

SISTEMA GESTOR DE UNA MICRORRED DE ENERGÍA RENOVABLES CON ENFOQUE A SISTEMAS INVERNADEROS

Hernández Jiménez Ana Eloísa, García Toribio Antonio de Jesús, Lara Alabazares David
Tecnológico Nacional de México
Instituto Tecnológico Superior de Misantla
Maestría en Ingeniería Industrial, departamento de posgrado
Km. 1.8 Carretera a Loma de Cojolite, Misantla, Veracruz
235-108-82-66

192t0056@misantla.tecnm.mx, 192t0052@misantla.tecnm.mx, dlaraa@misantla.tecnm.mx

RESUMEN

El desarrollo de las redes inteligentes (SG) es una alternativa factible para mejorar el abastecimiento de energía eléctrica incorporando energías renovables (ER), ofreciendo una solución en el aspecto de control y estabilidad de la red. Un elemento clave de las SG son las microrredes (MR), las cuales brindan beneficios al utilizarse en diversos escenarios, tales como el sector agrícola en el bombeo de agua y riego, y en el reciente uso de sistemas invernaderos que requieren de estrategias de control para un aprovechamiento óptimo de la energía suministrada al cultivo. Un invernadero es un espacio cerrado, que mantiene la temperatura, la humedad y otros factores ambientales dentro de los rangos deseados para favorecer el crecimiento de cultivos. La energía de un invernadero puede controlarse mediante sistemas gestores y técnicas de control. En el presente trabajo se muestra una modelación y simulación de un sistema gestor simplificado de energía usando Matlab/Simulink.

Palabras Clave: Redes inteligentes, Microrredes, Sistemas invernaderos.

ABSTRACT

The development of smart grids (SG) represents a feasible alternative to control the process of supplying electrical energy by incorporating renewable energy (ER), offering a solution in the aspect of control and stability of the grid. A key element of SGs are microgrids, which provide benefits when used in various settings. On the other hand, the agricultural sector is recently making use of greenhouse systems that require control strategies for optimal use of the energy supplied to the crop. A greenhouse is a closed space, which can keep temperature, humidity, and other environmental factors within the desired ranges to benefit crop growth. These factors can be controlled through management systems and control techniques. This paper shows a modeling and simulation of a simplified energy management system using Matlab/Simulink.

Keywords: Smart Grid, Microgrids, Greenhouse systems.

1. INTRODUCCIÓN

La disponibilidad de la energía eléctrica es fundamental para cualquier país. En la actualidad, los combustibles fósiles son los que proporcionan la estabilidad de la red eléctrica, sin embargo, estos traen consigo ciertas complicaciones al ser considerados como recursos finitos, con la repercusión que eso afecta el

precio, más aún con el posible peligro de agotamiento de las reservas. Las ER buscan reducir el uso de estos combustibles fósiles. La problemática actual es que las redes actuales de distribución eléctrica operan frecuentemente cerca de su máxima capacidad y deben adaptarse a frecuentes cambios para afrontar retos medioambientales y mejorar su confianza y sostenibilidad [1]. Las redes de energía tradicionales han estado experimentando muchos cambios, el desarrollo de sistemas híbridos basados en fuentes de energías renovables representa un nuevo paso hacia los nuevos sistemas de generación de energía [2]. La integración eficiente de la generación distribuida sólo es probable con la realización de cambios en la estructura de las redes de transporte y distribución, en la planificación, y en los procedimientos de operación. Las redes de distribución serán más activas y compartirán muchas de las responsabilidades de la transmisión. Una de las características del futuro dinamismo de las redes de distribución basadas en la generación distribuida (GD), será la capacidad de acomodarse a los flujos de potencia bidireccionales. [3]. Se conoce como GD a la aparición de pequeños generadores distribuidos en zonas cercanas a los lugares de consumo, de modo que se evitan las pérdidas asociadas al transporte y se hace un uso más eficiente tanto de la energía distribuida como de los activos instalados en las redes.

Es muy común que los sistemas de suministro con ER tengan algún aporte auxiliar, como un generador eléctrico diésel o una conexión a la red eléctrica alterna. Si ya existe la conexión, la red eléctrica suele ser la fuente auxiliar más económica. En este caso no hace falta el almacenamiento, sino que el sistema de suministro renovable interacciona con la red siempre y cuando la demanda no sea mayor al suministro renovable. [4]. Todos estos componentes adoptan un término que actualmente está tomando un auge importante dentro del campo de generación eléctrica, a estos sistemas se le llama redes inteligentes, estos sistemas integran a su vez microrredes eléctricas. Se puede definir a una microrred (MR) eléctrica como un sistema de generación eléctrica bidireccional la cual da la posibilidad de distribuir electricidad desde las plantas de generación hasta los consumidores y viceversa. Esto se logra empleando tecnología digital y electrónica de potencia, lo que favorece la integración de fuentes de ER, esto con el objetivo de ahorrar energía,

reducir costos e incrementar la fiabilidad. Los elementos que constituyen una MR son: sistemas de generación distribuida (fuentes), sistemas de almacenamiento de energía, técnicas para la gestión de cargas, sistemas de monitoreo y control del flujo de potencia y técnicas y procedimientos de mantenimiento preventivo. Las ventajas de las MR es que son autónomas, mejoran la calidad de la energía, son compatibles, escalables, con alta eficiencia, debido a que reducen las pérdidas de transmisión [5]. Estos sistemas particularmente cuentan con un sistema de gestión activa de la demanda, definida como la gestión por parte de la compañía y de las cargas del usuario final según un protocolo, prioridades y beneficios tarifarios. Esta funcionalidad permite optimizar el consumo de un cliente en base al comportamiento observado a un rango definido por el usuario y otras referencias adicionales tales como las condiciones meteorológicas. Este servicio avanzado de gestión permitirá conocer los consumos en tiempo real, hacer previsiones para optimizar el flujo de energía. Un sector muy importante que ha venido empleando últimamente las ER en MR es la agricultura en sus sistemas invernaderos, en los cuales se busca mantener controladas variables ambientales dentro de ciertos rangos, procurando una mejor eficiencia en cuanto al consumo de energía. Un sistema invernadero es una construcción confinada o cerrada de materiales translúcidos que emplea la radiación de luz solar para crear microambientes favorables para el crecimiento de plantas y este sistema debe ser capaz de proteger a los cultivos del medio ambiente externo. Los componentes que intervienen en diseño de estos sistemas son parte del equipo técnico necesario para controlar las variables medioambientales dentro del invernadero. En la Figura 1 se muestran de manera gráfica los elementos que intervienen en el control dentro de los sistemas invernaderos y son descritos en la Tabla 1.

Los invernaderos proporcionan cultivos de mejor calidad y los protegen de efectos ambientales, junto con la provisión de cultivos fuera de temporada. La calidad, cantidad y el crecimiento del cultivo pueden ajustarse mediante el control de parámetros y variables internas. Las principales variables para controlar en un invernadero son la concentración de CO₂, la temperatura, humedad, y la iluminación interior, sin embargo, se requiere más energía para mantener estas variables de control dentro de los rangos aceptables [6].

Tabla 1. Elementos de control de un invernadero inteligente

Simbología	Elementos
A	Sistema de iluminación artificial.
B	Sistema de ventilación.
C, D	Sistemas de calefacción y enfriamiento.
E	Sensor de temperatura y humedad.
F	Sensor de concentración de CO ₂ .
G	Generador de CO ₂ .
H	Rociadores.
I	Bomba de agua.
J	Sistema de reserva y transporte de agua.
K	Ventilación natural de aire.
-----	Información de control.
-----	Información ambiental.

Dentro de las investigaciones que se han propuesto hasta el momento está el elaborar sistemas de control enfocados a la optimización de sistemas invernaderos, optimizar el uso de la luz artificial, la producción de CO₂ y controlar las variables climáticas dentro del sistema [7]. El uso de controladores PID (Proporcional, Integral, Derivativo) para esta optimizar los sistemas invernaderos se pueden ver en [8], otros, como [9] emplean, otras alternativas, como lo son algoritmos genéticos para realizar la optimización de las variables de interés.

2. DESARROLLO

2.1. Modelo de un panel fotovoltaico

Un generador fotovoltaico consiste en un conjunto de celdas fotovoltaicas conectadas en serie y/o en paralelo para lograr las características eléctricas de potencia, corriente de corto circuito y voltaje de circuito abierto. El circuito equivalente de una celda fotovoltaica se muestra en la Figura 2. La energía generada por un módulo fotovoltaico es principalmente afectada por las condiciones ambientales (irradiancia y temperatura) y por el propio módulo. La corriente que genera la celda puede expresarse como [10]:

$$I = I_{ph} - I_0 \left\{ \exp \left[\frac{q(V_{cell} + IR_s)}{AkT} \right] - 1 \right\} - \frac{V_{cell} + IR_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

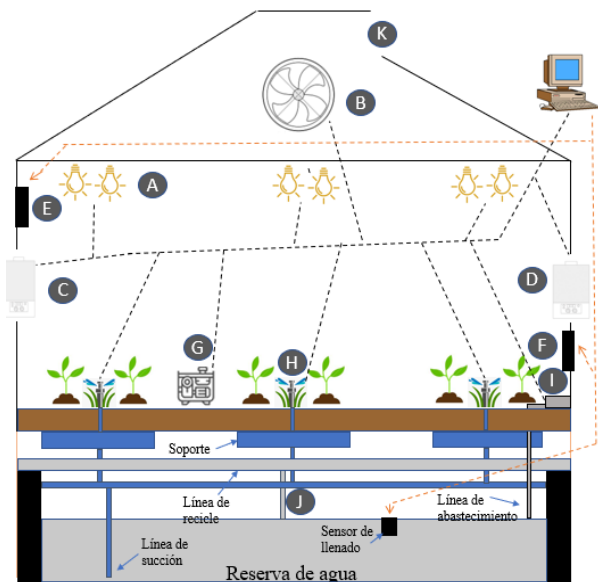


Figura 1. Estructura básica de un invernadero inteligente.

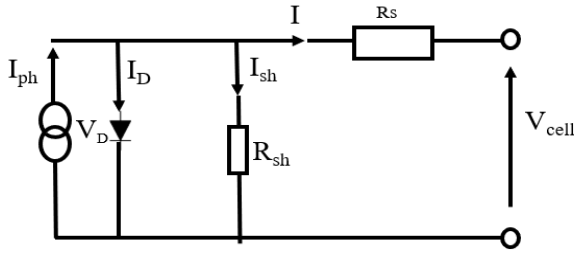


Figura. 2. Circuito equivalente de una celda fotovoltaica

Para un panel compuesto de N_s celdas en serie y N_p celdas en paralelo se calcula de la siguiente manera:

$$I_{pv} = N_p I_{ph} - N_p I_0 \left\{ \exp \left[\frac{1}{V_t} \frac{q(V_{pv})}{N_s} + \frac{I_{pv} R_s}{N_p} \right] - 1 \right\} - \frac{N_p}{R_{sh}} \left(\frac{V_{pv}}{N_s} + \frac{I_{pv} R_s}{N_p} \right) \quad (2)$$

Donde V_t es el potencial termodinámico, V_{pv} es el voltaje del panel, I_0 es la corriente inversa de saturación del diodo, T es la temperatura de la celda, k es la constante de Boltzmann, q es la carga del electrón, A es el factor de idealidad del diodo.

2.2. Modelo de una turbina eólica

Una turbina eólica es un sistema que se compone de diversos subsistemas, tal como se muestra en el diagrama a bloques de la Figura 3, donde se puede ver que la entrada al sistema es la velocidad del viento, la cual se transforma en un torque y velocidad angular del rotor que se transmite al sistema mecánico que es un multiplicador de velocidad que imprime una velocidad angular nominal al generador, así como un torque. El generador eléctrico produce la potencia requerida un voltaje de salida, con frecuencia y fase, los cuales se regulan mediante un sistema electrónico de potencia y un sistema de control. Si el aerogenerador es de paso variable, este tendrá un mecanismo de control de paso para regular la velocidad angular.

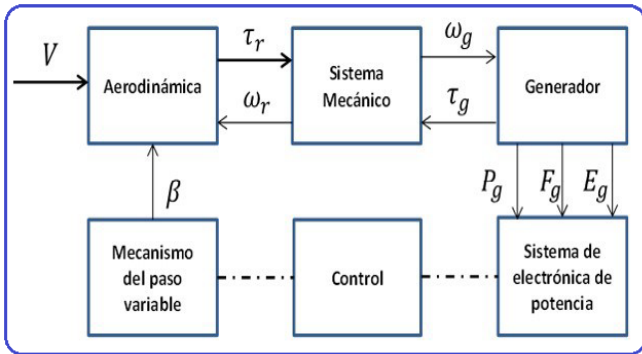


Figura. 3. Componentes de una turbina eólica.

Una turbina eólica convierte energía del viento en electricidad. La potencia de la energía cinética del viento P_{wind} es dada por [11]:

$$P_{wind} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V^3 \quad (3)$$

Donde el término ρ representa la densidad del aire, S es el área de barrido de las palas, y V es la velocidad del viento. La energía capturada está dada por:

$$P_r = \frac{1}{2} C_p(\beta, \lambda) \cdot \rho \cdot S \cdot V^3 \quad (4)$$

El coeficiente de potencia depende de dos factores los cuales son ángulo de las palas (β) y la proporción de velocidad (λ), que es la relación entre la velocidad de la punta de la pala (ωR) y la velocidad del viento, este coeficiente se calcula en (4). Sin embargo, de acuerdo con [12] se menciona que β puede omitirse para casos en los que se trabajan con microturbinas, ya que generalmente es cero.

$$\lambda = \frac{\omega R}{V} \quad (5)$$

Ahora bien, el comportamiento eléctrico del sistema eólico se describe por el siguiente sistema:

$$\dot{i}_q = -\frac{R_s}{L} i_q - \omega_e i_d + \frac{\omega_e \phi_m}{L} - \frac{\pi v_b i_q}{3\sqrt{3}L \sqrt{i_q^2 + i_d^2}} u \quad (6)$$

$$\dot{i}_d = -\frac{R_s}{L} i_d - \omega_e i_q - \frac{\pi v_b i_d}{3\sqrt{3}L \sqrt{i_q^2 + i_d^2}} u \quad (7)$$

$$\dot{\omega}_e = \frac{p}{2J} \left(T_t - \frac{3p}{2} \phi_m i_q \right) \quad (8)$$

donde i_q es la corriente cuadratura, i_d es la corriente directa del rotor, R_s es la resistencia de fase, L es la inductancia del bobinado del estator, ω_e es la velocidad eléctrica angular, ϕ_m es el flujo del bobinado del estator, v_b es el voltaje del DC bus, u es la señal de control, p es el número de polos del PMSG, J es la inercia de las partes rotativas y T_t es el torque de la turbina. La potencia máxima entregada por el sistema eólico solicitado por el sistema gestor esta dado de la siguiente manera:

$$P_{w,max} = K_{opt} \omega_m^3 - \frac{3}{2} (i_q^2 + i_d^2) r_s \quad (9)$$

donde K_{opt} es la relación de velocidad a la que alcanza el coeficiente $C_p(\lambda)$ su máximo.

2.3. Modelo de estado de carga de la batería

La batería es el componente de un sistema autónomo, que asegura el suministro ininterrumpido, compensando la falta de energía cuando las condiciones climáticas no son apropiadas. En base a la Figura 4 el modelo del SoC es el siguiente [10]:

$$SoC(t) = SoC(t - 1) + \frac{I_{bat}}{C_{bat}} \quad (10)$$

donde:

$C_{bat} = (1.67C_{10})(1 + 0.005\Delta T)/((1 + 1.67)(\bar{I}_{bat}/I_{10})^{0.9})$ es la capacidad de la batería, I_{bat} es la corriente instantánea, ΔT es la diferencia entre la temperatura de la batería y la temperatura ambiente; C_{10} es la capacidad nominal de la batería, además está sujeta a la siguiente restricción $SoC_{min} \leq SoC \leq SoC_{max}$

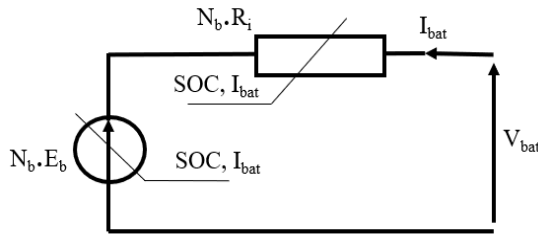


Figura 4. Diagrama del circuito de carga de la batería.

2.4. Sistema Gestor

En la Figura 5 se muestra el diagrama de un sistema gestor de energía para la simulación de una microrred instalada en un invernadero, en donde puede observarse que como entradas se tienen los perfiles de las fuentes de energía renovable que son la temperatura, la irradiancia y velocidades de viento, los cuales dependen de los datos estadísticos y esta información se traduce a potencias de las fuentes instaladas (en simulación) en la microrred. Por otro lado, se tiene el perfil de carga el cual es la sumatoria de los historiales de consumo de cada carga conectada a la red del sistema invernadero. La energía producida por las fuentes y la consumida por las cargas, son entradas del algoritmo gestor, el cual a su salida mandará señales de activación o desactivación de elementos de la red.

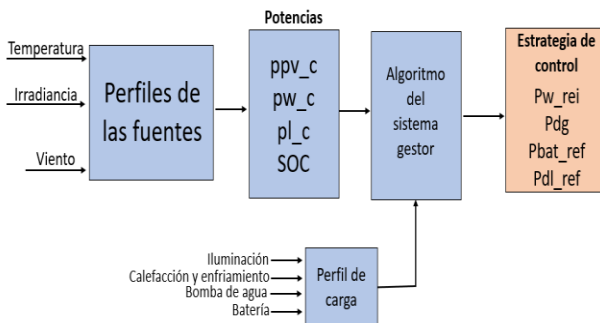


Figura 5. Diagrama que representa el sistema gestor de energía dentro del sistema invernadero.

3. RESULTADOS

3.1. Implementación de la microrred en simulación

En la Figura 6, se muestra el circuito en simulación de la microrred la cual consiste en dos fuentes fotovoltaicas un aerogenerador, como cargas se tienen el sistema de iluminación del invernadero y el sistema de ventilación propuesto los cuales son críticos en el crecimiento del cultivo. Se asume que este invernadero realiza en riego por goteo, por lo que el agua se almacena en tanques y el líquido se distribuye por gravedad. Por lo tanto, se tiene una bomba, la cual se acciona cuando hay energía excedente por parte de las fuentes renovables, y la batería tiene un estado de carga del 100%. Además, la microrred está interconectada a la red principal, en caso de que las fuentes de energía renovable no sean suficientes para abastecer la demanda del sistema invernadero.

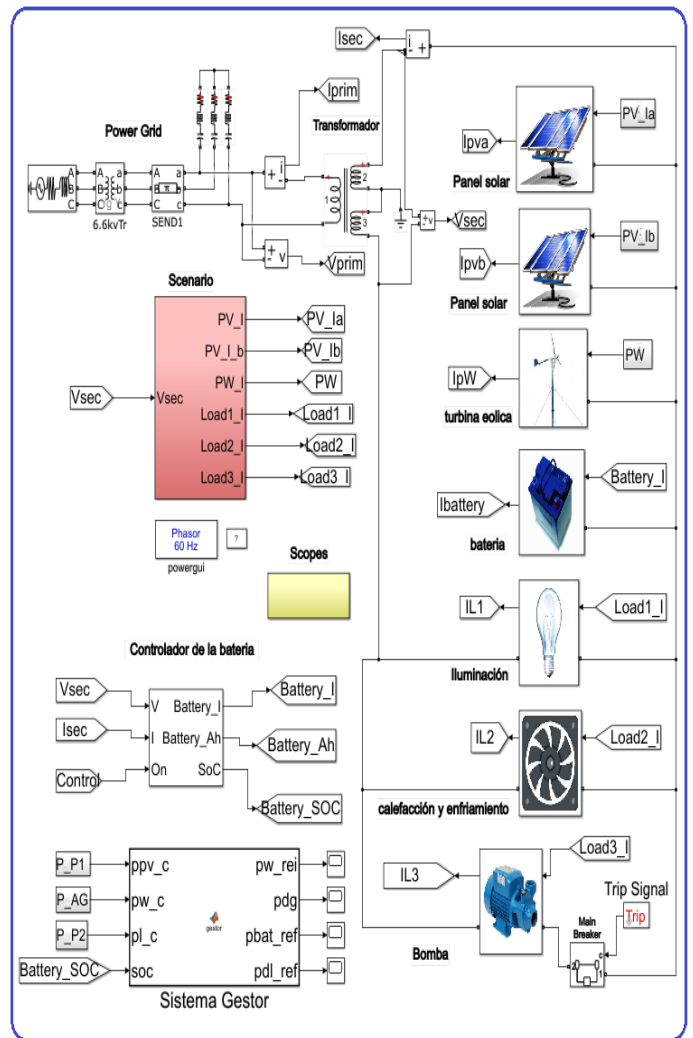


Figura 6. Diagrama que representa la microrred con un gestor de energía para el sistema invernadero.

La simulación tiene un bloque denominado escenario el cual contiene los perfiles de las fuentes renovables que emulan el comportamiento de las condiciones ambientales, tales como la velocidad de viento durante un día, que se muestra en la Figura 7, la cual se construyó considerando la periodicidad con la que varía la velocidad del viento durante un día más ráfagas periódicas y un factor de aleatoriedad.

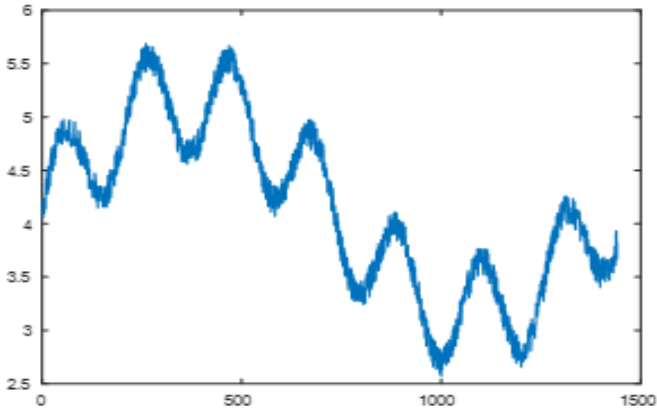


Figura 7. Perfil de viento de la turbina eólica.

Por otro lado, la irradiancia solar en un día típico se representa en la Figura 8, como puede observar durante la noche es nula y empieza a incrementar desde las primeras horas del día.

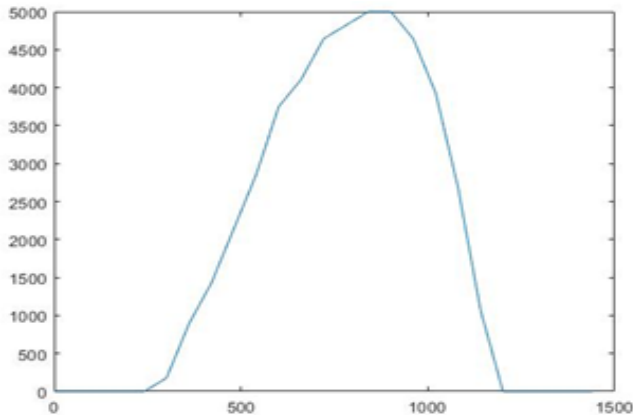


Figura 8. Perfil de irradiancia del panel solar

El perfil de la carga del sistema invernadero se muestra en la Figura 9, que representa la demanda de energía de cada uno de los elementos de iluminación, calefacción, ventilación y bombeo de agua. El objetivo de este sistema es suministrar constantemente la potencia requerida a las cargas, integrado por los elementos de iluminación, bomba de agua, calefacción y enfriamiento, procurando disminuir a los requerimientos de energía de la red principal. Por lo cual, desde el ámbito de control el sistema este sistema es dependiente de las condiciones climatológicas (velocidad del viento, irradiación, temperatura), y por consiguiente los elementos deben

proporcionar su máxima potencia en todas las condiciones posibles mediante algoritmos MPPT “Maximum Power Point Tracker” o seguimiento del punto de máxima potencia y el algoritmo en el sistema gestor debe ser capaz de variar las referencias de estos controladores, en caso de que estos sean ajustable. En la Figura 6, se presenta el sistema gestor el cual además de tener como objetivo el suministro a las cargas, también tiene como objetivo mantener la vida de la batería, la cual representa uno de los componentes más caros y delicados del sistema.

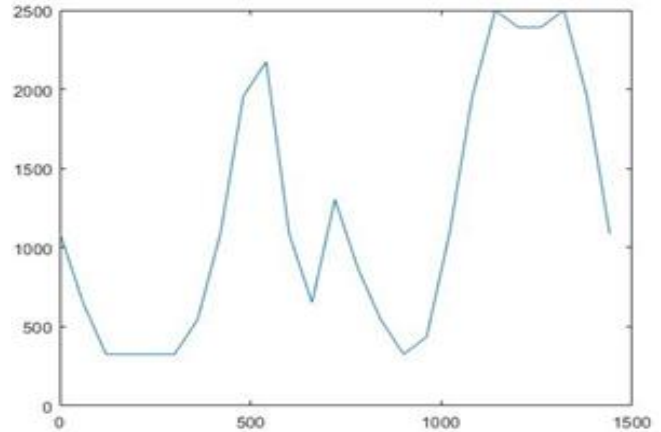


Figura 9. Perfil de carga del sistema invernadero

3.2. Ejecución de la simulación

Al correr la simulación se pueden obtener como resultado en primer lugar, la potencia generada por las fuentes de energía renovable, las cuales se muestra en la Figura 10, para el viento, en la parte superior, el cual produce más energía durante la noche y disminuye al final del día. El comportamiento de la energía fotovoltaica producida se muestra, en la parte inferior. Se tienen dos fuentes de energía solar, es decir dos paneles solares de diferentes características y diferentes condiciones de irradiancia y sombras por nubosidad.

En la Figura 11 se representa el comportamiento de la batería en el transcurso de la simulación, el funcionamiento de la batería es dependiente de la generación de las fuentes y del consumo, por lo cual, existen periodos en donde no se requiere el suministro desde la batería, sin embargo, cuando las fuentes no logran abastecer completamente la demanda de potencia, la batería es la encargada de compensar dicha energía principalmente en el transcurso de la noche cuando los paneles solares no están en funcionamiento, además, la batería se vuelve a cargar en cuanto el suministro de las fuentes es adecuado y es posible direccionar energía hacia la batería y el sistema de bombeo de agua.

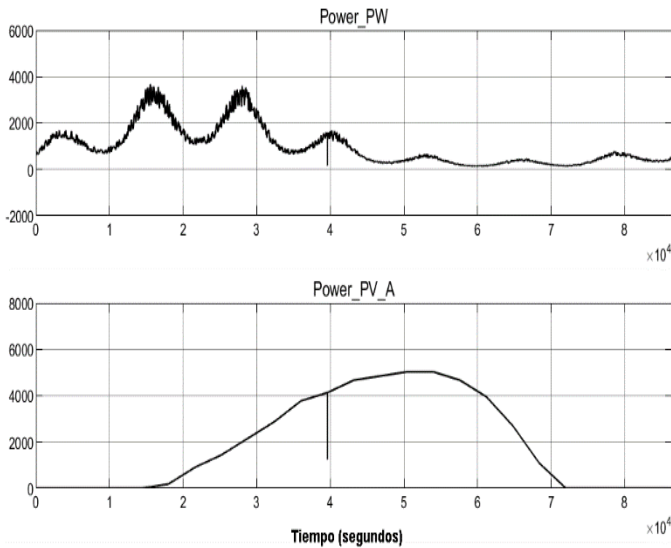


Figura 10. Energía suministrada por las fuentes de energía renovables de la microrred.

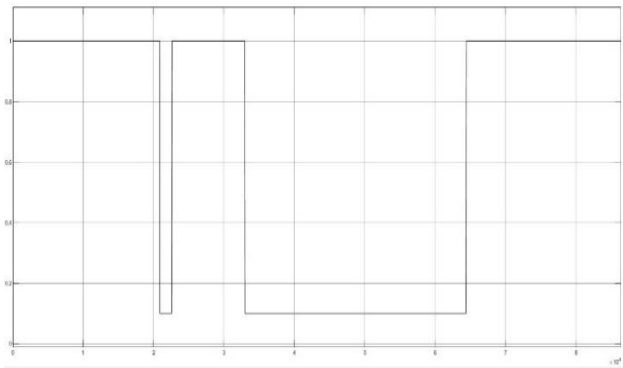


Figura 11. Comportamiento de la batería.

4. CONCLUSIONES

De acuerdo con lo mostrado en el documento, un sistema gestor de una microrred en un entorno de invernadero es propuesto empleando energías renovables, la estrategia de gestión satisface a las cargas y batería SOC, este se encarga de controlar el funcionamiento operacional de las fuentes y las cargas, se mantiene un flujo constante de energía y se prueba en simulación utilizando perfiles teóricos de las condiciones climáticas y de consumo, se tiene también una carga extra, la cual consta de una bomba de agua, que funciona cuando hay un exceso de energía en el sistema, la cual disipa el exceso de producción de energía.

Se mostraron las gráficas de los perfiles climatológicos y de las cargas a simular. Se comprobó la propuesta de sistema gestor mediante simulación en el software Matlab/Simulink.

5. REFERENCIAS

- [1] C. Bordons, F. García-Torres, and L. Valverde, "Gestión Óptima de la Energía en Microrredes con Generación Renovable," *Rev. Iberoam. e Inform. Ind.*, vol. 12, pp. 117–132, 2015.
- [2] I. Serban, R. Teodorescu, J. M. Guerrero, and C. Marinescu, "Modeling of an Autonomous Microgrid for Renewable Energy Sources Integration," pp. 4311–4316, 2009.
- [3] "Generación distribuida y microrredes," in *ESTUDIO Y VIABILIDAD TÉCNICOS EN UNA MICRO-RED ELÉCTRICA*, pp. 4–24.
- [4] M. Mikati, M. Santos, and C. Armenta, "Modelado y Simulación de un Sistema Conjunto de Energía Solar y Eólica para Analizar su Dependencia de la Red Eléctrica," *Rev. Iberoam. Automática e Informática Ind.*, vol. 9, no. 3, pp. 267–281, 2012.
- [5] R. D. Medina, "Microrredes basadas en Electrónica de Potencia: Características, Operación y Estabilidad," *Ingenius*, no. 12, pp. 15–23, 2014.
- [6] A. E. Hernandez Jimenez, A. de J. Garcia Toribio, and D. Lara Alabazares, "PRINCIPALES ASPECTOS DE CONTROL DE MICRORREDES EN SISTEMAS INVERNADERO," *Memorias del Congr. Int. Investig. Acad. Journals Morelia 2020*, vol. 12, no. 1, pp. 762–767, 2020.
- [7] M. C. Bozchalui, C. A. Cañizares, and K. Bhattacharya, "Optimal energy management of greenhouses in smart grids," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 6, no. 2, pp. 827–835, 2015.
- [8] M. Mahdavian and N. Wattanapongsakorn, "Multi-objective optimization of PID controller tuning for greenhouse lighting control system considering RTP in the smart grid," *2014 Int. Comput. Sci. Eng. Conf. ICSEC 2014*, pp. 57–61, 2014.
- [9] M. Mahdavian and N. Wattanapongsakorn, "Optimizing greenhouse lighting for advanced agriculture based on real time electricity market price," *Math. Probl. Eng.*, vol. 2017, 2017.
- [10] M. Dahmane, M. Ieee, J. Bosche, and M. Dfarivar, "Renewable Energy Management Algorithm for Stand – alone System," no. October, pp. 20–23, 2013.
- [11] R. Dahiya, "Development of a low cost test rig for standalone WECS subject to electrical faults," *ISA Trans.*, vol. 65, pp. 537–546, 2016.
- [12] K. K. M. S. Kariyawasam, K. K. N. P. Karunarathna, R. M. A. Karunarathne, M. P. D. S. C. Kularathne, and K. T. M. U. Hemapala, "Design and Development of a Wind Turbine Simulator Using a Separately Excited DC Motor," *Smart Grid Renew. Energy*, vol. 04, no. 03, pp. 259–265, 2013.