



2019 10 al 13 de septiembre - Cartagena de Indias, Colombia

## RETOS EN LA FORMACIÓN DE INGENIEROS EN LA ERA DIGITAL

# PROPUESTA DE UN MODELO INTELIGENTE DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA APLICADO EN REDES DE SISTEMAS HÍBRIDOS DE GENERACIÓN RENOVABLE NO CONVENCIONAL

**José Ulises Castellanos Contreras,  
Leonardo Rodríguez Urrego**

**Universidad EAN  
Bogotá, Colombia**

**Jose Luis Ramírez Arias**

**Universidad Cooperativa de  
Colombia  
Bogotá, Colombia**

### Resumen

A nivel mundial se viene desarrollando múltiples esfuerzos por promover el uso de procesos alternativos de generación de energía a partir de recursos renovables no convencionales. Las Naciones Unidas en su programa de desarrollo sostenible propuso que para el 2030 el 100% de la población tuviera una energía asequible, confiable, sostenible con la participación de las energías renovables. Colombia está ubicada en una zona donde se presentan diferentes fenómenos climatológicos que benefician este tipo de energías, (viento, sol, geotermia, mareomotriz, etc.) Y a su vez presenta cambios drásticos del clima por fenómenos denominados el Niño y la Niña; donde el país ha experimentado desabastecimiento de energía recurriendo a la generación a partir de combustibles fósiles. La Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME) destaca por lo menos 100 proyectos que emplearan el uso de energías renovables no convencionales; pero la viabilidad de estas está soportada en experiencias de otros países con políticas gubernamentales y comerciales muy diferentes.

La presente investigación propone como objetivo principal, el desarrollo de un modelo inteligente que pronostique el comportamiento de la energía eléctrica renovable no convencional en sistemas híbridos; basados en condiciones locales similares a los proyectos a implementar en Colombia. Los métodos usados para el desarrollo del modelo se basan esencialmente en la aplicación de técnicas de inteligencia artificial (Redes de Petri), que utiliza métodos matemáticos estocásticos para predecir comportamientos. Para su validación se pretende implementar el modelo en los laboratorios de energías que se encuentra en la Universidad EAN y compararlo con modelos utilizados

convencionalmente por otros países. El modelo inteligente pretende evaluar resultados en función de la generación, fallos, demanda, respuesta, confiabilidad entre otras; que influyen en la toma de decisión de los sistemas híbridos.

Para el caso de estudio se implementará una Smart Grid, con sistemas de control y adquisición de datos en una planta piloto de generación de energía híbrida en los laboratorios de la Universidad EAN y si hay lugar se llevara el modelo a empresas de generación híbrida. Este último aspecto permite vincular el modelo propuesto a la industria eléctrica.

**Palabras clave:** energía; modelo; smart grid

### **Abstract**

*At the global level, multiple efforts have been developed to promote the use of alternative processes for the generation of energy from non-conventional renewable resources. The United Nations in its sustainable development program propose that by 2030 100% of the population had affordable, reliable, sustainable energy with participation of renewable energy. Colombia is in an area where different weather phenomena are present that benefit this type of energy, (wind, sun, geothermal, tidal, etc.). At the same time, presents has drastic climate changes due to phenomena called El Niño and La Niña; where the country has experienced energy shortages and have drawn on the generation with fossil fuels. The Mining and Energy Planning Unit (UPME) highlights at least 100 projects that will use the use of non-conventional renewable energies; but the viability of these is supported in experiences of other countries with very different governmental and commercial law energy. The present investigation proposes as main objective, the development of an intelligent model that predicts the behaviour of nonconventional renewable electric energy in hybrid systems; based on local conditions like the projects to be implemented in Colombia. The methods used for the development of the model are based essentially on the application of artificial intelligence techniques (Petri nets), which uses stochastic mathematical methods to predict behaviour. For its validation, it is intended to implement the model in the energy laboratories found at the EAN University of Colombia and compare it with models conventionally used by other countries. The intelligent model aims to evaluate results based on generation, failures, demand, response, reliability among others; that influence the decision making of hybrid systems.*

*For the case study, a Smart Grid will be implemented, with control and data acquisition systems in a hybrid power generation pilot plant in the EAN University laboratories, and if there is a possible, the model will be taken to hybrid generation industrial companies. This last aspect allows linking the proposed model to the electricity industry.*

**Keywords:** energy; model; smart grid

## 1. Introducción

Según la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA), en su informe de progreso energético del 2019, indica que en el año 2016 cerca del 24% de la energía eléctrica consumida a nivel mundial era generada por fuentes renovables. En la figura 1 se muestra el crecimiento de la energía por uso final, el cual no alcanza la meta de las Naciones Unidas en su objetivo de desarrollo sostenible 7 que es el de “Garantizar el acceso a una energía asequible, confiable, sostenible y moderna para todos”. (AIE, IRENA, UNSD, BM, OMS, 2019)

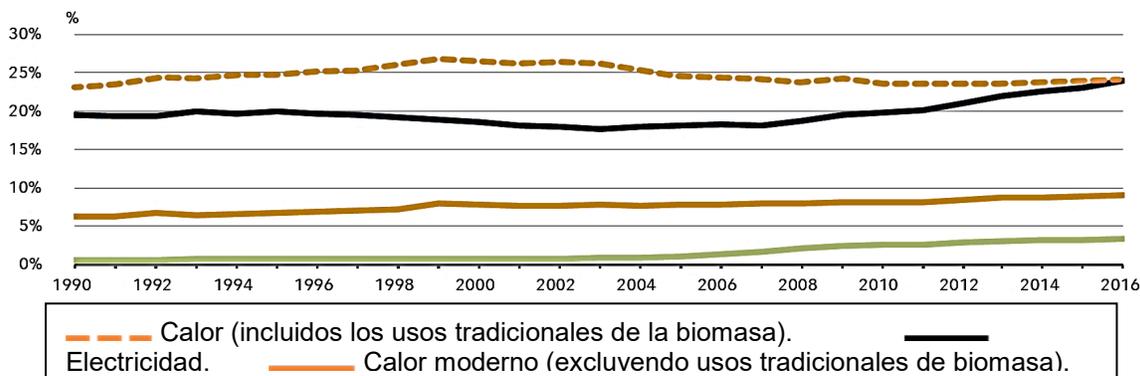


Figura 1. Participación de renovables en el consumo, por tipo de uso final, 1990-2016 (AIE, IRENA, UNSD, BM, OMS, 2019)

El crecimiento de la generación de energía para uso eléctrico, en los últimos 10 años obedece a políticas gubernamentales, apoyo económico estatal y el esfuerzo de organizaciones; las cuales promueven un desarrollo sostenible principalmente de países desarrollados. Este comportamiento se ve reflejado en la figura 2, donde la generación hidroeléctrica sigue predominando y fuentes de energía no convencional, predominan en países con desarrollo tecnológico.

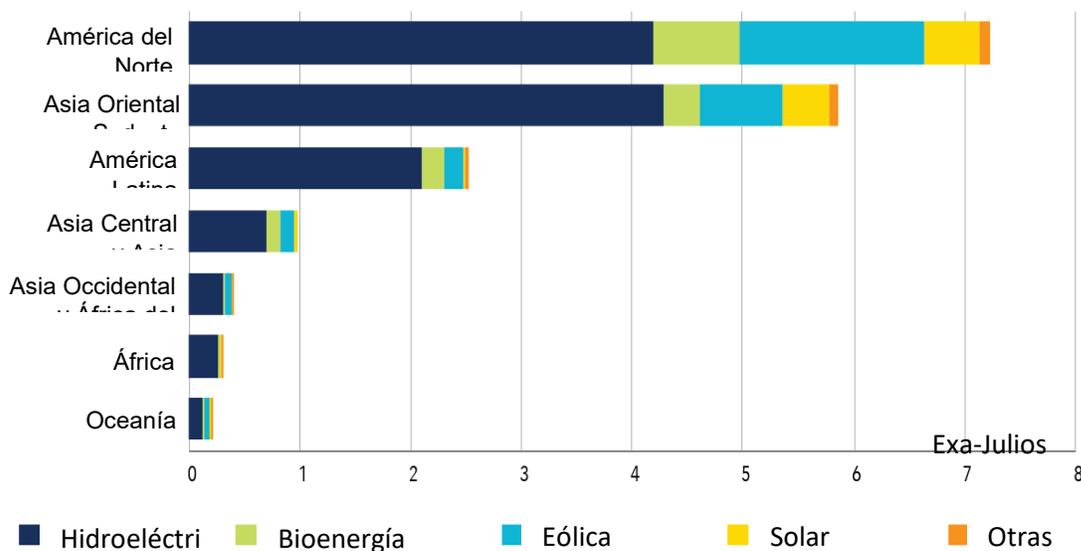


Figura 2. Consumo de Energía Eléctrica Renovable por región en el año 2016. (AIE, IRENA, UNSD, BM, OMS, 2019)

En América Latina y el Caribe, la energía hidroeléctrica siguió siendo la mayor fuente de electricidad renovable, pero la bioenergía y el viento se expandieron rápidamente, lo que generó diversificación, esto se debe a la inversión mundial en proyectos de energía renovables que entre los años 2004 al 2016, ha pasado de 40 a 270 miles de millones de dólares por año a nivel mundial. (REN21, 2017)

Un reflejo del incremento de la inversión en energías renovables es el desarrollo de patentes registradas a nivel mundial en los últimos años. La Oficina Europea de Patentes (EPO), y el Índice Global de Patentes en el informe 2010-2014, manifestó 300 códigos de investigación que relaciona las Smart Grid asociadas a energías renovables para solicitudes de patentes presentadas, que brindan información sobre las tecnologías de pequeñas redes de energía renovables que se están financiando, así como los niveles de interés general.

Este informe refleja que la mayoría de las solicitudes de patentes se centró en herramientas para modelado y simulación de Smart Grids. Las oficinas de patentes que presentaron la mayoría fueron China, con más de 540 solicitudes de patentes, seguidas por los Estados Unidos, la Organización Mundial de la Propiedad Intelectual (OMPI) para patentes internacionales, Japón, OEP, Canadá, la República de Corea, Alemania, Australia y Taipéi China. (EPO, 2015). Las principales empresas generadoras de patentes según el informe se encuentran en la figura 3.

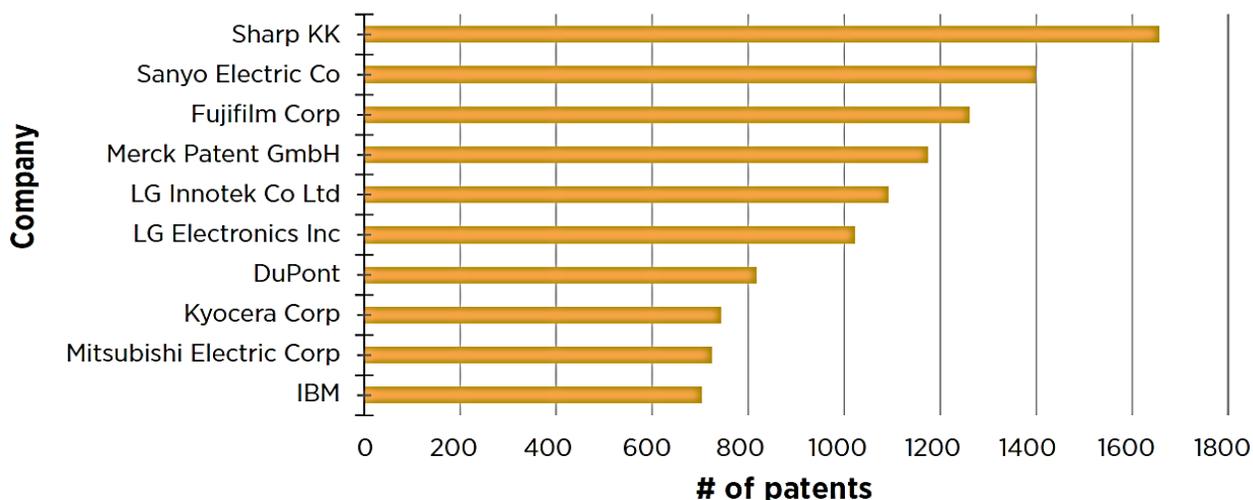


Figura 3. 10 principales empresas que presentaron patentes para el modelado y simulación relacionadas con Smart Grid del 2010 a 2014 (EPO, 2015)

Un gran número de patentes también se registraron a nivel internacional a través de la OMPI, y para toda Europa a través de la EPO. Las empresas que poseen la mayor cantidad de patentes en tecnología aplicada a Smart Grid para el período 2010-2014 se muestran en la figura 4.

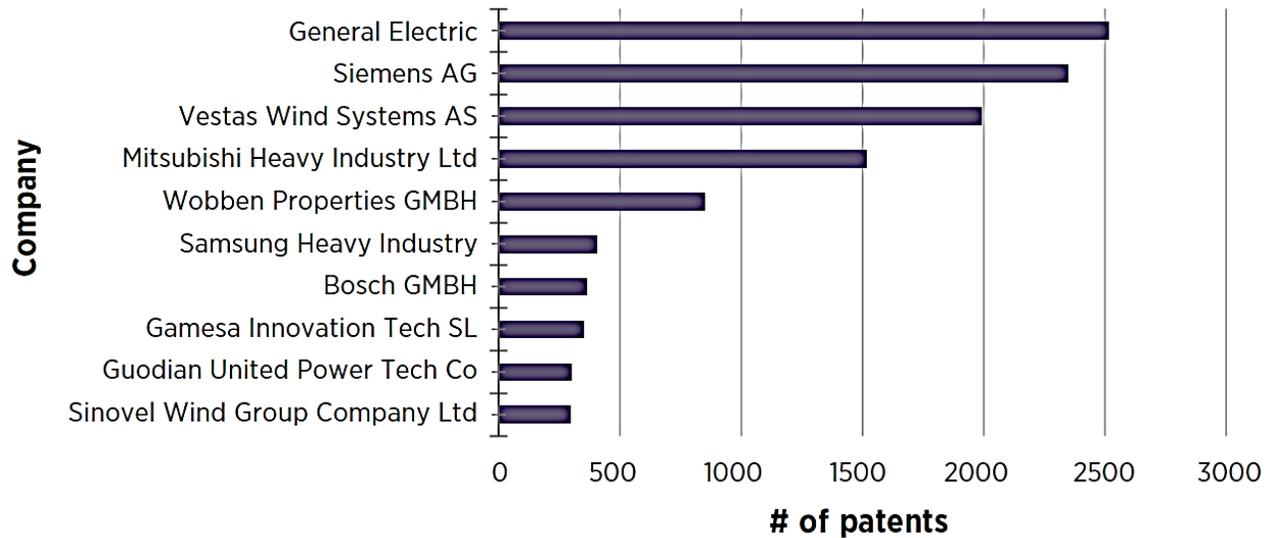


Figura 4. 10 principales empresas que presentaron patentes en tecnología desde 2010 hasta 2014 con relación a Smart Grid. (EPO, 2015)

En el caso de Colombia, se ha comenzado por la regularización de políticas energéticas que tienen como objetivo central la de maximizar la contribución del sector energético al desarrollo sostenible del país. Para ello ha tomado modelos de diferentes estudios de la comunidad internacional, que se agrupan en:

- Modelos de optimización. Utilizados para el análisis a corto plazo; por ejemplo, en la asignación eficiente de recursos como es el despacho programado de las plantas de generación.
- Modelos económicos. Son econométricos, basados en la estadística para pronosticar el comportamiento de la oferta y la demanda, aplicados para el corto y mediano plazo.
- Modelos de simulación. Aptos para obtener las variables relevantes de los mercados eléctricos que por lo general son, las limitaciones de los agentes generadores y su base de decisiones de generar en función a sus expectativas, habilidades de aprendizaje, asimetrías en la información, modelación de ciclos de realimentación y retardos asignados a la interconexión. (Hoyos, Franco, & Dyner, 2017).

## **2. Tecnologías Presentes**

En el aspecto técnico la UPME en su documento "Smart Grid Visión 2030", plantea que la integración depende de la existencia de una infraestructura de TIC altamente fiable, segura y que garantice la interoperabilidad para dar soporte a la infraestructura eléctrica. La UPME valora 4 tecnologías, Sistemas de medición avanzada, Recursos distribuidos, transporte eléctrico y Automatización de redes distribuidas; sobre esta última tecnología se basa el desarrollo de la investigación doctoral.

La automatización en las redes depende de factores importantes a tener en cuenta cuando se generan los modelos para su simulación, como son:

- Sistemas de control remoto. Elementos de control sobre el corte y maniobra de la red para modificar su distribución y reducción de tiempos de reposición del suministro.
- Respuesta a la demanda. Análisis de entrada y salida de demandas fijas o variables según importancia de la gestión.
- localización de fallas. Métodos complejos de optimización de análisis de fallas.
- Autocorrección de fallas. Procesos de detección, pronóstico y corrección de fallas.
- Reconfiguración automática. Desarrollo de algoritmos en función de la topología de la red cambiante.
- Gestión de la red. Actividades para el mantenimiento de red, planificación de generación, optimización de distribución. (BID, 2016)

### **3. Modelo Propuesto (Redes de Petri)**

El modelo que se propone se fundamenta sobre las Redes de Petri que se consideran una herramienta gráfica y matemática que describe el comportamiento de un sistema dinámico en términos de transiciones entre estados. Es utilizada con mucha frecuencia para describir y estudiar sistemas de procesamiento de información que pueden tener eventos concurrentes, distribuidos, asíncronos, no deterministas, paralelos y/o estocásticos. También permite visualizar el comportamiento del sistema gráficamente, como lo pueden hacer otro tipo de métodos como los diagramas de bloque, diagramas de flujo, redes y cadenas de Markov, con la diferencia de que su estructura gráfica la hace más atractiva e intuitiva para ciertas aplicaciones con sincronización de eventos. La Red de Petri para su modelado matemático se puede analizar a través de ecuaciones de estado, ecuaciones algebraicas y otros posibles métodos. Dentro de las aplicaciones típicas de las Redes Petri que de ahora en adelante se denominara RdP, se encuentran el modelado de protocolos de comunicación, redes de información, algoritmos distribuidos, sistemas embebidos, procesos de manufactura, procesos de negocio y flujos de trabajo. (Lu, Fakhm, Zhou, & Francois, 2010).

Para análisis de fallos en redes distribuidas, Rodríguez L. Presenta un método de punto fijo latente (por sus siglas en inglés LNM) que consiste en observar el comportamiento de un sector como todo un sistema determinar el fallo y seguir con otro sector. La gran ventaja que para sistemas híbridos es un método sencillo y fácil de implementar para el diagnóstico de fallas en cualquier sistema complejo. Este método es muy adecuado cuando se consideran muchos sensores y señales diferentes, independientemente de si su naturaleza es discreta, continua o ambas. (Rodríguez, Garcia, Morant, Correcher, & Quiles, 2013). La aplicación de RdP directamente en Smart Grid la presenta Qachchachi N. En un modelo simulado como un sistema supervisado en una pequeña micro malla híbrida de CA / CC en modo conectado a la red. Este modelo consiste en verificar el funcionamiento del sistema con diversas condiciones de carga y generación. Además, se desarrolló un algoritmo de supervisión sobre la RdP para la identificación de los posibles estados físicos del sistema. Para su comprobación se utilizó el entorno MATLAB / SIMULINK Sobre la base del modelado. De esta investigación surge la importancia de análisis por escenarios de la generación. (Qachchachi, Mahmoudi, & Hasnaoui, 2016)

#### 4. Experimentación

La experimentación se ha realizado sobre un modelo de gestión de generación de energía en CNP Tools, modelando un sistema de energía de fuentes múltiples compuesto por sistema fotovoltaico (PV), almacenamiento por baterías, generación eólica y conexión a la red eléctrica, frente a una demanda variable. Figura 5. El sistema está pensado en implementarse en los laboratorios de energías de la Universidad EAN.

La estrategia de control apunta a administrar el flujo de energía en función de la respuesta a la demanda y con respaldo de la red pública. El modelo de gestión energética que se está proponiendo va en la primera fase sobre redes de Petri. Los primeros resultados muestran que el enfoque por escenarios autónomos puede ser válido y puede ser una solución, pensando en Smart Grid para autoconsumo eléctrico en edificios inteligentes y puede contribuir a un mejor equilibrio entre la generación, la demanda y la futura gestión de la energía. Figura 6.

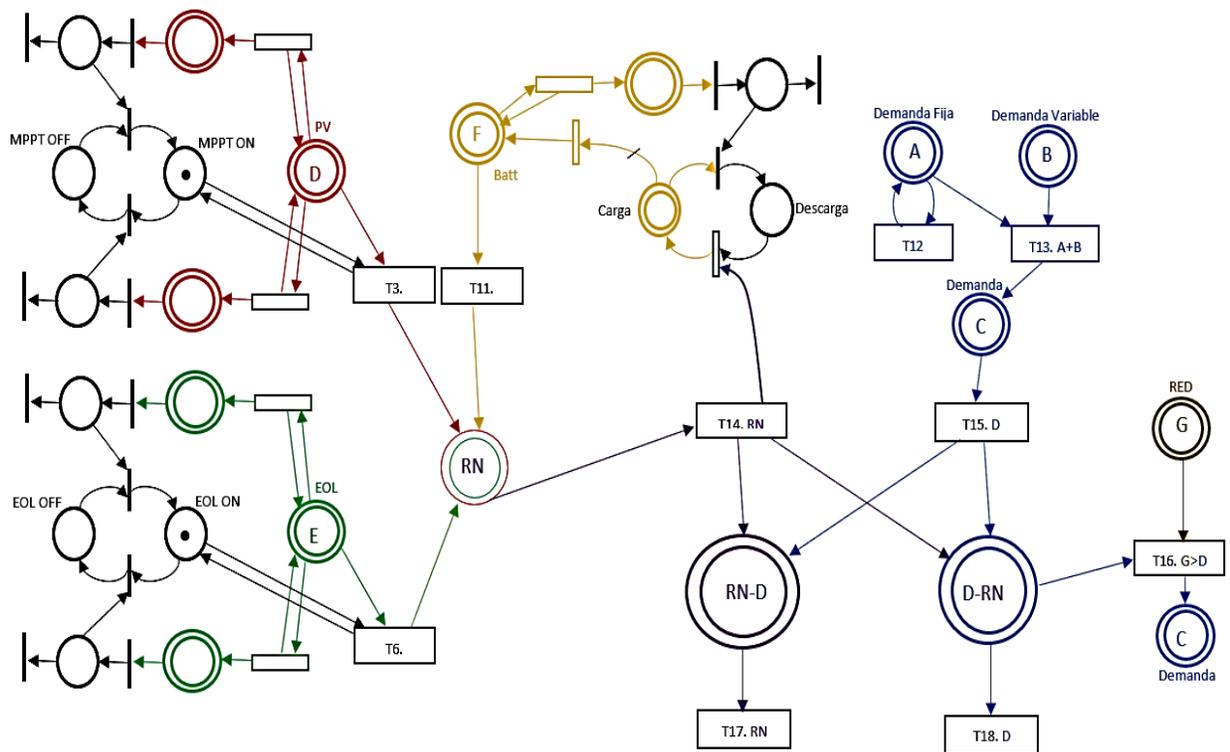


Figura 5. RNP de un sistema de generación de múltiples fuentes de energía

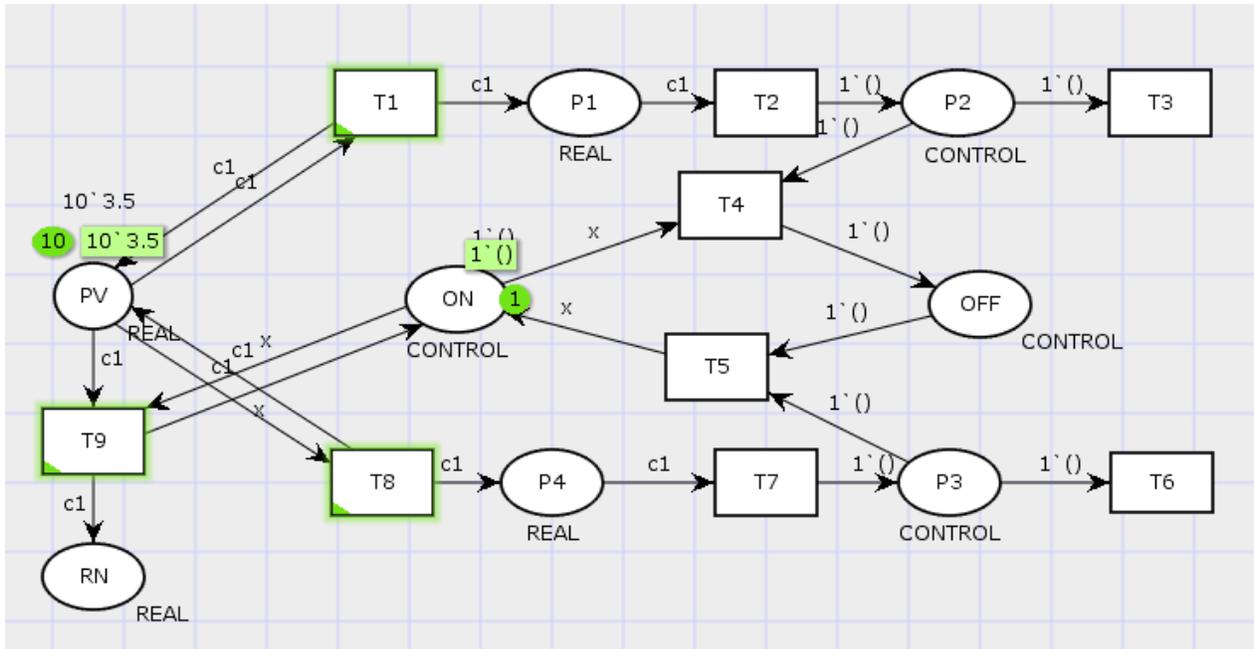


Figura 6. Escenario de control de activación de PV para ingresar a la red (RN) en CNP Tools.

## 5. Conclusiones y avances de la investigación

Es de acotar que el modelo antes propuesto se debe refinar con la inclusión del análisis de fallo, el sistema de comunicación inteligente todo sobre redes de Petri y en un nodo de generación se implementara un control inteligente utilizando inteligencia artificial con análisis de Big Data. El modelo resultante se implementará en el laboratorio de energía como caso de estudio.

Desde el punto de vista de la integración de la generación de energía renovable, es necesario la interacción de las empresas de servicios públicos, los generadores de energía renovable y los usuarios finales, para poder pensar en un futuro en construcciones sostenibles con "enrutadores" de energía, cuyo objetivo es administrar la demanda de energía en tiempo real para ajustar la generación de electricidad. Esto hace que el usuario final, tenga el control del uso de energía, las horas de funcionamiento y los precios. Hay que pensar en la supervisión de la administración de sistemas de energía de múltiples fuentes (PV, baterías, eólico y conexión de la red). De acuerdo con la necesidad, con cargas restringidas (Demanda fija y variable).

Para la visión al 2030 de la UPME en su conclusión "fomentar la generación de conocimiento local y de capital humano especializado, posicionando a Colombia como referente regional" es necesario la articulación del Estado con la Academia, para desarrollar tecnologías adaptadas a las necesidades del país; brindando un espacio para el apoyo a desarrollos de investigación.

## 6. Referencias

- AIE, IRENA, UNSD, BM, OMS. (2019). *Seguimiento de SDG7: Informe de Progreso Energético (2019)*. Banco Mundial. Washington: Banco Internacional para la Reconstrucción y el Desarrollo 2019. Recuperado el 2 de junio de 2019, de <https://irena.org/publications/2019/May/Tracking-SDG7-The-Energy-Progress-Report-2019>
- BID. (2016). *Smart Grid Colombia Visión 2030-I*. Bogotá D.C.: Banco Interamericano de Desarrollo. UPME. Ministerio de Minas y Energía.
- EPO. (1 de octubre de 2015). *Global Patent Index*. Recuperado el 20 de mayo de 2019, de European Patent Office: <https://www.epo.org/news-issues/technology/sustainable-technologies/stromnetze.html>
- Hoyos, S., Franco, C. J., & Dyner, I. (2017). Integración de fuentes no convencionales de energía renovable al mercado eléctrico y su impacto sobre el precio. *Ingeniería y Ciencia*, 13(26), 115-146.
- Lu, D., Fakhm, H., Zhou, T., & Francois, B. (2010). Applications of Petri nets for the energy management of a photovoltaic based power station including storage units. *Renewable Energy*, 1117-1124.
- Qachchachi, N., Mahmoudi, H., & Hasnaoui, A. (2016). Smart Hybrid AC/DC Microgrid: Power Management Based Petri Nets. *2016 International Conference on Information Technology for Organizations Development (IT4OD)* (págs. 50-56). Morocco: IEEE Xplore.
- REN21. (2017). *Renewables 2017 Global Status Report*. Paris: REN21 Secretariat.
- Rodriguez, L., Garcia, E., Morant, F., Correcher, A., & Quiles, E. (2013). Hybrid Analysis in the Latent Nestling Method Applied to Fault Diagnosis. *IEEE Transactions on Automations Science and Engineering*, 415-430.

## Sobre los autores

- **José Ulises Castellanos Contreras:** Ingeniero Electrónico, Máster en Ingeniería Mecánica y Mecatrónica, Estudiante de Doctorado en Ingeniería de Procesos Universidad EAN. [jcastel60808@universidadean.edu.co](mailto:jcastel60808@universidadean.edu.co)
- **Leonardo Rodríguez Urrego:** Ingeniero Mecatrónico, Máster en Automática e Informática Industrial, Doctor en Automática, Robótica e Informática Industrial. Profesor titular Universidad EAN. [lrodriguez@universidadean.edu.co](mailto:lrodriguez@universidadean.edu.co)
- **José Luis Ramírez Arias:** Ingeniero Mecatrónico, Máster en Sistemas Automáticos de Producción, Doctor en Science Pour Ingenieur. Profesor titular Universidad Cooperativa de Colombia. [jose.ramirez@campusucc.edu.co](mailto:jose.ramirez@campusucc.edu.co)

---

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

Copyright © 2019 Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería (ACOFI)