

Diseño, simulación y análisis, de sistema solar FV para suministro eléctrico en zonas rurales

Design, simulation and analysis of PV solar system for electricity supply in rural zones

Andrea Catalina Alvarado Fajardo¹, Hernán Carvajal-Osorio²

¹ Ing. Electrónico, M.Sc(c), Facultad de Ingeniería, Universidad Libre, Bogotá, Colombia.
andrea.alvarado@unilibrebog.edu.co

² Ing. Electricista, Ph.D., Facultad de Ingeniería, Universidad La Gran Colombia, Bogotá, Colombia.
hernan.carvajal@ugc.edu.co

Fecha de recepción: 28/03/2014 Fecha de aceptación del artículo: 10/06/2014

Resumen

Se evidenció cómo un sistema solar fotovoltaico autónomo puede aprovechar el recurso solar disponible en una zona de estudio, sitio de la escuela rural El Cardonal en Tibaná-Boyacá, Colombia, para el suministro de electricidad en atención a la necesidad especial de refrigeración de alimentos en soporte a plan nutricional para escolares pobres. Tomando los datos de radiación en el sitio, se diseñó el sistema y se modeló mediante el software TRNSYS, demostrando su buen funcionamiento de acuerdo a las características de operación de la carga, las condiciones climáticas y el recurso solar disponible en el lugar.

Palabras clave

Energía solar, Energías renovables, Escuela rural, Sistema fotovoltaico, TRNSYS.

Abstract

This research demonstrates how an off-grid photovoltaic system could make the most of solar resource at the rural site of the El Cardonal School, Tibaná-Boyacá, Colombia. Basic needs for electricity mainly for food conservancy by refrigeration, might be satisfied in support a nutritional program for poor school children. After solar irradiance was measured at the site, the solar system was designed

and modeled with the TRNSYS software, which demonstrated a good performance under specific load characteristics climate conditions and solar resource availability.

Keywords

Photovoltaic solar system, Rural school, Solar energy, TRNSYS.

1. Introducción

La escuela El Cardonal (la Escuela de ahora en adelante), está ubicada en la vereda Ruche del municipio de Tibaná, y aunque cuenta con acceso a la red eléctrica, presenta fallas en la continuidad del servicio. El daño se prolonga hasta por 10 días, en los cuales no solamente se afecta la continuidad de las actividades académicas, sino también está poniendo en grave riesgo la salud de los estudiantes, a quienes se les suministra una alimentación complementaria, debido a que la gran mayoría de los niños no reciben en sus hogares una adecuada nutrición.

Muchos de los alimentos necesitan refrigeración y durante el tiempo en que la Escuela no tiene servicio eléctrico, los víveres perecederos expiran. Motivo por el cual en el proyecto desarrollado se consideró primordial la conservación de los alimentos, debido a que afecta el bienestar de los niños.

Se desarrolló un modelado mediante el software TRNSYS en el cual, se generó un perfil de simulación que recreó las condiciones de funcionamiento del sistema y de la carga eléctrica de acuerdo a la radiación solar incidente. Exhibió el comportamiento que presentaría el modelo solar fotovoltaico proyectado, demostrando la bondad del sistema para satisfacer las necesidades eléctricas básicas de la institución y proyectándose en un prototipo que puede ser empleando para escuelas con situaciones similares.

2. Metodología

Inicialmente se realizó el registro de condiciones atmosféricas en la escuela mediante una estación meteorológica Marca Davis, Modelo Vantage pro 2 plus y se obtuvo los siguientes promedios diarios de radiación solar para cada mes (Figura 1).

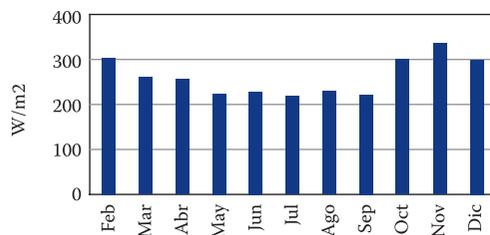


Figura 1. Radiación promedio diaria mensual en la Escuela.

Los cálculos empleados a continuación para el diseño del sistema solar fotovoltaico, se basan principalmente en (Nina, 2011), (Ortega, 2001) y (Alonso, 2014).

2.1 Estimación del consumo

La carga eléctrica definida para el sistema solar fotovoltaico, está compuesta por el refrigerador de 0,86 kW/24 h y 2 bombillas de 20 W, estas últimas están destinadas a usarse entre las 8 am y las 2 pm (horario en que los niños asisten a la escuela).

La energía consumida por las bombillas (Ecuación 1) se determinó por la potencia de las lámparas durante las 6 horas diarias de actividad escolar.

$$E_{bom} = P_{bom} * t = 240 (Wh)/día \quad (1)$$

De acuerdo a valores entregados por el fabricante de la nevera, la corriente nominal de operación es 1,3 A y el voltaje nominal de funcionamiento de 115 V. Por lo tanto, la potencia consumida por la nevera se describe en la ecuación 2.

$$P_{nev} = I_{nev} * V_{nev} = 150 W \quad (2)$$

Debido a que los refrigeradores no son equipos de funcionamiento continuo, se asumió el consumo de la potencia nominal (Ecuación 3), en un tiempo de operación de 6 horas diarias

$$E_{nev} = P_{nev} * t = 900 Wh \quad (3)$$

Se determinó la energía total diaria en AC (Ecuación 4), como la suma de la energía eléctrica diaria de los equipos que comprenden la carga.

$$E_{ac} = E_{nev} + E_{bom} = 1140 (Wh)/día \quad (4)$$

El sistema solar fotovoltaico desarrollado tuvo en cuenta que esta tecnología es una de las fuentes de energía más apropiadas para llevar electricidad al medio rural, en razón a sus propiedades de modularidad y autonomía, y adicionalmente al tener bajo mantenimiento y no ser contaminante (Egido, 2006).

La energía diaria DC equivalente (Ecuación 6) fue dada por el factor de eficiencia en la inversión (Ecuación 5) y la carga estimada en AC.

$$F_{ac-dc} = 1,2 \quad (5)$$

$$E_{dc} = F_{ac-dc} * E_{ac} = 1368 (Wh)/día \quad (6)$$

De acuerdo a la potencia diaria de la nevera y de las bombillas se determinó la potencia máxima en AC (Ecuación 7.)

$$P_{ac} = P_{bom} + P_{nev} = 190 W \quad (7)$$

Se consideró el pico de carga en el compresor del refrigerador como máximo el 150% de la potencia a carga nominal, con una duración de un segundo. De esta forma el factor del arranque de carga de la nevera se describe en la Ecuación 8.

$$F_p = 1,5 \quad (8)$$

La potencia máxima del refrigerador (Ecuación 9), se determinó por la potencia de la nevera y el factor del pico de carga del refrigerador

$$P_{M,nev} = P_{nev} * F_p = 225 \text{ W} \quad (9)$$

La potencia máxima resultante en AC (Ecuación 10), fue dada por la potencia máxima de la nevera y a la potencia diaria de las bombillas

$$P_{ac,max} = P_{M,nev} + P_{bom} = 265 \text{ W} \quad (10)$$

La energía diaria (Ecuación 11) se determinó por la carga estimada en DC y el voltaje del sistema (establecido para todos los elementos en 24 V).

$$E_d = E_{dc} / V_{op} = 57 \text{ (Ah)/día} \quad (11)$$

La carga total diaria (Ecuación 13), es la relación entre la energía diaria y el de seguridad por pérdidas en todos los elementos (Ecuación 12).

$$F_s = 1,2 \quad (12)$$

$$E_T = E_d * F_s = 68,4 \text{ (Ah)/día} \quad (13)$$

2.2 Dimensionamiento subsistema de generación

Para las características de los módulos fotovoltaicos, se determinó la corriente máxima del sistema solar fotovoltaico (Ecuación 15), en relación a la carga total diaria de corriente y a las horas de sol pico disponibles en la Escuela (Ecuación 14), que de acuerdo a los registros son tres.

$$HSP = 3 \text{ h} \quad (14)$$

$$I_p = E_T / HSP = 22,8 \text{ A} \quad (15)$$

Se consideraron paneles solares marca Suntech, de tipo monocristalinos, debido a que este material proporciona un rendimiento energético más alto (REDFE, 2014) y una mayor duración respecto a los módulos que emplean otro tipo de materiales (Fernández, 2009); adicionalmente las celdas de silicio monocristalino son las más usadas a nivel mundial, y aunque este material no se encuentra en estado puro, es el segundo material más abundante en la Tierra (Joachín, 2008).

De acuerdo a las especificaciones del fabricante poseen siguientes valores de potencia (Ecuación 16), voltajes (Ecuaciones 17 y 19) y corriente (Ecuaciones 18 y 20)

$$P_{ref} = 175 \text{ W} \quad (16)$$

$$V_{ref} = 24 \text{ V} \quad (17)$$

$$I_{sc,ref} = 5,2 \text{ A} \quad (18)$$

$$V_{mp,ref} = 35,2 \text{ V} \quad (19)$$

$$I_{mp,ref} = 4,95 \text{ A} \quad (20)$$

El número de módulos solares fotovoltaicos en paralelo necesarios para generar la energía requerida (Ecuación 21), se estableció como el valor entero más próximo al resultado de la relación entre la corriente pico del sistema y la corriente de operación del panel

$$NP = I_p / I_{sc,ref} = 4 \quad (21)$$

2.3 Dimensionamiento subsistema de acumulación

Se eligieron acumuladores de plomo ácido, debido a que son de larga duración y las condiciones de mantenimientos son bajas (Martínez, 2011).

En este diseño se consideraron cuatro días de reserva, debido a que la escuela se encuentra en un sector con bastante nubosidad (Ecuación 22).

$$N_d = 4 \quad (22)$$

Se determinó la capacidad del banco de baterías (Ecuación 23), de acuerdo a la carga total diaria de corriente y los días de reserva.

$$Q_B = E_T * N_d = 273,6 \text{ Ah} \quad (23)$$

Para evitar descargas profundas en el acumulador y que esto reduzca la vida útil de las baterías, se estipuló una profundidad de descarga máxima del 50% (Ecuación 24).

$$Q_{max} = 0,5 \quad (24)$$

Por lo tanto, la capacidad total del sistema de acumulación (Ecuación 25), fue establecida por la capacidad del banco de baterías, considerando la profundidad de descarga es

$$Q_T = Q_B / Q_{max} = 547 Ah \quad (25)$$

Para obtener dicha capacidad diseñada de acumulación se tuvo en cuenta que cuando un sistema solar fotovoltaico requiere más de una batería, es necesario realizar con estas una configuración serie y/o paralelo, en donde los acumuladores deben ser del mismo tipo, con la misma capacidad e idéntico potencial eléctrico (UPME, 2003). Por lo tanto se estimaron cuatro baterías, cada una con una capacidad 300 Ah a 12 V.

2.4 Dimensionamiento del Regulador-Inversor

Para que el Regulador-Inversor pueda manejar la potencia requerida por la carga sin forzar el equipo, la capacidad de este, debe ser mayor que la potencia máxima de la carga en AC (Ecuación 26).

$$P_{reg} > P_{ac,max} \quad (26)$$

Por lo tanto se estimó la potencia del Regulador-Inversor como se presenta en la Ecuación 27.

$$P_{reg} = 500 W \quad (27)$$

En la Figura 2, se muestran las características de los elementos requeridos para el sistema solar fotovoltaico de acuerdo al diseño calculado.

3. Resultados y análisis

Se generó una plataforma de simulación mediante el software TRNSYS 17 (Alvarado, 2014), donde para este modelado, se emplearon los TYPEs definidos como el archivo climático TYPE 109, los paneles solares TYPE 94a, el regulador – inversor TYPE 48d, el banco de baterías TYPE 47b, la carga TYPE 14h y módulos del TYPE 57, necesarios para realizar acoples entre parámetros de diferentes modelos. (Figura 3).

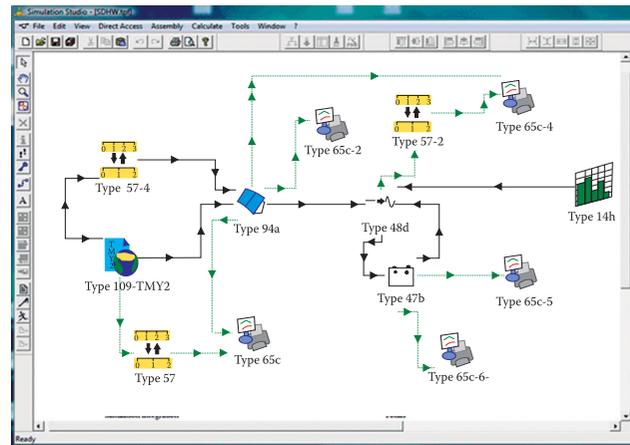


Figura 3. Modelo desarrollado en TRNSYS

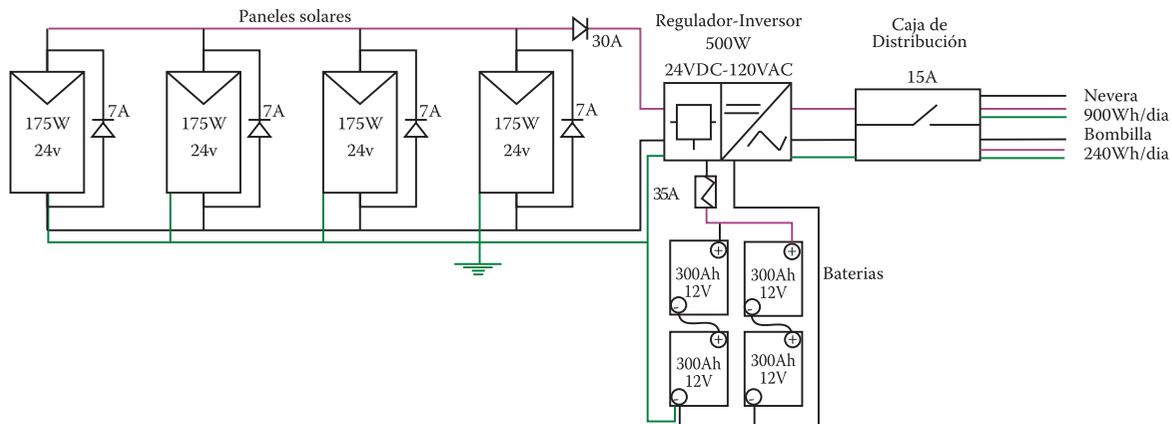


Figura 2. Plano eléctrico del diseño propuesto

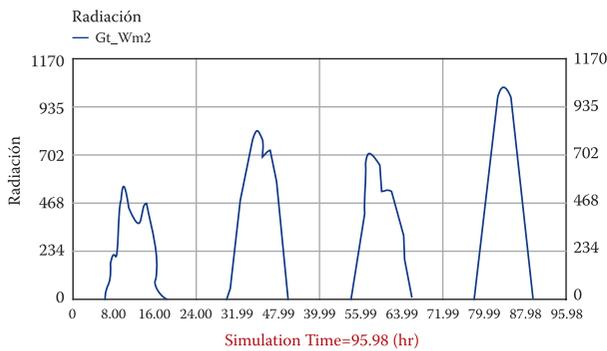


Figura 4. Radiación solar respecto al tiempo

En la Figura 4, se observa el comportamiento de la radiación solar incidente, durante cuatro días en los cuales se aprecian diferentes condiciones solares.

3.1 Matriz fotovoltaica

El TYPE 94a, modeló los módulos solares fotovoltaicos de silicio monocristalinos mediante un seguimiento al punto de máxima potencia. Empleó ecuaciones para un tipo de circuito equivalente empírico que predijo las características de corriente y voltaje de un solo panel y luego las extrapoló para predecir el rendimiento de una matriz multi-módulo (TRNSYS 17-Mathematical Reference, 2012).

Teniendo en cuenta la corriente de corto circuito entregada por el fabricante para cada módulo fotovoltaico, se estableció la corriente de corto circuito del arreglo fotovoltaico (Ecuación 28).

$$I_{sc,T} = I_{sc,ref} * NP = 20,8 A \quad (28)$$

La corriente en el punto máxima potencia de la matriz fotovoltaica (Ecuación 29), está definida por la corriente en el punto de máxima potencia según las condiciones de referencia y el número de paneles conectados en paralelo

$$I_{mp,T} = I_{mp,ref} * NP = 19,8 A \quad (29)$$

El comportamiento de voltaje y corriente, a la salida del arreglo de módulos fotovoltaicos, se presenta en la Figura 5.

El día con mayor radiación solar fue el cuarto, donde el punto máximo de voltaje se encontró a las 8 horas. En este instante, el voltaje de circuito

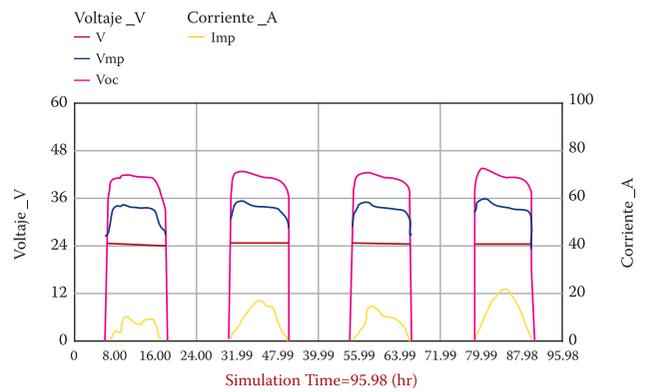


Figura 5. Comportamiento Voltaje y Corriente TYPE 94a

abierto es 42,9 V, muy próximo al voltaje de circuito abierto establecido por el fabricante .

En este día, debido a que el sistema modelado efectuó un seguimiento al punto de máxima potencia, el voltaje en el punto de máxima potencia se encontró a las 8 horas (hora 80 de simulación) presenta un valor de 35 V, el cual corresponde al voltaje de en el punto de máxima potencia según las condiciones de referencia . Y la corriente en el punto de máxima potencia para este instante de tiempo equivale a 8,3 A.

La Corriente en el punto de máxima potencia en el medio día es 21 V, adecuada para las condiciones de radiación incidente en ese instante de tiempo.

Teóricamente, la potencia de salida en la malla fotovoltaica (Ecuación 30), está dada por la potencia para un módulo solar (especificada por el fabricante) y el número de paneles conectados en paralelo

$$P_{ref,T} = P_{ref} * NP = 700 W \quad (30)$$

De acuerdo al resultado del modelado, la potencia generada por el arreglo de módulos fotovoltaicos para las 96 horas que comprenden los días analizados, se observa en la Figura 6.

Teóricamente, la potencia máxima que se puede conseguir a la salida del arreglo de paneles solares (Ecuación 31), es obtenida por los valores de voltaje y corriente de máxima potencia del cuarto día a las 12 horas.

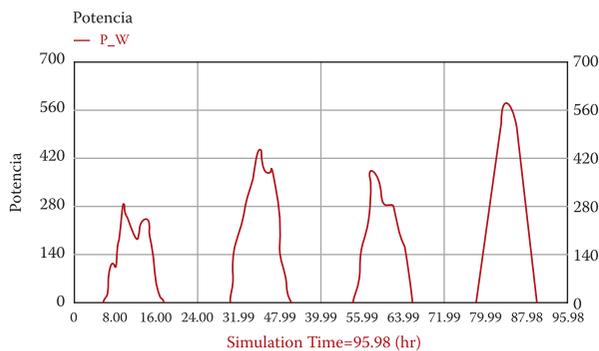


Figura 6. Potencia en el arreglo fotovoltaico TYPE94a

$$P_{max,84h} = I_{mp,84h} * V_{mp,84h} = 693 W \quad (31)$$

El comportamiento del arreglo de módulos fotovoltaicos es adecuado a la forma de operación esperada. La potencia máxima entregada tiene una eficiencia del 82.7% en relación con el valor de la potencia máxima teórica, determinada de acuerdo a los parámetros dados por el fabricante.

3.2 Banco de baterías

El modelo matemático del acumulador describió la relación entre el voltaje, la corriente y el estado de carga. El TYPE 47b es un modelo de una batería de plomo-ácido, que operó conjuntamente con la malla fotovoltaica y con componentes de acondicionamiento de potencia (TRNSYS 17-Mathematical Reference, 2012). Esta subrutina utiliza el modelo de Shepherd, para representar el voltaje del acumulador en función del estado de carga y de la corriente (Burgos, 2013).

El comportamiento de voltaje a la salida del banco de baterías durante el ciclo de carga se muestra en la Figura 7

El voltaje máximo de carga C_{Vc} , se mantuvo constante en 27,9 V, muy cercano al valor estimado como voltaje máximo para cargar el acumulador V_B . La tensión mínima de descarga D_{Vc} , también muestra un comportamiento permanente en 21,6 V.

El voltaje de operación, presentó 3 estados de carga durante cada día. Durante la primera etapa, el voltaje aumentó rápidamente sobrepasando los

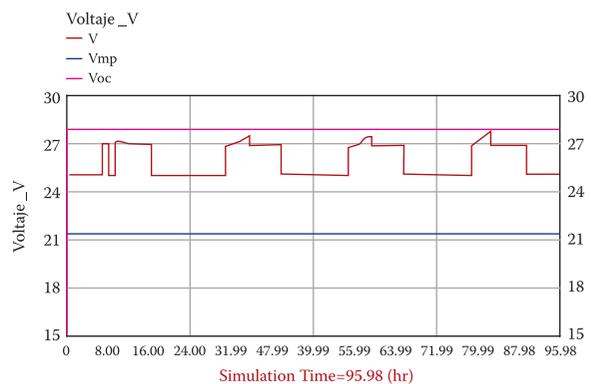


Figura 7. Voltajes de salida del banco de baterías - TYPE47b

27 V hasta alcanzar el punto de saturación, en este momento el acumulador llega al 100 % de carga, y es entonces cuando el regulador reduce el paso de tensión a la batería.

Para el segundo periodo, el acumulador se mantuvo en estado de carga total, el regulador de voltaje conservó este lapso de tiempo suministrando continuamente 27 V, hasta el momento en que fue necesario abastecer a la carga por parte de la batería.

En la última fase, el regulador permitió la descarga del acumulador en un valor levemente mayor a 25 V, este periodo se mantuvo hasta que la potencia generada por los módulos solares pudo recargar nuevamente la batería. En esta etapa el voltaje puede llegar a un valor mínimo de 24.77 V, debido a que un voltaje menor haría que la batería se descargue más que el porcentaje diseñado del 50 %.

3.3 Load

Para el modelado de la carga se genera un perfil de consumo diario de acuerdo al requerimiento eléctrico promedio del refrigerador y de las bombillas, teniendo en cuenta el tiempo en que estos están en funcionamiento (Figura 8).

Diariamente durante el tiempo en que la institución esta inactiva, desde las 0 horas hasta las 8 horas y de las 14 horas a las 24 horas, se requiere una potencia promedio de 33,3 W. En las horas de actividad escolar, comprendidas entre las 8 horas y las 14 horas, se estima un consumo de potencia de 90 W.

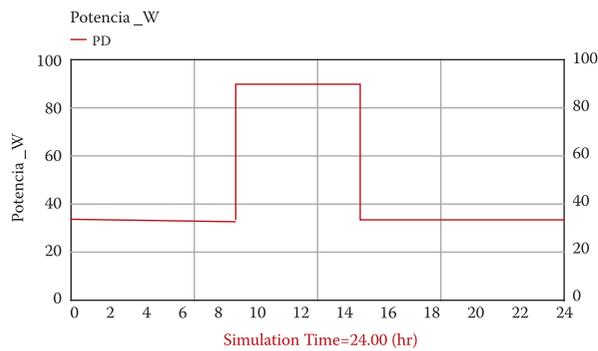


Figura 8. Perfil de consumo diario de potencia TYPE 14h.

3.4 Regulador – Inversor

En esta subrutina se analizó en forma general el comportamiento de todo el sistema, debido a que el Regulador-Inversor distribuye la energía a través de los elementos que lo conforman.

La Figura 9 presenta la salida de potencia del Regulador-Inversor desde o hacia la batería (cuando la potencia aumenta, indica el paso de energía en dirección al acumulador y cuando esta disminuye el regulador controla la descarga de la batería)

Durante las 18 horas en las cuales la institución esta inactiva, el regulador permitió una descarga de potencia continua en la batería con un valor de 40,12 W, donde para ese periodo de tiempo el perfil de consumo de carga establecido, indica un requerimiento de 33,3 W, obteniendo una eficiencia de inversión DC-AC, del 83%.

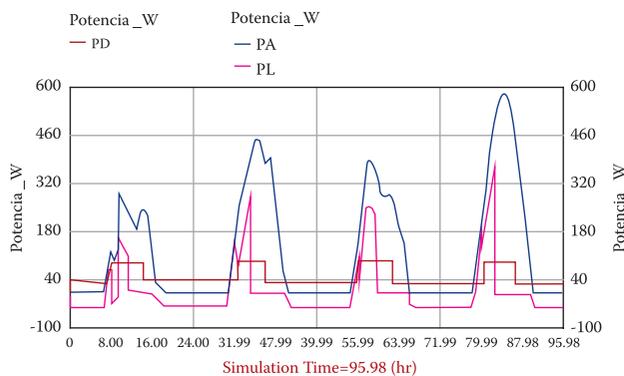


Figura 9. Potencia del Regulador-Inversor: desde o hacia la batería y hacia la carga

Durante las horas del día en que se presentó radiación solar, la potencia generada por arreglo fotovoltaico fue enviada desde el regulador para abastecer la carga.

Cada mañana de acuerdo a la potencia excedente generada por los paneles solares, el acumulador comenzó a ser recargado. A las 8 horas, cuando aumenta el requerimiento de potencia durante periodo de actividad escolar a 90 W, se pausó por unos minutos el proceso de carga en la batería y posteriormente continuó con su ritmo de carga. Una vez la batería fue llenada, se mantuvo en pausa hasta las 17 horas, momento en que la potencia generada por la matriz fotovoltaica es muy baja y el acumulador se convierte en la única fuente de alimentación para la carga.

4. Conclusiones

El modelo de sistema solar fotovoltaico diseñado es efectivo para satisfacer las necesidades eléctricas primordiales de la Escuela y mediante él se permitiría dar continuidad al desarrollo del plan nutricional de los estudiantes. El sistema también podría ser aplicado a otras instituciones educativas rurales que presenten condiciones similares de radiación y potencia requerida, favoreciendo de esta manera, los escenarios de alimentación infantil para niños en condición de vulnerabilidad.

El análisis detallado del comportamiento de la nevera no es fácil por su operación por ciclos, pero con el software TRNSYS se puede simular y evaluar la tendencia de esta, demostrando la capacidad del sistema solar fotovoltaico diseñado para operar adecuadamente ante los diferentes requerimientos eléctricos de carga, incluso mostrando suficiencia para soportar el pico de corriente que se presenta en el arranque del refrigerador durante cada ciclo.

Se ha verificado la validez de TRNSYS como herramienta para estimar la producción de energía en sistemas solares fotovoltaicos y para optimizar el diseño, con lo cual, en caso de que el sistema sea instalado, se podría obtener una mayor eficiencia de los recursos.

Agradecimientos

De la Facultad de Tecnología de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas:

Al PhD(c). *Camilo Andrés Arias Henao*, profesor del grupo de investigación en energías alternativas GIEAUD.

Al Ing. *John Alejandro Forero Casallas*, coordinador del proyecto curricular del programa de Tecnología e Ingeniería Mecánica.

A la Ing. *Yisselle Indira Acuña Hereira*, quien se desempeñó en ese cargo hasta final de 2013.

Por permitir el uso de la licencia educativa del software TRNSYS 17, para propósitos educativos en el desarrollo de este trabajo.

A la Universidad Libre por facilitar los escenarios y equipos requeridos para el trabajo desarrollado.

Referencias

1. Alonso Abella, Miguel. *Dimensionamiento de sistemas fotovoltaicos autónomos*. Madrid: Laboratorio de energía Solar, CIEMAT. Consultado el 24 de junio de 2014. En: http://api.eoi.es/api_v1_dev.php/fedora/asset/eoi.../componente45301.pdf.
2. Alvarado Fajardo, A. (2014). *Análisis, diseño y simulación de sistema solar fotovoltaico para suministro eléctrico en apoyo a programa nutricional en la escuela rural el cardonal, Tibaná (Boyacá) – Colombia*. Universidad Libre, Colombia.
3. Burgos Mellado, C. (2013). *Estimación del estado de carga para un banco de baterías basada en modelación difusa y filtro extendido de Kalman*. Universidad de Chile, Santiago de Chile, Chile.
4. Egido Aguilera, Miguel Ángel (2006). Energía solar fotovoltaica para la electrificación del medio rural. *Energía Participación y sostenibilidad. Tecnología para el desarrollo humano*, primera edición, 157 – 172.
5. Fernández Ferichola, J. (2009). *Caracterización de módulos fotovoltaicos con dispositivo portátil*. Universidad Carlos III de Madrid. España.
6. Joaquín Barrios, Carmencita De Los Ángeles (2008). *Diseño de un sistema solar fotovoltaico aislado, para el suministro de energía eléctrica a la comunidad rural buena vista, san marcos*. Universidad de San Carlos de Guatemala.
7. Martínez Cerro, B. (2011). *Instalación solar fotovoltaica aislada*. Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España.
8. Nina E., Edgar. (2011). “Dimensionamiento y evaluación económica de SFV”. En *XVIII Simposio Peruano de Energía Solar*. Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.
9. Ortega Rodríguez, Mario (2001). *Energías renovables*. Ediciones Paraninfo.
10. REDFE. Red de fuentes de energía CONACYT: *Estado del arte de la investigación en fuentes de energía y políticas públicas*. Consultado el 17 junio de 2014. En <http://www.redfe.org.mx/es/images/redfe/estado-de-arte-totalredfe.pdf>
11. Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison. (2012). *TRNSYS 17 - Mathematical Reference*, Vol. 4. Ed. Madison, Wisconsin. USA.
12. UPME (Unidad de planeación minero energética). (2003). *Guía de Especificaciones de Sistemas Fotovoltaicos*. Unión Temporal ICONTEC – AENE.