



Sistema de monitorización de contaminación ambiental alimentado con energía solar fotovoltaica para una estación de autobús

Monitoring system of environmental pollution powered by photovoltaic solar energy for a bus station

Eneil Quintero Arenas¹ Sergio Basilio Sepúlveda Mora² Sergio Iván Quintero Ayala³

Para citar este artículo: Quintero, E., Sepúlveda, S. y Quintero, S. (2017). Sistema de monitorización de contaminación ambiental alimentado con energía solar fotovoltaica para una estación de autobús. *Revista Redes de Ingeniería*. 8(1), 36-46, doi: <https://doi.org/10.14483/2248762X.11872>.

Recibido: 19-abril-2017 / **Aprobado:** 3-agosto-2017

Resumen

Para incentivar y mejorar el uso de las estaciones de autobuses, se ha realizado el diseño de un sistema ecológico y tecnológico en el cual, por medio de sensores, se miden las variables climatológicas de humedad, temperatura, ruido, nivel de rayos ultravioleta y de gas carbónico. Estos parámetros son adquiridos por un microcontrolador para su posterior envío al sistema embebido Raspberry Pi 3, que procesa la información y genera la interfaz gráfica compuesta de cinco ventanas que se visualizan secuencialmente en una pantalla LED. La energía requerida para el funcionamiento de los dispositivos electrónicos es de 3922,4 Wh/día, y será suministrada por un sistema fotovoltaico autónomo. Con el uso del software PVsyst se ha validado el diseño del sistema FV obteniendo una energía anual de 1172 kWh.

Palabras clave: estación de autobús, Raspberry Pi, sistema embebido, sistema fotovoltaico.

Abstract

In order to encourage and improve the use of bus stations, we designed an ecological and technological system. The climate variables of humidity, temperature, noise, ultraviolet rays and carbonic dioxide levels are sensed; this information is acquired by a microcontroller, then these variables are sent to the Raspberry Pi 3 embedded system which processes the data and generates a graphical interface composed of 5 screens displayed sequentially on an LED display. The energy required for the operation of the electronic devices is 3922.4 Wh/day, and it will be supplied by an off-grid photovoltaic system. With the use of PVsyst software, the design of the PV system has been validated, obtaining an annual power of 1172 kWh.

Keywords: Bus station, embedded system, photovoltaic system, Raspberry Pi.

1. Universidad Francisco de Paula Santander. Correo electrónico: eneilquintero@ufps.edu.co
2. Profesor e investigador del Departamento de Electricidad y Electrónica, Universidad Francisco de Paula Santander. Correo electrónico: sergio.sepulveda@ufps.edu.co
3. Universidad Francisco de Paula Santander. Correo electrónico: sergioivanqa@ufps.edu.co

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la mayor parte de la energía eléctrica se produce a partir de recursos no renovables, que en su mayoría son limitados y causan emisiones de gases de efecto invernadero [1]; por lo tanto, la generación de energías limpias tales como la eólica, marítima, geotérmica, biomasa y solar [2], se ha convertido en una necesidad mundial debido a la creciente demanda energética que agota rápidamente los recursos no renovables [3] [4] [5].

En Colombia, la energía solar fotovoltaica es un tema que se ha ido desarrollando paulatinamente [6] [7] [8], incluyendo la ciudad de Cúcuta, lo que hace necesario profundizar en el conocimiento de esta tecnología ecológica y poder estar al nivel de las grandes ciudades y los países desarrollados. El avance de la tecnología ha llevado a aprovechar la radiación electromagnética que el sol emite sobre la Tierra; el efecto fotoeléctrico permite transformar la energía solar en energía eléctrica de corriente continua [9].

La energía fotovoltaica es el proceso de convertir la luz del sol directamente en energía eléctrica por medio de células solares, sin perjudicar el medio ambiente, sin generar basuras y sin dañar la salud. El sol ofrece la posibilidad de detener o al menos minimizar el cambio climático y el agotamiento de los recursos naturales; por otro lado, invertir en la energía solar ofrece beneficios económicos [10] para las empresas que incursionen en este ámbito.

La energía solar puede aprovecharse en dos direcciones, una orientada a los sistemas conectados a la red y la otra a los sistemas autónomos; estos últimos están conformados por una serie de elementos básicos para su correcto funcionamiento y control, tal como se observa en la Figura 1 [9].

Las instalaciones solares fotovoltaicas constan de paneles solares, que a su vez contienen células solares individuales hechas de materiales

semiconductores como el silicio (cristalino y amorfo). Cuando brilla el sol, una célula solar produce una corriente y un voltaje para generar energía eléctrica. Una variedad de materiales puede satisfacer los procesos en la obtención de energía fotovoltaica, pero la mayor parte en la conversión de esta energía, es la utilización de materiales semiconductores en forma de una unión PN [11].

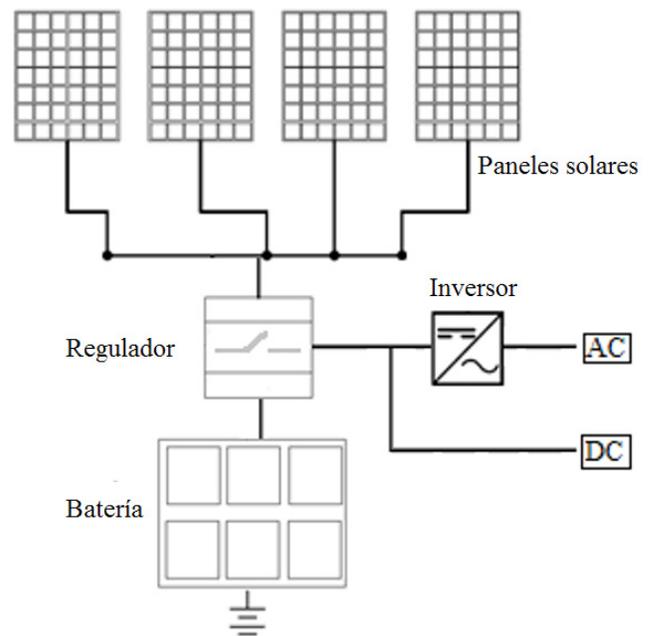


Figura 1. Esquema general de un sistema fotovoltaico autónomo.

Fuente: adaptado de [9].

La ciudad de Cúcuta actualmente demanda un gran flujo vehicular de transporte público con un porcentaje considerable de usuarios que lo utilizan, además de tener un clima tropical con unos niveles de contaminación variables; con esta situación, se observa la falta de estaciones de autobús y la ausencia de medios o equipos para que los usuarios conozcan variables climatológicas relacionadas con el nivel de contaminación ambiental. En países como los Estados Unidos existen iniciativas tales como soofa [12], que tiene el propósito de monitorizar variables de contaminación mediante el uso de sensores embebidos con el fin de crear ciudades inteligentes.

En este trabajo se propone un sistema electrónico alimentado con energía solar fotovoltaica, que permite monitorizar variables físicas relacionadas con la contaminación ambiental, en una estación de autobús de la ciudad. El sistema permite complementar otros estudios sobre movilidad vehicular que se han desarrollado previamente en San José de Cúcuta [13].

MÉTODOS

Análisis de la situación actual en la ciudad

Se identificaron los tipos de tecnologías que actualmente componen el sistema de energía solar fotovoltaica y que puede variar de acuerdo con su localización y su utilidad; para ello se realizó un recorrido con el fin de verificar la operación y el funcionamiento de los sistemas de energía solar fotovoltaica instalados en la ciudad. A continuación, se listan algunas empresas donde se ha implementado este tipo de tecnología.

- Canchas QATAR (sector Los Patios).
- Supermercado JM (sector Los Patios).

- Restaurante donde Juana (sector Villa del Rosario).

Por otra parte, se realizó un recorrido para observar algunas estaciones de autobuses presentes en la ciudad para comprobar su estado y el uso que los usuarios le dan al momento de utilizar este servicio. A continuación, se mencionan algunas estaciones de autobús principales presentes en la ciudad.

- Estación de autobús Centro, ubicada en la calle 13 entre avenidas 5 y 6.
- Estación de autobús Parque Colón, ubicada en la avenida 3 entre calles 12 y 13.
- Estación de autobús Fuente Luminosa, ubicada en la calle 8 con avenida 0.
- Estación de autobús Guaimaral, ubicada en la avenida Guaimaral cerca al Hospital.

Dentro de este recorrido se observó el poco uso de estas estaciones debido al mal estado de algunas, además de la falta de cultura ciudadana al momento de utilizar este medio, donde la mayoría de personas las utilizan para conversar con sus conocidos, aparte de la poca señalización de estas estaciones, como se observa en la Figura 2.



Figura 2. Estaciones de autobús instaladas en la ciudad de Cúcuta.

Fuente: elaboración propia.

Arquitectura del sistema electrónico

En la Figura 3 se observa la arquitectura del sistema electrónico, el cual está conformado por: los sensores, para realizar las mediciones climáticas en la estación; el microcontrolador PIC 16F877A, para la adquisición de la información de los sensores; la tarjeta Raspberry Pi 3, encargada del procesamiento de la información, y la pantalla LED, que permite la visualización de la información a los usuarios.

En la Tabla 1 se indican las variables climatológicas a medir junto con sus respectivos sensores, los cuales se encuentran conectados con el microcontrolador para realizar el proceso de adquisición de datos; la información es transmitida a través del protocolo de comunicación I2C hacia la tarjeta Raspberry Pi 3, encargada de procesar y ejecutar la interfaz gráfica, la cual a través del puerto HDMI será visualizada en la pantalla LED por los usuarios de la estación de autobús.

Para la adquisición de los datos medidos por los sensores, se ha empleado el PIC 16F877A, utilizando sus puertos analógicos; para el envío de la información hacia la Raspberry Pi se han empleado los puertos SCL y SDA. En la Figura 4 se observa el diagrama de flujo que describe el algoritmo empleado para esta tarea.

Tabla 1. Variables climatológicas.

VARIABLES CLIMATOLÓGICAS	SENSOR
Ruido	LM393
Humedad	HSM 20G
Temperatura	HSM 20G
Dióxido de carbono	MQ 135
Radiación ultravioleta	UVM 30A
Tiempo	Módulo RTC

Fuente: elaboración propia.

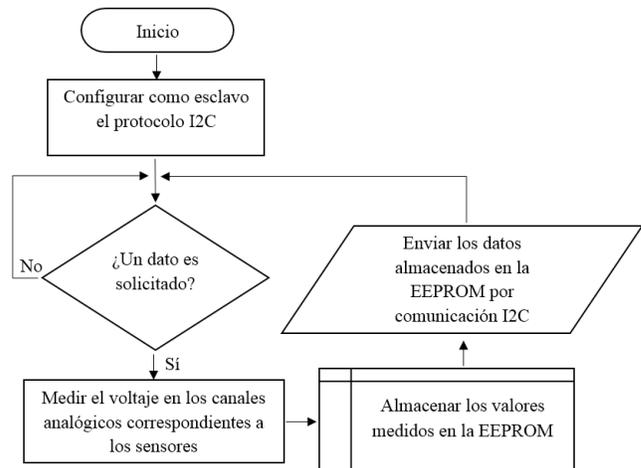


Figura 4. Diagrama de flujo del microcontrolador.

Fuente: elaboración propia.

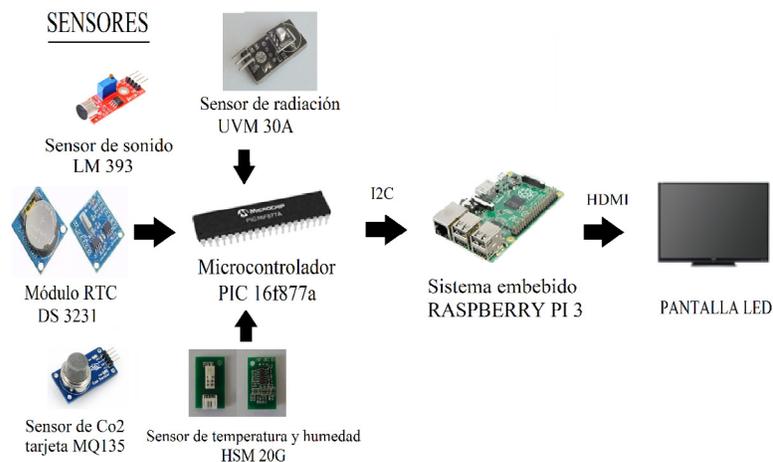


Figura 3. Arquitectura del sistema electrónico.

Fuente: elaboración propia.

Para realizar la interfaz gráfica se ha empleado la tarjeta Raspberri Pi 3, la cual se encarga de recibir la información enviada por el PIC mediante la comunicación I2C. Para el desarrollo del algoritmo se ha empleado el lenguaje de programación Python, haciendo uso de la librería TKinter para crear cinco ventanas de usuario para la visualización de la información recibida respecto al estado de las variables climatológicas y los tiempos de llegada de los buses a la estación. Para definir el consumo de energía medio diario de la estación de autobús, se tuvo en cuenta el tiempo estimado de trabajo diario de los equipos eléctricos y electrónicos que se observan en la Tabla 2. El diagrama esquemático del circuito y los códigos fuente del microcontrolador y la tarjeta Raspberry Pi se encuentran en un repositorio público en la plataforma GitHub con el nombre de upervisión-ambiental.

Teniendo en cuenta la eficiencia de los componentes que conforman el sistema fotovoltaico, siendo estas del 90% para el inversor, 95% para el cableado y 95% para las baterías se obtiene un consumo de energía de 3922,4 Wh/día, lo cual equivale a 163,4 Ah/día, usando un voltaje de corriente directa de 24 V en el banco de baterías.

Para realizar el diseño del sistema fotovoltaico, se requiere determinar la radiación solar incidente en la ubicación donde se realizará la instalación, para ello se ha consultado el atlas de radiación solar en

Colombia del IDEAM [14], seleccionando la estación satelital autónoma de la Universidad Francisco de Paula Santander de la ciudad de Cúcuta, la cual se encuentra a una Latitud de 7°53'56,7" N, Longitud 72°29'15,1"W y a 311 metros sobre el nivel del mar. Estos datos corresponden a la radiación solar diaria promedio de los meses de enero a diciembre desde el 2006 al 2014.

Teniendo en cuenta estos datos, se determinaron cuáles son los meses con valores de radiación solar más bajos, tal como se muestra en la Figura 5, en la que se observa la curva de radiación en función de las diferentes horas del día para los doce meses del año; por lo tanto, se seleccionó el mes de marzo con la radiación solar más baja 4.660 Wh/m², utilizando su equivalente en horas solar pico se determinó que la radiación solar para el mes más crítico es de 4,66 HSP.

Para calcular el número de baterías, se consideraron dos días de autonomía en los cuales el sistema funcionará de forma normal en ausencia total de sol. Se calcula la capacidad total del sistema de acumulación, considerando los días de autonomía y teniendo en cuenta una máxima profundidad de descarga del 50% empleando la ecuación 1, obteniendo una capacidad total de 726,22 Ah.

$$\text{Capacidad total Ah} = \frac{\text{corriente del sistema} \cdot \text{Días de autonomía}}{\text{Máx. profundidad de descarga} \cdot \text{Corrección por temperatura}} \quad \text{Ecuación (1)}$$

Tabla 2. Consumo de energía diario.

Descripción	Nº de componentes	Potencia (W)	Potencia total (W)	Horas de funcionamiento diario	Total Energía necesaria (Wh)
Circuito electrónico	1	10	10	24	240
Pantalla LED	1	69	69	24	1.656
Luminarias LED	2	20	40	12	480
Toma corrientes	3	15	45	18	810
Energía total del circuito					3.186

Fuente: elaboración propia.

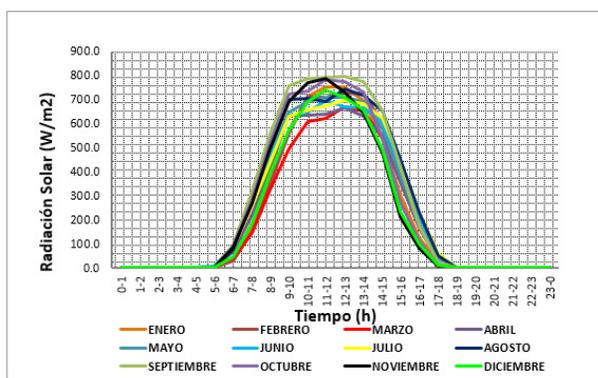


Figura 5. Radiación solar promedio de los doce meses del año.

Fuente: elaboración propia.

Teniendo en cuenta las 4,66 horas solares pico calculadas previamente, se determina la cantidad de paneles solares que formarán el arreglo fotovoltaico, teniendo en cuenta la corriente que el sistema consume durante todo el día (163,4 A) se tiene que los paneles deben suministrar una corriente instantánea de 35,02 A. Para suplir esta corriente se emplean cuatro paneles solares en paralelo.

Para conocer el número de reguladores que forman parte del sistema, se aumenta en 2 % la corriente pico máxima del generador fotovoltaico, obteniendo una corriente de 43,7 A del regulador.

La potencia del inversor está condicionada a la potencia global de los componentes de la estación de

autobús, en donde el consumo total instantáneo es de 164 W, teniendo en cuenta un factor de seguridad de 25%, la potencia nominal mínima del inversor es 205 W.

Para validar los cálculos realizados se ha realizado su respectiva simulación en el software PVSyst [15] para determinar el comportamiento del sistema fotovoltaico autónomo; con base en lo anterior, se establece si cumple con los requerimientos de potencia de los equipos a alimentar.

RESULTADOS

Según los criterios de diseño expuestos previamente, se han seleccionado los componentes que integran el sistema fotovoltaico autónomo tal como se muestran en la Tabla 3.

Para garantizar un correcto funcionamiento, es necesario el diseño de las protecciones adecuadas para cada uno de los componentes, tal como se indica en la Tabla 4.

En la Figura 6 se indica el diagrama de interconexión de los componentes que forman parte del sistema fotovoltaico autónomo encargado de suministrar la potencia necesaria para el correcto funcionamiento de los dispositivos de la estación de bus.

Tabla 3. Componentes del sistema fotovoltaico autónomo.

Descripción	Referencia del componente	Especificaciones técnicas	Nº de componentes
Paneles fotovoltaicos	UP-M320P-W	- Corriente máxima: 8,72 A - Potencia máxima: 320 W - Voltaje máximo: 36,7 V	4 (1 en serie, 4 en paralelo)
Baterías	DC-12-250AH generic	- Capacidad: 250Ah - Voltaje nominal: 12V	6 (2 en serie, 3 en paralelo)
Regulador de carga	Schneider electric	- Voltaje: 24 V - Corriente: 60 A	1
Inversor	GE INVERTER 300/24	- Voltaje: 24 V - Potencia: 300 W	1

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4. Protecciones del sistema fotovoltaico autónomo.

Equipo	Protección	Corriente nominal (A)	Voltaje nominal (V)
Panel fotovoltaico	Fusible	13,47A	55,58V
Arreglo fotovoltaico	Fusible	44,9A	55,58V
Batería	Fusible	67,35A	55,58V
Inversor	Interruptor automático bipolar	3A	110V

Fuente: elaboración propia.

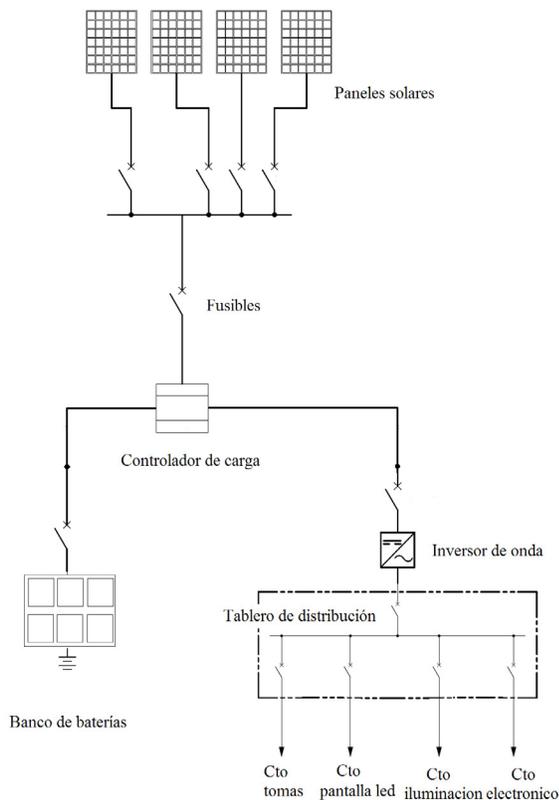


Figura 6. Diagrama de interconexión del sistema fotovoltaico autónomo.

Fuente: elaboración propia.

Empleando el *software* PVsyst se han ingresado los valores de las especificaciones técnicas de cada uno de los componentes seleccionados, determinando el comportamiento del sistema fotovoltaico

a lo largo de un año. En la Figura 7 se observan las pérdidas que sufre el sistema, calculando una potencia total de 1172 kWh al año.

En la Figura 8 se observa el diseño de la vista lateral de la estación de autobús con cada uno de sus componentes enumerados como sigue: (a) paneles solares, (b) lámparas LED, (c) toma corriente, (d) tablero del inversor, (e) regulador de carga, (f) baterías, (g) sistema electrónico, (h) pantalla LED.

La interfaz principal de usuario que observarán los peatones se aprecia en la Figura 9, en ella se encuentra el estado de las variables climatológicas de la estación. En la Figura 10 se indica la secuencia de ventanas que se visualizarán en la pantalla LED, cada una de ellas ha sido diseñada utilizando la librería TKinter de Python y son ejecutadas por la tarjeta Raspberry Pi 3.

DISCUSIÓN

Al momento de desarrollar varias tareas simultáneamente, como se evidenció en el presente trabajo, es necesario tener la capacidad de procesamiento multitarea. El sistema electrónico utilizado permitió desarrollar la simulación de los sensores de manera óptima para su posterior visualización de variables medidas, logrando informar de manera oportuna a los usuarios que hacen uso de las estaciones de autobús.

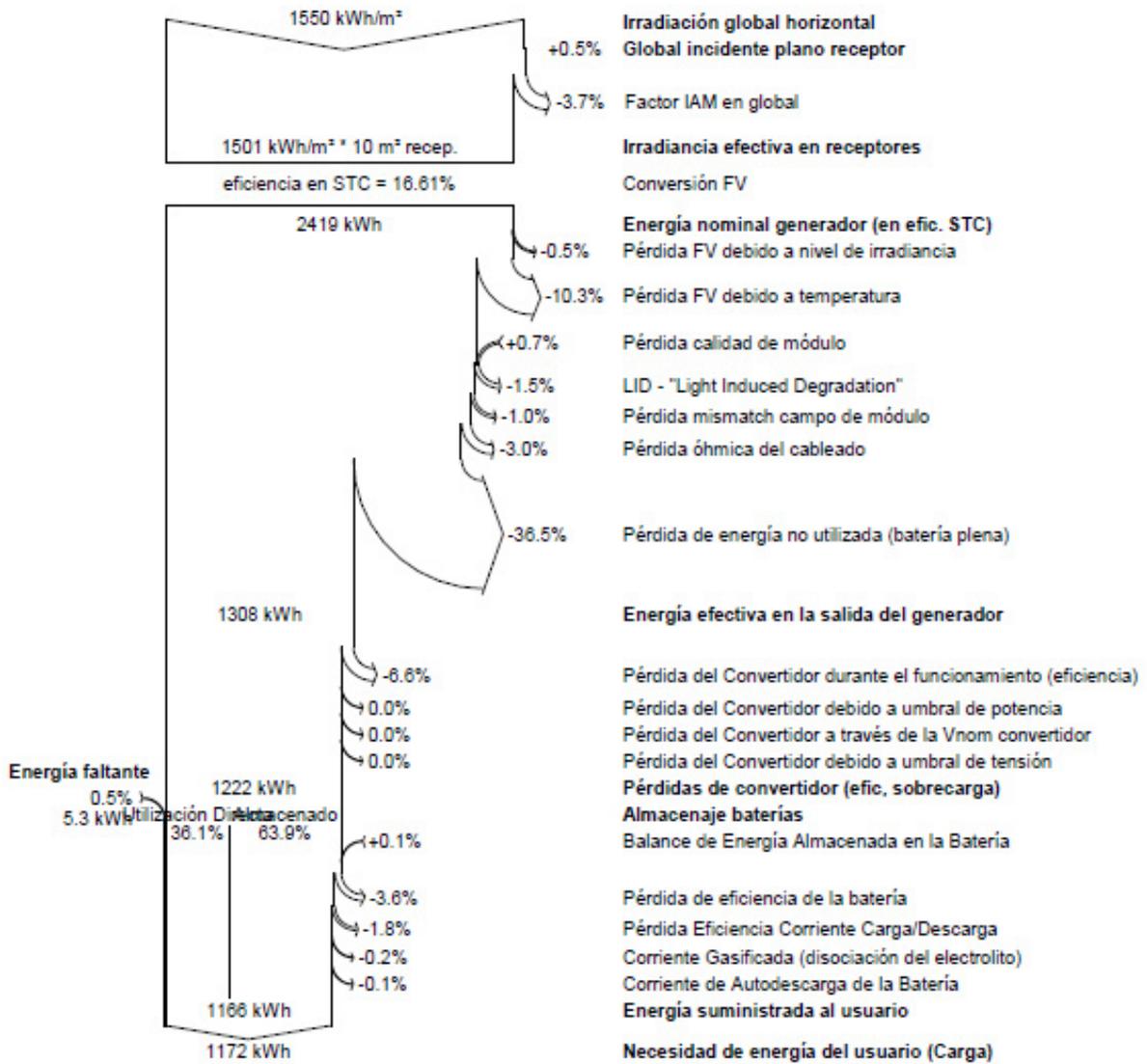


Figura 7. Diagrama de pérdidas anuales para el sistema autónomo.

Fuente: elaboración propia.

En el presente proyecto se ha utilizado la tarjeta Raspberry Pi 3 para llevar a cabo la recepción de los datos y soporte en la ejecución del algoritmo, brindando de manera constante la actualización del sistema, logrando así enviar la información para posteriormente ser visualizada en la pantalla LED, lo cual mejoró la eficiencia del proceso; todo esto soportado en el principio del procesamiento de multitarea, haciendo uso de las interrupciones.

CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados obtenidos del diseño del sistema autónomo, si se implementa se lograrían establecer puntos ecológicos de energía para los ciudadanos, de tal manera que el ahorro y reducción de costos sería significativo, además de incentivar a las personas a hacer un uso más frecuente de las estaciones tecnológicas de autobús; por otro lado, ofrece

la posibilidad de integrar la red ciudadana y el sistema de transporte público y la opción de cargar los dispositivos móviles en el momento que se requiera.

Realizar las interfaces gráficas de manera didáctica, es una manera eficaz de lograr que los

usuarios entiendan y observen las diferentes variables climatológicas y las rutas de autobús, de este modo se mejora eficientemente el servicio de transporte público en la ciudad, contribuyendo con una mejor calidad de vida de sus habitantes.

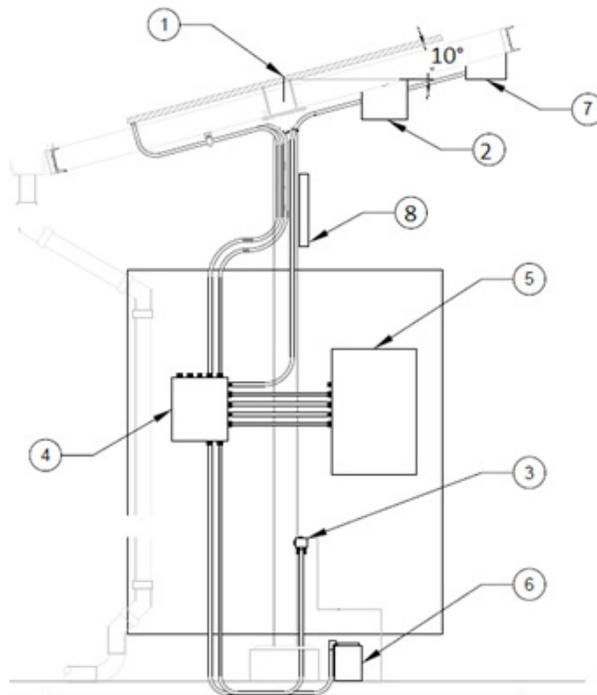


Figura 8. Vista lateral de la estación de autobús.

Fuente: elaboración propia.



Figura 9. Interfaz gráfica principal.

Fuente: elaboración propia.

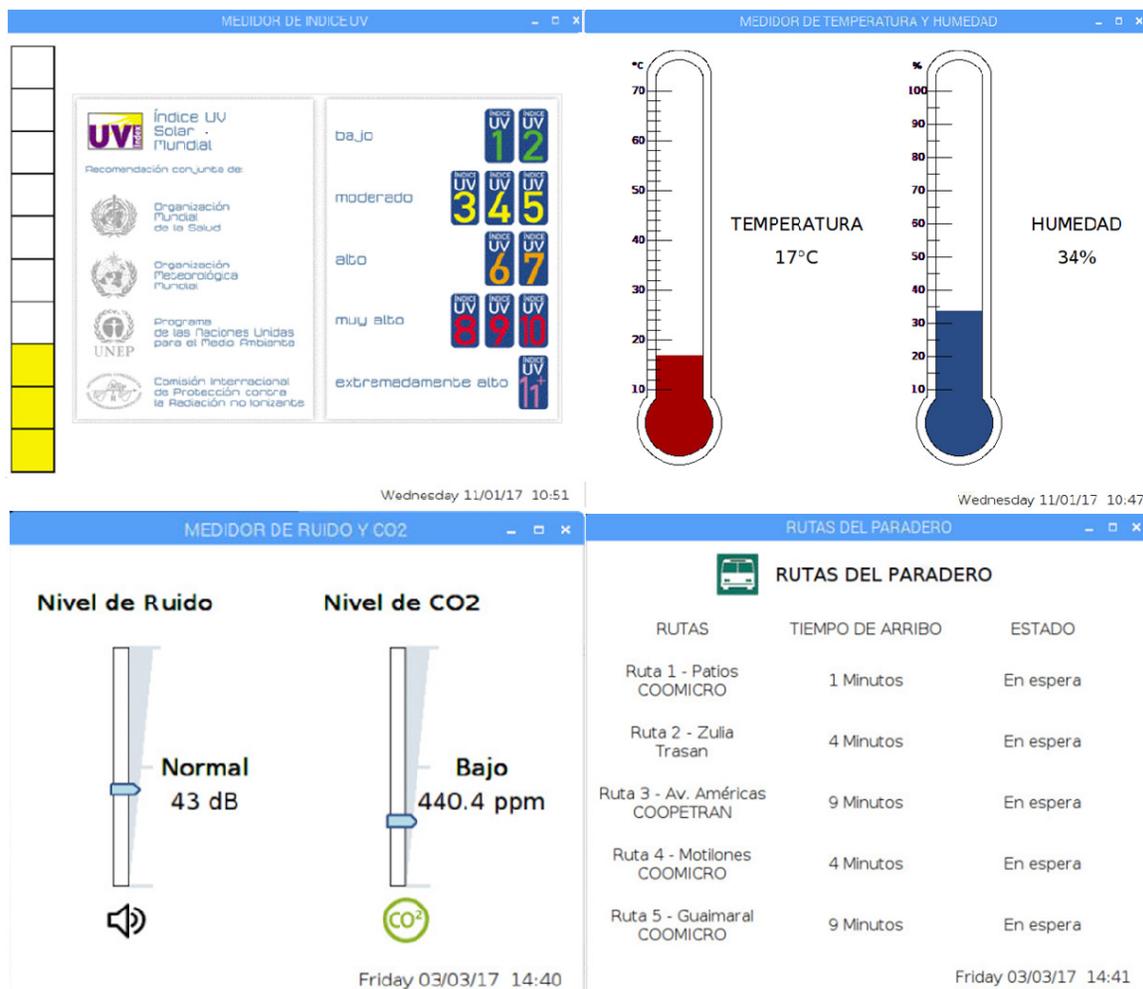


Figura 10. Secuencia de ventanas de la interfaz gráfica.

Fuente: elaboración propia.

REFERENCIAS

- [1] M. A. Mantilla Villalobos, J. F. Petit Suárez y G. Ordóñez Plata, "Control directo de potencia aplicado a sistemas fotovoltaicos conectados a la red". *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, pp. 47-60, 2014.
- [2] C. G. Rodríguez-Borges y A. Sarmiento-Sera, "Dimensionado mediante simulación de sistemas de energía solar fotovoltaica aplicados a la electrificación rural". *Ingeniería Mecánica*, vol. 14, n° 1, pp. 13-21, 2011.
- [3] L. Herrera, A. Miranda, E. I. Arango-Zuluaga, C. A. Ramos-Paja y D. González-Montoya, "Dimensionamiento de sistemas de generación fotovoltaicos localizados en la ciudad de Medellín". *Tecno Lógicas*, pp. 289-301, 2013.
- [4] C. A. Correa Flórez, G. A. Marulanda García y A. F. Panesso Hernández, "Impacto de la penetración de la energía solar fotovoltaica en sistemas de distribución: estudio bajo supuestos del contexto colombiano". *Tecnura*, vol. XX, n° 50, pp. 85-95, 2016.
- [5] C. M. Giraudy Arafet, I. Massipe Cano, R. Rodríguez Rivera, M. Rodríguez Gámez y A. Vázquez Pérez, "Factibilidad de instalación de sistemas fotovoltaicos conectados a red". *Ingeniería Energética*, vol. XXXV, n° 2, pp. 141-148, 2014.

- [6] A. Escobar Mejía, M. Holguín Londoño y J. C. Osorio R., "Diseño e implementación de un seguidor solar para la optimización de un sistema fotovoltaico". *Scientia Et Technica*, vol. XVI, nº 44, pp. 245-250, 2010.
- [7] A. Escobar Mejía, C. A. Torres y R. A. Hincapie Isaza, "Conexión de un sistema Fotovoltaico a la red eléctrica". *Scientia Et Technica*, vol. XV, nº 43, pp. 31-36, 2009.
- [8] J. A. Hernández Mora, C. L. Trujillo Rodríguez y W. A. Vallejo Lozada, "Modelo de un sistema fotovoltaico interconectado". *Tecnura*, vol. XVII, pp. 26-34, 2013.
- [9] J. D. Mesa, A. Escobar Mejía y R. A. Hincapie Isaza, "Descripción y análisis del efecto fotovoltaico en la región". *Scientia Et Technica*, vol. XV, nº 42, pp. 327-332, 2009.
- [10] M. Rodríguez Gámez, A. Vázquez Pérez, M. Castro Fernández y M. Vilaragut Llanes, "Sistemas fotovoltaicos y la ordenación territorial". *Ingeniería Energética*, vol. XXXIV, nº 3, pp. 247-259, 2013.
- [11] N. Journ, "PV EDUCATION". 2003. [On Line]. Available from: <http://www.pvcdrom.org/pvcdrom/solar-cell-structure>
- [12] soofa, "Smart City". 2016. [On Line]. Available from: <http://www.soofa.co>
- [13] J. M. Celis-Peñaranda, C. D. Escobar-Amado, S. B. Sepúlveda-Mora, S. A. Castro-Casadiago, B. Medina-Delgado y J. J. Ramírez-Mateus, "Control adaptativo para optimizar una intersección semaforica basado en un sistema embebido". *Ingeniería y Ciencia*, vol. XII, nº 24, pp. 169-193, 2016. <https://doi.org/10.17230/ingciencia.12.24.8>
- [14] IDEAM, "Atlas de radiación global. Lista de estaciones automáticas". 2015. [En línea]. Disponible en: <http://atlas.ideam.gov.co/basfiles/Anexo-Lista-de-estaciones-automatizadas-de-radiacion-global-del-Ideam.pdf>
- [15] L. Osorio Laurencio y R. Montero Laurencio, "Análisis energético de un sistema fotovoltaico integrado a una cubierta plana horizontal". *Ingeniería Energética*, vol. XXXVII, nº 1, pp. 45-54, 2016.

