

IDENTIFICACIÓN DE ESCENARIOS RELEVANTES PARA EL APROVECHAMIENTO DE LAS FUENTES RENOVABLES DE ENERGÍA EN EL MUNICIPIO LA SIERPE

RELEVANT SCENARIOS FOR THE USE OF RENEWABLE ENERGY RESOURCES IDENTIFYED IN LA SIERPE MUNICIPALITY

Ernesto L. Barrera Cardoso^{1}, Jasiel Palmero Viciado¹, María del Carmen
Echevarría Gómez¹, Bismayda Gómez Avilés¹ y Jorge Luis Isaac Pino²*

¹ Centro de Estudios de Energía y Procesos Industriales (CEEPI), Universidad de Sancti Spíritus "José Martí Pérez". Ave de los Mártires 360, CP. 60100 Sancti Spíritus, Cuba.

² Dirección de Energía Renovable (DER), Ministerio de Energía y Minas (MINEM), Ave. Salvador Allende No. 666, CP. 10200 Centro Habana, La Habana, Cuba.

Recibido: Noviembre 27, 2018; Revisado: Enero 3, 2019; Aceptado: Abril 2, 2019

RESUMEN

En este trabajo se identifican escenarios relevantes para el aprovechamiento de las Fuentes Renovables de Energía (FRE) en el municipio La Sierpe, Sancti Spíritus, Cuba. Se utilizaron el método Delphy para la evaluación de los expertos y las técnicas multicriterio para seleccionar los escenarios relevantes. Se seleccionaron siete expertos con nivel de competencia medio y alto. Los criterios de mayor peso fueron: *Potencial Existente; Demanda Energética, Prioridad y Daños Ambientales*. Se pudo comprobar que el escenario de mayor relevancia consume el 14% de la electricidad, y cuenta con el 39% del potencial FRE del municipio. A pesar de la menor relevancia de otros escenarios, sus potencialidades FRE deben analizarse puntualmente ya que alcanzan valores mínimos de 1110 toneladas equivalentes de petróleo por año.

Palabras clave: energía renovable; escenario relevante; multicriterio; potencial.

Copyright © 2019. Este es un artículo de acceso abierto, lo que permite su uso ilimitado, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada.

* Autor para la correspondencia: Ernesto L. Barrera, Email: ernestol@uniss.edu.cu

ABSTRACT

Relevant scenarios for Renewable Energy Resources (*RER*) use were identified in this work in La Sierpe municipality, Sancti Spíritus province, Cuba. Delphi methodology for expert evaluation, as well as multicriteria techniques to select the relevant scenarios were used. Seven experts with high to medium competence level were selected. The criteria *Existent Potential*, *Energetic Demand*, *Priority* and *Environmental Damage* showed the highest weigh. The scenario with the highest relevance consumed 14% of the electricity, having 39% of the Municipality *RER* potential. Despite the lower relevance of some scenarios, they should be locally analyzed as they reported minimum values of 1110 tons of oil equivalent per year.

Keywords: renewable energy; relevant scenario; multicriteria; potential.

1. INTRODUCCIÓN

Las energías renovables se han establecido como una tendencia mundial. Su rápido crecimiento, particularmente en el sector eléctrico, es impulsado por diversos factores, incluyendo el aumento de la rentabilidad de las tecnologías renovables; iniciativas de políticas aplicadas; un mejor acceso al financiamiento; seguridad energética; cuestiones medio ambientales; demanda creciente de energía en economías en desarrollo y emergentes; y la necesidad de acceso a una energía modernizada (Panwar y col., 2011).

En Cuba, la energía renovable tiene vital importancia para una economía que importa alrededor del 50% del combustible fósil que consume y cuya producción nacional de crudo, decreció en el año 2015 en un 2,9% (ONEI, 2016). El estado cubano ha aprobado importantes documentos y normativas que contemplan alcanzar para el año 2030, un 24% de generación de energía eléctrica con Fuentes Renovables de Energía (FRE) (Trade e Investment, 2014). El programa de apoyo a las fuentes renovables de energía en Cuba, financiado por la Unión Europea en el 2018, prevé la instalación de proyectos pilotos y demostrativos utilizando las FRE, como apoyo al desarrollo local. Sin embargo, un punto de partida importante es la identificación de oportunidades y necesidades en cada uno de los municipios.

En el municipio La Sierpe, provincia de Sancti Spíritus, Cuba, se han realizado esfuerzos aislados para la introducción de las FRE. Desde hace varios años cuenta con experiencias en la explotación de la pequeña central hidroeléctrica (PECHE) Zaza. Además, cuenta con un parque solar fotovoltaico de 1,2 MW, 128 molinos de viento y 11 pequeños digestores para la producción de biogás (ONEI, 2016).

A pesar de esto, no se reportan en la literatura estudios encaminados a la identificación de otros escenarios relevantes para el aprovechamiento de las FRE en el territorio, teniendo en cuenta su posible interconexión con las redes eléctricas, la mitigación de daños ambientales, la prioridad para el territorio, la existencia de experiencias previas y otros criterios de relevancia. Las técnicas multicriterio han sido utilizadas para comparar la relevancia de una alternativa tecnológica o un escenario en función de un grupo de criterios (Bauer y col., 2010; Nzila y col., 2012; Roth y col., 2009).

Por tal motivo, el objetivo del presente trabajo es identificar los escenarios relevantes para la utilización de las FRE en el municipio de la Sierpe, mediante la aplicación de técnicas multicriterio.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Se parte de un diseño no experimental, de tipo transversal (Hernández y col., 2014), donde se observan escenarios relevantes para la utilización de FRE, en el contexto natural del municipio La Sierpe durante el año 2017, que posteriormente fueron analizados y valorados según el juicio de los expertos y técnicas de análisis multicriterio.

2.1. Selección de los expertos

Para identificar los expertos se realizó una tormenta de ideas, con especialistas y directivos del Centro de Estudios de Energía y Procesos Industriales (CEEPI). Se identificaron los posibles expertos a utilizar, según su experiencia, conocimiento, creatividad, disposición a participar, capacidad de análisis y de pensamiento, interés colectivista y autocrítico. Luego, se realizó, la evaluación de los expertos para determinar su nivel de competencia, utilizando el método Delphy (Hurtado, 2003). Posteriormente, se seleccionaron los expertos necesarios para la investigación (n_e); utilizando la distribución binomial de la Eq. 1, donde p es la proporción estimada de errores de los expertos, i es el nivel de precisión deseada en la estimación, y k es la constante asociada al nivel de confianza elegido ($1-\alpha$).

$$n_e = \frac{p(1-p)k}{i^2} \quad (1)$$

2.2. Método multicriterio de decisión.

El método multicriterio consiste en el uso de técnicas y herramientas que permiten mejorar la calidad integral de los procesos de decisión, y el incremento del conocimiento sobre los mismos, en contextos con objetivos en conflicto y entornos inciertos (Aznar y Guijarro, 2012). Se emplearon técnicas multicriterio, basadas en aspectos metodológicos establecidos en la literatura (Marrero, 2001). Se desarrollaron los siguientes pasos: **Paso 1:** Definición de las alternativas o escenarios a evaluar; **Paso 2:** Definición de los criterios de decisión (7 ± 2); **Paso 3:** Evaluación de cada alternativa según cada criterio; **Paso 4:** Obtención de los pesos o importancias relativas de cada criterio (Ponderación); **Paso 5:** Construcción de la matriz de decisión; **Paso 6:** Aplicación de un método de agregación; **Paso 7:** Ordenación de las alternativas o escenarios; y **Paso 8:** Selección del escenario o alternativa.

2.3. Recolección y procesamiento de los datos

Los datos técnicos fueron recolectados en empresas del municipio, mientras que los aspectos cualitativos fueron evaluados por actores del desarrollo local en La Sierpe. Para su procesamiento se utilizaron las hojas de cálculo de Microsoft Excel 2016.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Selección de expertos

Se identificaron un total de 9 posibles expertos, cuyos niveles de competencias fueron calculados. Sin embargo, el número de expertos necesario fue de 6,5898, para un nivel de confianza ($1-\alpha$) del 99%, con una proporción estimada del error de los expertos (p)

de 0,01 y una precisión (*i*) de 0,1. Al tratarse de personas, el número de expertos se aproximó a 7, los que fueron seleccionados entre los nueve propuestos. Los expertos seleccionados obtuvieron un nivel de competencia entre medio y alto, siendo alto para más del 50% de los mismos. La procedencia de los expertos del nivel nacional, provincial y territorial fue: Dirección de Energía Renovable (DER) del Ministerio de Energía y Minas de Cuba, (MINEM); Unidad de Medio Ambiente de Sancti Spíritus, Consejo de la Administración municipal de La Sierpe, Centro Universitario Municipal de La Sierpe y Centro de Estudios de Energía y Procesos Industriales (CEEPI) de la Universidad de Sancti Spíritus “José Martí Pérez”.

3.2 Aplicación del método multicriterio de decisión

Paso 1: Definición de los escenarios o alternativas.

Para la definición de los mismos se tuvieron en cuenta aquellos circuitos con mayores consumos para el municipio, según la estructura de las redes eléctricas establecidas por la Organización Básica Eléctrica (OBE) provincial. Los escenarios se conformaron de la siguiente forma:

- Escenario 1 (E1): Circuito SK 48
- Escenario 2 (E2): Circuito SK 49
- Escenario 3 (E3): Circuito SK 50
- Escenario 4 (E4): Circuito SK 51
- Escenario 5 (E5): Circuito SK 52

Paso 2: Definición de los criterios de decisión (7±2).

Los criterios tomados en cuenta para la evaluación de los escenarios fueron:

- Criterio 1 (C1): *Potencial Existente*; se refiere al volumen total de FRE en toneladas equivalentes de petróleo (tep)/año.
- Criterio 2 (C2): *Demanda Energética*; se refiere al consumo de los principales sistemas productivos del escenario (MWh/año).
- Criterio 3 (C3): *Distancia del punto terminal*; indica la distancia promedio (km) a la que se encuentran los potenciales del punto de interconexión con el Sistema Electroenergético Nacional (SEN), dentro del escenario.
- Criterio 4 (C4): *Número de Experiencias previas en Cuba*; se refiere a la cantidad de experiencias tecnológicas existentes en el país para aprovechar el potencial FRE de cada escenario (cualitativo, con escalas: (1) Ninguna; (2) Menor o igual que 5, y (3) Mayor que 5).
- Criterio 5 (C5): *Prioridad*; se refiere al nivel de prioridad, que pudiera tener en el territorio, la implementación de los potenciales FRE del escenario (cualitativo, con escalas: (1) Baja; (2) Media y (3) Alta).
- Criterio 6 (C6): *Articulación con otros proyectos locales*; se relaciona con la incidencia que pueda tener la implementación de los potenciales FRE, con otros proyectos de desarrollo local (cualitativo, con escalas: No Articulada (1); y Articulada (2)).
- Criterio 7 (C7): *Daños Ambientales*; se refiere al daño ambiental que provoca el potencial (cualitativo, con escalas: Bajo (1); Moderado (2) y Severo (3)).

- Criterio 8 (C8): *Percepción de los Actores*; se refiere a la actitud que poseen los habitantes y actores locales para la implementación de las FRE, según sus aspiraciones, aceptación de la tecnología y condiciones socio-económicas (cualitativo, con escalas: Desfavorable (1); Aceptable (2) y Favorable (3)).

Paso 3: Evaluación de cada alternativa según cada criterio.

Se determinaron los valores de cada criterio en cada escenario para conformar la matriz original (Tabla 1). Se observó que el criterio C3, fue un criterio que está valorado como un mínimo, donde, mientras más pequeño es su valor se considera mejor el escenario por estar más cerca el potencial del punto de interconexión con la red eléctrica. El resto de los criterios fueron considerados de máximo, ya que a mayor valor mayor relevancia del escenario para la utilización de las FRE. Por tal motivo será necesario homogenizar la matriz original para convertir todos los criterios a máximo (Marrero, 2001).

Tabla 1. Matriz original para los criterios en cada escenario

<i>Criterios</i>	<i>Escenario 1</i>	<i>Escenario 2</i>	<i>Escenario 3</i>	<i>Escenario 4</i>	<i>Escenario 5</i>
C1	1483,63	2118,78	3030,03	1110,30	3084,55
C2	1058,6	903,3	3051,0	259,8	1533,4
C3	200	600	150	300	150
C4	2,4	2,5	2,4	2,5	2,3
C5	2,0	1,0	3,0	1,0	3,0
C6	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
C7	2,0	1,75	1,8	1,75	2,0
C8	2,0	1,0	3,0	1,0	3,0

Criterio 1 (C1): *Potencial Existente* (tep/año); Criterio 2 (C2): *Demanda Energética* (MWh/año); Criterio 3 (C3): *Distancia del punto terminal* (km); Criterio 4 (C4): *Número de Experiencias previas en Cuba* (-); Criterio 5 (C5): *Prioridad* (-); Criterio 6 (C6): *Articulación con otros proyectos locales* (-); Criterio 7 (C7): *Daños Ambientales* (-); y Criterio 8 (C8): *Percepción de los Actores*; (-).

Paso 4: Obtención de los pesos o importancias relativas de cada criterio. (Ponderación).

El nivel de concordancia en el juicio de los expertos, fue valorado para la matriz original, según el coeficiente de Kendall ($W = 0,4791$) que estuvo por debajo de 0,50, y fue necesario entonces aplicar una prueba de hipótesis, para probar el grado de significación de los criterios. Como resultado de esta prueba de hipótesis, se concluyó: $X^2_{\text{calculado}} = 23,476 > X^2_{\text{tabulado}} = 20,090$; por tanto, se rechazó la hipótesis nula (H_0 : no hay concordancia en el juicio de los expertos), por lo que no se encontraron evidencias estadísticas suficientes que impliquen falta de concordancia en el juicio de los expertos, con un nivel de confianza del 99%.

Posteriormente, se homogenizó y se neutralizó la matriz original para llevar todos los criterios a máximos, y expresarlos en una misma unidad de medida, respectivamente. Con la matriz neutralizada se determinó el peso de los criterios (W_{comb}) a partir de la combinación del peso subjetivo (W_{subj}) y el peso objetivo (W_{obj}). Para la determinación de este último (W_{obj}), se hizo necesario determinar los valores de

entropía y diversidad como parte del método empleado (Marrero, 2001). Los resultados obtenidos son mostrados en la Figura 1.

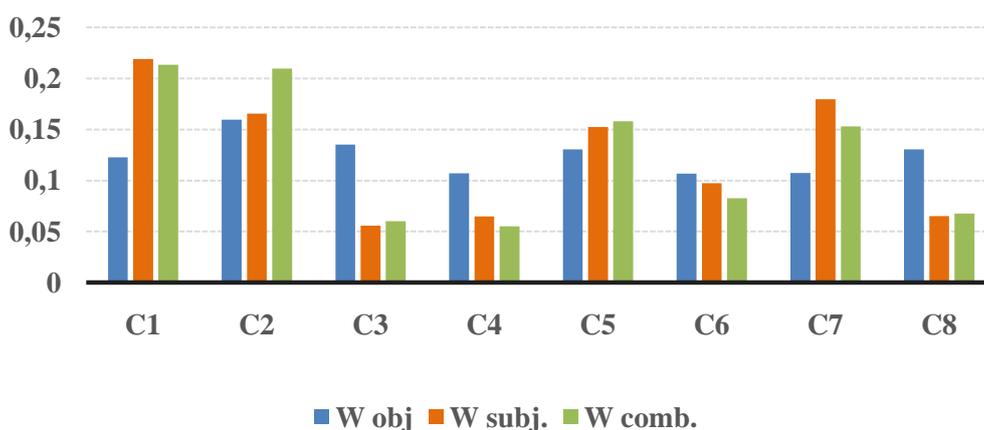


Figura 1. Representación gráfica de la ponderación de los criterios

Se observó una gran variabilidad, en cuanto al peso de los criterios, destacándose los criterios *C1*, *C2*, *C5* y *C7* como criterios de mayor peso combinado (*Potencial Existente*, *Demanda Energética*, *Prioridad* y *Daños Ambientales*), los que representaron el 73,4% de importancia con respecto al total de los criterios evaluados. Resultó significativo que los criterios *C1*: *Potencial Existente* y *C2*: *Demanda Energética* reportaron el 42,3% de importancia, mientras que *C5*: *Prioridad* y *C7*: *Daños ambientales*, ocuparon el 31,1%. El peso de los restantes criterios estuvo entre el 5,5 y 8,2%, lo que estuvo asociado a la ponderación realizada por los expertos (aspectos subjetivos) en los criterios *C3*, *C4* y *C8*, donde el peso subjetivo (W_{subj}) representó entre el 41 y 60% del peso objetivo (W_{obj}).

Además, se corroboró la importancia de determinar el peso o importancia de los criterios a partir de la combinación de métodos objetivos y subjetivos, pues existen criterios que aún con mayor peso objetivo que otro, tienen un menor peso combinado (ej., *C7* y *C8*). En otras palabras, el peso subjetivo (W_{subj}) representó la valoración de la importancia de cada criterio según el juicio de los expertos, mientras que el peso objetivo (W_{obj}) representó la importancia de los criterios según su variabilidad y magnitud en los escenarios evaluados.

Paso 5: Construcción de la matriz de decisión.

Luego de determinados los valores de los pesos de los criterios, se construyó la matriz de decisión, multiplicando los valores de la matriz neutralizada por los pesos combinados de cada criterio (Figura 1), que constituyó las sumas ponderadas de cada criterio en cada escenario.

El diagrama de araña de la Figura 2, se realizó con los valores de la matriz de decisión. Se observó una elevada influencia de los criterios *C1* y *C2* en el escenario 3, agrupando el 52% de su suma ponderada. Sin embargo, para el escenario 5, se observaron tres criterios (*C1*, *C2* y *C5*) con similares sumas ponderadas (0,061, 0,047 y 0,047, respectivamente). Se pudo observar un bajo nivel de relevancia para los criterios *C3*, *C4* y *C8* en correspondencia con sus bajos pesos combinados, mostrando valores de su suma ponderada por debajo de 0,02. Aunque el criterio *C7* resultó entre los de mayor

peso combinado, se observaron valores muy similares de su suma ponderada para todos los escenarios debido a su similitud en la matriz de decisión (Tabla 1).

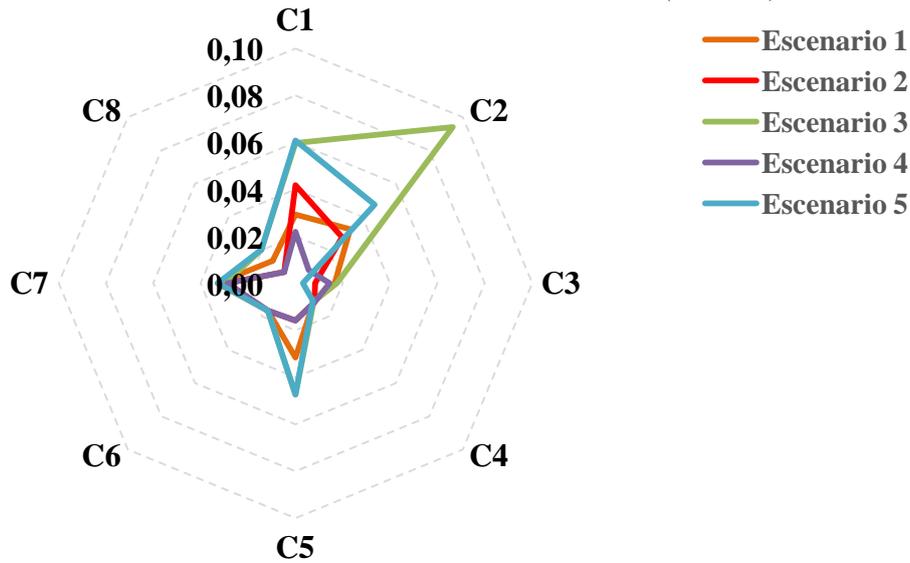


Figura 2. Representación gráfica de la relación entre criterios, peso y escenarios

Aunque el área ocupada por cada una de las curvas es proporcional a la relevancia del escenario, resultó complejo mostrar el orden de relevancia de los escenarios desde la Figura 2. Por tanto, se le aplicó el método de agregación de suma ponderada o utilidad aditiva (SPi) por escenario, para definir su relevancia en la implementación de las FRE. En el diagrama de araña de la Figura 3, se mostró la relevancia de los escenarios. Se pudo observar que el escenario de mayor relevancia para la utilización de las FRE es el escenario 3, que comprende al circuito SK 50.

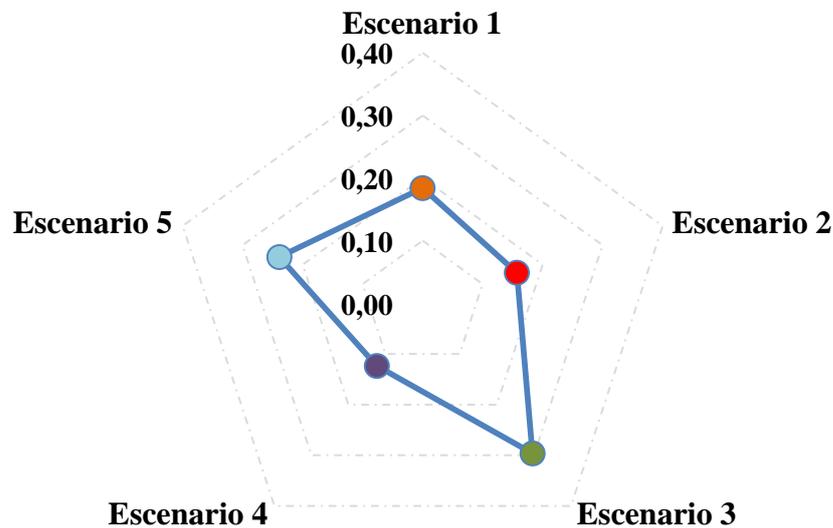


Figura 3. Representación gráfica la relevancia de los escenarios

Su relevancia se fundamenta en que este circuito consume el 14% del total del municipio, siendo el más grande del territorio, ya que suministra energía a la cabecera del municipio y cuenta con varios sistemas productivos altos consumidores (de hasta

503 MWh/año), entre los que se destacan la Unidad Empresarial de Base (UEB) Los Españoles, la Estación de Bombeo La Sierpe, la Cooperativa de Créditos y Servicios “Tony Alomá”, y la Fábrica de Hielo “Sur del Jíbaro”. Al mismo tiempo, cuenta con un potencial FRE anual de 3 030 tep, fundamentalmente residuos pecuarios (62 tep) y residuos agro-industriales arroceros (2618 tep). Estos últimos se distribuyen entre residuos de cosecha (95%) y residuos de secaderos (5%).

El segundo escenario de mayor relevancia fue el escenario 5 (Circuito SK 52), donde se consumió el 6% de la electricidad del municipio y están instalados sistemas productivos altos consumidores como la UEB Tamarindo, UEB Acuiser y las Estaciones de bombeo de Brígido y San Carlos. Coexisten en las cercanías de este circuito potenciales FRE anuales equivalentes a las 3084 tep, distribuidas entre residuos pecuarios (105 tep) y residuos agro-industriales arroceros (2 635 tep). En este escenario, los residuos agro-industriales arroceros correspondieron a los residuos de cosecha en un 53%, a los residuos de los molinos en un 45%, y a los residuos de secaderos en un 2%.

Se observó además (Figura 3) que en el escenario 1 (circuito SK 48), se obtuvo una mayor suma ponderada que en el escenario 2, teniendo un potencial FRE 1,4 veces menor, con similar demanda energética (Tabla 1). Esto demostró el peso de los restantes criterios en la decisión final.

A pesar de la menor relevancia de los escenarios 2 y 4, sus potencialidades anuales para las FRE alcanzan las 2118 y 1110 tep, respectivamente, siendo necesario un análisis puntual para la explotación de los mismos, donde se incluyan estudios de factibilidad, evaluaciones detalladas de impacto ambiental, así como su contribución al desarrollo local en cada comunidad.

4. CONCLUSIONES

1. Se ponderaron de criterios de relevancia, mostrando que los criterios Potencial Existente; Demanda Energética, Prioridad y Daños Ambientales tendrán la mayor repercusión durante la toma de decisiones.
2. Se comprobó que el escenario de mayor relevancia, comprende el circuito SK 50, que consume el 14% del total del municipio, y cuenta con el 39% del potencial FRE (2 681 mil toneladas equivalentes de petróleo al año), distribuido fundamentalmente entre residuos pecuarios (62 toneladas equivalentes de petróleo al año) y agro-industriales arroceros (2618 toneladas equivalentes de petróleo al año).
3. A pesar de la menor relevancia de otros escenarios, sus potencialidades para las FRE deben analizarse puntualmente a partir de estudios de factibilidad, evaluaciones detalladas de impacto ambiental, así como su contribución al desarrollo local en cada comunidad.

REFERENCIAS

- Aznar, J. y Guijarro, F., Nuevos Métodos de Valoración. Modelos Multicriterio., Editorial Universitat Politècnica de Valencia, 2da Edición, 2012, pp. 125-269.
- Bauer, C., Schenlera, W. and Rothb, S., A Comparative Sustainability Assessment of Combined Heat and Electricity Supply by Cogeneration and Heat Pump Systems

- for Switzerland,. Paper presented at the ECOS 2010 23th International Conference on Efficient, Cost, Optimization, Simulation & Environmental Impacts of Energy Systems, Lausanne, Switzerland, June 14-17, 2010.
- Hernández, R., Fernández, C. y Batista, P., Metodología de la Investigación., Sexta edición, Editorial McGRAW-HILL, Interamericana Editores, S.A. de C.V. 2014, pp. 152-155.
- Hurtado de Mendoza, S., Criterio de expertos. Su procesamiento a través del método Delphy. Histodidáctica., 2003, pp. 1-13. Consultado: 15 de Septiembre, 2018, Disponible en: https://clasesvirtuales.ucf.edu.cu/pluginfile.php/19017/mod_resource/content/1/Gu%C3%ADa%20Te%C3%B3rica.pdf
- Marrero, F., Procedimientos para la toma de decisiones logísticas con enfoque multicriterio en la cadena de corte, alza y transporte de la caña de azúcar., Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas, Especialidad de Ingeniería Industrial en la La Universidad Tecnológica de la Habana (CUJAE), La Habana, Cuba, 2001.
- Nzila, C., Dewulf, J., Spanjers, H., Tuigong, D., Kiriamiti, H. and van Langenhove, H., Multi criteria sustainability assessment of biogas production in Kenya., Applied Energy, Vol. 93, 2012, pp. 496-506.
- ONEI., Oficina Nacional de Estadística e Información de la República de Cuba., 2016, Minería y Energía pp. 1-25. Consultado: 28 de abril de 2018, Disponible en: <http://www.one.cu>
- Panwar, N.L., Kaushik, S.C. and Kothari, S., Role of renewable energy sources in environmental protection: A review., Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 15, No. 3, 2011, pp. 1513-1524.
- Roth, S., Hirschberg, S., Bauer, C., Burgherr, P., Dones, R., Heck, T., and Schenler, W., Sustainability of electricity supply technology portfolio., Annals of Nuclear Energy, Vol. 36, No. 3, 2009, pp. 409-416.
- Trade and Investment, U.K., Renewable Energy in Cuba., 2014, pp. 1-3. Consultado: 14 Septiembre de 2018, Disponible en: https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/345400/Renewable_Energy_in_Cuba.pdf