas condiciones de temperatura y radiación. Es el producto entre I_{mp} y V_{mp} , y en la curva I-V es el punto de inflexión.
- *Factor de forma (FF)*. Relación entre P_{mp} y el producto de I_{sc} y V_{oc} . Determina cómo es la transición en la curva I-V del módulo entre la zona de corriente y tensión constante; varía normalmente entre 0,7 y 0,8.
- *Eficiencia*. Relación entre la energía generada por el módulo y la energía solar incidente sobre su superficie.
- α . Coeficiente de temperatura de I_{sc} , que determina cómo cambia I_{sc} ante variaciones de temperatura. Se sitúa normalmente en el rango de 0,02 a 0,1 %/°C.
- β . Coeficiente de temperatura de V_{oc} , que determina cómo varía V_{oc} ante variaciones de temperatura. Se sitúa en el rango de -0,3 a -0,5 %/°C.
- γ . Coeficiente de temperatura de P_{mp} , que determina cómo cambia el P_{mp} del panel ante variaciones de temperatura. Se sitúa en el rango de -0,3 a -0,5 %/°C.
- *NOCT (*Nominal Operating Cell Temperature*)*. Temperatura nominal de operación de la celda, que generalmente corresponde a 45 °C.

El efecto de la temperatura de trabajo de los módulos y la radiación incidente son los factores que más afectan su rendimiento. Dicho efecto se puede evidenciar más adelante (figuras 2 y 3), donde a mayor temperatura, menor tensión y potencia; por otro lado, a mayor irradiación, mayor corriente y potencia.

Además, se puede realizar otra curva característica del panel, la curva P-T (figura 4), la cual se obtiene con el coeficiente de temperatura de P_{mp} , que muestra la relación entre potencia en el panel y su temperatura de trabajo. A mayor temperatura, menos potencia suministrada; dicha relación se ajusta a una regresión lineal con una covarianza de 0,98.

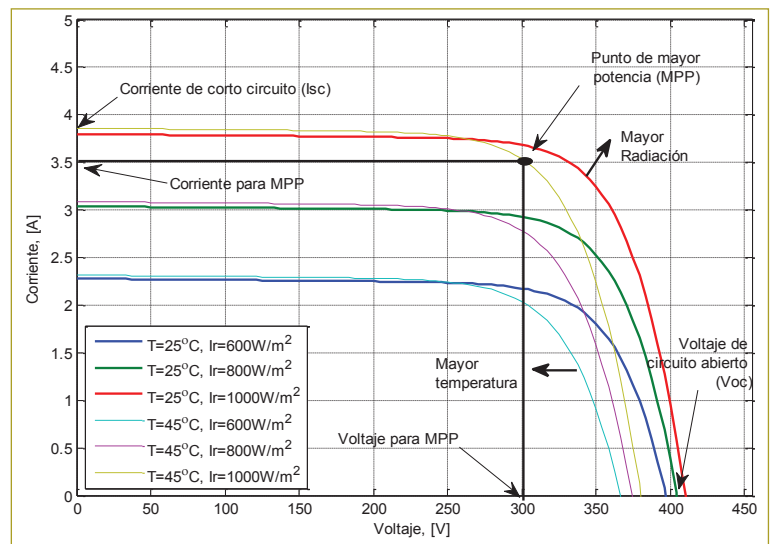


Figura 2. Curva corriente vs tensión (I-V) en diferentes condiciones de temperatura e irradiación. Fuente: González (2016).

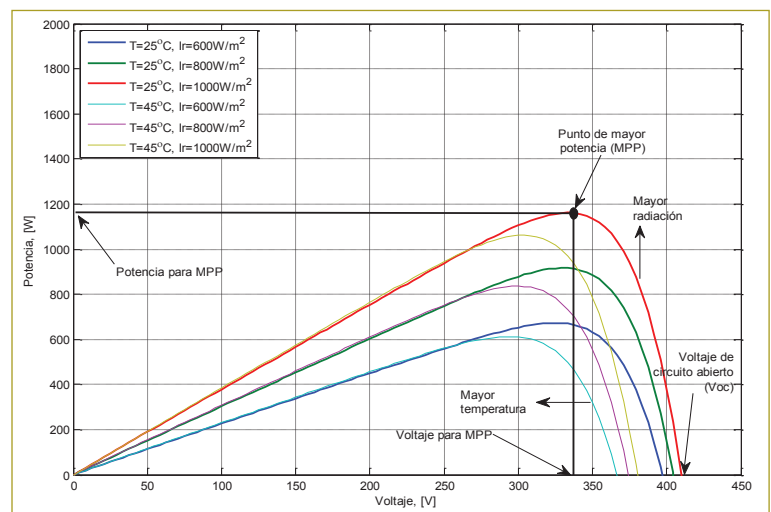


Figura 3. Curva potencia vs tensión (P-V) en diferentes condiciones de temperatura e irradiación. Fuente: González (2016).

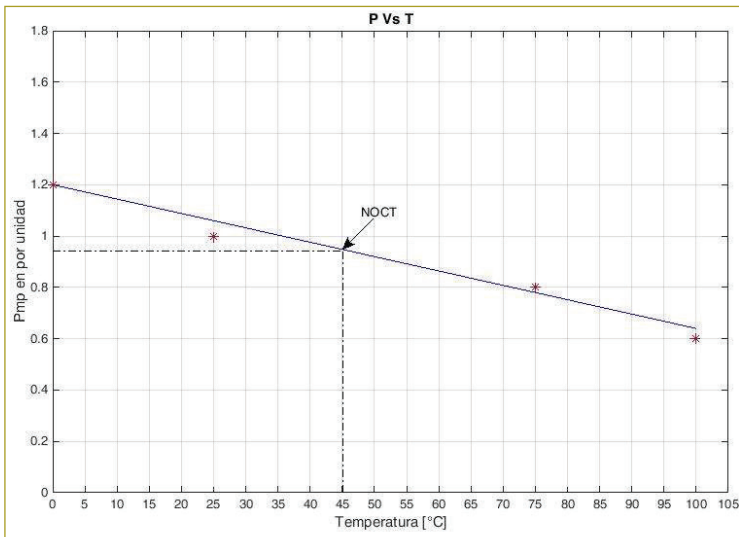


Figura 4. Curva potencia vs. temperatura (P-T) para diferentes valores de Pmp en por unidad (p.u.). Fuente: Elaboración propia.

MODELO DE INTEGRACIÓN EN SISTEMAS DE POTENCIA DE RECURSO INTERMITENTE SOLAR CON UN PROGRAMA ESPECIALIZADO

Los programas de simulación de transitorios electromagnéticos (*Electromagnetic Transients Programs*, EMTP's) son programas computacionales destinados al análisis de circuitos en régimen transitorio. Realizan una abstracción de la realidad al modelar matemáticamente sistemas eléctricos, mecánicos y de control, con fines de diseño, supervisión y análisis de riesgos.

Dos de las herramientas computacionales destacadas en el sector para simulaciones de sistemas de potencia son ETAP y NEPLAN. Por otro lado, el *software* OpenDSS es una herramienta de libre acceso que también permite modelar y analizar sistemas de potencia, con inclusión de recursos renovables.

1. ETAP

“Herramienta de análisis y control para el diseño, simulación, automatización de generación y operación de sistemas de potencia eléctricos de distribución e industriales” (ETAP, 2012).

Cuenta con diferentes módulos que permiten realizar flujos de carga, análisis de cortocircuito, de arcos eléctricos, coordinación de protecciones, calibración de relés, análisis de modelos dinámicos, estabilidad y transitorios, dimensionado de conductores, análisis de

calidad de la energía, sistemas de control, diseños de líneas de transmisión, sistemas de distribución, sistemas de puesta a tierra e integración de recursos renovables.

El módulo de energías renovables permite modelar sistemas eólicos y fotovoltaicos. Cuenta además con una extensa librería actualizada de generadores eólicos y paneles fotovoltaicos, con sus respectivos inversores de diferentes fabricantes y modelos.

Para el caso de paneles fotovoltaicos, permite el modelado ilimitado de paneles solares individuales o en grupos, conectándolos en serie o paralelo (ETAP, 2016).

Así mismo, ajusta los coeficientes de eficiencia y calcula su respectivo flujo de carga y otros análisis con un dato de irradiación base definido por la ubicación seleccionada y la hora, lo que permite simular varios escenarios en los que varíe la irradiación solar y su efecto sobre la generación.

Además, realiza el registro del máximo punto de potencia y las curvas P-V e I-V, las cuales se pueden definir mediante la librería o manualmente.

Al querer ingresar al sistema un panel fotovoltaico en este programa, se puede seleccionar un prototipo de la librería o ingresar los siguientes datos (figura 5):

Tensión y temperatura de operación, número de celdas, potencia nominal, Vmp, Imp, Voc, Isc, eficiencia, FF, irradiación, α , β y NOCT.

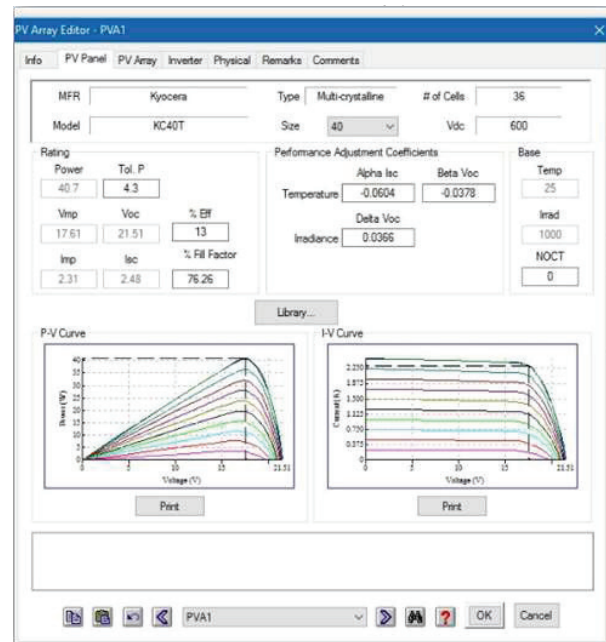


Figura 5. Datos de entrada PV Panel-ETAP. Fuente: Tomado directamente del programa ETAP.

2. NEPLAN

Herramienta informática para análisis, planeación, optimización y simulación de redes eléctricas, de agua, gas y vapor (GERS, 2014).

Su interfaz gráfica es didáctica y fácil de manejar. Cuenta con diferentes módulos para análisis y modelamiento, que cubren aspectos eléctricos en redes de transmisión, distribución, generación e industriales tales como flujo de carga, análisis de cortocircuito, análisis de selectividad, cálculo de parámetros para líneas de transmisión, flujo de carga óptimo, flujo de carga con perfiles de variación de carga, estabilidad, optimización en redes de distribución, análisis de fallas, análisis de armónicos, análisis de confiabilidad, de inversión y simuladores dinámicos.

Posee extensas librerías para sistemas de excitación, máquinas sincrónicas y asincrónicas, conductores, reguladores y transformadores.

Para la modelación de sistemas con fuentes renovables, cuenta con bloques de turbinas eólicas, paneles solares e inversores, con los cuales se pueden hacer los respectivos análisis de flujos de carga, simulaciones dinámicas y sus efectos sobre el sistema interconectado. En este programa para utilizar módulos fotovoltaicos e inversores con las características de los fabricantes se requiere introducir los datos por parte del usuario, además de que se hace necesario modelar tanto el panel o arreglo de paneles con sus respectivos inversores independientemente, no como se haría en ETAP, que ya incluye el arreglo de panel con inversor en conjunto como un solo elemento; sin embargo, dado que no hay librerías con dichos elementos, el usuario tiene la facilidad de crearlas y acceder a ellas cuando lo requiera.

En caso tal de no crear librerías, la implementación de un panel o arreglo de éste al sistema que se va a simular, requiere los siguientes datos de entrada (figura 6):

I_{sc} , V_{oc} , NOCT, temperatura, irradiancia, irradiancia base, delta de irradiancia para diferentes tiempos (para análisis dinámico), eficiencia, α , β , V_{mp} , I_{mp} , número de celdas en serie y en paralelo.

3. OpenDSS

Open Distribution System Simulator (OpenDSS) es una herramienta de simulación certificada por Electric Power Research Institute (EPRI) (EPRI, 2016).

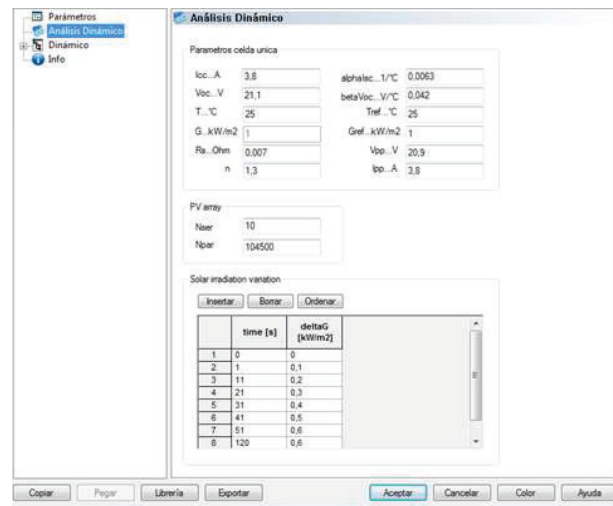


Figura 6. Datos de entrada PV Panel-Neplan. Fuente: Tomado directamente del programa NEPLAN.

Está diseñada para satisfacer las necesidades futuras relacionadas con redes inteligentes, la modernización del sistema interconectado y la investigación en el área de energías renovables.

Entre sus aplicaciones están los flujos de carga, análisis de armónicos, estudios de falla, variaciones paramétricas de carga. Transitorios electromecánicos y dinámicos, análisis de cargas desbalanceadas, análisis de riesgos en planificación de sistemas de distribución, estudios de planeación probabilísticos, desarrollo de perfiles de tensión, evaluación de control y automatización de la distribución, simulaciones y análisis de integración de generación distribuida a la red con recursos intermitentes, simulación de sistemas fotovoltaicos, simulación de plantas eólicas y modelado de almacenamiento.

El modelamiento de sistemas en esta herramienta se basa en lenguaje de programación C, lo cual permite manejar grandes cantidades de datos correspondientes a una sola variable en forma de vectores, realizando análisis como flujos de carga robustos para periodos definidos (diario, semanal, mensual, anual, etc.), considerando la variabilidad tanto del recurso como de la demanda.

Los datos de entrada necesarios para modelar sistemas fotovoltaicos en esta herramienta son:

- Irradiancia puntual o como un vector de datos, bien sea diario, anual, mensual, etc. P_{mpp} a 1 kW/m^2 y temperatura, NOCT, curva de eficiencia del inversor en función de la potencia y curva P vs. T , donde

P corresponde al valor en por unidad de P_{mp} a diferentes temperaturas.

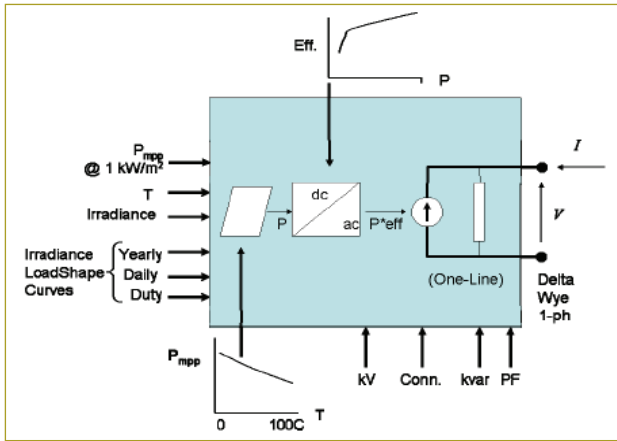


Figura 7. Diagrama de bloques de un sistema fotovoltaico conectado a la red con requerimientos en OpenDSS. Fuente: EPRI (2011).

4. Cuadro comparativo de características técnicas requeridas por las herramientas de simulación

Para llevar a cabo los análisis de generación de potencia eléctrica suministrada por los módulos fotovoltaicos, las herramientas de simulación requieren parámetros técnicos específicos (tabla 1). Algunos son comunes entre los programas, mientras que otros se encuentran a partir del tratamiento matemático de éstos.

En el caso de análisis de rendimiento e integración en la red de distribución, es necesario conocer los complementos que ofrece cada programa; por tanto, más adelante se explican algunas especificaciones de cada uno (tabla 2).

CONCLUSIONES

Para el modelamiento preciso de módulos fotovoltaicos se requieren herramientas de simulación que consideren tanto la disponibilidad e intermitencia del recurso de generación asociado como la variación de la demanda, es decir, herramientas que soliciten como parámetros de entrada perfiles de carga e intermitencia variables, de tal manera que se puedan ingresar al sistema como vectores de datos que varían en lapsos especificados.

Tabla 1
Parámetros técnicos requeridos para modelar paneles fotovoltaicos en diferentes programas

	ETAP	NEPLAN	OPENDSS
Isc	✓	✓	✗
Voc	✓	✓	✗
Imp	✓	✓	✗
Vmp	✓	✓	✗
Pmp	✗	✗	✓
FF	✓	✗	✗
Eficiencia	✓	✓	✓
α	✓	✓	✗
β	✓	✓	✗
γ	✗	✗	✓
NOCT	✓	✓	✓
# de celdas	✓	✓	✗
Curva I -V	✓	✗	✗
Curva P-V	✓	✗	✗
Curva P-T	✗	✗	✓
Curva de eficiencia del inversor en función de la potencia (P)	✗	✗	✓
Irradiancia puntual	✓	✓	✓
Irradiancia como vector de datos que varían con el tiempo	✗	✗	✓

Tabla 2
Propiedades de análisis de los diferentes programas

	ETAP	NEPLAN	OPENDSS
Análisis dinámico <i>off-line</i>	✗	✓*	✓
Librería con diferentes fabricantes y modelos incluida por defecto en el programa	✓	✗	✗
Flujos de carga con perfiles de variación de carga	✓**	✓	✓
Programa libre	✗	✗	✓

✓* Introducción manual de cambios en la irradiancia a partir de un valor de irradiancia base y un delta de variación.

✓** No directamente, sino acudiendo a *plugins* o aplicaciones externas.

A pesar de que algunos de los parámetros de entrada que requiere OpenDSS provienen de un tratamiento previo de las características técnicas de los módulos fotovoltaicos, se acude a menos parámetros, en los cuales se basa el *software* para identificar completamente el

arreglo fotovoltaico que se va a emplear y llevar a cabo los análisis correspondientes.

En el caso de la identificación de la curva P-T, tan sólo se necesitan NOCT, γ y Pmp del módulo para describir una función lineal aproximada con covarianzas superiores al 95 %, donde Pmp se toma como 1 en por unidad (p.u.) y (NOCT, 1) corresponde a una coordenada de la gráfica, cuya pendiente está definida por el parámetro γ .

Los perfiles de variación de carga y de variación de la irradiancia se pueden definir para diferentes periodos (diario, semanal, mensual, anual); para cada punto definido, OpenDSS realiza un respectivo flujo de carga y los análisis requeridos por el usuario, mostrando un compilado de resultados para cada uno de los puntos definidos.

OpenDSS no posee una interfaz gráfica tan amigable y fácil de manejar como la de ETAP o la de NEPLAN, debido a la introducción de parámetros mediante programación en lenguaje C; sin embargo, cuenta con enlaces a otros programas tales como Matlab, por lo que es posible importar tanto datos de entrada como resultados, hacerles tratamientos gráficos más avanzados y otros tipos de análisis.

Por las razones enunciadas anteriormente, OpenDSS se caracteriza por ser un simulador preciso, flexible y de fácil acceso al público entre los tres programas objeto de comparación en el presente artículo.

Herramientas como las descritas a lo largo del documento facilitan la integración de recursos renovables a la red de distribución al permitir una evaluación técnico-económica de los sistemas; esto, junto con los incentivos e instrumentos ofrecidos por los gobiernos para impulsar el uso de las FNCER, fomentan la inversión, investigación y desarrollo progresivos de tecnologías limpias para la producción de energía.

REFERENCIAS

- Boyle, G. (2012). *Renewable Energy*. Amersham, UK: Oxford University Press.
- Carta, J. A., Calero, R., Colmenar, A., Castro, M. A. & Collado, E. (2013). *Centrales de energías renovables*. Madrid: Pearson.
- 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_1715_DEL_13_DE_MAYO_DE_2014.pdf.
- IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía) (2011). Instalaciones de energía solar fotovoltaica. Pliego de condiciones técnicas de instalaciones conectadas a red. Madrid, España.
- ETAP (2012). Detalles del producto. http://www.etapesp.es/assets/etap_overview.pdf.
- ETAP (2016). Energías renovables-energía solar. <http://etapesp.es/energiasolar.html>.
- GERS (2014). Boletín Universitario-I. <http://gers.com.co/wp-content/uploads/2014/02/BOLETIN-UNIVERSITARIO-I.pdf>.
- González, J. (2016). Prototipo de energía eléctrica fotovoltaica para el laboratorio de energía de la Escuela Colombiana de Ingeniería. <http://repositorio.escuelaing.edu.co/handle>.
- Ideam (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales) (2015). Atlas de radiación solar, ultravioleta y ozono de Colombia. <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasRadiacion.html>.
- EPRI (Electric Power Research Institute) (2011). OpenDSS PVSys-tem Element Model-Versión 1.
- EPRI (Electric Power Research Institute) (2016). OpenDSS Manual- Reference Guide.
- NREL (National Renewable Energy Laboratory) (2010). Concentrating Solar Power- Best Practices Handbook for the Collection and Use of Solar Resource Data. <http://www.nrel.gov/docs/fy10osti/47465.pdf>.
- Minminas, UPME (Unidad de Planeación Minero Energética) (2016). *La República* (marzo de 2012). Colombia, un mercado con potencial en energía solar. http://www.larepublica.co/responsabilidad-social/colombia-un-mercado-con-potencial-en-energ%C3%ADa-solar_3773.
- UPME (Unidad de Planeación Minero Energética), Minminas (3 de febrero de 2016). Resolución 045 del 3 de febrero de 2016. Colombia.
- UPME (Unidad de Planeación Minero Energética), Minminas. (2016). Resolución 143 de 2016. Colombia.