

# CONTROL DE FLUJO DE ENERGÍA EN UNA MICRO-RED ELÉCTRICA BASADA EN ENERGÍAS RENOVABLES

Núñez Palomares José Jesús (1), Lozano García José Merced (2)

1 [Licenciatura en Ingeniería Eléctrica, Universidad de Guanajuato] | Dirección de correo electrónico: [jjchucho@gmail.com]

2 [Departamento de Ingeniería Eléctrica, División de Ingenierías, Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato] | Dirección de correo electrónico: [jm.lozano@ugto.mx]

## Resumen

En el presente trabajo se presenta el modelado, simulación y análisis operativo de una micro-red eléctrica cuando opera con un controlador supervisor basado en un control PI tradicional. Para la realización del proyecto se asume una configuración genérica de micro-red eléctrica conformada por fuentes renovables de energía como aerogeneradores, paneles fotovoltaicos y dispositivos de almacenamiento; mientras que su comportamiento se analiza en conexión con un sistema eléctrico principal. En éste sentido, el controlador desarrollado se encargará de gestionar la potencia disponible en la micro-red y en el sistema principal, a fin de suministrar la potencia demandada por la carga local en todo momento. El sistema completo es modelado de forma detallada con Simulink, herramienta del software Matlab®, a fin de establecer de forma precisa la interacción dinámica entre los diferentes dispositivos que conforman el sistema bajo análisis. Mediante simulaciones numéricas se analiza el caso de estudio en el cual, como la potencia generada por la micro-red es mayor que la potencia demandada por la carga, el controlador actúa de tal forma que el excedente de potencia es enviado hacia el sistema de suministro principal. Finalmente, con los resultados obtenidos es posible validar la operación del controlador desarrollado.

## Abstract

In this report, the modeling, simulation and operative analysis of an electrical micro-grid, operating under a traditional PI supervisory controller is presented. For the project, a generic micro-grid configuration consisting of renewable energy sources such as wind turbines, photovoltaic panels and energy storage devices is assumed; whereas its performance is analyzed in connection with a main power grid. In this sense, the developed controller will be in charge of managing the power available in the microgrid and the main grid, in order to supply the power demanded by the local load at all times. The complete system is modeled in detail with Matlab® Simulink to establish accurately the dynamic interaction between the various devices that make up the system under analysis. Through numerical simulations, it is analyzed the case study in which as the power generated by the microgrid is greater than the power demanded by the load, the controller acts so that the surplus power is sent to the main supply system. Finally, the results obtained serve to validate the operation of the controller developed.

## Palabras Clave

Micro-redes eléctricas, Fuentes renovables de energía, Control, Flujos de potencia.

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad, los combustibles fósiles son la principal fuente de energía a nivel mundial y representan uno de los principales motores de la economía global. No obstante, la utilización a gran escala de éste recurso ha sido uno de los factores determinantes en la generación de los problemas ambientales a los que ahora se enfrentan la mayor parte de los gobiernos, obligándolos a buscar mejores alternativas para la generación de energía eléctrica. En este contexto, la generación de energía eléctrica por medios renovables y limpios tales como la energía solar y la energía eólica han recibido una gran atención por parte de ingenieros e investigadores, quienes se han dado a la tarea de desarrollar las tecnologías necesarias para poder producir grandes cantidades de energía eléctrica a través de estos medios. Hoy en día, por ejemplo, en la literatura abierta se cuenta con un extenso marco de referencia sobre diversos tipos de máquinas desarrolladas para aplicaciones relacionadas con la generación eólica [1-2]. En relación a la tecnología fotovoltaica se han reportado una gran cantidad de sistemas compuestos principalmente por conjuntos de celdas fotovoltaicas y dispositivos tanto de acondicionamiento como de almacenamiento de energía; asimismo, se han propuesto un gran número considerable de técnicas y estrategias empleadas para maximizar el desempeño de los sistemas de generación solar [3-4].

De igual forma los sistemas híbridos diseñados para la generación de energía eléctrica mediante la combinación de estos dos tipos de tecnología, se comienza a situar como una excelente opción para la producción de energía de forma masiva, debido principalmente a sus características complementarias. Por tal motivo, la tendencia actual que siguen los sistemas eléctricos va dirigida hacia la implementación de redes eléctricas de menor capacidad, suministradas por pequeñas unidades de generación distribuidas a lo largo del sistema de potencia e implementadas en muchos casos por generadores basados en fuentes renovables. A este nuevo tipo de estructuras dentro de los sistemas eléctricos se les conoce como micro-redes y se enmarcan dentro del nuevo concepto de las Redes Eléctricas Inteligentes (REI) [5-6].

En años recientes se han presentado una gran variedad de publicaciones técnicas referentes al desarrollo de modelos analíticos, análisis operativos, proyectos pilotos, entre otros temas relacionados con este tipo de sistemas. Una gran parte de estos trabajos se enfocan a diseño de estrategias para el control central de los mismos, con el objetivo de optimizar su operación [7-8].

Bajo la revisión del estado del arte de los temas relacionados a las micro-redes eléctricas, en el presente trabajo se propone el modelado y simulación de una micro-red eléctrica híbrida operada bajo un control supervisor, basado en un controlador PI, utilizado para regular el flujo de potencia activa hacia una carga local.

## MICRO-REDES ELÉCTRICAS

El concepto de micro-red fue propuesto por primera vez por el Consortium for Electric Reliability Technology Solutions (CERTS) [9], y se puede entender como la interconexión de diversas unidades de generación distribuida (DGU) como micro-turbinas, módulos fotovoltaicos, celdas de combustible, generadores eólicos, etc., por nombrar algunos. Asimismo, las micro-redes pueden contener unidades de almacenamiento de energía (DSU) y cargas controlables [9]. En la figura 1 se observa una configuración general de micro-red eléctrica.

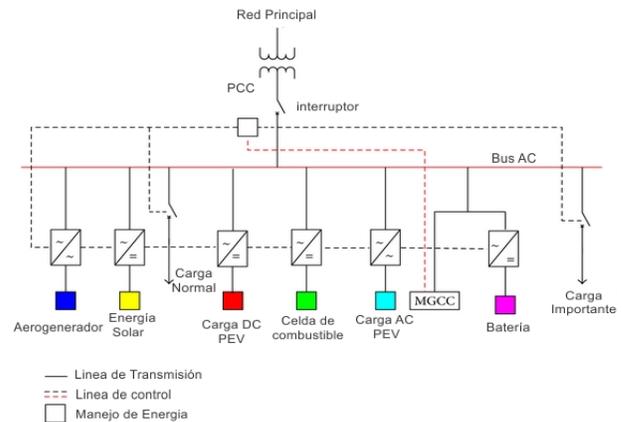


FIGURA 1: Diagrama general de una micro-red híbrida

La operación de una micro-red eléctrica básica se puede dar bajo cualquiera de las siguientes dos configuraciones generales: i) conectada con la red

eléctrica principal, y *ii*) sin conexión de la red principal. En el primer modo de operación, la micro-red puede aprovechar la energía proveniente de la red principal para suplir la demanda energética. Por su parte, la red eléctrica principal ve a la micro-red como una celda de energía controlable capaz de responder en segundos a las necesidades del sistema, mejorando con esto la confiabilidad local, además de brindar soporte ante posibles variaciones de voltaje en la vecindad del punto de acoplamiento común. Por otro lado, cuando la micro-red opera en modo aislado tiene como principal objetivo la optimización del flujo de potencia entre las UDG, los dispositivos de almacenamiento y las cargas conectadas a ésta.

## MODELADO DE LOS ELEMENTOS DE LA MICRO-RED

La estructura de la micro-red bajo análisis se muestra en la figura 2.

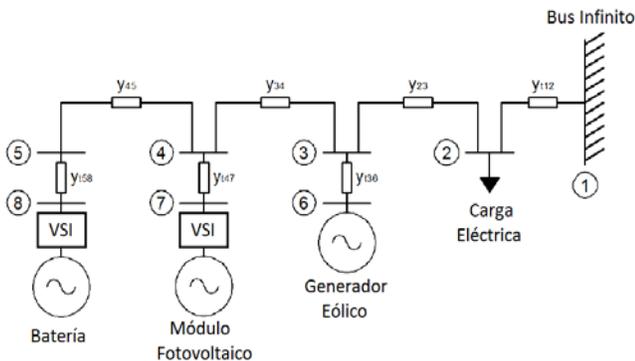


FIGURA 2: Diagrama unifilar de la micro-red bajo análisis

En el presente trabajo, cada uno de los elementos que conforma la micro-red de la figura 2, se modela de forma detallada en Simulink de Matlab®. A continuación se presentan los modelos de los elementos más importantes.

### Módulo Fotovoltaico

El modelo de módulo fotovoltaico implementado, es el modelo de un solo diodo, figura 3, el cual está basado en la bien conocida ecuación del diodo Shockley [8]. El circuito de la figura 3, permite representar los módulos fotovoltaicos con sencillez y un alto grado de precisión. Para una

descripción de las ecuaciones que resuelven el circuito de la figura 3 y modelan el panel fotovoltaico, referirse a la referencia [8].

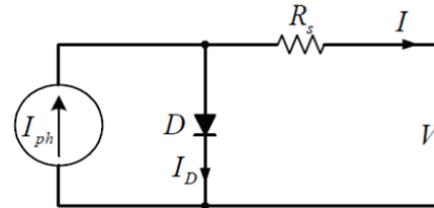


FIGURA 3: Modelo equivalente de un solo diodo para un módulo fotovoltaico

La curva de radiación solar considerada para el presente trabajo se observa en la figura 4.

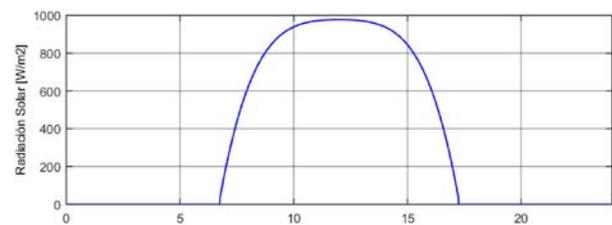


FIGURA 4: Radiación solar durante las 24 horas

### Aerogenerador

Para simular el aerogenerador se utilizó el modelo de turbina eólica de la librería de Simulink, acoplado al modelo simplificado de una máquina síncrona trifásica, figura 5. Para la simulación, se consideró una velocidad de viento constante al igual que un ángulo constante para las palas de la turbina.

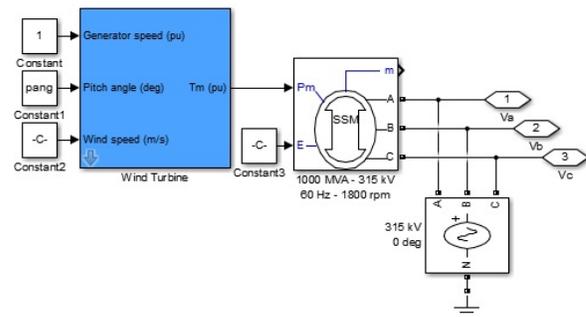


FIGURA 5: Modelo de aerogenerador en Simulink

### Batería

Para el caso de la batería también se utilizó el modelo de batería contenido en la librería

SimPower Systems de Simulink, configurada como una batería genérica de Niquel-Cadmio, cuyas ecuaciones de carga y descarga se muestran en la documentación contenida en la sección de ayuda de Simulink.

### Fuente inversora de Voltaje

Los módulos fotovoltaicos y la batería, se interconectan con el sistema a través de una Fuente Inversora de Voltaje (VSI), la cual realiza la conversión de energía de CD a CA. La configuración utilizada para la VSI es un puente trifásico de seis pulsos, conformada por IGBTs como se observa en la figura 6. La VSI será controlada mediante la técnica de modulación SPWM (Sinusoidal Pulse Width Modulation), la cual permite generar voltajes controlables tanto en magnitud como en frecuencia y fase; por lo tanto, este dispositivo será quien ejecute las acciones de control determinadas por el control supervisor.

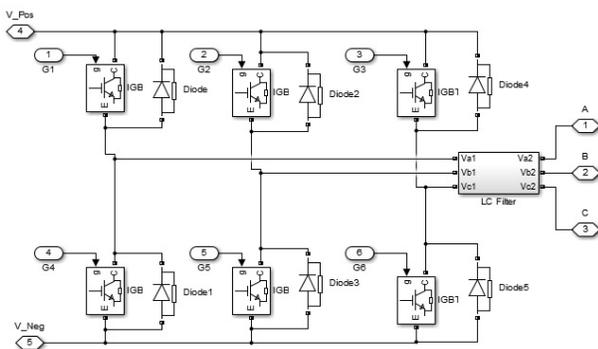


FIGURA 6: Fuente Inversora de Voltaje trifásica de seis pulsos

## RESULTADOS DE SIMULACIÓN

El diagrama del sistema bajo análisis, implementado en Simulink de Matlab®, se muestra en la figura 8. Para el caso de estudio del presente trabajo la micro-red opera en conexión con el sistema eléctrico principal y el control supervisor se encargará de satisfacer la potencia demandada por la carga en todo momento mediante las siguientes acciones:

- Cuando la potencia generada por la micro-red sea menor que la potencia demandada por la carga, el controlador deberá establecer las

señales de control necesarias para que el sistema principal aporte la potencia faltante.

- Cuando la potencia generada por la micro-red sea mayor que la potencia demandada por la carga, el controlador deberá establecer las señales de control necesarias para que el excedente de potencia sea suministrado al sistema principal.

De esta forma, el diagrama de control para el controlador supervisor utilizado es como se muestra en la figura 9.

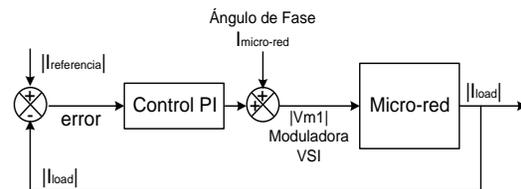


FIGURA 9: Diagrama de control del controlador supervisor

Para verificar la operación del controlador supervisor se realizaron una serie de simulaciones con el sistema implementado en Simulink. En el caso que se presenta, la micro-red genera una potencia mayor a la demandada por la carga, los resultados se muestran en las figuras 10 y 11. La figura 10 muestra las magnitudes de los voltajes en la red, siendo claro como el controlador modifica los voltajes de tal forma que el flujo de potencia se produzca de izquierda a derecha en el diagrama de la figura 8.

En la figura 11 se presentan las magnitudes de las corrientes en varias de las líneas del sistema. Tomando como referencia la figura 2, las corrientes mostradas son las siguientes:  $I_{pv}$  entre nodos 4 y 3,  $I_{aerogenerador}$  entre nodos 6 y 3,  $I_{micro-red}$  entre nodos 3 y 2, finalmente  $I_{sistema}$  es la corriente entre los nodos 1 y 2. A partir de ésta figura es posible validar la operación del controlador supervisor, ya que al revisar la magnitud de las corrientes es posible corroborar como al ser mayor la potencia generada por la micro-red, una parte se utiliza para suministrar la demanda de la carga y el resto se envía hacia el sistema.

## CONCLUSIONES

En el presente trabajo se presentó el modelado y

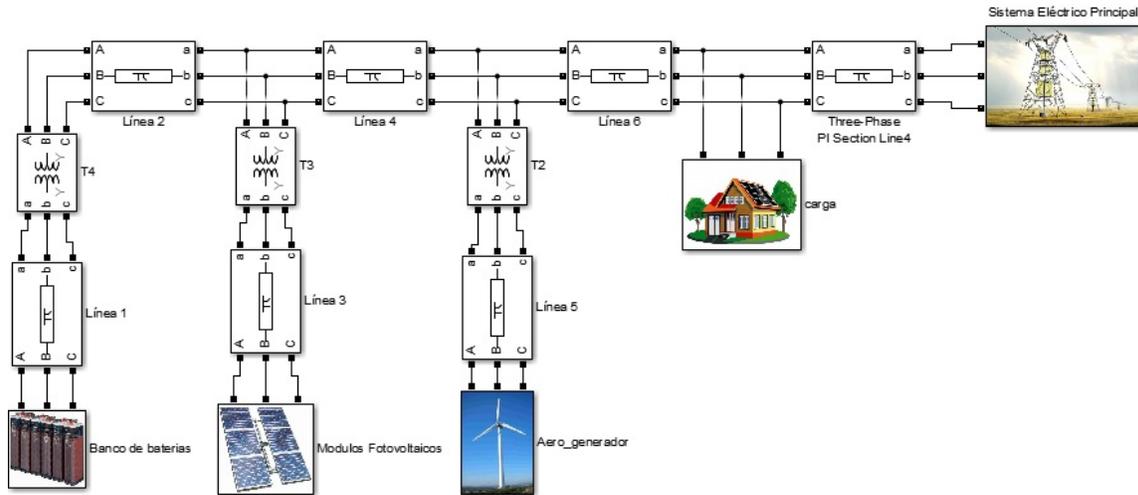


FIGURA 8: Micro-red implementada en Simulink de Matlab®

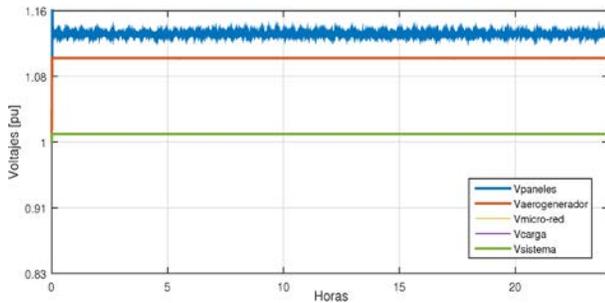


FIGURA 10: Voltajes de la fase a en varios puntos del sistema

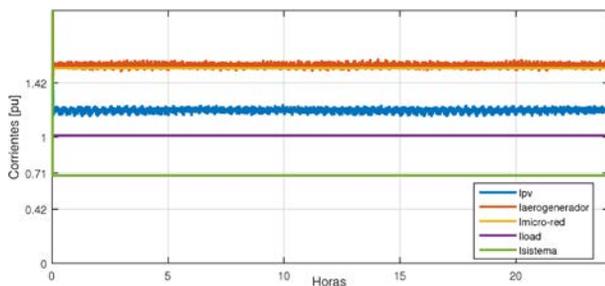


FIGURA 11: Magnitud de corrientes en varias líneas del sistema

simulación de una micro-red eléctrica en el software Simulink de Matlab®. Asimismo se desarrolló un controlador supervisor para controlar el flujo de potencia entre la micro-red y el sistema eléctrico principal. Mediante la implementación de modelos detallados es posible ver de forma más precisa la interacción de cada uno de los elementos de la micro-red y el sistema principal. Finalmente, se llevaron a cabo una serie de simulaciones, con las cuales fue posible validar

la operación del controlador supervisor desarrollado.

## REFERENCIAS

- [1] Cimuca, G.O., Saudemont, C. & Radulescu, M.M. (2006). Control and performance evaluation of a flywheel energy-storage system associated to a variable-speed wind generator. IEEE Trans. On Industrial Electronics, 53(4), 1074-1085.
- [2] Niu, S., Chau, K.T., & Jiang, Z. (2007). Design and control of a new double-stator cup-rotor permanent-magnet machine for wind power generation. Journal of Applied Physics. 105(7), 1-3.
- [3] Daniel, S.A., & Ammasai, N. (2004). A novel hybrid isolated generating system based on PV fed inverter-assisted wind-driven induction generators. IEEE Trans. On Energy Conversion. 19(2), 416-422.
- [4] Wang, Q. & Chang, L. (2004). An intelligent maximum power extraction algorithm for invertir-based variable speed wind turbine system. IEEE Trans. On Power Electronics. 19(5), 1242-1249.
- [5] Tang, G.Q. (2011). Smart grid management & visualization: Smart power management system. Proceedings of the International Conf. & Expo on Emerging Technologies for a smarter world. 1-6.
- [6] Hashmi, M. Hänninen, S. & Mäki, K. (2011). Survey of smart grid concepts, architectures and technological demonstrations worldwide. Proceedings of IEEE PES Conference on Innovative Smart grid Technologies. 1-7.
- [7] Shahid Khan, M. Irvani, M.R. (2007). Supervisory hybrid control of a microgrid system. IEEE Canada Electric Power Conference.
- [8] Raya Armenta, J.M. (2015). Análisis de una micro-red inteligente con un neurocontrolador como control supervisor. Tesis de Maestría (No publicada). Universidad de Guanajuato.
- [9] Lasseter, R.H. (2002). Microgrids: Large scale integration of micro-generation to low voltage grids. First International Conference on Integration of RES and DER.