



Evaluación de una estación eólica-fotovoltaica conectada a la red para recargar ómnibus eléctricos

Evaluation of a grid-connected solar-wind powered electric bus charging station

Yamir Sánchez-Torres^{1,*}, Antonio Sarmiento-Sera¹, Joel Morales-Salas¹,
Yunesky Masip-Macía^{II}

I. Universidad Tecnológica de la Habana José Antonio Echeverría. Centro de Estudios de Tecnologías Renovables. La Habana, Cuba

II. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. Escuela de Ingeniería Mecánica. Quilpue, Chile

*Autor de correspondencia: yamir@tesla.cujae.edu.cu

Este documento posee una [licencia Creative Commons Reconocimiento-No Comercial 4.0 internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



Recibido: 25 de febrero de 2019

Aceptado: 2 de abril de 2019

Resumen

El objetivo de esta investigación consistió en evaluar un sistema híbrido eólico-fotovoltaico conectado a la red para la recarga de una flota de ómnibus eléctricos. Su importancia radica en que son analizados dos fuentes renovables, el sol y el viento, en dos localidades con diferente recurso eólico. El sistema adquirió la energía de un arreglo fotovoltaico de 120 kW y de un aerogenerador de 65 kW. Se utilizaron 4 convertidores para las 4 estaciones de recarga y 4 inversores bidireccionales (CD)/(CA) conectados a la red. Se usó el

programa de simulación HOMER para evaluar y comparar el potencial solar y eólico de cada localidad y su efecto en el sistema de recarga. Se demostró que en ambos lugares el sistema no solo es capaz de recargar los ómnibus eléctricos sino que también brinda energía a la red.

Palabras claves: energía renovable, ómnibus eléctricos, sistemas híbridos eólico-fotovoltaicos, Yutong.

Abstract

The aim of this research was to evaluate the behavior of a hybrid solar-wind powered grid-connected electric bus charging station to recharge a fleet of electric busses. The system acquired the energy from a 120 kW photovoltaic array and a 65 kW wind turbine. It has 4 converters associated with 4 charging stations, and 4 bidirectional (DC)/(AC) inverter connected to the grid. The HOMER simulation software was used to evaluate and to compare the solar and wind energy

potential presented in each zone and its effect in the charging system. It was demonstrated for both sites that the system not only provides electric energy to charge the busses fleet but also brings energy to the grid.

Key words: renewable energy, electric bus, hybrid solar-wind systems, Yutong.

Cómo citar este artículo:

Sánchez Torres Y, Sarmiento Sera A, Morales Salas J, et al. Evaluación de una estación eólica-fotovoltaica conectada a la red para recargar ómnibus eléctricos. Ingeniería Mecánica. 2019;22(3):127-132. ISSN 1815-5944.

Introducción

A nivel mundial, el sector del transporte es responsable de más de un 30 % del consumo total de energía, una cuarta parte de las emisiones de CO₂ y un 15 % de las emisiones antropogénicas de Gases de Efecto Invernadero (GEI) [1, 2]. Si se anhela cumplir con las obligaciones establecidas en el Acuerdo de París, es necesaria una transición que se aleje paulatinamente del consumo de combustibles fósiles. Esto sería posible mejorando la eficiencia energética de los modos de transporte y las tecnologías relacionadas con los mismos. En este sentido urge un cambio conceptual, estructural y técnico para alcanzar el reto de la sostenibilidad energética. No existe formulación técnica posible para lograr el desarrollo sostenible con el uso de los combustibles fósiles.

En el campo de las fuentes renovables de energía, se reconocen las ventajas del empleo de sistemas integrados a la red por sobre las aplicaciones aisladas, debido principalmente al alto costo de los sistemas de almacenamiento de energía y a la intermitencia y variabilidad de los recursos renovables [3, 4]. Hoy es evidente el desarrollo de la utilización de las fuentes renovables y su aplicación en la recarga de vehículos eléctricos como solución a la necesidad de un transporte menos contaminante [5-7].

Por otro lado, aunque parezca suficiente un determinado potencial solar o eólico para considerar preferible un sistema eólico puro o fotovoltaico puro, el empleo de sistemas híbridos de energía resulta en muchos casos, más

confiable [3, 8, 9]. La posibilidad de implementar un sistema híbrido eólico-fotovoltaico en localidades con reducido potencial eólico para la recarga de vehículos eléctricos es algo aun por analizar.

Muchas empresas, centros de enseñanza, y otras instituciones emplean flotas de ómnibus de combustión para el traslado de los estudiantes y trabajadores desde las sedes hasta determinados enclaves. La gran mayoría de esos equipos poseen varios años de explotación y en ocasiones se encuentran sobreexplotados. Debido a que no se cumple con los plazos de los mantenimientos planificados y por ello aumenta el deterioro técnico y el consumo de combustibles y lubricantes. Los tiempos de parada por rotura traen aparejado que no se cumplan los planes anuales de transportación.

Los autores analizaron la propuesta de sustituir una flota de ómnibus diésel por una de ómnibus eléctricos para ser usados en la transportación de los trabajadores de los centros de trabajo y educacionales. Dicha flota va a ser recargada usando un sistema híbrido eólico-fotovoltaico; situado en dos zonas de estudio, una primera zona con un abundante potencial eólico (Zona 1) y otra zona con un potencial eólico pobre (Zona 2). Con un cargador de 60 kW se pueden recargar sus baterías hasta la máxima capacidad de 295 kWh en 5 horas [10]. En este trabajo se utilizó el ómnibus híbrido Yutong E12, la capacidad es de 97 personas, tienen una velocidad máxima de 69 km/h y una autonomía de 300 kilómetros [11].

El objetivo de esta investigación consistió en evaluar un sistema híbrido eólico-fotovoltaico conectado a la red para la recarga de una flota de ómnibus eléctricos. Se comprobó que el sistema híbrido en ambas localidades cumple con la demanda para la recarga de la flota y se evidenció la influencia positiva que tiene contar con un buen potencial eólico en la generación eléctrica. Como resultado colateral se obtuvo una reducción considerable de GEI debido al empleo de fuentes renovables de energía para la generación de la electricidad de recarga de los ómnibus, en lugar de utilizar la red eléctrica. Los resultados corroboran que la demanda de electricidad necesaria para la recarga de una flota de 8 ómnibus eléctricos con pobre potencial eólico como el de la zona 2, se puede satisfacer con un sistema híbrido eólico-fotovoltaico.

Métodos y Materiales

Esta investigación se realiza para evaluar y comparar la energía entregada al sistema de recarga por dos fuentes renovables (viento y sol) en dos emplazamientos, uno con un buen potencial eólico (Zona 1) y otro con un potencial eólico pobre (Zona 2). Cada uno de los sistemas debe generar la energía para recargar las baterías de una flota de los 8 ómnibus eléctricos K12. En este estudio se evaluó la factibilidad técnica de implementar un sistema de recarga híbrido en localidades con reducido potencial eólico. Como resultado colateral se evidencia una reducción considerable de los GEI debido al empleo de fuentes renovables de energía para la generación de la electricidad de recarga de los ómnibus, en lugar de utilizar la red eléctrica.

Las disponibilidades de las fuentes de energía estudiadas se obtienen: para la energía solar-fotovoltaica en los trabajos [3, 12] y para la energía eólica que puede ser generada en cada territorio en los trabajos [13, 14].

Para el análisis y modelación de los sistemas de recarga basados en fuentes energéticas renovables se empleó el software HOMER versión 2.68 Beta. Este programa permite diseñar y evaluar diversos sistemas híbridos teniendo en cuenta el análisis de la sensibilidad y optimización a partir de la definición de las tecnologías, los costos, las cargas de demanda y la disponibilidad de recursos. Permite además realizar un análisis detallado hora a hora del comportamiento del sistema, propiciando la buena selección de las opciones y minimizando el tiempo de trabajo.

La instalación de recarga se diseñó con un aerogenerador de 65 kW de potencia, modelo Entegry eW15, un arreglo de 400 paneles fotovoltaicos de 300 Wp, para una potencia fotovoltaica total de 120 kW y se utilizan 4 convertidores para las 4 estaciones de recarga y 4 inversores bidireccionales (CD)/(CA) conectados a la red para la entrega de la energía sobrante a la misma, figura 2.

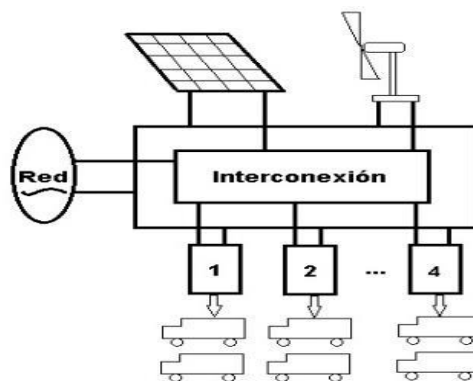


Fig. 1. Sistema de recarga eólico-fotovoltaico conectado a la red

Características del ómnibus

Uno de los modelos de ómnibus híbridos más empleados es el modelo Yutong K12, figura 1 y cuyas características se muestran en la tabla 1 [10]. Después de realizadas las pruebas técnicas los mismos se encuentran circulando por distintas ciudades con un buen desempeño y una reducida emisión de contaminantes en su funcionamiento. Este modelo es el empleado en esta investigación.



Fig. 2. Ómnibus eléctrico Yutong E12

Tabla 1. Características técnicas del ómnibus Yutong E12

Largo	12,0 m	Potencia	200 kW
Ancho	2,5 m	Torque	2400 N-m
Peso	19700 kg	Velocidad máxima	70 km/h
Pasajeros sentados	23	Autonomía	320 km
Pasajeros de pie	69	Tiempo de recarga	5 h con cargador de 70 kW

Estos ómnibus no emiten emisiones de gases en su funcionamiento y son más silenciosos que los de combustión, disminuyendo la contaminación sonora. Poseen características de diseño semejantes a los ómnibus tradicionales. Su capacidad es de 92 personas, semejante a los ómnibus de combustión de iguales dimensiones [11].

Los ómnibus trabajan cinco horas y media diarias, en ese tiempo recorren alrededor de 60 km por día, en régimen urbano, con velocidad promedio de 30 km/h. El consumo promedio de los ómnibus eléctricos es de 1,1 kWh/km [10].

Las flotas de ómnibus realizan recorridos iguales en ambas localidades. En la mañana trasladan el personal de 5 am a 7:30 am, en la tarde de 5:30 pm a 8 pm. El resto del tiempo permanecen en la base, este plan de transportación se repite todos los días laborales, excepto los fines de semana. Este itinerario permite aprovechar el recurso solar de 7:30 am a 5:30 pm en la recarga de la flota, cuando los ómnibus se encuentran en la base.

Teniendo en cuenta los recorridos diarios de la flota, se tiene una demanda energética de 405 kWh al día, con una potencia pico para la recarga de 70 kW. En la investigación se decidió recargar la flota entre las 9 am a 4 pm todos los días, figura 3.



Fig. 3. Demanda horaria de la flota

Estaciones de recarga y fuentes de energía

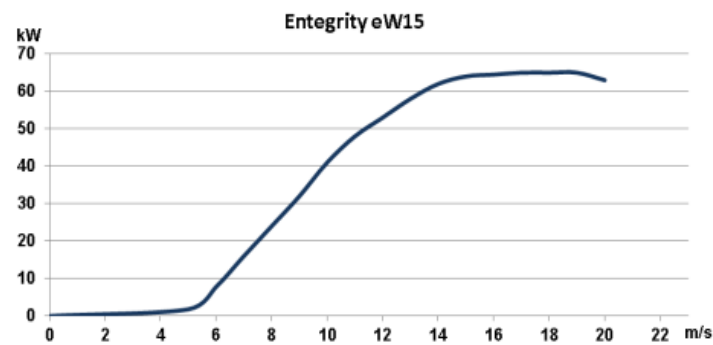
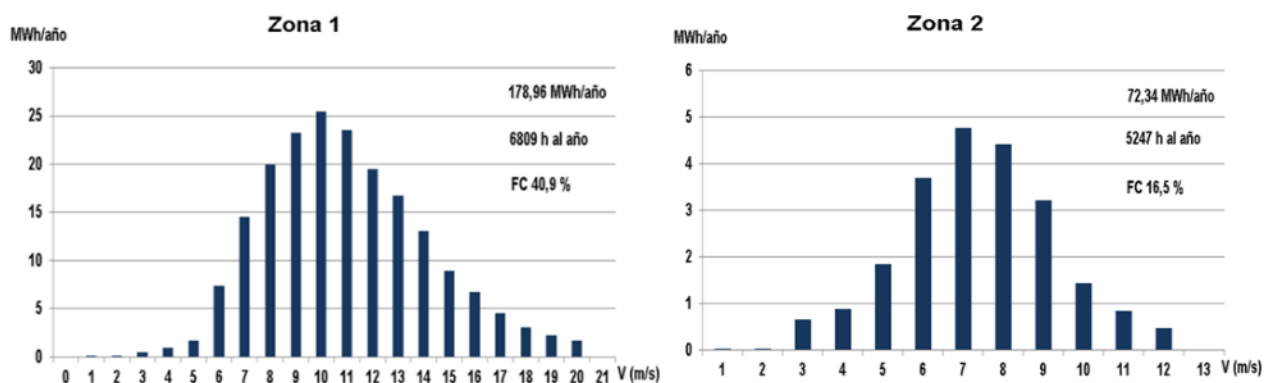
Las estaciones de recarga se encuentran en zonas con abundante recurso solar, por el contrario las velocidades del viento difieren considerablemente en ambos lugares y esto hace que las densidades de potencia también sean diferentes. En este trabajo se evaluó el comportamiento de la instalación de recarga teniendo en cuenta el potencial eólico abundante y escaso de las zonas 1 y 2 respectivamente. Los datos de la velocidad del viento promedio mensual de ambas zonas, en metros por segundo, se muestran en la tabla 2. Las disponibilidades de las fuentes de energía estudiadas se obtienen: para la energía solar-fotovoltaica en los trabajos [3, 12] y para la energía eólica que puede ser generada en cada territorio en los trabajos [13, 14]. En la figura 4 se observa la frecuencia mensual de probabilidad de velocidad del viento a 50 m de altura para las dos zonas.

Tabla 2. Velocidad del viento promedio mensual

Mes	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Promedio
Zona 1	7,6	7,7	7,5	7,6	6,3	6,8	7,3	6,7	5,6	6,2	7,6	7,7	7,1 (m/s)
Zona 2	5,4	5,5	5,6	5,1	4,7	4,1	4,2	3,9	4,3	4,5	5,6	5,4	4,8 (m/s)

**Fig. 4.** Distribuciones de frecuencia de velocidad del viento

En la figura 5 se representa la curva de potencia en función de la velocidad del viento para el aerogenerador empleado, modelo Entegriy eW15 [15]. Con las gráficas de la figura 4 y la curva de potencia del aerogenerador se obtuvo la energía anual que entrega el aerogenerador para cada velocidad de viento, el factor de capacidad y las horas de trabajo al año en ambas localidades. Los resultados se muestran en la figura 6.

**Fig. 5.** Curva de trabajo del aerogenerador**Fig. 6.** Energía anual entregada en cada localidad

Resultados y Discusión

Se realizaron 120 iteraciones del software, los resultados más factibles se muestran resumidos en la tabla 3. Se observó que para ambas localidades fue posible simular adecuadamente el sistema híbrido propuesto. Se evidenció además la necesidad de tener conectado el sistema a la red para cumplir con la demanda de recarga de la flota, debido fundamentalmente a la fluctuación de la velocidad del viento y la radiación solar.

Tabla 3. Comportamiento del sistema en cada lugar

Distribución anual Zona 1					
Generación	MWh/año	%	Consumo	MWh/año	%
Fotovoltaica	193,16	50,6	Demanda para recarga	147,82	38,7
Eólica	178,96	46,8	Suministrada a la red	214,98	56,2
Obtenida de la red	10,01	2,6	Obtenida de la red	10,01	2,6
Total	382,13	100,0	Total	382,13	100,0
Fracción renovable	372,12	97,4	Balance	204,97	55,1
Distribución anual Zona 2					
Generación	MWh/año	%	Consumo	MWh/año	%
Fotovoltaica	193,16	68,7	Demanda para recarga	147,82	52,6
Eólica	72,34	25,7	Suministrada a la red	113,86	40,5
Obtenida de la red	15,51	5,5	Obtenida de la red	15,51	5,5
Total	281,01	100,0	Total	281,01	100,0
Fracción renovable	265,50	94,5	Balance	98,35	37,0

En la tabla 3 se observa que en la zona 1, con abundante potencial eólico, ambas fuentes por separado (eólica y fotovoltaica) serían capaces de cumplir con la demanda de 147,82 MWh/año, pues la fotovoltaica generó 193,16 MWh/año y la eólica 178,96 MWh/año, cada una por separado. El potencial fotovoltaico de la zona 2 es igual al de la zona 1, pero la eólica solo generó 72,34 MWh/año, solo un 25 % de la energía necesaria. Por esa causa en la zona 1 solo se necesitó un 2,6 % de aporte de la red y en la zona 2 un 5,5 %, el doble de la zona 1.

En el caso de la Zona 2 hay que destacar que su pobre recurso eólico no permitió utilizar en buena medida esta fuente, sobre todo en los meses de junio a octubre, esto se muestra en las barras de color verde de la figura 8. La potencia mensual promedio del aerogenerador en dicha zona fue de 10 kW, el 15,4 % de la nominal. En el mismo período se apreció la necesidad de un mayor aporte de energía por parte de la red (barras de color azul).

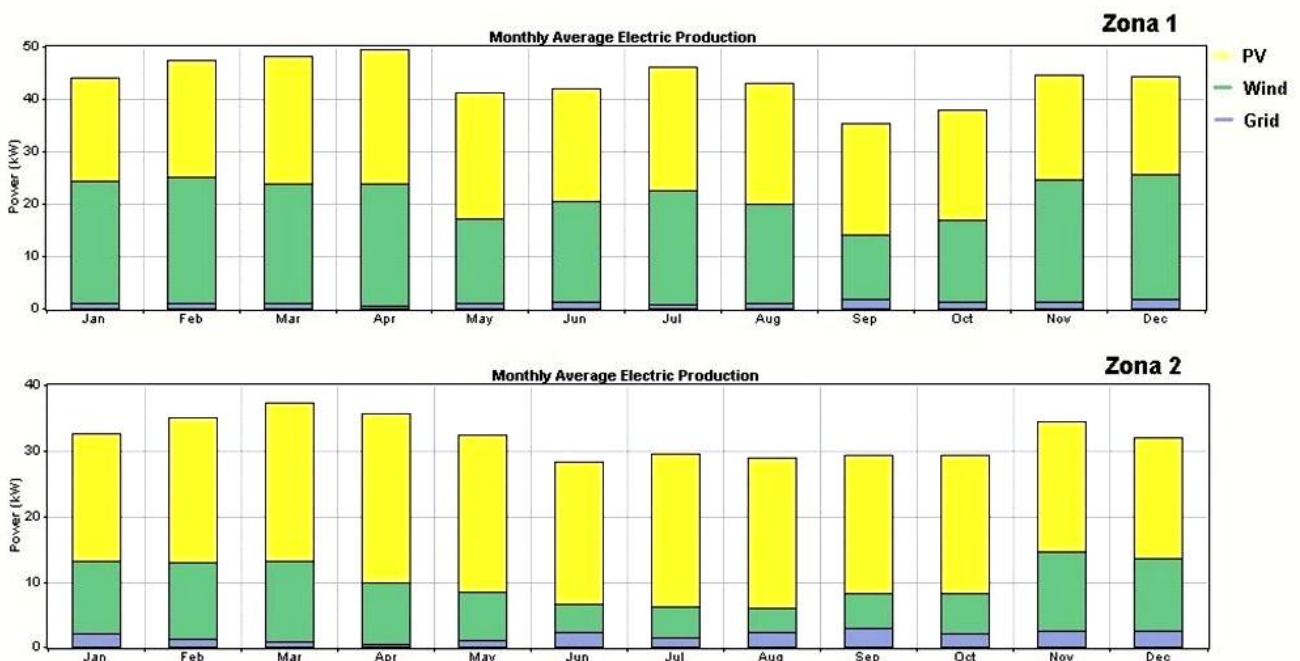


Fig. 7. Balance de energía del sistema en las Zonas 1 y 2

A pesar de esto, el aerogenerador en la Zona 2 trabajó un total de 5247 horas al año, el 60 % del período analizado y muchas veces en las horas sin sol, por lo que su generación se complementa con la fotovoltaica que asciende a 193,16 MWh/año, evidenciando el importante recurso solar de ambas zonas.

Se apreció también que el sistema en dicha localidad cumplió con la recarga de la flota, entregando a la red 98,35 MWh/año, que representó el 37 % de la generación de las fuentes renovables.

Por ello se puede plantear, que en ambos lugares es posible cumplir con la demanda de energía para la recarga de la flota, cumpliendo con el plan de transportación anual utilizando ómnibus eléctricos recargados mediante fuentes renovables.

El sistema suministró y recibió energía de la red, con un balance neto positivo de 214,98 MWh/año en la Zona 1 y 113,86 MWh/año en la Zona 2.

También se pudo apreciar que solo por concepto de generación limpia a partir de la eólica y la fotovoltaica, se dejan de emitir al entorno 155,10 T de CO₂ que corresponden a la combustión de 48,5 T de diesel. Teniendo en cuenta un valor de emisiones de 950 g de CO₂ por cada kWh generado [16].

En el uso de los datos meteorológicos de ambas zonas se consideró el carácter aleatorio del comportamiento de la velocidad de los vientos y la radiación solar para cumplir con la demanda de la recarga, con resultados positivos.

Limitaciones del trabajo: no se cuantificaron las cantidades considerables GEI que se dejan de emitir al sustituir la flota de ómnibus de combustión por la de ómnibus eléctricos. Faltaría realizar el análisis económico, en este trabajo solo se consideró la factibilidad desde el punto de vista energético. No obstante se puede argumentar que los costos de los proyectos de energía renovables se han mantenido disminuyendo en los últimos años [17] y hay otros que son subvencionados por el estado, teniendo en cuenta las ventajas medioambientales.

Conclusiones

En ambas localidades entre la energía que se inyectó a la red y la obtenida de la red hubo un balance energético neto positivo. Ambos sistemas tienen ventajas ecológicas o de bajo impacto ambiental, como dirección sostenible a seguir.

Los resultados corroboran que la demanda de electricidad necesaria para la recarga de una flota de 8 ómnibus eléctricos con pobre potencial eólico como el de la zona 2, se puede satisfacer con un sistema híbrido eólico-fotovoltaico.

Referencias

1. Markiewicz M. Reduction of CO₂ Emissions from Road Transport in Cities: Impact of Dynamic Route Guidance System on Greenhouse Gas Emission. Bremen, Germany: Springer Vieweg; 2017.
2. Harrison M. Environmental Impacts of Road Vehicles: Past, Present and Future. Cambridge, UK: Royal Society of Chemistry; 2017.
3. Sarmiento Sera A, Rodríguez Gámez M. Sistemas Integrados de energías con fuentes renovables, requisitos y opciones. Ingeniería Energética. 2013;XXXV(1):71-8.
4. Ryota K A, Matsumoto K. Investors' perspective on determinants of foreign direct investment in wind and solar energy in developing economies. Journal of Cleaner Production. 2017;179(132-142).
5. Lajunen A. Life cycle costs and charging requirements of electric buses with different charging methods. Journal of Cleaner Production. 2017;172:56-67.
6. Corazza MV, Guida U, Musso A, et al. A European vision for more environmentally friendly buses. Transport and environmental. 2015;45:48-63.
7. De Filippo G, Marano V, Sioshansi R. Simulation of an electric transportation system at The Ohio State University. Applied Energy. 2014;113:1686-91.
8. Qamarc B, Janajreh I. Renewable Energy Sources for Isolated Self-sufficient Microgrids: Comparison of Solar and Wind Energy for UAE. Energy Procedia. 2016;103:413-8.
9. Djalilova N, Esteban M. Feasibility Study of Hybrid Wind-Solar Stand-Alone Energy Systems for Remote Regions in Developing Countries: The Case of Post-Soviet Uzbekistan. Energy. 2018;6(1):3-14.
10. Fengju H. Yutong full electric bus E7 delivered to State Guest House. Zhengzhou, China: Zhengzhou Yutong Bus Co., Ltd; 2015. [Citado 12 febrero 2019] Disponible en: <http://www.yutong.com>.
11. Bogdan Ovidiu V, Iclodean C, Mariasiu F. Electric and Hybrid Buses for Urban Transport. Switzerland: Springer International Publishing; 2016.
12. Castro Fernández M, Barrios Velázquez MA, Vilaragut Llanes M. Evaluación preliminar de la introducción de un sistema fotovoltaico (SFV) como servicio eléctrico de la CUJAE. In: Congreso Internacional de alta tensión y aislamiento eléctrico; La Habana, Cuba: CIPEL; 2017. [Citado 9 abril 2019] Disponible en: <https://slideplayer.es/slide/13851138/>.
13. Castañeda A, Corvo F, Howland JJ, et al. Penetration of marine aerosol in a tropical coastal city of Havana. Atmósfera. 2018;31(1):87-104.
14. Avila Prats D, Alesanco García R. Economic Analysis Of The Wind Energy Generated In Cuba, Considering The Turbines Tested In The Country. Global Journal of researches in engineering Mechanical and mechanics engineering. 2011;11(7):5-9.
15. Christensen K. Catalogue of Small Windmills from 5 W to 50 kW. Denmark: Nordic Folkecenter for Renewable Energy; 2016. [Citado 17 abril 2019] Disponible en: <http://www.folkecenter.eu/PDF/Preview-Catalogue-Small-Wind-Turbines.pdf>.
16. Meneses Ruiz E, Roig Rassi A, Paz E, et al. Factores de emisión de CO, CO₂, NO_x y SO₂ para instalaciones generadoras de electricidad en Cuba. Revista Cubana de Meteorología. 2018;24(1):1-9.
17. The International Renewable Energy Agency-IRENA. Renewable Power Generation Costs in 2017. Abu Dabi, Agency United Arab Emirates: International Renewable Energy; 2018. [Citado 23 mayo 2019] Disponible en: https://www.irena.org/_media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Jan/IRENA_2017_Power_Costs_2018.pdf.

Yamir Sánchez Torres. <https://orcid.org/0000-0003-4321-276X>