

## **Innovación tecnológica energética en comunidades rurales. Caso de estudio comunidad de "Manantiales", Villa Clara, Cuba**

### **Innovation technological energetics in rural communities. Case of study community of "Manantiales", Villa Clara, Cuba**

Raul Olalde Font<sup>1</sup>, Taymi González Morera<sup>1</sup>, Lianet Herrera González<sup>1</sup>, Judith Cherni<sup>2</sup>, Antonio Urbina Yeregui<sup>3</sup>, Lucia Serrano Luján<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas (UCLV). Carretera a Camajuaní, km 5½. Santa Clara, Villa Clara, Cuba. CP 54830.

<sup>2</sup> ICEPT, Imperial College London (ICL), 3rd Floor, Mechanic Engineering Building, South Kensington, London, UK. CP SW7 2AZ.

<sup>3</sup> Universidad Politécnica de Cartagena. Plaza del Hospital 1, Cartagena, España. CP 30202.

**E-mails:** raulo@uclv.edu.cu; taymigm@uclv.edu.cu; lianethg@uclv.edu.cu; j.cherni@imperial.ac.uk; antonio.urbina@upct.es; hlunah@gmail.com

---

**RESUMEN.** Esta investigación se enmarca en el análisis de impactos en el desarrollo local a partir de la toma de decisiones en proyectos de energización rural en comunidades cubanas que tienen como principal actividad económica el sector agrícola. Ilustrándose los resultados de un estudio de caso donde se seleccionan las opciones tecnológicas más viables bajo la óptica del mejoramiento de indicadores de recursos comunitarios. Los métodos y materiales utilizados son característicos de un estudio de campo con la aplicación del modelo multicriterial para el apoyo a la toma de decisiones en proyectos de energización rural SURE. Se precisa región geográfica la comunidad rural aislada de "Manantiales"; al mismo tiempo, se reseña el estado actual en la temática abordada. Se esbozan los principales indicadores en cada recurso de la comunidad rural bajo la óptica del modelo en su versión 3.0, así como la caracterización que se deriva de la predicción de los impactos de cada opción tecnológica sobre los recursos. Se exhibe una matriz de impactos y el ordenamiento de las tecnologías según el nivel de logros que aportan a los indicadores de recursos comunitarios. Los resultados obtenidos demuestran que la tecnología hidroenergética es la opción más viable con un valor de 100 puntos en la escala de 0 a 100, seguida del sistema electroenergético nacional con 91,11 y de los sistemas fotovoltaicos basados en paneles de silicio con 90,57. Todas las opciones aportan un nivel de logros significativo al desarrollo local comunitario.

**Palabras clave:** desarrollo local sostenible, recursos renovables, sostenibilidad energética, ciclo de vida

**ABSTRACT.** This investigation is framed in the analysis of impacts in the local development starting from the taking of decisions on projects of rural energy in Cuban communities that have as economic main activity the agricultural sector, illustrated the results of a case study where the technological most viable options are selected under the optics of the improvement of indicators of community resources. The methods and used materials are characteristic of a field work with application model are characterized for the taking of decisions in the energy area and their sources SURE, as geographical region the community isolated rural "Manantiales" linked to the agrarian sector in the republic of Cuba and the present period review in the thematic one approached. The main indicators are sketched in each resource of the rural community under the optics of the SURE in their version 3.0, as well the characterization of the prediction of the impacts at each technological option on the resources, is exhibited a mean of impacts and the classification of the technologies according to the level of achievements contribute to the indicators of community resources, obtaining as a result that the hydro energy technology is the most viable option with a value of 100 points in the scale from 0 to 100, followed by the GRID with 91.11 and of the photovoltaic systems based on silicon panels with 90.57, in this case all technologies contribute a significant level of achievements to the local community development.

**Keywords:** sustainability local development, renewable resources, energy sustainability, life cycle

## INTRODUCCIÓN

En Cuba se identifica como problema fundamental para su seguridad energética la alta dependencia de combustibles importados, el elevado costo promedio de la energía entregada, la fuerte contaminación ambiental y la baja utilización de las fuentes renovables de energía (FRE). Por ese motivo en la disminución de la dependencia energética es preciso un cambio en la matriz energética a partir del uso de FRE utilizando las potencialidades y recursos locales (Murillo, 2014). En este sentido, se debe observar que la transferencia tecnológica active las pequeñas economías locales, generando formas de empleo con producciones que se integren a la matriz energética y económica local. Para lograr esto es necesario que las tecnologías energéticas a introducir impacten positivamente no solamente sobre el recurso económico sino que también incidan de manera positiva sobre los recursos naturales, sociales, humanos y físicos, que conforman la teoría del modo de vida (DIFID, 1999a; DIFID, 1999b; DIFID, 2000).

Un alto potencial en la búsqueda de recursos para el cambio en la matriz energética a escala local lo tienen las zonas rurales donde existe posibilidades de introducir tecnologías con uso de fuentes renovables de energía. A lo que se agrega que, existe la necesidad de que en las estrategias de desarrollo de las comunidades (localidades) se tomen en consideración aquellos recursos naturales o económicos que permitirán ser utilizados para la generación de energía logrando cambios sustantivos en la matriz local energética; todo esto con criterios de sostenibilidad. Se impone desde luego una mayor participación de las instituciones de gobierno, productores locales, junto a Grupo nacional gubernamental de “Energía Renovable, Cogeneración, Ahorro y Eficiencia Energética” y la asesoría de centros de investigación de las universidades como promotores de innovaciones tecnológicas en este campo de acciones. A tenor con lo anterior, resulta imprescindible que el proceso de toma de decisiones se realice bajo técnicas que permitan una selección adecuada de las tecnologías energéticas a introducir en comunidades rurales y que responda de manera integral al beneficio de los recursos que estas poseen. En este tema se reportan una serie de herramientas computacionales que permiten la selección, modelación y optimización de los sistemas de generación de electricidad en apoyo a la toma de decisiones a diferentes

niveles y que se aplican para la ejecución de proyectos de inversión. Estas consideran aspectos tecnológicos, financieros o diferentes indicadores de recursos de una comunidad rural o región para la toma de decisiones. Entre las de mayor visibilidad se tiene a HYBRID2 (Manwell *et al.*, 1994; NREL, 2015); ViPOR para electrificación de pequeñas comunidades o villas con energías renovables (NREL, 2015); INSEL (Brassel *et al.*, 2005); JODYMOD (Pereira, 2000), NAIADE, (Menegolo y Pereira, 1996); PRODOM (Santana y Llanes, 2002); RESTCreen (Niagara, 2011); SIMENERG (Chaer *et al.*, 1993); SOMES (Guasch, 2003), HOMER (NREL, 2000; NREL, 2015); SAM (NREL, 2014) y otras herramientas. Todas con excepción de NAIADE apoyan la toma de decisiones a diferentes niveles pero tratan únicamente los aspectos tecnológicos, financieros, en menor caso los ambientales y no prevén los aspectos relacionados con el desarrollo local integral comunitario que podrían Potenciarlo de manera sostenible un desarrollo local sostenible.

En este contexto a partir del año 2009, con el acuerdo 95 del Grupo nacional gubernamental de “Energía Renovable, Cogeneración, Ahorro y Eficiencia Energética” se estima la aplicación y puesta en la práctica social en Cuba del modelo para la toma de decisiones en proyectos de energización rural “SURE”, (Cherni *et al.*, 2007) en coordinación con los Consejos de la Administración Municipales en las provincias de Pinar del Río, Villa Clara, Sancti Spíritus, Las Tunas, Holguín, Granma y Santiago de Cuba.

A diferencia de las herramientas reportadas, con SURE se apoya la toma de decisiones a nivel de grupos de expertos que pueden asistir a los Consejos de Administración Municipales. En este escenario es que esta herramienta y la forma de evaluar los impactos en término de logros a alcanzar, refuerza la idea del autodesarrollo comunitario sustentable desde la arista de la energización rural (Cherni *et al.*, 2007). Este modelo se enmarca en la teoría de los modos de vida (DFID, 1999a; DFID 1999b; DFID, 2000), definiendo cinco tipos de recursos de una comunidad rural, el natural, el humano, el social, el físico y el financiero.

## MATERIALES Y MÉTODOS

SURE utiliza métodos de análisis multicriterio-objetivo (AMO) e introduce técnicas participativas, conformando un instrumento que predice y mide de forma dinámica los diferentes impactos que producen las transferencias de

tecnologías energéticas en comunidades rurales electrificadas parcialmente o no electrificadas en sus recursos locales según el orden de niveles de logros a alcanzar. Para eso se adecuan al escenario comunitario cubano los conceptos de la teoría de los modos de vida. En este sentido se precisan los factores que comprenden al recurso social, recurso financiero, recurso natural, recurso humano y recurso físico, previéndose la aplicación de un cuestionario participativo (Águila y Olalde, 2006), como parte de las técnicas participativas que incorporan y aportan información adicional sobre cada uno de los recursos de las comunidades para el uso del modelo.

Como elemento novedoso, esta evaluación de impactos se estructura a través de un procedimiento que define estructuralmente los cinco recursos de la comunidad respecto a las opciones tecnológicas energéticas, donde  $X_j$  representa un juego separado de factores para cada función del recurso. Cada factor tiene un rango de valores entre 0 y 100, donde 0 refleja ningún efecto positivo o resultado de la alternativa energética “i” en el recurso “j”, y 100 expresa su efecto más elevado (Cherni *et al.*, 2007). Esta captura dinámicamente la relación entre los recursos que la población posee cuando la energía llega a la comunidad y adicionalmente predice el impacto.

$$C_j(A_i) = \frac{1}{1 + e^{-\alpha_j X_j(A_i)}} \quad (j=1, \dots, 5; i=1, \dots, n)$$

Donde  $C_j(A_i)$  representa la evaluación o impacto de determinada i alternativa energética ( $A_i$ ,  $i=1, \dots, n$ ) contra el recurso j,  $j=1, 2, \dots, 5$ ,) y 1 indica el recurso físico, 2 el financiero, 3 el natural, 4 el social y 5 el recurso humano.  $C_j(A_i)$  toma los valores dentro del intervalo (0, 100), e indica como la opción energética i impacta al recurso j;  $X_j$  representa el número de factores que integran a cada recurso j (por ejemplo, para el recurso natural, los factores son agua, aire, paisaje y flora y fauna);  $X_j(A_i)$  representa los efectos de i alternativa energética en cada factor del correspondiente recurso de la comunidad j. Finalmente,  $\alpha_j$  es un parámetro matemático de escalado que normaliza, en un intervalo común para todos los recursos, los efectos de una i alternativa energética a través de todos los recursos para que estos puedan ser comparados. Por lo tanto, el modelo asume el mayor valor numérico como absoluto que abarca todos

los valores de los recursos, el cual se usa para estandarizar la función  $C_j$ .

Por otro lado, con vista al ordenamiento de las alternativas, se introducen las técnicas o métodos de análisis multiobjetivo implementándose otro procedimiento el que se tiene como meta calcular una distancia con el objetivo de minimizar el vacío o espacio entre el posible valor máximo del recurso de cada comunidad (valor ideal, 100) y el valor que podría obtener a partir de la aplicación de una tecnología energética, 90, 75, 25, ..., (Cherni *et al.*, 2007), procesando la información con el método de análisis de multicriterio programación por compromiso (Zeleny, 1973). Igualmente, SURE cuantifica las emisiones de  $CO_2$  evitadas, llamándose a este procedimiento “Impacto Global” mediante la introducción de los conceptos de ciclo de vida y su evaluación (LCA), demanda energética acumulativa (CED) (o energía arraigada), tiempo de recuperación de la energía (EPBT) y el factor de retorno energético (ERF), que brindan la posibilidad de calcular las emisiones de gases de invernadero evitadas tomando en cuenta la condición geográfica (Raugei *et al.*, 2007; Serrano, 2013).

Como secuencia lógica para el análisis y solución del problema mediante el modelo SURE se tiene:

1. Definición de grupos de decisores. Se deben considerar los pobladores y futuros beneficiarios de los resultados en la comunidad.
2. Caracterización de los recursos de la comunidad y establecimiento de la línea base. Se realiza mediante la aplicación del cuestionario participativo y opinión de expertos.
3. Definición del grupo de alternativas a analizar, aceptación de la propuesta del modelo y/o adecuación de las mismas.
4. Definición de los criterios u objetivos de decisión, los cuales corresponden a los Indicadores de recursos o capital.
5. Evaluación de las alternativas en una matriz de alternativas *versus* recursos o capital.
6. Aplicación de métodos de análisis multiobjetivo, ordenamiento de las alternativas y la predicción de sus impactos o niveles de logros.
7. Elaboración del informe, recomendaciones y propuestas con un mínimo de tres variantes de ponderación de objetivos y el consecuente ordenamiento que responde a estas.

El estudio se desarrolló por parte de un equipo multidisciplinario en la comunidad

rural parcialmente electrificada “Manantiales”, localizada en el extremo suroeste del lago Hanabanilla. La totalidad de las familias a beneficiar fue de 40 viviendas (familias de granjeros). Unos 40 niños habitan la comunidad, en total 123 habitantes, 15 residencias son de madera totalmente, otras 25 de mampostería (ladrillos y cemento), y se distribuyen en un radio de 500 metros; carecían de un servicio estable de electricidad y de medios de comunicación.

Como actividad fundamental se dedican a la cría de animales y complementan la misma con el cultivo del café, maíz y otros productos agrícolas. Esta comunidad posee un puesto médico y escuela con servicio de electricidad mediante paneles solares, pero no abarcan la totalidad de las horas necesarias y presentan inestabilidad por la inexistencia de adecuadas baterías de respaldo. Existe igualmente una bodega y un club social en mal estado constructivo no electrificados. La vegetación dominante es el pinar, la pluvisilva de montaña, (bosque húmedo tropical y subtropical de frondosas). El recurso natural más valioso además del sol lo constituye el agua proveniente de un manantial cercano a la comunidad que garantiza el abasto poblacional, riego y constituye una fuente natural para la energía. El viento no es significativo y la biomasa (madera) precisamente se encuentra en proceso de protección y recuperación.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

SURE, tomando en cuenta los resultados de la aplicación del cuestionario participativo y la

opinión de expertos, elabora una base de datos que contiene la información de la comunidad estructurada en los cinco recursos que se tienen en cuenta. Esta base de datos se define a partir de la disponibilidad de los recursos naturales, demanda, preferencias de los beneficiarios y de la información recolectada por los expertos. El modelo propone cuatro posibles alternativas energéticas (hidroenergía, fotovoltaica, la Red y sistema autónomo convencional de generación basado en combustible diésel), estructuradas en seis tipos de opciones tecnológicas, las que deberán ser evaluadas respecto a una serie de factores que conforman cada recurso de la comunidad, en una matriz de alternativas versus indicadores de recursos, previéndose instalar una capacidad de 15 kW, en función de la demanda de la comunidad, sus preferencias y la opinión de expertos (tabla 1).

Se define una línea base con las tecnologías ya existentes en la comunidad (actual fotovoltaica e hidroenergía), lo que se observa en los valores de la primera línea de la tabla 2. Esta línea base se caracteriza por exhibir un recurso financiero bajo donde las principales entradas financieras provenían del cultivo del café, venta de ganado menor y de algunos servicios forestales. Las mujeres poseían especialmente un alto grado de disponibilidad para el trabajo pero no conseguían emplearse.

El recurso físico era bajo (27,14 puntos), la infraestructura local se limitaba a una escuela primaria y un puesto médico electrificados mediante paneles fotovoltaicos instalados de manera independiente, basados en silicio; una

Tabla 1. Definición de alternativas energéticas

Alternativa	Capacidad [KW]	Fuente de Energía	Eficiencia [%]
Actual Fotovoltaica y hidroenergía (sistemas independientes)	5,24	Varios/Other	55
Micro y Pico Hidráulica	15	Agua/Water	80
Solar Fotovoltaica modulos independientes del tipo silicio	15	Sol/Sun	30
Grupo autónomo convencional	15	Diesel	70
Red	15	Varios/Other	96
Solar Fotovoltaica modulos independientes del tipo capa delgada	15	Sol/Sun	10
Solar Fotovoltaica modulos independientes del tipo orgánica	15	Sol/Sun	5



**Tabla 2. Representación en SURE del puntaje obtenido por cada opción tecnológica prevista**

Tablas y Gráficos					
Matriz Tecnológica					
Tecnologías	Recurso Natural	Recurso Físico	Recurso Humano	Recurso Social	Recurso Financiero
Actual Fotovoltaica y hidroenergía	36.75	27.14	25.16	87.5	66.66
Micro y Pico Hidráulica	36.14	99.99	99.44	93.75	98.87
Solar Fotovoltaica modulos independientes del tipo silicio	36.14	99.079	99.42	89.79	66.66
Grupo autónomo convencional	12.81	98.01	97.16	93.75	75
Red	36.14	100	98.69	93.75	66.66
Solar Fotovoltaica modulos independientes del tipo capa limite (CdTe)	36.73	96.186	99.42	89.79	66.66
Solar Fotovoltaica modulos independientes del tipo organicos	36.73	85.97	99.42	89.79	66.66

bodega de productos domésticos y un local de ocio (no electrificados), y 44 viviendas con mala calidad en el servicio de electricidad existente para aquel entonces. La vía de acceso principal estaba en malas condiciones y las viviendas poseían un estado constructivo entre regular y bueno.

El recurso social exhibe una puntuación adecuada (87,5) comparado con la media de la puntuación exhibida en la matriz tecnológica de SURE. En términos de los recursos naturales, el agua es abundante siendo el principal recurso disponible junto con el sol (exhibe un puntaje de 36,75). Sin embargo, el recurso humano muestra indicadores bajos, a pesar de un índice adecuado de escolaridad de 0,76 de un máximo valor de 1 posible a alcanzar, pues un 86 % de los residentes acabaron la escuela primaria; un 34 % la escuela secundaria, el 1 % posee entrenamiento técnico y 1 % de la población posee nivel profesional, observándose que las mujeres tienen el logro más bajo referente a las destrezas profesionales.

Se modela la predicción del impacto para un horizonte de planeación de proyecto de 20 años mediante una matriz de opciones tecnológicas contra recursos de la comunidad (tabla 2), incluyéndose ya seis posibles tipos de opciones tecnológicas energéticas a implementar:

la micro y pico hidráulica (en lo adelante hidroenergía); la fotovoltaica, subdividida en módulos independientes tipo orgánico, de capa límite (CdTe) y de silicio; grupo autónomo convencional (GAC) basado en combustible diésel y la Red (sistema electroenergético nacional). En función del puntaje total alcanzado a partir del nivel de logros para cada recurso, el modelo pasa a la fase de aplicación de métodos de análisis multiobjetivo con el objetivo de ordenar las alternativas (tabla 3).

Los resultados que muestra SURE indicaron que la opción tecnológica más apropiada sería la hidroenergía (Micro y Pico Hidráulica) con 100 puntos, seguida del sistema electroenergético nacional (Red) y la solar fotovoltaica con módulos independientes del tipo silicio.

Interpretándose los resultados de las tablas 2 y 3, se resume que el recurso físico se maximiza en la comunidad si es implementada la hidroenergía o la Red. La hidroenergía debido a su mayor eficiencia entre las tecnologías basadas en fuentes renovables alcanza un nivel de logros mayor de este recurso, por lo que puede superar en su vida útil de 40 años el horizonte de planeación previsto dentro del proyecto.

Resulta interesante el análisis del impacto en el recurso físico de la comunidad sobre las

**Tabla 3. Representación en SURE del ordenamiento de cada opción tecnológica prevista y su puntaje**

Ordenamiento	Tecnologías	Puntaje Tecnología
1	Micro y Pico Hidráulica	100.0
2	Red	91.11
3	Solar Fotovoltaica modulos independientes del tipo silicio	90.57
4	Grupo autónomo convencional	65.58
5	Actual Fotovoltaica y hidroenergía	0.0

tecnologías solares fotovoltaicas (PV) pues la vida útil de sus módulos corresponden al horizonte de planeación del proyecto (aunque se requiere la sustitución de baterías anualmente o cada 4 años) y son instalados en las viviendas como sistemas de generación independientes. La tecnología fotovoltaica, al igual que la hidroenergía eliminan la dependencia sobre los combustibles fósiles y la primera posee un alto grado de modularidad, (es de observar que la hidroenergía no es modular, abarca gran extensión de superficie de la comunidad aunque utilice el embalse de agua existente). Por otro lado, la contribución energética de los sistemas PV se dirigen a los sectores demandados y preferenciales de la población que comprenden la mejora del servicio de electricidad en las viviendas, la instalación del sistema de bombeo para el riego y abasto, la electrificación del puesto médico, la reactivación de la actividad de comercio y la implementación del alumbrado perimetral durante la noche. Se prevé que los sistemas fotovoltaicos tengan un período de funcionamiento de 24 horas al día.

Los tres tipos de tecnologías energéticas fotovoltaicas alcanzan casi idéntica predicción de logros, lo cual se puede discriminar a partir de la definición del impacto global donde eventualmente se diferencian entre sí, y constituye en estos casos una consideración adicional necesaria para la toma de decisiones.

Por otro lado, el uso de tecnologías solares y la micro y pico hidráulica no deterioran el recurso natural de la comunidad. Estas tecnologías exhiben el impacto negativo ambiental más bajo sobre la comunidad "Manantiales". Las demás alternativas tienen un impacto negativo mayor sobre el recurso natural por tener como fuente natural combustibles fósiles aunque sea localmente.

Las instalaciones fotovoltaicas y la destinada a la hidroenergía, tendrán un efecto considerable sobre el recurso humano existente en la comunidad. La creciente capacidad local técnica propicia una apropiación adecuada de estas tecnologías aunque se necesita capacitación adicional para la operación tecnológica de las mismas. Con respecto al recurso social, la disponibilidad de luz durante las noches en toda la infraestructura comunitaria podría permitir un aumento de los niveles de cohesión, asociatividad y la cooperación en las redes sociales existentes, aunque las tecnologías de mayor impacto son la Red, el grupo autónomo convencional y la hidroenergía.

Por otro lado, si la tecnología PV es instalada en la comunidad en sistemas independientes, también podría provocar algunos impactos negativos sobre los recursos financieros. El costo de la inversión por unidad de la capacidad instalada es particularmente alto y la instalación y operación de sistemas solares no generan oportunidades de empleos directos ni indirectos. Resumiendo, la hidroenergía exhibe logros mayores en cada recurso lo que decide en el ordenamiento de todas las opciones tecnológicas (tabla 3). Es importante señalar que la transferencia tecnológica con la alternativa hidroenergía y fotovoltaica (en sus tres tipos de módulos independientes), impactará positivamente a la activación de la pequeña economía local pues contribuye de forma relevante a actividades económicas como la agricultura, ganadería, comercio y otras actividades económicas que se desarrollan en la comunidad.

En este sentido la estrategia de desarrollo de la comunidad se podría centrar en la reactivación de la actividad económica cafetalera, los productos agrícolas varios y algunos servicios forestales (prácticamente nulos en la comunidad), que son los sectores económicos que aportan las principales entradas financieras por concepto de ingresos a los habitantes. La creación de nuevas formas de autogestión asociadas a las pequeñas mini industrias rurales y cooperativas en el comercio y los servicios pueden darle oportunidades de empleos, con prioridad al sector femenino, a mayor cantidad de personas que en la actualidad solo se dedican a la agricultura de subsistencia.

Igualmente fueron determinados los impactos globales y por su diversidad se muestra el caso de las diferentes tecnologías fotovoltaicas por constituir un análisis que revela interés (tabla 4).

Si bien el resultado del ordenamiento en cuanto a opciones energéticas el modelo lo propone usualmente a partir de las alternativas energéticas, se pudo observar que se desagregan en la matriz de impacto tres tipos de tecnologías solares, lo que permite realizar un análisis y diferenciar el posible valor único del ordenamiento en tres opciones de decisión en la variante energética fotovoltaica. En el ordenamiento de las tecnologías se logra diferenciar los tres tipos de módulos independientes fotovoltaicos y la opción de paneles independientes basados en silicio alcanza un puntaje de 90,57 (tabla 3), pero en ocasiones las tres posibles tecnologías fotovoltaicas debido a sus semejanzas se agrupan con una única puntuación.

El análisis del concepto de impacto global en SURE tiene dos objetivos, determinar la cantidad de emisiones de CO<sub>2</sub> evitada observando la dependencia geográfica (donde se produce el equipo y donde se instala) y posibilitar la diferenciación de las alternativas energéticas si alcanzan un único puntaje en el ordenamiento de estas, por ejemplo, dentro de la energía fotovoltaica donde se proponen tres tipos de módulos. Este análisis permite diferenciar el impacto sobre los recursos de la comunidad de los sistemas basados en paneles de silicio, paneles de capa límite basados en telurio de cadmio (CdTe) y los paneles orgánicos en el orden de emisiones de CO<sub>2</sub> evitadas, por lo que SURE posibilita el análisis de la alternativa fotovoltaica en sus tres tipos de paneles comerciales.

En la tabla 4 se aprecia que el EPBT de los módulos orgánicos es el más bajo; requiere solamente cuatro meses para producir la energía usada en su fabricación. Sin embargo, su requisito de superficie es el más grande, debido a su baja eficiencia. Los módulos de CdTe requieren de más superficie que los de silicio, pero el EPBT es más bajo y las emisiones de gases CO<sub>2</sub> evitadas son mayores. La decisión definitiva sobre cual tipo de tecnología fotovoltaica elegir dependería de la prioridad de comunidad y/o decisores en cuanto a la observación o no de los efectos del cambio climático y de la predicción de impactos en los recursos que se exhiben en la tabla 2. Debe tenerse en cuenta la dependencia

geográfica (para el caso de este estudio es entre Cuba y China), y la cantidad de emisiones de gases de CO<sub>2</sub>, evitado cambia cuando otro país de fabricación se escoge. La tecnología basada en módulos orgánicos es la que más emisiones de CO<sub>2</sub> evita y Dinamarca es el país que salva más emisiones de gases de CO<sub>2</sub> cuando los módulos de PV son manufacturados en el mismo país.

### CONCLUSIONES

1. Al evaluar la predicción de impactos a partir de la transferencia tecnológica en Manantiales, se aprecia que la alternativa de hidroenergía es la de mayor puntaje ocupando el 1er lugar dado su alto grado de integralidad con una importancia relativa equilibrada para cada recurso. El recurso financiero para esta alternativa resulta decisivo, alcanzando un puntaje de 98,87 % dado en gran medida por el bajo costo unitario de generación de electricidad; lo que propicia empleos indirectos y directos para los recursos humanos de la comunidad y maximiza los valores en el recurso físico (99,99) y en el humano (99,44).

2. Al evaluar la predicción de impactos a partir de la transferencia tecnológica en Manantiales, se aprecia que tres opciones tecnológicas fotovoltaicas compiten y entre ellas la ganadora con un 3er lugar es la fotovoltaica basada en módulos independientes del tipo silicio. Si se observa el análisis de impacto global se precisa una mayor eficiencia

Tabla 4. Indicadores de impacto global de las tecnologías fotovoltaicas en “Manantiales”

	Eficiencia (%)	Emb Energy GJ/kW	Peso kg/m <sup>2</sup>	Vida útil	Performance Ratio
PV Si	18	50.5	18.91	30	0.7
PV Organic	5	7.6	0.3	30	
PV CdTe	14	14.3	11.6	30	

  

	Superficie requerida (m <sup>2</sup> )	EPBT	ERF	Emisiones evitadas (kg CO <sub>2</sub> )
PV Si	64.72	0.32	93.75	358174.97
PV Organic	233.0	0.04	750.0	378090.99
PV CdTe	83.21	0.09	333.33	371366.18



contra superficie requerida para su instalación, requerimiento que presenta limitaciones en la comunidad ya que esta solo permite el uso del 50 % del área del poblado con fines energéticos. El recurso financiero para esta alternativa alcanza un puntaje de 66,66 dado en gran medida por el alto costo unitario promedio referencial por kWp instalado.

3. Un posible reordenamiento a escala rural de la economía en Manantiales, en función de elevar el recurso financiero, propondría la reanimación de la actividad cafetalera y de algunos servicios forestales, la creación de nuevas formas de autogestión asociadas a la pequeña e inexistente industria rural, el comercio y los servicios, con especial énfasis en la incorporación del recurso humano que posee y a la vida activa de la comunidad.

4. Es necesario el control y monitoreo a mediano plazo para medir los impactos reales de la transferencia de tecnología sobre los recursos de la comunidad y compararlos con la predicción de estos, de manera que se pueda ajustar y generalizar el procedimiento en otras comunidades. El proceso de inversión se realizó por parte de la empresa de hidroenergía, tomando en cuenta el informe de los resultados que apoyan la toma de decisiones aplicando el modelo SURE, con tecnología hidroenergética Micro y Pico hidráulica del tipo Pelton, con una capacitada instalada de 15 kW, importada de IREM spa, Italia, por un proyecto de colaboración de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, coexistiendo actualmente con dos sistemas de emergencia fotovoltaicos independientes basados en paneles de silicio como parte de la diversificación de fuentes energéticas. Esto permite eliminar el sistema de generación de hidroenergía “artesanal” y un grupo electrógeno basado en combustible diésel que existían en la comunidad antes del proceso inversionista.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Águila, M.; R. Olalde F.: La universidad en la comunidad a través del proyecto. Una experiencia en la montaña Villaclareña. Memorias del Evento Provincial Universidad 2006, Santa Clara, 22 de septiembre, Villa Clara, Cuba. 2006. ISBN: 959-250-226-9.

2. Brassel, K.; E. Duminil; D. Pietruschka; J. Schumacher; A. Trinkle: INSEL version 7.0. Stuttgart,

Germany, March 2005. En sitio web: <http://www.insel.eu/index.php?id=138&L=1> Consultado el 23 de Julio, 2015.

3. Chaer, R.; R. Zeballos; W. Uturbey; G. Casaravilla: SIMENERG: A novel tool for designing autonomous electricity systems”, 1993. European Community Wind Energy Conference and Exhibitions, Lubeck-Travemunden, Germany, 8-12 de March, 1993.

4. Cherni, J.; F. Henao; P. Jaramillo; I. Dyrer; R. Smith; R. Olalde: Energy supply for sustainable rural livelihoods, a multi-criteria decision-support system, England. *Journal Energy Policy*, 35 (3): 1493-1500, 2007.

5. DfID (Department For International Development): Sustainable Livelihoods Guidance Sheets - Section 1, Introduction to the Sustainable Livelihoods approach. London, UK, 1999a. En sitio web: <http://www.eldis.org/go/topics&id=41731&type=Document#.VY4f7RZNQvQ> Consultado el 11 de Septiembre, 2014.

6. DfID (Department For International Development): Sustainable Livelihoods Guidance Sheets -Section 2, Introduction to the Sustainable Livelihoods framework. London, UK, 1999b. En sitio web: <http://www.eldis.org/go/topics&id=41739&type=Document#.VY4gdxZNQvQ> Consultado el 13 de Septiembre, 2014.

7. DfID (Department For International Development): Sustainable Livelihoods Guidance Sheets - Section 3, Uses of the Sustainable Livelihoods Approach. London, UK, 2000. En sitio web: <http://www.eldis.org/go/topics&id=41741&type=Document#.VY4gvRZNQvQ> Consultado el 22 de Septiembre, 2014

8. Guasch, D.: Modelado y análisis de sistemas fotovoltaicos. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, Departamento de Ingeniería Electrónica, abril 2003. En sitio web: <http://www.chem.uu.nl/nws/www/research/e&e/somes/somes.htm> Consultado el 13 de mayo, 2015.

9. Manwell, J. F.; J. G. Mcgowan; E. I. Baring-Gould; W. Q. Jeffries and W. M. Stein: Hybrid systems modeling: development and validation. *Wind Engineering*, 18 (5): 241-255, 1994.

10. Menegolo, L.; A. Pereira: Naiade, manual & tutorial. Joint Research Centre - EC, ISPRA SITE Institute for Systems, Informatics and Safety, TP 650, 21020, ISPRA (VA) Italy, Copyright © 1996 by JRC - Ispra site, November, 1996.



11. Murillo, M.: I Seminario de Unificación Monetaria en Cuba. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Santa Clara, Villa Clara, 22 de abril, 2014.
12. NREL (National Renewable Energy Labotatory): HOMER. May 2000, USA. En sitio web: <http://homerenergy.com/software.html> Consultado el 17 de Septiembre, 2015.
13. NREL(National Renewable Energy Labotatory): Computational software’s HOMER®, Hybrid2® y ViPOR®, US, 2015. En sitio web: <http://www.nrel.gov/> Consultado el 24 de Septiembre, 2015.
14. NREL (National Renewable Energy Labotatory): System Advisor Model, SAM®, US, 2014. En sitio web: <https://sam.nrel.gov/> Consultado el 15 de Julio, 2015.
15. Niagara Fall’s Institute: RETScreen Conference & Training. Ontario, Canada, June 20-22, 2011.
16. Pereira, A.: Modular supervisory controller for hybrid power systems. Risø National Laboratory, Roskilde, June, 2000.
17. Raugei, M., Bargigli, S., Ulgiati, S. Life cycle assessment and energy pay- back time of advanced photovoltaic modules: CdTe and CIS compared to poly-Si. Energy, 32, 1310–1318, 2007.
18. Serrano, L. Computing tools applied to the analysis of performance and sustainability of photovoltaic systems. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Cartagena, Departamento de Electrónica, Tecnología de Computadoras y Proyectos, Cartagena, España, 2013.
19. Santana, J., Llanes, J. Software para el diseño de opciones de mitigación de GEI, PRODOM 0.0. CUBAENERGIA y Facultad Economía, UH, 2002.
20. Zeleny, M. Compromise programming in multiple criteria decision making. University of South Carolina, Press, Columbia, US, 1973.

---

**Recibido el 21 de septiembre de 2015 y aceptado el 11 de marzo de 2016**