Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica

Página principal: www.riiit.com.mx

Modelo de laboratorio para la aplicación de las energías renovables en la vivienda

Laboratory model for the application of renewable energies in housing

Espinosa-Faller, F.J.[a*], Buenfil-Mañé, C.[b]

[a] Escuela de Ingeniería, Universidad Marista de Mérida, Mérida, Yucatán 97310, México.
[b] YAAXTEC, Energía y Tecnología Alternativa S.A. de C.V. Mérida, Yucatán 97110, México.
Correo-e: *fjespinosa@marista.edu.mx; cbuenfil@yaaxtec.com

Innovación tecnológica: Laboratorio para la aplicación de las energías renovables en la vivienda.

Área de aplicación industrial: vivienda urbana y rural, capacitación en aplicación de la energía solar y eólica en la vivienda.

Enviado: 30 Enero 2019.
Aceptado: 19 Abril 2019.

Abstract

The design, construction and first results of a laboratory for the study of the application of renewable energy in housing is presented. Solar and wind energy are used in grid tie and offgrid configurations. A water pumping and water heater complements the laboratory. The system consists of 10 panels of 250 W each, divided in 6 panels connected to a DC inverter and 2 panels with microinvertes and 2 panels for an offgrid system with a 60 A charge controller connected with a bank of 4 bateries of 6 V, 375 Ah. The battery bank is connected to an inverter of 2.5 kW at 24 V. The laboratory has a 2.1 kW wind generator interconnected to the power grid. Two 80 W panels are connected to a solar pump that can extract up to 2 m^3 of water a day and feeds a water tank at 3 m height. The laboratory is complementes with a 195 liter water heater. The laboratory has the purpose of providing educational services for the application of solar and wind energy in housing. When it is not in a didactic use it generates energy that is injected to the power grid.

Keywords: Educational renewable energy laboratory, renewable energy for housing, solar energy, wind energy.

Resumen

Se presenta el diseño, construcción y los primeros resultados de un laboratorio para el estudio de la aplicación de las energías renovables en la vivienda. Se utilizan la energía solar y la eólica en sistemas interconectados, aislado, así como equipo para el bombeo y calentamiento de agua. El sistema consta de 10 paneles de 250 W cada uno divididos en 6 paneles conectados a un inversor para interconexión de 2 kW de potencia, 2 paneles con microinversor y 2 paneles conectados en sistema aislado con controlador de carga de 60 A para un banco de 4 baterías de 6 V a 375 Ah @20h e inversor de 2.5 kW a 24 V. El laboratorio tiene un generador eólico interconectado a la red eléctrica de 2.1 kW así como con dos paneles de 80 W para una bomba solar que alimenta un reservorio de agua a una altura de 3 m extrayendo al día hasta 2 m^3 de agua de una profundidad de 18 m. El laboratorio se complementa con un calentador de agua de 195 litros. El sistema tiene la finalidad de prestar servicios educativos para la aplicación de la energía solar en la vivienda. Cuando no está en uso didáctico genera energía que se inyecta a la red eléctrica.

Palabras clave: Energías renovables en casa habitación, energía solar, energía eólica, laboratorio educativo de energías renovables.

1. Introducción

La producción de energía y el consumo energético necesario para elaborar todos los bienes que requiere una sociedad desarrollada ha sido objeto de múltiples estudios (Uqaili & Harijan, 2012), (Chow, 2003), (Arto, Capellán-Pérez, Lago, Bueno, & Bermejo, 2016). Actualmente, la producción de energía depende de forma muy importante de combustibles fósiles (Armor, Srivastava, McIlvried, Marshall, & Plasynski, 2015). Las reservas mundiales probadas de combustibes fósiles representan 47 años de petróleo, 52 años de gas natural y aproximadamente 134 años de carbón (BP, 2018). La disminución natural de estos recursos hará que sea cada vez mas costosa su extracción o que eventualmente su recuperación pueda ser muy dañina para el medio ambiente (Jefferson, 2016), (Bardi, 2019). Esto se suma a la gran preocupación por el calentamiento global, el cual se ha visto acelerado por el consumo de combustibles fósiles (Hansen et al., 2013). La energía nuclear, que representa aproximadamente el 10 % de la producción mundial, si bien no genera gases de efecto invernadero, presenta problemas en cuanto al depósito final del combustible utilizado (BP, 2018). Es de notar que a la tasa de consumo actual se tiene suficiente Uranio para satisfacer la demanda por 130 años (*NEA/IAEA*, 2019). La situación actual nos lleva a la búqueda de nuevas alternativas para la generación y distribución de la energía.

La necesidad de satisfacer la demanda creciente de energía ha centrado la atención en la investigación y desarrollo de materiales y tecnologías que puedan generar energía de forma limpia (Parida, Iniyan, & Goic, 2011), (Kumar et al., 2016). Las energías renovables, tales como la solar y la eólica, representan una parte de la solución, sin embargo, aunque son abundantes, están distribuidas espacialmente, por lo que su aprovechamiento involucra el uso de superficies considerables (Richter, 2013), (Hernandez et al., 2014). Es de notar que el recurso solar es abundante, se estima que en 90 minutos la tierra recibe del Sol una energía equivalente al consumo mundial de un año (Philibert, 2011). El esquema de generación distribuida de energía renovable representa, en contraste con la generación

centralizada en plantas termoeléctricas o en granjas solares o eólicas, una forma alternativa de generación y distribución eléctrica (Wainstein & Bumpus, 2016), (Chicco & Mancarella, 2009), (Coma & Jones, 2015).

La aplicación de las energías renovables en casas habitación y edificios urbanos usando sistemas interconectados a la red eléctrica o la generación y almacenamiento de energía renovable de forma autónoma, aislados de la red eléctrica, representan no solo una alternativa de generación eléctrica sino tambien son uno de los mercados de más alto crecimiento (Pérez-Lombard, Ortiz, & Pout, 2008), (Singh & Banerjee, 2015), (Benis, Turan, Reinhart, & Ferrão, 2018). Este crecimiento implica que se deben formar los recursos humanos en las mejores prácticas de diseño e instalación de sistemas de energía renovable (Richter, 2013). En este trabajo se presenta el diseño y construcción de un laboratorio de energías renovables así como los primeros resultados de producción energética. En su diseño se tomaron en cuenta las normativas aplicables para la selección e instalación de paneles fotovoltaicos utilizando componentes y equipos de uso comercial. Igualmente se seleccionó un generador eólico para uso residencial que genera poco ruido al operar con un montaje de poste único que no requiere tensores. La bomba de agua solar y el calentador de agua son equipos de uso comercial en la región. Todo esto con el objetivo que lo aprendido sea directamente transferible a la práctica profesional. Este laboratorio permite la experimentación en sistemas solares y eólicos interconectados, sistemas solares aislados con almacenamiento de energía así como de bombeo y calefacción de agua. Académicamente refuerza la currícula en la formación de ingenieros civiles y permitirá formar personal y técnicos en instalaciones residenciales.

2. Materiales y métodos

2.1 Sistema solar interconectado

El sistema solar interconectado de corriente directa (DC) cuenta con 6 módulos fotovoltaicos de 993 x 1668 x 46.2 mm marca IUSA PV-01-250 de 250 Watts pico (Wp) con un voltaje de circuito abierto (Voc) de 37.8 V, una corriente de corto circuito (Isc) de 8.75 A, voltaje pico máximo (Vpmax) de 30.6 V y corriente pico máxima (Ipmáx) de 8.17 A, con una eficiencia de hasta el 15.1 %. Los módulos alimentan un inversor marca Solis modelo Solis-mini-2000-4G con una potencia de 2 KWp, un voltaje máximo de entrada de 600 V, un rango de operación de voltaje de entrada DC de 80 a 500 V y un 97.2 % de eficiencia de acuerdo con la metodología de la Comisión de Energía de California (CEC). La corriente máxima de entrada es de 11 A. El sistema cuenta con un sistema WiFi stick para monitoreo marca Solis.

En este tipo de sistemas, los paneles se conectan en serie y/o paralelo de forma tal que el voltaje y la corriente DC que generan van a la entrada de un inversor central. Este inversor se ocupa de que los paneles operen de la forma mas eficiente posible, convierte la DC que viene de los paneles en corriente alterna (AC) e inyecta esta corriente de forma sincronizada a la red eléctrica.

El sistema interconectado por microinversor cuenta con un módulo fotovoltaico monocristalino de 250 Wp marca Solartec modelo S60MC-250 con Voc = 37.92 V, Isc = 8.62 A, un voltaje en el punto máximo de potencia (Vmpp) de 30.96 V y una corriente en el punto de máxima potencia (Impp) de 8.07 A con una eficiencia de 15.37 % y un módulo policristalino marca Solartec de 250 Wp modelo S60PC-250 con Voc = 37.85 V, Isc = 8.65 A, Vmpp = 30.12 V e Impp = 8.30 A con una eficiencia de 15.29 %. Cada módulo tiene un microinversor marca Enphase modelo M215 con tierra integrada con sistema de monitoreo mediante portal

de comunicación Envoy, un voltaje máximo de entrada de 48 V y una corriente máxima de entrada de 10.0 A. Los microinversores tienen un rendimiento CEC promedio de 96.5 %.

En este tipo de sistema, a cada panel solar se le conecta un microinversor haciendo las mismas funciones que en el sistema DC de forma tal que cada uno de los microinversores se ocupa de optimizar la producción de energía de su propio panel poniéndolo en su punto óptimo de operación, de convertir la DC en AC y de inyectar la corriente a la red eléctrica.

2.2 Sistema solar tipo isla

El sistema aislado cuenta con dos módulos fotovoltaicos marca IUSA PV-01-250 de 250 Wp con Voc = 37.8 V, Isc = 8.75 A, Vmpp = 30.6 V e Impp = 8.17 A, un controlador de carga marca Outback Power modelo FM60 con entrada de 12/24/36/48/60 V y 60 A con una eficiencia del 98.1 % y un inversor para sistema aislado marca Outback Power modelo GTFX2524 con entrada de 24 VDC y salida senoidal de hasta 2500 VA a un voltaje de 120 VAC, 60 Hz. Tiene una eficiencia típica del 92 %. El sistema cuenta con 4 baterías de ciclo profundo marca Rolls modelo S-480 6 VDC – 375 Ah pudiendo otorgar 18.75 A para una razón de descarga de 20 horas. En este sistema, los paneles solares se conectan en serie/paralelo y su salida va a un controlador de carga que se ocupa de optimizar el funcionamiento de los paneles, regula la carga de las baterías y entrega energía a un inversor. El inversor convierte la DC en AC para su uso en equipos y dispositivos que trabajan con corriente alterna.

2.3 Aerogenerador

El aerogenerador es un sistema horizontal marca Xzeres modelo Skystream 3.7 que tiene una operación silenciosa y produce energía aún con vientos ligeros. Tiene una potencia nominal de 2.1 kW con viento de 11 m/s. Está ubicado a una altura de 12 m y está interconectado a la red eléctrica. Posee una conexión inalámbrica con tecnología ZigBee para monitorear su funcionamiento y generación de energía. El aerogenerador tiene integrado un sistema para la interconexión que inyecta energía de forma sincronizada a la red eléctrica.

2.4 Sistema de bombeo y calentamiento de agua

El sistema de bombeo de agua cuenta con una bomba de agua sumergible de diafragma marca Shurflo modelo 9325-043-101 de un voltaje nominal de 24 VDC con una cabeza de bomba de hasta 70 m con una salida de 12.7 mm (1/2”). La bomba tiene un diámetro de 9.5 cm y una altura de 30.5 cm. A 12 m, esta bomba es capaz de proveer un flujo máximo de 413 l/h. Dependiendo de la altura a la que se desee bombear el agua, la potencia de los paneles puede ir de 58 W (6.1 m) hasta 155 W (70.1 m). La bomba está conectada a través de un controlador a dos paneles monocristalinos marca Perlight Solar modelo PLM-075M/12 con una potencia de 80 W y Vpm = 17.2 V, Ipm = 4.65 A, Voc = 22.4 V e Isc = 5.00 A. El sistema de bombeo descarga a un contenedor de agua de 700 l ubicado a 3 m de altura y es coordinado mediante un controlador Shurflo LCB-O de 24 V que conecta los modulos fotovoltaicos con la bomba DC y un flotador eléctrico automático. El sistema de bombeo solar, a través del controlador, optimiza el funcionamiento de los pañeles y entrega la energía a la bomba sumergible de forma tal que la entrega de agua va de acuerdo a la intensidad de la radiación solar. Esto permite que aún en condiciones medio nubladas se obtenga flujo de agua, siendo este máximo con radiación directa en cielo despejado.

El sistema de calentamiento de agua cuenta con un calentador solar de gravedad marca Sunnergy modelo SEI-AC-15-2000-58, con

un tanque de 195 l de capacidad. El agua la recibe de un contenedor ubicado a 3m de altura. La salida de agua está dirigida a una llave por la cual se evacúa el calentador.

2.5 Simulación

El desempeño esperado del sistema de paneles solares interconectados a la red se simula utilizando el programa Helioscope de Folsom Labs. (Labs, s.f.). En este programa se especifica el tipo de módulo, su ubicación, el ángulo de inclinación y la altura a la cual están instalados. Los árboles que pueden sombrear los paneles se simulan especificando una esfera con una altura y un diámetro ajustable. Con esto genera un reporte de producción esperada de energía.

3. Resultados y discusión

3.1 Sistema solar interconectado

La distribución del laboratorio de energías renovables se muestra en la Figura 1, en donde se pueden apreciar cada uno de los elementos que lo conforman. El diagrama esquemático de conexiones del sistema solar de DC interconectado se muestra en la Figura 2. Los paneles solares están montados en bases giratorias de dos ejes para poder ajustar el ángulo de inclinación respecto al sol (Fig. 1). Los cables positivo y negativo que salen de cada panel se llevan hasta una caseta en donde se encuentra el inversor. En ese punto se cuenta con una terminal de bloques que actúa como panel de conexiones de los paneles, con el objeto de poder hacer demostraciones de conexiones en serie y en paralelo. El panel cuenta con fusibles y un interruptor para el paso de la corriente hacia el inversor. El inversor bifásico tiene las dos líneas “vivas” y el neutro que a través de un panel interruptor y distribuidor se conecta a la red eléctrica.

En el sistema por microinversores, cada uno de los dos paneles tiene un microinversor pegado en la parte trasera. La salida de los microinversores es llevada a la caseta de control en donde se encuentra una caja de conexiones con fusibles y el interruptor que desconecta los microinversores de la red eléctrica. La Figura 3a muestra el modelo utilizado para simular la producción de energía del sistema interconectado durante un año. Los árboles que están al lado izquierdo del laboratorio se simulan por medio de esferas utilizando el programa Helioscope, de Folsom Labs (Labs, s.f.). La Figura 3b muestra la producción anual esperada del sistema interconectado. Se pueden observar las variaciones mensuales de producción esperadas. La Figura 3c muestra la producción de energía en un día específico de un panel monocristalino y un policristalino que funcionan por microinversor. Es notable la diferencia en producción, siendo el panel policristalino más eficiente que el monocristalino. Esto se puede atribuir a dos causas: la primera es el efecto del sombreado que afecta más al panel monocritalino ya que es el primero en ser sombreado por lo árboles. La segunda causa es el efecto de la temperatura. El día 30 de junio de 2018 se tuvo una temperatura máxima de ~35 °C, lo cual afecta el voltaje máximo de salida y por tanto la potencia de las celdas. De acuerdo a estos datos, el efecto de la temperatura es mayor para la celda monocristalina.

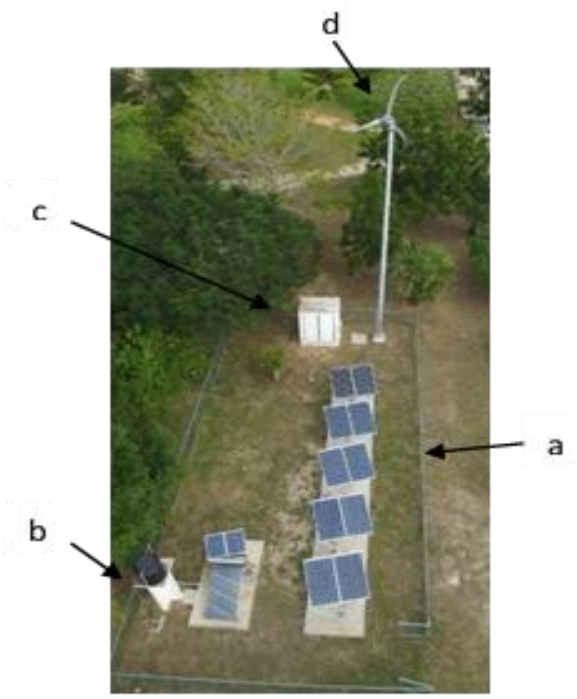


Figura 1. Laboratorio para la enseñanza de las energías renovables con a) paneles fotovoltaicos con montaje en bases giratorias a dos ejes, b) sistema de bombeo de agua y calentador de agua solar c) caseta de control y d) aerogenerador.

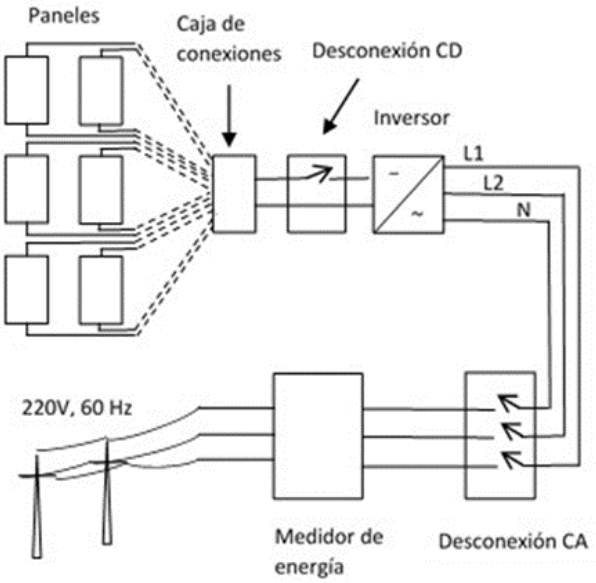


Figura 2. Diagrama esquemático de conexiones del sistema solar interconectado.

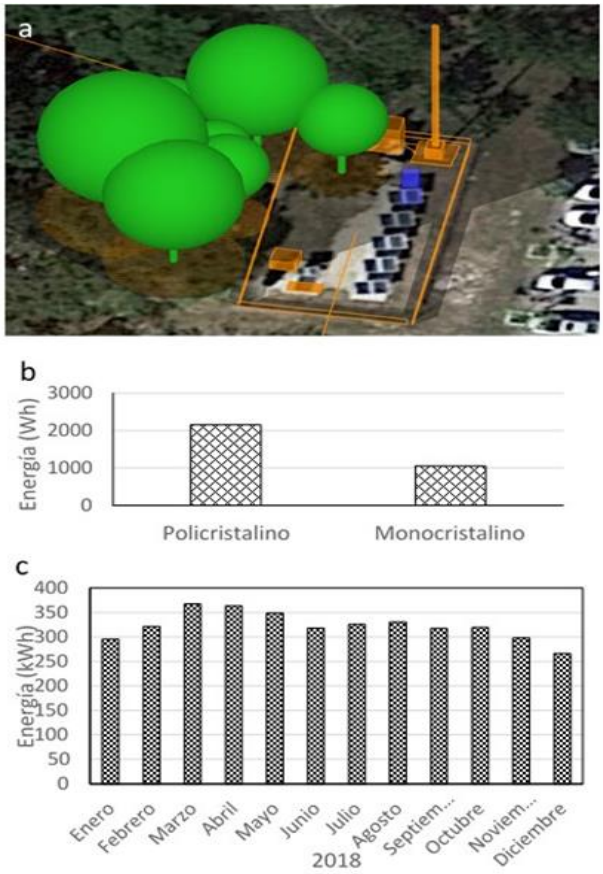


Figura 3. (a) Modelo de simulación de producción de energía, (b) Producción de energía el día 30 de junio de 2018 de un panel policristalino y uno monocristalino por microinversor y (c) Simulación de producción de energía de todo el sistema solar interconectado durante un año.

3.2 Sistema solar tipo isla

La Figura 4 muestra el diagrama esquemático de conexión del sistema tipo isla. La salida de los paneles solares es enviada a la caseta de control. El panel de conexiones tiene fusibles y un interruptor para el paso de la corriente al controlador de carga. El controlador de carga se conecta a las baterías y al inversor. El inversor surte energía a través de un contacto eléctrico fácilmente accesible en donde se pueden hacer pruebas de carga. El sistema completo es configurable en la caseta de control para poder incluir el número deseado de paneles fotovoltaicos ya sea al sistema aislado o al sistema interconectado, dando mucha flexibilidad al instructor para tomar decisiones para sus prácticas así como poder evaluar las competencias de sus alumnos.

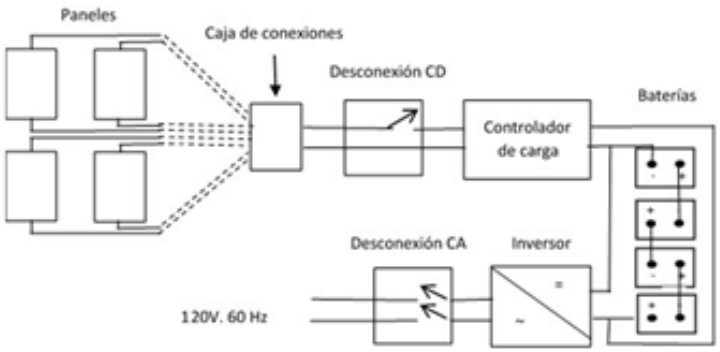


Figura 4. Diagrama esquemático de conexiones del sistema tipo isla.

3.3 Aerogenerador

El aerogenerador está ubicado a un costado de la caseta de control (Fig. 1d) y está montado sobre un poste de 12 m de altura. Si bien en general y particularmente en el norte de la península de Yucatán se tiene una mayor velocidad de viento a una mayor altura, el incrementar la altura significa incrementar los costos se cimentación del poste y mayor dificultad para darle mantenimiento o para desmontarlo en caso de amenaza de vientos de huracanes que eventualmente azotan la zona con velocidades que rebasan los límites de diseño. La Figura 5 muestra el diagrama esquemático de conexiones y la Figura 6 el desempeño del aerogenerador durante el año 2018. Se observa una distribución no uniforme de la generación eléctrica propiciada por la variabilidad del clima.

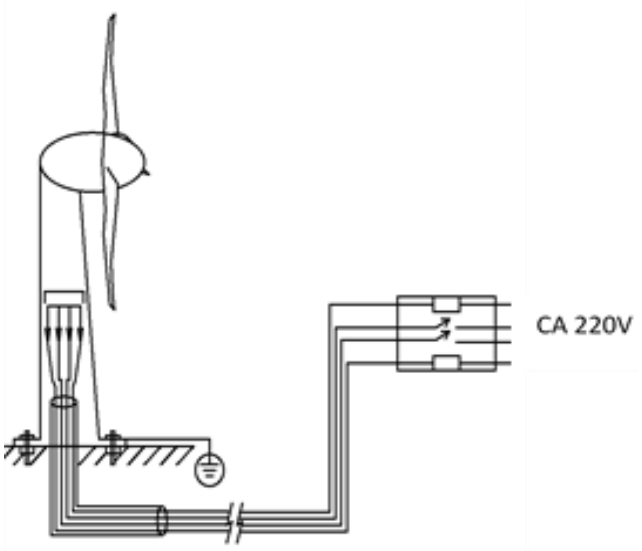


Figura 5. Diagrama esquemático de conexiones del generador eólico. El controlador de interconexión está integrado a la cabeza del aerogenerador.

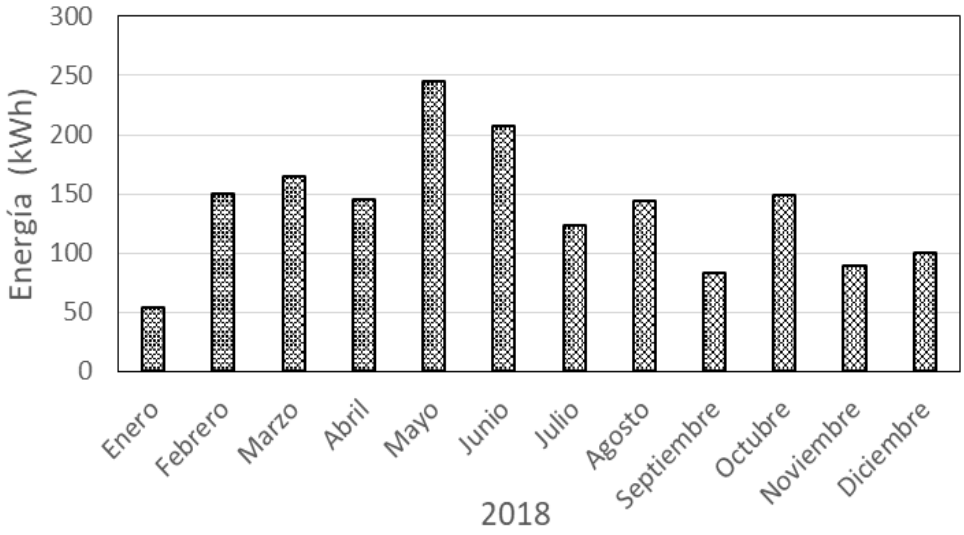


Figura 6. Generación de energía eólica durante el año 2018.

3.4 Sistema de bombeo y calentamiento de agua

El diagrama del sistema de bombeo y calentamiento de agua se muestra en la Figura 7. El pozo de donde se obtiene agua tiene 12.7 cm de diámetro y 18 m de profundidad y bombea agua hacia el contenedor situado a 3 m de altura. Una característica importante y que es muy didáctica es que el flujo de agua que produce la bomba solar depende de la cantidad de radiación solar.

La entrada del calentador de agua está conectada al tanque elevado. La salida del calentador está conectada a una llave que regula el flujo. En un día soleado se pueden alcanzar temperaturas del agua de hasta 90 °C.

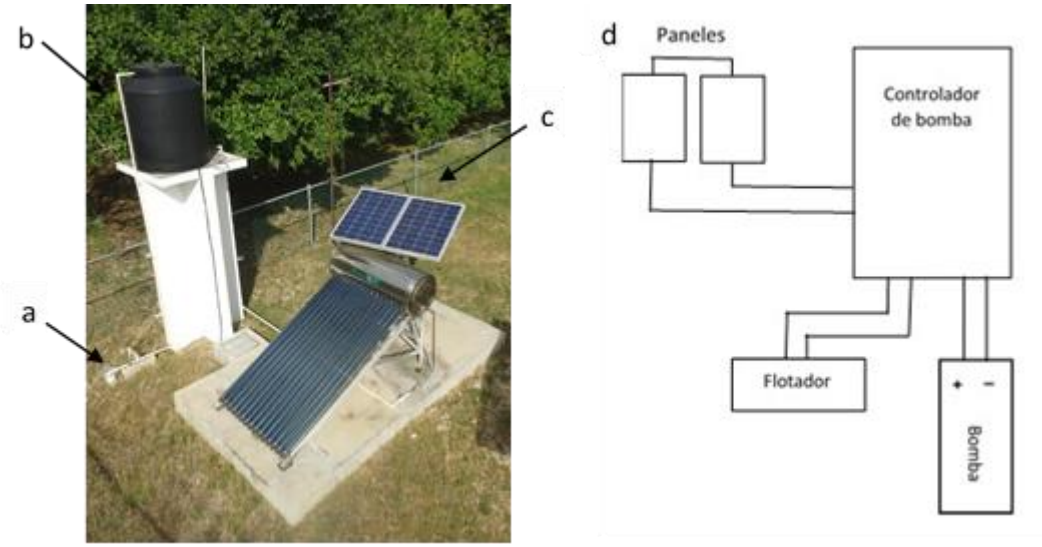


Figura 7. Sistema de bombeo de agua con (a) Pozo de 18 m de profundidad (b) Tanque de almacenamiento de 400 Litros, (c) Paneles de alimentación de la bomba sumergible y (d) Diagrama esquemático de conexiones del sistema de bombeo. En la parte inferior se encuentra el calentador de agua.

4. Conclusiones

Se ha descrito el diseño e implemntación de un laboratorio para la aplicación de las energías renovables en la vivienda con un sistema interconectado DC con inversor central, paneles policristalinos y monocristalinos interconectados por microinversor, un sistema solar aislado con inversor, un sistema eólico interconectado a la red eléctrica, así como una bomba y un calentador de agua solar. Por la ubicación del laboratorio, en el norte de la península de Yucatán, los sistemas fotovoltaicos así como la bomba y el calentador solar funcionan de manera consistente. La generación de energía eléctrica por el generador eólico está muy por debajo de su capacidad ya que el viento no es abundante en la zona y a la altura instalada. Sin embargo esto no limita su uso didáctico y sí permite un fácil mantenimiento y desmontaje en caso de huracanes, que son relativamente frecuentes en la zona.

El desarrollo del modelo de laboratorio de energías renovables permitirá la formación de personal para su aplicación en la vivienda. Este modelo de laboratorio permite experimentar con diversas configuraciones de paneles solares, bomba solar, calentador de agua y aerogenerador para obtener capacitación en el diseño, manejo e instalación de equipos que se aplican directamente en la vivienda. Se espera que este sistema facilite la adopción de tecnologías limpias y renovables en ambientes urbanos.

Agradecimientos

F.J.E. agradece el apoyo de la Escuela de Ingeniería de la Universidad Marista de Mérida por el financiamiento del presente trabajo y al M.C. Pedro Poot Cauich por su asistencia técnica.

Referencias

Armor, A. F., Srivastava, R. D., McIlvried, H. G., Marshall, T. D., & Plasynski, S. I. (2015). Fossil fuels. In *Energy Efficiency and Renewable Energy: Handbook, Second Edition*. https://doi.org/10.1201/b18947.

Arto, I., Capellán-Pérez, I., Lago, R., Bueno, G., & Bermejo, R. (2016). The energy requirements of a developed world. *Energy for Sustainable Development*, *33*, 1–13. https://doi.org/10.1016/j.esd.2016.04.001.

Bardi, U. (2019). Peak oil, 20 years later: Failed prediction or useful insight? *Energy Research & Social Science*, *48*, 257–261. https://doi.org/10.1016/j.erss.2018.09.022.

Benis, K., Turan, I., Reinhart, C., & Ferrão, P. (2018). Putting rooftops to use – A Cost-Benefit Analysis of food production vs. energy generation under Mediterranean climates. *Cities*. https://doi.org/10.1016/j.cities.2018.02.011.

BP. (2018). *BP Statistical Review of World Energy*. Retrieved from https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2018-full-report.pdf.

Chicco, G., & Mancarella, P. (2009). Distributed multi-generation: A comprehensive view. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.11.014.

Chow, J. (2003). Energy Resources and Global Development. *Science*. https://doi.org/10.1126/science.1091939.

Coma, E., & Jones, P. (2015). "Buildings as Power Stations": An Energy Simulation Tool for Housing. In *Procedia Engineering*. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.404.

Hansen, J., Kharecha, P., Sato, M., Masson-Delmotte, V., Ackerman, F., Beerling, D. J., Zachos, J. C. (2013). Assessing "dangerous climate change": Required reduction of carbon emissions to protect young people, future generations and nature. *PLoS ONE*. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0081648.

Hernandez, R. R., Easter, S. B., Murphy-Mariscal, M. L., Maestre, F. T., Tavassoli, M., Allen, E. B., … Allen, M. F. (2014). Environmental impacts of utility-scale solar energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.041.

Jefferson, M. (2016). A global energy assessment. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment*, *5*(1), 7–15. https://doi.org/10.1002/wene.179.

Kumar, Y., Ringenberg, J., Depuru, S. S., Devabhaktuni, V. K., Lee, J. W., Nikolaidis, E., … Afjeh, A. (2016). Wind energy: Trends and enabling technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.200.

Labs, F. (s.f.). Folsom Labs. Recuperado el 28 de enero de 2019, de

https://www.folsomlabs.com/?gclid=Cj0KCQiAkMDiBRDNARIsACKP1FEhTXykZHbzfBP6h0lItAbfvCVm5FyqbmulyoIdPBKdtlP3BZWg-qgaAuZpEALw_wcB.

NEA/IAEA (2019), *Uranium 2018*: Resources,Production and Demand, OECD Publishing, Paris, https://doi.org/10.1787/uranium-2018-en.

Parida, B., Iniyan, S., & Goic, R. (2011). A review of solar photovoltaic technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.032.

Pérez-Lombard, L., Ortiz, J., & Pout, C. (2008). A review on buildings energy consumption information. *Energy and Buildings*. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.03.007.

Philibert, C. (2011). *Solar energy perspectives*. (M. van der Hoeven, Ed.), *Solar Energy Perspectives* (Vol. 9789264124). Paris: International Energy Agency. https://doi.org/10.1787/9789264124585-en.

Richter, M. (2013). German utilities and distributed PV: How to overcome barriers to business model innovation. *Renewable Energy*. https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.12.052.

Singh, R., & Banerjee, R. (2015). Estimation of rooftop solar photovoltaic potential of a city. *Solar Energy*. https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.03.016.

Uqaili, M. A., & Harijan, K. (2012). *Energy, environment and sustainable development*. *Energy, Environment and Sustainable Development*. https://doi.org/10.1007/978-3-7091-0109-4.

Wainstein, M. E., & Bumpus, A. G. (2016). Business models as drivers of the low carbon power system transition: A multi-level perspective. *Journal of Cleaner Production*. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.095.