

ARTÍCULO ORIGINAL

Aplicación de una herramienta de ayuda a la planificación energética en comunidades rurales aisladas. Caso de aplicación Las Peladas

Application of a tool of aid to the energy planning in isolated rural communities. Case of application Las Peladas

Ing. Lázaro Ventura Benítez Leyva, Dr.C. Rubén Jerez Pereira, Lic. Yanel Pompa Chávez, Lic. Michel Tamayo Saborit, Ing. Alain de la Rosa Andino

Universidad de Granma, Facultad de Ciencias Técnicas, Dpto. de Ingeniería Mecánica, Bayamo, Granma, Cuba.

RESUMEN. Este trabajo refiere la experiencia de un estudio de caso realizado en la comunidad rural Las Peladas, ubicado en el municipio Bartolomé Masó Márquez, de la provincia Granma. En el mismo se presenta la aplicación de un modelo matemático multi-objetivo como herramienta computacional de ayuda a la planificación energética, en concordancia con las características específicas de la localidad analizada. El estudio de campo se fundamentó en los resultados de una encuesta participativa, la observación y compilación de datos, que posibilitó obtener una caracterización de la comunidad y, de esta manera, delimitar los parámetros necesarios para la aplicación de la herramienta. Se evaluaron cinco alternativas: energía eólica, biomasa, solar, hidráulica y la conexión a la red nacional. De ellas, el modelo sugiere, que la energía solar fotovoltaica ejerce la mayor influencia en el mejoramiento de la sostenibilidad integral de los capitales natural, físico, financiero, humano y social en la comunidad.

Palabras clave: SURE, energía fotovoltaica, comunidad rural, capitales.

ABSTRACT. This work refers the experience of a study of case realized in the rural community Las Peladas, located in the municipality Bartolome Maso Marquez, of the Granma province. In the same the application of a multi-objective mathematical model like computer tool of aid to the planning appears energetics, in agreement with the specific characteristics of the analyzed locality. The field study was based on the results of a participating survey, the observation and compilation of data that it made possible to obtain a characterization of the community and, this way, of delimiting the necessary parameters for the application of the tool. Five alternatives were evaluated: Aeolian energy, biomass, to pave, hydraulics and the connection to the national network. Of them, the model suggests, that the photovoltaic energy solar exerts the greater influence in the improvement of the integral sustainability of the capitals natural, physical, financial, human and social in the community.

Keywords: SURE; photovoltaic energy, rural community, capitals.

INTRODUCCIÓN

En años recientes, las fuentes renovables de energía están siendo catalogadas como ilimitadas, inagotables, medioambientalmente amigables y sostenibles. De ellas se obtienen beneficios directos o indirectos que favorecen a la generación de electricidad. En áreas remotas, a través de estos recursos y tecnologías de transformación se puede garantizar el riego, la preservación de alimentos, el procesar cosechas, climatizar e industrializar a pequeña escala. Lo que ayudaría a un aumento de la calidad

de vida de sus habitantes (Kanase-Patil *et al.*, 2010).

Los servicios básicos tienen un rol importante en el desarrollo rural, y principalmente el desarrollo de las economías locales que permitan a los pobladores rurales tener un mejor futuro para sus familias, su entorno social y ambiental (Canedo, 2005). Para lograr dichos servicios en una comunidad rural no electrificada se hace necesaria la energización.

En la actualidad una buena parte de los proyectos basados en la energización (energía eléctrica, mecánica, térmica, etc.) de comunidades rurales aisladas (no electrificadas), para

garantizar los servicios básicos, son mediante tecnologías que aprovechan fuentes energéticas renovables (Nissing y Blottnitz, 2010; Bhattacharyya, 2012).

La mayor parte de las comunidades rurales aisladas de países en vías de desarrollo, carecen de una adecuada planificación de estos recursos energéticos y esto hace dificultoso la selección del tipo de alternativa energética, utilizando recursos locales, es la **más adecuada** (Borda *et al.*, 2011). Del mismo modo, se ignora cuál de ellas ejerce una mayor influencia en el mantenimiento integral de la sostenibilidad de la misma (Cherni, 2002; Amador y Domínguez, 2005).

De cara a estas limitaciones, las herramientas matemáticas se erigen como un valioso instrumento mediante las cuales es posible tomar decisiones más apropiadas en lo que a alternativas energéticas se refiere (Ren *et al.*, 2010). En el presente se están difundiendo más y cobran una importancia capital estas herramientas también conocidas como modelos de planificación energética. Los cuales constituyen una estimable ayuda para establecer con mayor exactitud la (s) solución (es) óptimas para tales problemas (Loken, 2005).

Existen herramientas de apreciable utilización para tales propósitos que se encuentran difundidas en el mundo; ejemplo de esto se pudo constatar el Solar Design Studio V. 6.0, que es un software diseñado para simular el funcionamiento anual, en base horaria, de un sistema de energía fotovoltaica, de acuerdo con el diseño y los datos climáticos seleccionados por el usuario (Team, 2011).

Asimismo, el HOMER es un modelo devenido software, desarrollado por National Renewable Energies Laboratory (NREL, 2005). Se basa en un análisis técnico-económico de sistemas que integran recursos renovables y no renovables de energía para la selección de la combinación más adecuada de tecnologías energéticas (Manrique *et al.*, 2009; Rodríguez y Sarmiento, 2010; Borda Ángel *et al.*, 2011). Por otro lado, el modelo de optimización EFOM ayuda a determinar una mezcla óptima de tecnologías para un sistema de energía, conforme a un número de restricciones **límites**, tales como límites de emisión, límite de reducción de costos, etc. (Cormio *et al.*, 2003).

El PAMER es un modelo que utiliza las técnicas de programación lineal. Con la única función objetivo empleada, se maximiza la cantidad de energías proveniente de fuentes renovables. Las restricciones empleadas tienen en cuenta con la disponibilidad de recursos, de las tecnologías de transformación, entre otras (Marcos, 1984). Asimismo el SEMA es un modelo que se basa en la Programación Multiobjetivo y Multiatributo y tiene como precursor al modelo PAMER. Trabaja con tres funciones objetivos: función de maximización de las energías renovables; función de minimización de las emisiones de CO₂, haciendo un análisis de ciclo de vida y una función de minimización de costos (García, 2004).

Finalmente, la herramienta utilizada en este trabajo de denomina SURE (Sustainable Rural Energy Decisión-Support System) y es un modelo matemático multiobjetivo para la toma de decisiones (soportado en un software) desarrollado por DFID (1999) y está basado en los conceptos de “Medios de Vida Sostenibles” el cual contiene en su matriz energética un

grupo de alternativas energéticas renovables que hacen, según esta teoría, que la comunidad alcance una mayor sostenibilidad (Henao *et al.*, 2012). Este modelo matemático utiliza los estados de la naturaleza de una comunidad susceptible de estudio como esencia en la construcción de este y luego determina, dentro de un grupo de alternativas factibles, un conjunto más estrecho de ellas aportando una solución óptima y facilita el trabajo al decisor.

El presente trabajo es parte del proyecto de investigación RESURL “Renewable Energy for Sustainable Rural Livelihoods”, liderado por el Colegio Imperial de Londres, Reino Unido. Tuvo como objetivo determinar la tecnología energética más apropiada para una comunidad rural no electrificada evaluando los factores que contribuyen o dificultan su sostenibilidad.

MÉTODOS

Este estudio se desarrolló en la comunidad rural Las Peladas, zona no interconectada al sistema eléctrico nacional, perteneciente al municipio Bartolomé Masó Márquez de la provincia Granma, Cuba. Ubicada a 10 km de la cabecera municipal. El pueblo urbano más cercano a ella es Bueycito, a 7 km de distancia. Asimismo, pertenece al Parque Nacional Sierra Maestra el cual está declarado, por la Institución de Flora y Fauna de la provincia, zona protegida. Tiene 56 habitantes, 14 viviendas, 3 km² de superficie y está a 4 km de distancia a la red de transporte más importante. No tiene acceso a servicio telefónico.

Se utilizó el modelo matemático multiobjetivo, una herramienta computacional para la planificación energética SURE descrito anteriormente. Se identificó visualmente a través de un pentágono, el estado actual de los Activos o Capitales de la comunidad; con la ayuda de una serie de reglas lógicas (sistema de expertos) y la información proveniente de una encuesta que se le practicó a la comunidad, la observación y datos de instituciones oficiales ambientalistas de la región, que son las variables de decisión del modelo.

SURE, sus variables de decisión. Inicialmente para caracterizar la sostenibilidad de la comunidad y su posterior esquema de cobertura energética, ya sea con fuentes renovables o no renovables de energía, dependiendo de la factibilidad de aplicación, se compilaban los datos a través de una encuesta participativa, así como la observación de las condiciones físicas y naturales de la comunidad. Esto produce un impacto en los cinco indicadores de capital del modelo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Según los datos de la encuesta y las observaciones que son, en definitiva, las variables de decisión del modelo, se obtuvieron los siguientes resultados:

En la Tabla 1 se presenta la demanda de energía estimada que, según evaluaciones cotejadas por UPME (1999), debe tener una comunidad a la poste electrificada, de una cantidad inferior a 500 habitantes. Aunque la comunidad aún no posee ninguno de estos sectores electrificados, se considera pertinente debido a la necesidad de conocer la demanda para poder definir las tecnologías energéticas y sus capacidades.

TABLA 1. Demanda de energía de la comunidad

Demanda por sectores, en kWh $\cdot$ a ^{no} -1							
Hospital	Escuela	Viviendas	Bombeo de agua	Alumbrado Público	Comercio	Industria Rural	Equipos y Maquinaria
544,5	181,5	1815,0	90,75	363,0	181,5	363,0	90,75

La Tabla 2 muestra el nivel de acceso a los servicios públicos y la infraestructura básica. Según la opinión de sus habitantes, la electricidad cubre tan solo una pequeña parte de la población. Esto es en virtud a la existencia de paneles fotovoltaicos en una sala de televisión y una escuela de enseñanza primaria, lo que se puede considerar una comunidad semielectrificada. De este modo se puede valorar el alcance de la energización.

TABLA 2. Servicios e infraestructura

Salud	Educación	Electricidad	Bombeo de Agua
21,4%	100%	28,6%	0,0%

La principal actividad económica realizada es la agricultura (Tabla 3) teniendo en cuenta que es una comunidad rural alejada, mayormente son afiliados a algún tipo de propiedad cooperativa en el sector azucarero.

TABLA 3. Porcentaje de la población vinculada a actividades económicas

Agricultura	Ganadería	Otras
50%	7,1%	42,9%

El SURE es un modelo que tiene en cuenta la opinión de sus habitantes y es por esta razón que establece la prioridad de energía por sectores (Tabla 4), para de este modo poder definir los que tienen mayor ponderación según las necesidades concretas de sus habitantes. Las viviendas, el bombeo de agua y el comercio son a los que más atención se debe prestar para ser electrificados por partes de los decisores debido a la total ausencia de este servicio. Aunque la comunidad no posee los sectores, a saber: hospital, bombeo de agua, alumbrado público, comercio, industria rural, equipos y maquinaria mostrados en la Tabla 4, el modelo los tiene en cuenta debido a que la energización puede en el futuro desarrollarlos.

TABLA 4. Prioridades de energía por sectores

Respuestas según encuestada, %							
Hospital	Escuela	Viviendas	Bombeo de agua	Alumbrado Público	Comercio	Industria Rural	Equipos y Maquinaria
78,59	0	100	100	71,4	100	75	75

Los recursos naturales fueron evaluados por los investigadores. Su importancia es debido a que el modelo es susceptible a las disponibilidades de cada uno de ellos, de este modo puede definir la tecnología energética apropiada. Se observa en la Tabla 5 que el valor de la radiación solar es alto. Por otro lado, la comunidad dispone de otros recursos pero en menor grado.

TABLA 5. Recursos naturales de la comunidad

Vientos*	Sol	Biomasa	Agua
4-5 m $\cdot$ s ⁻¹	Más de 5 kWh $\cdot$ m ⁻² $\cdot$ día	6 kg $\cdot$ semana ⁻¹ $\cdot$ casa	Flujo de agua: baja

* Con una frecuencia de calma del viento de 1- 4 semanas

También se valora el nivel educativo de la población por la necesidad de conocer el grado de asimilación de la tecnología energética a implementar. En este caso hay un bajo nivel educacional si se tiene en cuenta que solo hay uno por ciento de nivel superior (Tabla 6).

TABLA 6. Nivel educativo de la comunidad

Ninguno	Primaria	Secundaria	Capacitación técnica	Superior
43,0%	20,0%	23,0%	13,0%	1,0%

También son importantes las actividades sociales de la población, esto es porque a través del modelo se pueden visualizar el impacto que causará la energización a la comunidad al permitir menos tiempo a diligencias cotidianas de supervivencia. En la Tabla 7 se observa que solo en la recolección de leña y agua para las labores hogareñas como la cocina y la limpieza resta una gran cantidad de tiempo a los habitantes.

Después de los resultados de las encuestas y las evaluaciones se le presenta al (los) decisor (es): primero, las características más relevantes que debe tener el conjunto de alternativas de energización; segundo, un conjunto de alternativas genéricas de energización a evaluar, en una primera fase de prefactibilidad; y tercero, el Pentágono Inicial, o situación actual de los capitales de la comunidad.

TABLA 7. Actividades sociales

Recolección de leña	Colección de agua	Organizaciones locales
1,5 horas $\cdot$ semana promedio ⁻¹	1,3 horas $\cdot$ semana promedio ⁻¹	Más de 4

Pentágono Inicial de la comunidad

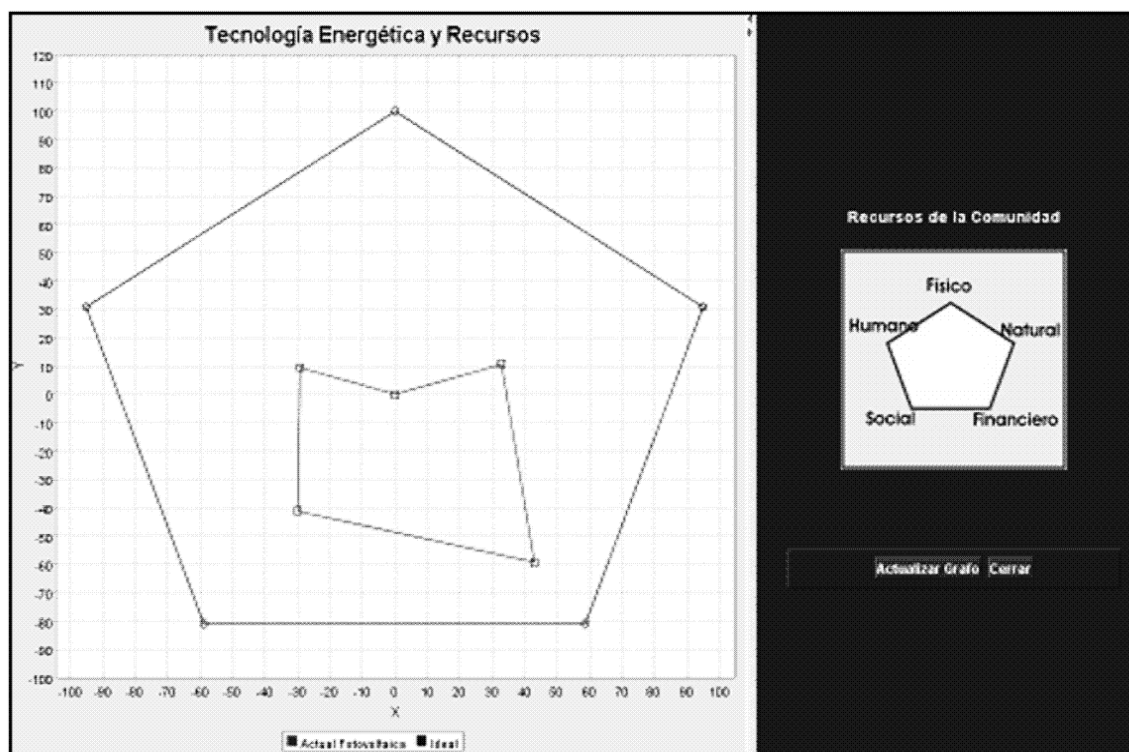


FIGURA 1. Pentágono inicial de la comunidad.

El modelo SURE presenta inicialmente, y solo después de ingresar todos los datos anteriores, un pentágono pequeño (Figura 1), para poder visualizar gráficamente la situación actual o inicial de la sostenibilidad local. Cada vértice representa los capitales (Capital Físico, Capital Social, Capital Natural, Capital Financiero y Capital Humano) de la comunidad. La cercanía de cada vértice del pentágono pequeño asimétrico al pentágono ideal simétrico (Figura 1), es un mayor grado de sostenibilidad. De este modo, se pudo constatar el impacto que tiene la situación energética actual en cada uno de los capitales para decidir el tipo de alternativa energética necesaria para cambiar positivamente la situación.

Según el pentágono menor (asimétrico) en la Figura 1, muchos de los capitales están deprimidos, sobre todo el Capital **Físico** debido al deterioro de la infraestructura básica y

los bienes de producción (herramientas y equipos) necesarios para respaldar a los medios de vida. El Capital Natural, aunque en menor nivel que el capital anterior, muestra estos valores deprimidos debido al déficit de suelo cultivable, agua, plantas, animales y minerales. Por otro lado, el Capital Humano presenta un bajo valor debido a las bajas aptitudes, conocimientos, capacidades laborales y buena salud. Todo lo anterior sugiere que es posible encontrar una (s) alternativa (s) energética (s) que mejore integralmente esta situación.

En la Tabla 8 se presentan un conjunto de tecnologías, con su capacidad y eficiencia energéticas introducidas por el decisor y a ser evaluadas por el SURE, con posibilidades de ser seleccionadas la mejor alternativa. Esto se realiza cuando los expertos determinan la disponibilidad de recursos locales.

Definición de las alternativas

TABLA 8. Alternativas energéticas aplicables a la comunidad introducidas en SURE

Capacidad Energética Estimada (kW)	6,29		
No. de Tecnologías	5		
Alternativa	Capacidad, kW	Fuente de Energía	Eficiencia, %
Actual Fotovoltaica	0,10	Sol	30
Micro Eólica	6,29	Viento	90
Solar Fotovoltaica	6,29	Sol	30
Grupo Autónomo Convencional	6,29	Diésel	40
Red	6,29	Otros	90

Cuando se eligen las posibles alternativas energéticas a competir (Figura 2), cada una por separado, actúa de mejor o peor forma en cada activo de la comunidad (Capital Físico, Financiero, Natural, Social y Humano, ver pentágono (Figura 1), por lo que existe una de ellas que mejora los activos de manera integral. El SURE toma esta alternativa como la mejor, muestra el cambio que produce en el pentágono final, las compara con la situación inicial y los impactos de las demás alternativas.

Pentágono final

El Pentágono Final constata visualmente (mediano, Figura 3) el impacto que produce la alternativa energética Solar Fotovoltaica en los capitales, esencialmente los capitales humano y físico. Esto es estratégicamente factible para esta comunidad. Las demás tecnologías energéticas no originan el impacto sobre los cinco capitales que provoca esta alternativa en particular. Asimismo, esta herramienta computacional propone la alternativa energética más adecuada según los criterios de selección y de los impactos que producen en los capitales. Posteriormente los decisores son los encargados de valorar la más conveniente.

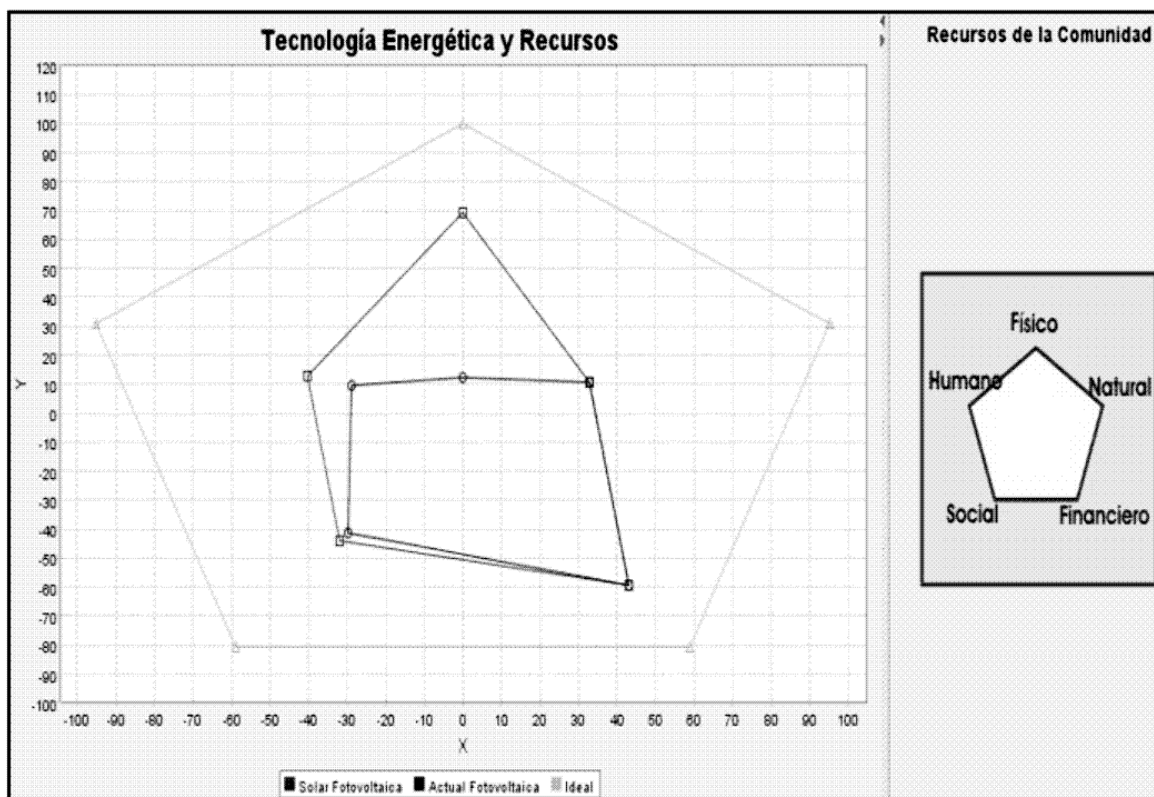


FIGURA 3. Impacto de la tecnología Solar Fotovoltaica sobre los capitales.

CONCLUSIONES

- Existen disímiles herramientas de ayuda a la toma de decisiones en la planificación energética.
- SURE demostró ser un modelo adecuado y factible para ser aplicado en la toma de decisiones en el diseño de esquemas de cobertura energética en localidades rurales aisladas, debido a que tiene en cuenta aspectos imprescindibles como

- la sostenibilidad y el mejoramiento integral de los capitales.
- Se consideró que la alternativa de energía solar fotovoltaica es la más adecuada para la comunidad estudiada, debido a que se alcanza una condición de sostenibilidad superior a la que tenía antes de la energización según el pentágono final (Figura 3) y por su interacción positiva con los capitales de la comunidad.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMADOR, J. & J. DOMÍNGUEZ: "Application of geographical information systems to rural electrification with renewable energy sources", *Renewable Energy*, 30: 1897-1912, 2005.
- BHATTACHARYYA, S.: "Review of alternative methodologies for analysing off-grid electricity supply", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16: 677-694, 2012.
- BORDA ÁNGEL, J.; J. DOMÍNGUEZ; J. AMADOR; L. ARRIBAS & I. PINEDO: *Characterization of Hybrid Systems for Rural Electrification with Renewable Energies Using Geographic Information Systems (GIS)* (Informes Técnicos Ciemat), Ed. Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT), España, 2011.

- CANEDO, W.: *Diagnóstico del Sector Energético en el Área Rural de Bolivia (Proyecto: Electrificación Rural)*, Ed. Organización Latinoamericana de Energía (OLADE), Agencia Canadiense para el Desarrollo Internacional (ACDI) y Universidad de Calgary, Canada, 2005.
- CORMIO, C.; M. DICORATO; A. MINOIA & M. TROVATO: "A regional energy planning methodology including renewable energy sources and environmental constraints", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 7: 99–130, 2003.
- CHERNI, J. A.: *Seminario: Energización de zonas aisladas en Latinoamérica (Terceras Jornadas de Energía 2002)*, Ed. Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia, 2002.
- DFID: *Hojas Orientativas Sobre Los Medios De Vida Sostenibles*, Ed. Department For International Development, USA, 1999.
- GARCÍA, L.: *Desarrollo de un modelo multicriterio-multiobjetivo de oferta de energías renovables: aplicación a la comunidad de Madrid*, Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, España, 2004.
- HENAO, F.; J. CHERNI; P. JARAMILLO & I. DYNER: "A multicriteria approach to sustainable energy supply for the rural poor", *European Journal of Operational Research*, 218 (3): 801-809, 2012.
- KANASE-PATIL, A.; R. SAINI & M. SHARMA: "Integrated renewable energy systems for off grid rural electrification of remote area", *Renewable Energy*, 35: 1342–1349, 2010.
- LOKEN, E.: "Use of multicriteria decision analysis methods for energy planning problems", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11: 1584–1595, 2005.
- MANRIQUE, P.; J. DOMÍGUEZ y I. PINEDO: *Dimensionado de un Sistema Híbrido FV - Biogás/Diesel mediante el Empleo de la Herramienta Homer®. Caso de Aplicación: Granja "Pozo Verde", Municipio de Jamundí, Valle del Cauca, Colombia* (Informes Técnicos Ciemat), CIEMAT, Jamundi, Colombia, 2009.
- MARCOS, F.: *Estudio de la aplicación de un modelo de planificación energética a la región Castellano-Leonesa*, Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España, 1984.
- NISSING, C. & H. BLOTTNITZ: "Renewable energy for sustainable urban development: Redefining the concept of energisation", *Energy Policy*, 38: 2179-2187, 2010.
- NREL: *Getting Started Guide for HOMER Version 2.1* (Innovation for our energy future), Ed. National Renewable Energy Laboratory Colorado, USA, 2005.
- REN, H.; W. ZHOU; K. NAKAGAMI; W. GAO y Q. WU: "Multi-objective optimization for the operation of distributed energy systems considering economic and environmental aspects", *Applied Energy*, 87: 3642–3651, 2010.
- RODRÍGUEZ, C. y A. SARMIENTO: "Dimensionado mediante simulación de sistemas de energía solar fotovoltaica aplicados a la electrificación rural", *Ingeniería Mecánica*, 14 (1): 13-21, 2010.
- UPME: *Línea base geo-referenciada para la formulación del plan de suministro de energía para las zonas no interconectadas de Colombia*. Metodología, Ed. Unidad de Planeamiento Minero Energético, Colombia, 1999.

Recibido: 23 de noviembre de 2012.

Aprobado: 28 de enero de 2014.

Lázaro Ventura Benítez Leyva, Prof., Universidad de Granma, Facultad de Ciencias Técnicas, Dpto. de Ingeniería Mecánica, Carretera a Manzanillo, km 17 ½. Apdo. 21, Bayamo, Granma, Cuba. Correo electrónico: lbenitez@udg.co.cu

Nota: La mención de marcas comerciales de equipos, instrumentos o materiales específicos obedece a propósitos de identificación, no existiendo ningún compromiso promocional con relación a los mismos, ni por los autores ni por el editor.

Copyright of Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias is the property of Centro de Mecanización Agropecuaria and its content may not be copied or emailed to multiple sites or posted to a listserv without the copyright holder's express written permission. However, users may print, download, or email articles for individual use.