



TEORICO-EXPERIMENTAL

Planeamiento territorial con energía fotovoltaica en la provincia de Cienfuegos

Territorial planning with photovoltaic energy in the province of Cienfuegos

María Rodríguez Gámez¹, Antonio Vázquez Pérez¹, Mirelys Torres Pérez², Miriam Vilaragut Llanes^{3,*}, Miguel Castro Fernández³

¹Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo, Ecuador.

²Universidad de Las Tunas, Las Tunas, Cuba.

³Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, La Habana, Cuba.

*Autor de correspondencia: miriamv@electronica.cujae.edu.cu

Recibido: 2 de noviembre del 2021

Aprobado: 12 de enero del 2022

Licencia de uso y distribución Creative Commons Reconocimiento-No Comercial 4.0 Internacional



RESUMEN/ABSTRACT

Se valoran diferentes parámetros que inciden en el planeamiento territorial con sistemas fotovoltaicos, se incluye el comportamiento del potencial solar de cada municipio, destacando los que reúnen las mejores condiciones para instalar una central fotovoltaica. Se evalúa el impacto económico y ambiental, se presenta información del potencial máximo y mínimo de cada territorio, además del comportamiento del ángulo de inclinación y el rendimiento técnico de la tecnología, se analiza la eficiencia energética, económica y ambiental en diferentes modos de conexión, se proponen los elementos técnicos que deben considerarse en el proyecto de montaje e instalación de la tecnología, además de los riesgos a que están sometidas estas instalaciones para asegurar una adecuada eficiencia de aprovechamiento del recurso solar, se valoran las pérdidas en los procesos de distribución y transportación de la electricidad, expresando los elementos que influyen y determinan los niveles de eficiencia en el aprovechamiento de la energía generada.

Palabras clave: Planeamiento territorial, sistemas fotovoltaicos, riesgos, factibilidad económica.

Different parameters that affect the territorial planning with photovoltaic systems are valued, the behavior of the solar potential of each municipality is included, highlighting those that meet the best conditions to install a photovoltaic power plant. The economic and environmental impact is evaluated, information on the maximum and minimum potential of each territory is presented, in addition to the behavior of the angle of inclination and the technical performance of the technology, the energy, economic and environmental efficiency in different connection modes is analyzed, the technical elements that must be considered in the project of assembly and installation of the technology are proposed. In addition to the risks to which these facilities are subjected to ensure an adequate efficiency of use of the solar resource, the losses in the processes of distribution and transportation of electricity are assessed, expressing the elements that influence and determine the levels of efficiency in the use of the energy generated.

Keywords: Territorial planning, photovoltaic systems, risks, economic feasibility.

INTRODUCCIÓN

La necesidad de lograr territorios y localidades energéticamente sostenibles implica la solución de complejos problemas en el esquema energético, que al propio tiempo conducen a la búsqueda de alternativas para el uso de fuentes energéticas que reduzcan las incidencias ambientales y menos costosas. El aprovechamiento de las fuentes renovables de energía constituye una opción de deferencia, en la búsqueda de soluciones sostenibles al desarrollo energético de los territorios. La matriz energética cubana depende en más de un 95% del uso del petróleo, con un peso específico importante en los resultados de la gestión económica de la nación, que por otro lado no posee reservas considerables de este recurso.

Desde la década del '90, se propusieron diversas estrategias para desarrollar desde el nivel local el uso de las fuentes renovables de energía, existiendo una ficha metodológica que proporcionaba una lista de control para la realización de los proyectos energéticos [1], que venían a resolver problemas locales y de satisfacción de la demanda de casos puntuales o comunidades completas. El incremento en el aprovechamiento de las fuentes renovables y la necesidad del uso de grandes espacios del suelo, ha propiciado el desarrollo de metodologías para los estudios territoriales y tecnologías que pueden ser implementadas a partir del conocimiento del potencial renovable existente y de la demanda [2], otros trabajos relacionados con el tema y que ha permitido hacer análisis para la disminución de las emisiones de carbono y la penetración con fuentes renovables, combinado con los generadores convencionales es el de la metodología Monte Carlo, desarrollada para realizar la planificación de la penetración de las fuentes renovables y la disminución del carbono [3]. Se han realizado además diferentes estrategias en América Central, para elaborar el diagnóstico de las fuentes renovables e identificar el potencial que aún no aprovecha, así como las principales barreras que impiden un mayor desarrollo, haciendo énfasis en la proyección de la demanda de combustibles, sus emisiones asociadas y las ventajas que se derivan de utilizar los recursos en interés de mejorar la calidad de vida de la región [4]. Otras de las investigaciones que propician la penetración de las Fuentes renovables es: el Modelo Integral de planeamiento energético sostenible y promotor de energías renovables, basado en Long-Range Energy Alternatives Planning System (L.E.A.P); Sistemas de Información Geográfica (SIG); Análisis Multicriterio de Decisión; el MODERGIS que resulta una plataforma integrada de modelación para la planificación energética sostenible [5]; la metodología para la evaluación de criterios y alternativas, jerarquizando la combinación de tecnologías energéticas renovables que puedan ser incorporadas a la matriz energética.

En Cuba se ha trazado una política de desarrollo de las fuentes renovables de energía, que comenzó en la década de los años 80 y donde a pesar de los esfuerzos realizados, no fue hasta el 2006 cuando realmente se comenzara un programa a nivel de todo el país y se comienza a introducir la tecnología fotovoltaica para la electrificación rural de diferentes objetivos sociales en zonas aisladas y de difícil acceso [6]. Para el año 2010 existían tres parques eólicos en funcionamiento, que totalizan una potencia instalada de 7,2 MW (Turiguanó en Ciego de Ávila con 0,45 MW; Los Canarreos en Isla de la Juventud con 1,65 MW y; Gibara-1 en Holguín con 5,1 MW), estos parques eólicos operaron con una disponibilidad promedio de 90%, generando hasta fines de julio unos 7.507 MWh, y han desplazado consumos de 1.668,9 toneladas de combustible, evitando la emisión de 6.091,6 toneladas de gases de efecto invernadero. Se destaca Gibara-1 que acumula 6.446,9 MWh y promedia un factor de capacidad de 24,3% [7].

Cuba se encuentra ubicada en la región tropical del planeta, con una amplia disponibilidad de la radiación solar, de forma tal que las posibilidades reales de esta fuente energética, ofrece perspectivas de desarrollo en el propósito de lograr una base energética nacional diversa y sostenible. La energía solar resulta la más abundante y distribuida en el planeta. En el caso particular de Cuba, el Sol aporta diariamente el equivalente energético de medio litro de petróleo por metro cuadrado; pero al propio tiempo las condiciones climáticas y ambientales del territorio implican, que la radiación que llega al plano horizontal del suelo se vea afectada y regida por las condiciones intermitentes de los elementos climáticos y ambientales. El funcionamiento óptimo de un sistema fotovoltaico depende del aprovechamiento eficiente de la radiación solar incidente, resultando necesario para ello el conocimiento y evaluación de la radiación diaria, de forma tal que se puedan establecer pronósticos acertados sobre el estimado de la generación de energía [8]. Actualmente se trabaja en una proyección direccionada a los sistemas fotovoltaicos conectados a red, con el objetivo de iniciar el cambio de matriz energética e ir incorporando tecnologías menos invasoras a las condiciones ambientales. El objetivo central del trabajo está centrado en ofrecer un grupo argumentos válidos, para ser abordados durante la solicitud de la micro localización y el resto de las licencias que son necesarias obtener, durante el proceso de autorización y aprobación de las inversiones basadas en la penetración de la tecnología fotovoltaica conectada a la red en una provincia de Cuba.

DESARROLLO

Evaluación del comportamiento del potencial solar en la zona seleccionada, su impacto en la eficiencia económica y medioambiental

Se puede afirmar en teoría, que de poder aprovechar el total de la radiación solar incidente en la zona seleccionada en un día, se puede generar la energía eléctrica que a los ritmos actuales del consumo pudiera demandar el territorio durante unos 39 años; pero no es posible, ni se justifica desde el punto de vista económico, cubrir la totalidad del espacio de la provincia con paneles fotovoltaicos, es por lo que resulta de utilidad determinar las posibilidades y los límites actuales y perspectivas en esa dirección. Los valores de la radiación solar incidente en la provincia de Cienfuegos califican entre los más elevados del país, con un promedio diario anual de 6,004 kWh/m²d, un valor de la radiación máxima absoluta de 6,829 kWh/m²d, que suele producirse en el mes de abril y una mínima absoluta de tiene lugar generalmente en el mes de diciembre con valores de 5,150 kWh/m²d. Los meses del año donde la radiación solar se comporta por encima del promedio diario anual, corresponde de febrero a septiembre por debajo de este desde octubre a enero. En la figura 1, se puede apreciar el mapa del potencial solar promedio anual de la provincia de Cienfuegos.

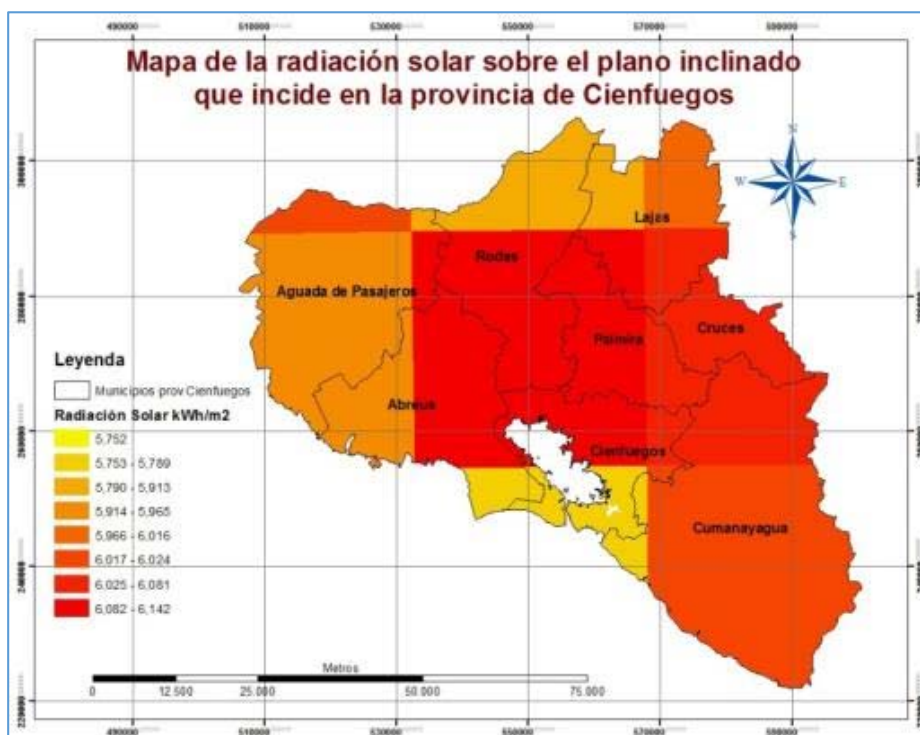


Fig. 1. Radiación solar promedio anual de la provincia de Cienfuegos.

Fuente: Elaborado con información del (SWERA).

Como se puede apreciar en todos los municipios de la provincia no incide los mismos valores de radiación solar, pudiendo estimarse que el rendimiento energético de la tecnología no será la misma en todo el territorio. En la tabla 1 se ofrecen los datos estadísticos del potencial solar incidente, los cálculos del rendimiento energético y su impacto económico y medioambiental.

Los valores mostrados en la tabla 1, se calculan teniendo en cuenta los siguientes parámetros:

Hpa→ Radiación solar diaria promedio anual (kWh/m² día).

Hmax→ Radiación mínima Absoluta (kWh/m² día).

Hmin→ Radiación máxima absoluta (kWh/m² día).

Pe→Productividad específica promedio anual (kWh/kWp)

Es→ Aporte de energía estimado para en un año (MWh/MWp)

E→ CO₂que dejan de emitirse (ton de CO₂).

La Productividad específica promedio anual (Pe) se calcula mediante la ecuación (1).

$$Pe = (Hpa \cdot Ppi \cdot Ac \cdot t) \cdot \eta_c \cdot \eta_t \quad (1)$$

Donde:

Hpa→ Radiación solar diaria promedio anual (kWh/m² día).

Ppi→ Potencia pico instalada (kWp)

Ac → Área de captación de celda (6,4 m²/kWp)

η_t → Eficiencia técnica de los módulos (14/100 para el silicio cristalino que se comercializa en Cuba)

η_c → Eficiencia de captación de la Radiación solar (85/100 en las condiciones ambientales de Cuba).

t→ tiempo de generación de la instalación (día, mes o año)

Ic→ Índice de consumo

El aporte de energía estimado para en un año (Es), se calcula con la ecuación (2).

$$Es = Pe \cdot t \quad (2)$$

El CO₂ que deja de emitirse se calcula por la ecuación (3), el análisis se realiza a partir de que para generar 1 kWh de energía con combustibles fósiles con la tecnología instalada se emiten 0,867 ton. de CO₂, entonces:

$$E = E_s \cdot I_c \quad (3)$$

Estos análisis permiten conocer el comportamiento de la generación en cualquiera de los municipios de la provincia a partir de la radiación solar incidente, entre más precisa sea la medición de la Radiación mejores serán los resultados obtenidos y si la base de datos de radiación tiene un periodo mayor de evaluación con respecto al ciclo solar se podrán hacer los análisis de predicción de la posible energía a generar con mejor calidad en el tiempo, hay que tener claro que el combustible que se utiliza es la radiación solar y que estos valores son los que influyen en los resultados como se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Radiación solar diaria promedio anual incidente por municipios y sus impactos

	Hpa	Hma	Hmin	Pe	Es	Ee
	(kWh/m ² día)	(kWh/m ² día)	(kWh/m ² día)	(kWh/kWp)	(MWh/MWp)	(Ton CO ₂)
Municipios						
Abreus	5,962	5,150	6,822	1650,71	1650,71	1431,83
Aguada	5,989	5,018	6,829	1658,19	1658,19	1438,31
Cienfuegos	6,007	5,150	6,822	1663,17	1663,17	1442,63
Cruces	6,096	5,389	6,822	1687,81	1687,81	1464,01
Cumanayagua	6,000	5,150	6,775	1661,23	1661,23	1440,95
Lajas	6,030	5,018	6,822	1669,54	1669,54	1448,16
Palmira	6,116	5,389	6,822	1693,35	1693,35	1468,81
Rodas	6,005	5,018	6,822	1662,62	1662,62	1442,15
Total Provincia	6,004	5,150	6,829	1662,34	1662,34	1441,91

Fuente: Grupo de proyecto del CIPEL.

En la figura 2, se observa la valoración del comportamiento en el impacto energético teniendo en cuenta la radiación solar diaria promedio anual por municipios.

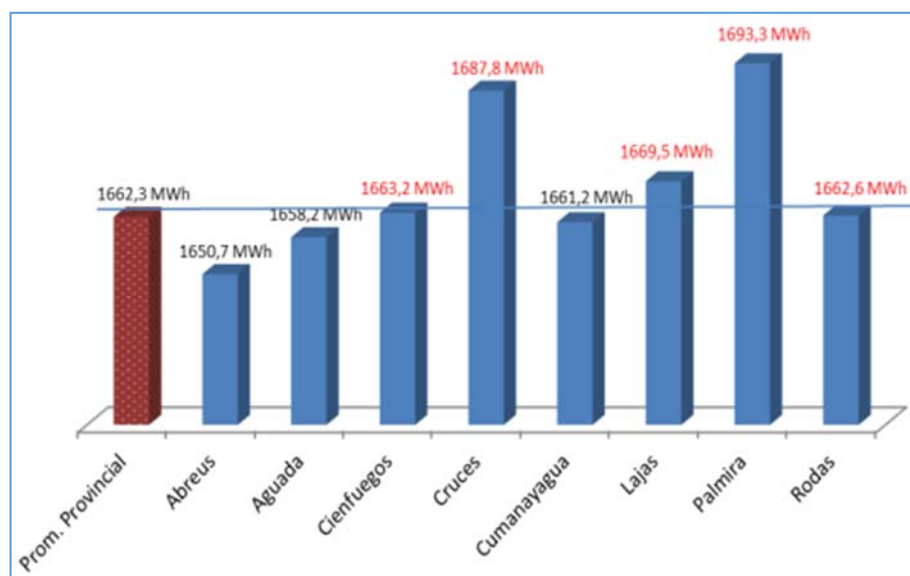


Fig. 2. Comportamiento de la radiación solar diaria promedio anual por municipios y su influencia en el impacto energético.

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados mostrados en la figura 3, demuestran la proporcionalidad que existe entre la calidad de la radiación solar y el rendimiento energético de un sistema, suponiendo que en los sitios donde la radiación es más elevada, será mayor la rentabilidad económica y de reducción de impactos medioambientales.



Fig. 3. Potencial solar diario promedio anual incidente en los municipios de la provincia de Cienfuegos.
 Fuente: Elaboración propia.

De esta manera las inversiones realizadas en los municipios de Palmira, Cruces, Lajas, Cienfuegos y Rodas por su orden deben asegurar niveles de rendimiento superiores al del resto de los municipios, con periodos de recuperación económica más breves. En la figura 4, se pueden apreciar los mapas de la radiación mínima y máxima absoluta por municipios, las CFV deben diseñarse para los meses de menor radiación para que no exista déficit de energía.

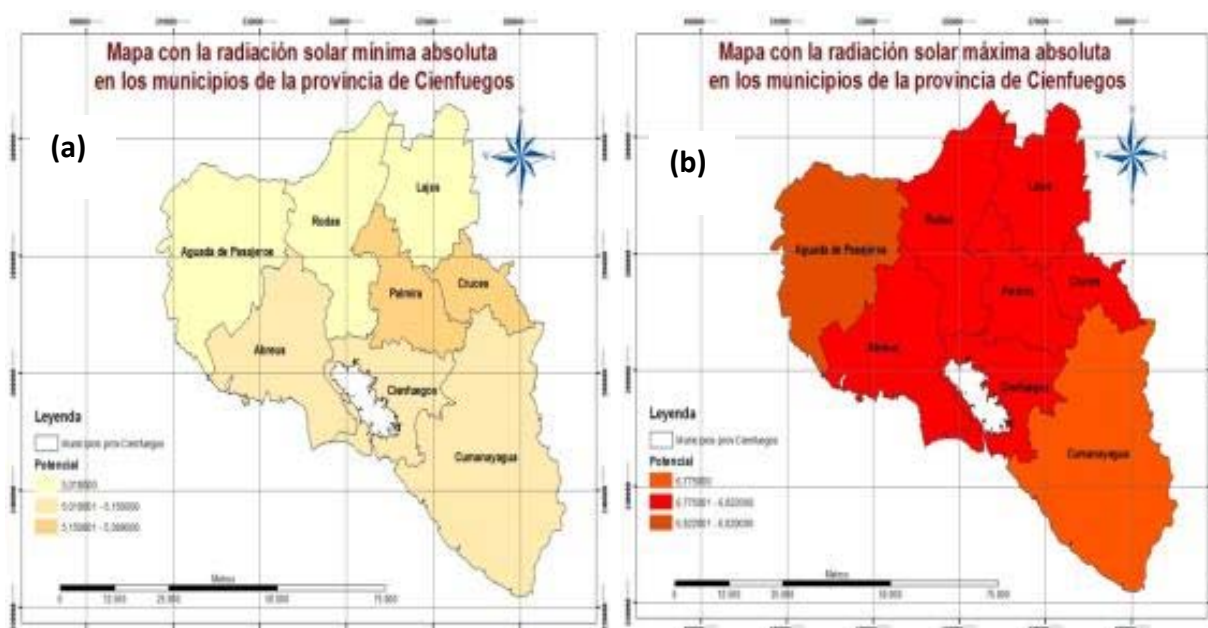


Fig. 4. Mapas de la radiación mínima y máxima absoluta por municipios.
 Fuente: Grupo de proyecto del CIPEL.

Influencia del ángulo de inclinación de los paneles y su impacto en la eficiencia del rendimiento técnico de la tecnología

Los resultados de investigaciones experimentales desarrolladas [9], corroboran que la no observancia de la adecuada orientación e inclinación de los paneles fotovoltaicos, procurando la mayor perpendicularidad posible a los rayos solares, pueden afectar entre un 5 % y un 10 % la eficiencia en la captación de la radiación y la conversión eléctrica. La energía captada por el receptor está en dependencia entre otros factores, de la inclinación del mismo respecto a los rayos solares; se recomienda que la mayor captación de la radiación durante el año para sistemas fijos se obtenga con una orientación de la superficie captadora de los módulos hacia el sur, con una inclinación acimutal 0 y un ángulo de inclinación igual a la latitud del sitio de instalación, ello favorece la máxima captación promedio en el año. Las simulaciones realizadas han permitido calcular la eficiencia de captación de las celdas fotovoltaicas, en diferentes ángulos de inclinación de los paneles, según se muestra en la tabla 2.

Tabla 2. Conversión energética de las celdas fotovoltaicas a diferentes ángulos de inclinación

Grados de inclinación de los paneles.							
5°	10°	15°	22°	25°	30°	35°	40°
Perdidas en la captación de energía Wh/m²			Inclinación adecuada para la provincia de Cienfuegos.	Perdidas en la captación de energía Wh/m²			
-176	-59	-18		-23	-63	-103	-143
Perdidas de conversión energética Kwh/kWp				Perdidas de conversión energética Kwh/kWp			
-32,4	-11,4	-5,0		-6,4	-17,4	-28,5	-39,6

Fuente: Elaboración propia

Los resultados demuestran que la inclinación idónea de los paneles fotovoltaicos para la provincia corresponde con los 22° y aunque las cifras por sí solas pueden parecer insignificantes, cuando se tiene en cuenta la potencia instalada y se calculan al tiempo de vida útil a la que están diseñados estos sistemas, pueden traducirse en pérdida económicas de consideración.

Por ejemplo: Una central fotovoltaica de 2 MWp instalada en este territorio con 15° de inclinación de los paneles, puede reportar pérdidas durante el ciclo de vida útil estimadas en uno 250 MWh, con un impacto económico y ecológico, calculado sólo por conceptos del combustible en 15.587,5 USD y 216,85 ton de CO₂.

Otras de las funciones que puede cumplir la inclinación de los paneles, está relacionada con contribuir a evitar que en la superficie de estos se depositen basuras, hojas de árboles y otros obstáculos que pueden crear sombreado parcial de los módulos. Este elemento resulta de importancia si se tiene en cuenta, que este fallo técnico puede provocar el surgimiento de puntos calientes, que constituyen una causa directa en la reducción de eficiencia energética del sistema, requiriéndose el mantenimiento de la observación constante de este parámetro y su solución rápida. En la figura 5, se puede apreciar el comportamiento de las pérdidas energéticas a diferentes grados de inclinación de los paneles fotovoltaicos. También ocurre que se pueden depositar partículas o basuras en la superficie de los módulos, esto si no se limpian en un tiempo dado pueden provocar los puntos calientes, constituyen uno de los fallos típicos de la tecnología, que dada la forma de instalación de las celdas, módulos y paneles (serie-paralelo) la obstrucción de una de ellas puede provocar un fallo en cadena con la caída de la tensión del sistema.

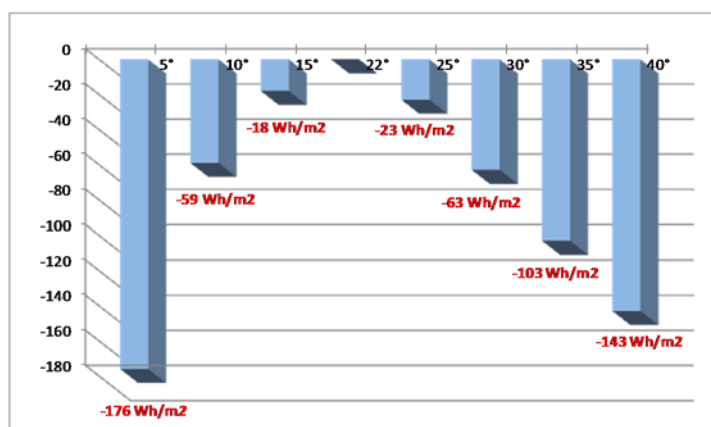


Fig. 5. Pérdidas energéticas a diferentes grados de inclinación de los paneles fotovoltaicos.

Fuente: Elaboración propia

La eficiencia en el aprovechamiento de la energía generada por la Central EFV, a partir de los modos de conexión a la red

En la actualidad el sistema eléctrico basa su capacidad de producción eléctrica en más de un 95 %, en grandes y medianos centros de generación y que a pesar de las mejoras introducidas en los últimos años con la aplicación del modo de la generación distribuida, prevalecen los complejos procesos de distribución y transportación de la electricidad, asociados a ciclos técnicos de elevación del voltaje, transportación mediante redes a diversas distancias, reducción del voltaje para poder suministrarla y que finalmente pueda ser consumida por los centros de demanda. Este proceso supone un esquema típico de pérdidas, que incluso se planifican y que van a estar en dependencia de la magnitud de los procesos de distribución, las distancias de transportación de la electricidad, así como el estado de las redes y el resto de los elementos técnicos del sistema [10]. En algunas publicaciones reconocidas internacionalmente como la Scheneider Eléctric, en su publicación “Guía de Soluciones de Eficiencia Energética” plantea: que las acciones locales de Eficiencia Energética tienen un importante efecto productivo, debido a las pérdidas en la red eléctrica de distribución y transmisión [11]. Es por ello por lo que plantean que por cada unidad energética que se ahorra, se ahorran tres de producción.

Debido en parte a las razones analizadas anteriormente, en el año 2009 se consumieron a nivel del país 14.918.655 MWh, para lo que el sistema eléctrico se vio obligado a generar unos 17.305.982,9 MWh¹, es decir, por cada kWh consumido fue necesario generar 1,16 kWh. La provincia Cienfuegos puede haber presentado un esquema de pérdidas similar al nacional. En países como Alemania y España que son líderes europeos en el desarrollo de CFV conectados a la red, prevalece el concepto de concentrar la energía solar en grandes instalaciones, para luego distribuir y transportar la electricidad bajo los mismos criterios aplicados al esquema energético tradicional; pero es perfectamente verificable que en las condiciones del sistema eléctrico cubano, dicho modo de aprovechamiento de la energía fotoeléctrica del recurso solar, no en todos los casos resulta eficientemente rentable, pudiendo aplicarse modalidades de conexión que garantizan reducir unas pérdidas que le son típicas a esos sistemas.

La energía solar es la más distribuida, predecible y estable de las fuentes renovables, no siendo necesaria su distribución ni trasportación para ser suministrada y consumida. El suministro directo a los centros de demanda de la energía eléctrica generada con CFV, puede representar en unos casos una relación de ahorro de 1,5 kWh generado con petróleo, por cada kWh consumido de fotovoltaica y en otros casos la relación del ahorro de energía generada con petróleo puede llegar a 1,16 kWh, por cada kWh de fotovoltaica consumido. En la tabla 3, se muestran los resultados de la simulación de dos centrales FV conectadas a la red, en un sitio donde incide una radiación solar similar al de Cantarrana. La primera conectada a la red, estimándose las pérdidas promedias del 5 % asociada a los procesos de distribución y transportación, así como un 5 % vinculada a energía generada y no entregada por fallos de la red; la segunda conectada directamente a la carga del centro de demanda y partiendo de que en ningún sistema eléctrico las pérdidas llegan a ser iguales a 0, se prevén mermas energéticas del 2 %. Haciendo un análisis mediante las ecuaciones (1), (2) y (3), se obtuvo los resultados mostrados en la tabla 3, donde pueden apreciar los impactos económicos y medioambientales y donde se tiene que:

Esc→ Estimado de energía que puede ser suministrada al consumo.

Egp→ Cálculo del ahorro de energía generada con petróleo

Ie→ Estimado del Impacto Económico

Tabla 3. Eficiencia energética, económica y medioambiental de dos CFV en diferentes modos de conexión a la red

Variante	Pe (kWh/kWp)	Pe al año (kWh/kWp)	Es (MWh)	Esc (MWh/año)	Egp (MWh/año)	Ie (USD)	E (CO ₂)
Conectado a la red de distribución	1700,55	1700,55	1615,52	1615,52	1688,22	105260,47	1464,36
Conectado directamente a la red del centro de demanda	1700,555	1700,52	-	1666,65	1833,19	1114299,46	1590,11

*Pérdidas evitadas

**Pérdidas reducidas

Fuente: Elaboración propia

Se puede apreciar en las variantes analizadas, que la diferencia de los impactos energéticos, económicos y medioambientales, van a estar dados esencialmente por las pérdidas asociadas a los procesos de distribución y transportación de la energía y las pérdidas estimadas por los fallos de la red, que en sólo un año llegan a ser de 144,9 MWh en energía generada con el petróleo dejada de ahorrar, 9.039,00 USD por conceptos de combustible y 125,7 ton de CO₂ dejados de emitir a la atmósfera. En la figura 6, se puede apreciar el gráfico de comportamiento de la diferencia en el ahorro de energía generada con petróleo entre una central FV conectada a la red de distribución y otra conectada directamente al centro de carga.

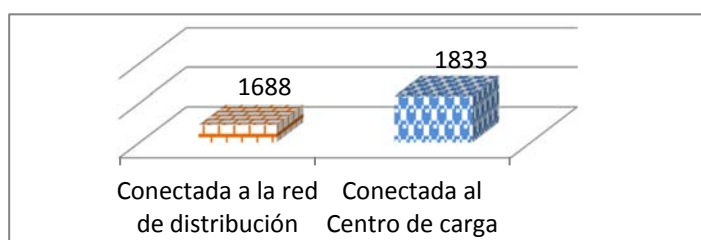


Fig. 6. Comportamiento de la diferencia en el ahorro de energía generada con petróleo.

Fuente: Elaboración propia

¹Datos de informe del Despacho Central de Cargas. 2010.

Las ciudades de Cienfuegos y Cruces son las que presentan la mayor prioridad desde el punto de vista energético, pues en ellas se concentra la demanda eléctrica más elevada del territorio y en la primera se ubican un conjunto de industrias y objetivos económicos vitales, no sólo para la provincia, sino para la nación. En la tabla 4, se ofrecen los datos de estas dos ciudades, relacionados con el cálculo de las áreas que ofrecen viabilidad y las que pueden resultar disponibles para la instalación de sistemas fotovoltaicos, esencialmente aprovechando las áreas techadas, áreas perimetrales y otras superficies del ámbito urbano donde actualmente no es óptimo el aprovechamiento del espacio. Se determinó que la ciudad de Cienfuegos y Cruces existen áreas viables que permiten instalar una potencia de 20 MWp, esto permite cumplir con la propuesta planteada anteriormente posibilitando alcanzar una mayor proximidad de la generación a la carga, reduciendo las pérdidas y garantizando una mayor eficiencia y la recuperación económica del sistema en más breves plazos.

Impactos de la aplicación de la tecnología en los centros de demanda que se encuentran alejados de los centros de generación

Determinar los cálculos y estimación de las pérdidas energéticas provocadas durante el proceso de transportación de la electricidad por las redes, es tarea verdaderamente difícil dada la diversidad de factores técnicos que en ello intervienen; pero lo que sí es generalmente aceptado, es que las mermas se manifiestan en aumento, en la medida que es mayor la distancia entre el centro de generación y el de consumo de la energía. No en todas las partes del sistema eléctrico las pérdidas suelen ser homogéneas; de esta manera es posible que los números asignados para indicarlas, sea excesiva para algunos sitios y condiciones específicas, de la misma forma que para otros sea simbólica, dada su irrelevancia en relación con el comportamiento real de las mismas. De forma general se trata de fijar determinados indicadores, que permitan realizar las simulaciones y cálculos del impacto sobre la introducción de CFV y poder definir su eficiencia en cada una de las variantes que son posibles adoptar.

Los indicadores estimados de las posibles pérdidas energéticas, motivadas por la distancia de los centros de consumo hasta las centrales eléctricas del territorio se pudieron estimar por distribución hasta un 5 %, llegando a hacer en un radio de 30 km hasta el 15 % demostrándose que a medida que aumentan la distancia las pérdidas aumentan considerablemente. En la provincia existen 203 núcleos poblacionales entre los que se distinguen: uno con la categoría de ciudad que es la capital provincial Cienfuegos, 57 pueblos y 145 caseríos. Se realizó un análisis estadístico y territorial de la cantidad de núcleos poblacionales ubicados a diferentes distancias de los centros de generación y las pérdidas energéticas estimadas por conceptos de distribución y transportación de la electricidad en porcentajes. Se pudo determinar que la mayor cantidad de comunidades se encuentran entre 5 y 15 km, a partir de esa distancia las comunidades comienzan a disminuir hasta llegar a los 30 km con una sola comunidad en este sentido a mayor distancia de distribución mayores pérdidas que pueden llegar a hacer hasta un 20 %.

El análisis mostrado anteriormente demuestra, que cuanto más alejado se encuentre la generación el centro de demanda, la relación entre energía generada y el consumo real será mayor, pues las pérdidas asociadas a los procesos de distribución y transportación de la electricidad implican que, para consumir una unidad específica de electricidad, se tenga que generar el equivalente de esa propia unidad más las pérdidas. Si se considera importante que los primeros impactos de la introducción de los CFV conectados a la red, van a estar relacionados con la reducción del consumo de electricidad generada con petróleo, entonces resulta necesario modelar estos impactos para diferentes escenarios, vinculados al suministro de energía eléctrica a diferentes distancias de los centros de generación en la provincia y lo que puede representar en ello la introducción de las tecnologías fotovoltaicas. En la figura 7, se puede apreciar el mapa de la provincia, con la ubicación de los núcleos poblacionales a diferentes distancias de los centros de generación.

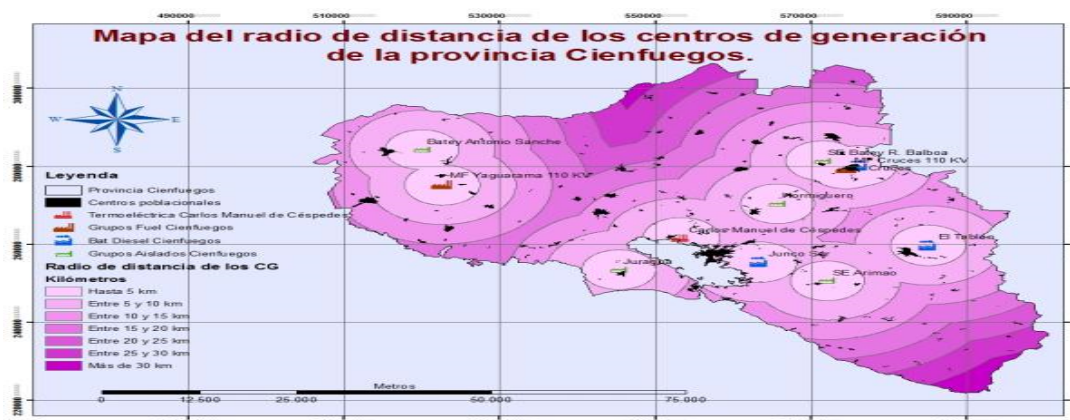


Fig. 7. Mapa del radio de distancia de los centros de generación y la ubicación de los núcleos poblacionales.

Fuente: Elaboración propia.

Los impactos energéticos, económicos y medioambientales estimados para un año, que puede representar la introducción de 1 MWp, en relación con los centros de demanda ubicados a una distancia entre 5 a 30 km distancias de los centros de generación del territorio conectado a la línea de distribución en el caso energético pueden estar en el orden 1765,4 MWh, en lo económico 111939 dólares y en lo ambiental se dejan de emitir 1557 ton CO₂. En el caso de los conectados directamente a la carga se encuentran en el orden de 1954,9 MWh, en lo económico hay un ahorro de 121889 dólares y en lo ambiental se dejan de emitir 1696 ton CO₂, notándose que los sistemas conectados directamente a la carga son las mejores opciones en los tres impactos analizados. Para la simulación se ha considerado el potencial solar promedio anual de la provincia de Cienfuegos, así como los porcentajes de pérdidas propuestos en el presente trabajo. En la figura 8, se puede apreciar el comportamiento gráfico del impacto energético que representa, la introducción de las CFV conectados a la red, en cuanto al ahorro estimado de electricidad generada con petróleo.

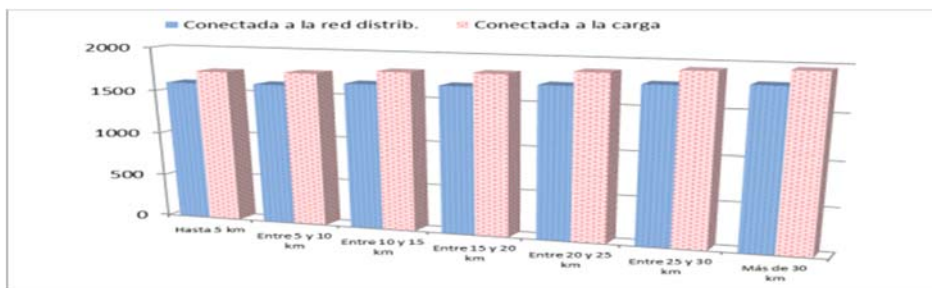


Fig. 8. Impacto energético de la introducción de los CFV conectados a la red, en cuanto al ahorro estimado de electricidad generada con petróleo
Fuente: Elaboración propia

Otras consideraciones técnicas de importancia que deben tomarse en consideración a la hora de concebir un proyecto de instalación de una CFV de 1 MWp

La idea de la sencillez y poco complicada desde el punto de vista tecnológico de las CFV conectadas a la red y la viabilidad demostrada sobre el empleo de estos sistemas en sitios remotos, puede inducir la idea que las CFV conectadas a la red no exigen una atención sistemática y que pueden operar en un régimen de trabajo desatendidas; pero existen dos factores esenciales que, en el caso, pueden indicar lo contrario requiriendo medidas especiales de atención y vigilancia técnica. Los costos de inversión de una instalación de 1 MWp, se encuentran en el orden de más de tres millones quinientos mil pesos, lo que incluye un fuerte componente en moneda libremente convertible, a lo que hay que agregar que la reposición de componentes dañados para restablecer la capacidad técnica de la instalación en casos de accidentes o motivados por una inadecuada operación del sistema, representa igualmente un elevado monto en recursos económicos, sólo baste señalar que el costo KWp de las tecnologías (módulos FV) representa unos 1700,00 pesos y el precio de cada inversor se cotiza aproximadamente en 4117,00 USD. Se debe considerar que esta es una instalación, que durante las horas del día genera riesgos asociados a la electricidad, que pueden manifestarse en graves consecuencias para la salud y la vida de personas y animales, motivados por causas diversas vinculadas a accidentes tecnológicos, desastres naturales o negligencias de las personas. Estos razonamientos esenciales y otros que pueden estar vinculados con factores culturales propios del territorio, deben ser analizados cuidadosamente a la hora de valorar la manera de atención operacional de la CFV de 1 MWp.

Disponibilidad de personal y la calidad operacional

La introducción de las CFV conectadas a la red como parte del proceso de diversificación de la base energética, se justifica en la medida que se alcance una aproximación lo más cercana posible, a elevados niveles de eficiencia, calidad de la gestión y seguridad energética. Las implicaciones económicas y técnicas asociadas a estas inversiones y que anteriormente se razonan, prácticamente debe preverse un mínimo de personal responsabilizado con la operación, mantenimiento y seguridad de estas instalaciones. El personal destinado para instalar, mantener las operaciones ajustadas a la confiabilidad del servicio y la seguridad de la CFV, debe recibir la capacitación técnica y profesional según sea el caso, para el cumplimiento de su trabajo y disponer de los procedimientos de calidad a lo que está obligado, para garantizar el cumplimiento del objeto social al que está destinada la instalación, así como los requerimientos de protección que garantizan la seguridad tecnológica y física de los procesos y de la propia estructura de la central. Las tecnologías fotovoltaicas son diseñadas bajo conceptos de mantenimientos mínimos, no obstante deben editarse manuales para los usuarios donde se recojan los fundamentos técnicos mínimos necesarios, los requerimientos de calidad establecidos por la empresa y las normas técnicas de explotación y seguridad tecnológica y física, de manera que se asegure la preparación progresiva del personal encargado y la creación de hábitos tecnológicos para resolver problemas sencillos, enfrentar y restablecer fallas técnicas y las medidas de protección para evitar accidentes eléctricos y daños físicos a las instalaciones. Es conveniente entrenar y preparar una o varias personas para realizar el trabajo y que contribuyan a la creación de una cultura en la explotación y mantenimiento de estos sistemas, lo que favorece a la reducción de los costos y el fomento de las actividades bajo presupuestos funcionales económicamente rentables.

La limpieza del área de instalación y la superficie captadora de los módulos FV

La limpieza hay que analizarla en dos vertientes técnicas: en la limpieza de la superficie captadora de los módulos; y la limpieza del terreno donde se ubica la CFV. La suciedad (polvo y otras micropartículas) depositada en la superficie de las celdas, no se limita a tapar una cierta proporción de la superficie captadora, reduciendo la eficiencia de conversión fotoeléctrica del módulo, también acorta el ángulo límite de incidencia, por encima del cual la radiación solar no llega a las células, sino que se pierde por reflexión en la cara externa del vidrio que las protege. Algunos estudios y evaluaciones teóricas realizadas en España, sobre las consecuencias de la suciedad de los módulos, han logrado estimar el impacto energético en tres grados distintos de suciedad: baja el 2%; moderada el 3%; y alta el 7% referencia.

La suciedad del terreno donde se depositan las estructuras del sistema, puede provocar que la basura (hojas de papel o pedazos de estas, pedazos de nylon, hojas de los árboles, mazos de yerba o follaje seco de árboles u otros artefactos livianos) interactúen con el aire y la humedad depositándose en la superficie de las celdas, provocando sombreado parcial de los módulos y como consecuencia se produzcan los típicos fallos de puntos calientes, que pueden acarrear en algunos casos la caída de voltaje del sistema. El crecimiento de pasto en del terreno puede favorecer la aparición de microfaunas, roedores e insectos, con potencial de dañar el componente plástico de los cables y la electrónica de potencia, provocando daños progresivos que pueden dar al traste con la confiabilidad de la central y afectaciones económicas de consideración para lograr su reposición, además el pasto impide que el sol pueda secar con rapidez la humedad del terreno, provocando la aceleración de los procesos corrosivos de las estructuras metálicas, así como la elevación del riesgo vinculado a fugas eléctricas y cortocircuitos por exceso de humedad.

Estos aspectos vinculados con la limpieza deben ser asegurados de forma permanente en la CFV, previendo la adquisición y mantenimiento del equipamiento y los medios de limpieza necesarios que permitan controlar y erradicar la suciedad. En algunos casos se definen plazos para la realización de los mantenimientos vinculados con la limpieza, pero realmente van a depender de las características del lugar y su entorno, el grado de contaminación del aire, la época del año y el comportamiento de la actividad climática, por lo que debe quedar claro que el chequeo de la suciedad, principalmente la asociada a la superficie de las celdas, debe ser controlada diariamente, erradicando de inmediato la suciedad y los obstáculos que pudieran depositarse en la superficie de los módulos.

Identificación de los principales fallos técnicos

Los módulos solares fotovoltaicos son componentes de alta fiabilidad, calidad y durabilidad, siendo la probabilidad de falla muy baja. No obstante, cuando ocurren, constituyen una importante carga económica para el usuario y en muchos casos se deben a descuidos durante la operación del sistema. Otros de los elementos que deben ser vigilados y atendidos con periodicidad, es el relacionado con el estado técnico del cableado, ajuste de los empalmes, estado del sistema de aterramiento, chequeo al estado técnico estructural de los módulos FV y los inversores, estado técnico de los contadores de energía y el sistema de monitoreo, surgimiento de obstáculos que son capaces de crear áreas de sombreado parcial a la instalación, estado técnico de la cerca perimetral y el nivel de acceso a la instalación, así como otras cuestiones que van a depender de las características socioculturales propias del sitio de la instalación y que pueden ser incorporados al plan de mantenimientos y chequeos técnicos periódicos. El plan de mantenimientos y chequeos técnicos periódicos puede preverse en función del tamaño y envergadura del sistema y las características del sitio donde se encuentra instalada, de forma general los mantenimientos se pueden realizar trimestralmente, aunque el chequeo al estado físico de la instalación debe cumplirse diariamente.

Los aseguramientos esenciales de protección que deben considerarse durante la vida útil en la operación de la CFV

Las tecnologías en que se basan las CFV conectados a la red, se diseñan para una prolongada vida útil de operación, que en la mayoría de los casos alcanza los 25 años y más. En estas condiciones las medidas de protección de diferentes tipos deben estar dirigidas a garantizar la confiabilidad técnica del sistema durante todo el periodo del ciclo de vida, las que deben preverse desde la etapa de preinversión, mediante estudios puntuales de los riesgos y el despliegue de las medidas que garanticen su reducción o erradicación.

Protecciones contra accidentes en las CFV

Toda instalación fotovoltaica requiere de dispositivos de protección para la prevención de accidentes. Los fundamentales pueden ser los siguientes:

- Protección eléctrica del panel fotovoltaico.
- Protección contra riesgos ceráneos.
- Protección contra vientos.
- Protección física contra animales y personas.
- Protección contra lluvia, radiación solar y otros factores atmosféricos.
- Protección contra corto circuito.

En el caso de los riesgos ceráneos, es necesario conocer cómo se comparte estos fenómenos en el territorio seleccionado. El riesgo de impactos de tormentas eléctricas va a estar influenciado por las características típicas del clima tropical cubano, pudiendo ocurrir durante todo el año y en cualquier hora del día, no obstante, durante el periodo lluvioso (153 días, de junio a octubre) este riesgo es más elevado. En la figura 9, se pueden apreciar el mapa del riesgo ceráneo en el periodo lluvioso.



Fig. 9. Mapa del riesgo ceráneo durante el periodo lluvioso.

Fuente: Elaboración propia.

Para la protección frente a rayos y descargas eléctricas de alta tensión, se puede utilizar un pararrayos no radiactivo del tipo "Punta de Franklin" con radio de acción superior a la superficie ocupada por toda la instalación fotovoltaica, incluyendo el panel. La experiencia indica que esta es una protección que no puede obviarse, ya que algunas de las averías más importantes en las CFV conectadas a red, se han producido por descargas atmosféricas.

Protección contra desastres naturales

Resulta difícil la predicción de los desastres naturales, máxime cuando no se cuenta a nivel de proyectos, con las tecnologías y conocimientos especializados específicos para realizar pronósticos confiables sobre la ocurrencia de los mismos; pero en los territorios se ha acumulado durante años, un apreciable caudal de información y experiencias que pueden ser utilizadas con efectividad, en función de apreciar los peligros, prever las pérdidas y generar las medidas encaminadas a su reducción. De los riesgos de desastres naturales, el que con más frecuencia e intensidad de sus consecuencias amenaza la infraestructura eléctrica del territorio estudiado, son los de origen hidrometeorológicos, es decir los ciclones tropicales y las tormentas locales severas, que suelen estar acompañadas de fuertes vientos, tormentas eléctricas y lluvias de granizos, todos estos efectos con un potencial de afectaciones importantes para las CFV conectadas a la red, incluso pueden llegar a causar su colapso técnico y destrucción parcial o total de las mismas.

En esta región del país el periodo lluvioso suele comenzar en el mes de mayo y prolongarse hasta octubre, coincidiendo casi totalmente con la temporada ciclónica, que resulta el periodo caracterizado por la aparición de fenómenos hidrometeorológicos extremos, siendo los meses de septiembre y octubre los de mayor potencial de riesgos. Desde el año 1800 hasta la fecha, el territorio ha sido impactado por la ocurrencia de 30 ciclones tropicales, con una recurrencia estimada del azote de un huracán cada 7 años aproximadamente, por lo que el riesgo de impactos de estos fenómenos durante la vida útil de la central (25 años), puede estimarse de 3 a 4 ocasiones como mínimo [12]. El 50 % aproximadamente de los huracanes que han impactado el territorio, han presentado vientos sostenidos superiores a los 150 km/h, que lo convierten en factores muy destructivos y peligrosos para las estructuras similares a la de una CFV.

El potencial de este riesgo puede justificar un monto de recursos adicionales durante la etapa de inversión, dirigidos a garantizar la seguridad y protección de la tecnología ante la ocurrencia de estos fenómenos, no obstante deberán aplicarse sistemáticamente las medidas de reducción de desastres encaminadas a reducir los riesgos, enfrentar el fenómeno natural y acometer los trabajos de restablecimiento del servicio y la recuperación en los más breves plazos y con el menor gasto de recursos posibles. Las actividades de reducción de desastres deben coordinarse desde el inicio de la inversión y mantenerse durante todo el ciclo de vida útil del sistema, de manera sistemática en conjunto con las autoridades del territorio, pudiéndolas identificar en tres periodos o momentos fundamentales: Antes del impacto; durante la ocurrencia del fenómeno; y posterior al impacto.

Se definieron los elementos técnicos esenciales que deben ser considerados, para asegurar una adecuada eficiencia en el aprovechamiento fotoeléctrico del recurso solar en el territorio de la provincia de Cienfuegos, además de la evaluación teórica del impacto de las pérdidas asociadas a los procesos de distribución y transportación de la electricidad, expresando los elementos que influyen y determinan los niveles de eficiencia en el aprovechamiento de la energía generada, en relación con el modo que se adopte para la conexión a la red, comprobando teóricamente la repercusión de los impactos energéticos, económicos y medioambientales, asociados a las pérdidas energéticas vinculadas con el consumo de energía en los centros de demanda que se encuentran ubicados a diferentes distancias de los polos de generación, información de especial importancia en el planeamiento eléctrico del territorio.

CONCLUSIONES

1. Se realizó un estudio territorial para la instalación de CFV, ofreciéndose los datos y elementos técnicos básicos que deben considerarse en el proyecto de montaje e instalación de la tecnología, realizándose un análisis general de prefactibilidad económica y la estimación del período de recuperación de la inversión, al propio tiempo que se realizó la evaluación de un grupo de riesgos básicos más comunes a que están sometidas a estas instalaciones.
2. Se realizó el ordenamiento energético territorial, determinando que utilizando solamente el 2% del espacio disponible de las superficies techadas, solares yermos, así como áreas perimetrales ubicadas dentro de los límites del espacio urbano de las ciudades de Cienfuegos y Cruces, se puede llegar a instalar una capacidad fotovoltaica equivalente a 20 MWp, traducándose en un importante ahorro económico por concepto de sustitución del consumo de energía generada con el petróleo, con un positivo saldo en el impacto medioambiental.

REFERENCIAS

- [1]. PARODI, Violeta. "Propuesta metodológica para la evaluación integral de proyectos en el sector energético". Tesis doctoral. Valencia, marzo 2013. Disponible en: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/30063/TESISDOCTORAL.VPARODI.VERSION3.pdf>
- [2]. JACOBSON, M.Z. and a.M.A. Delucchi. "Wind, water and solar technologies can provide 100 percent of the world's energy, eliminating all fossil fuels". sustainable-energy, 2009. [Consultado febrero de 2013]. Disponible en: <https://www.scientificamerican.com/article/a-path-to-sustainable-energy-by-2030/>
- [3]. ELAINE K. Hart*, M.Z.J. "A Monte Carlo approach to generator portfolio planning and carbon emissions assessments of systems with large penetrations of variable renewables". Elsevier, Renewable Energy, 2011. vol. 36, p. 2278-2286. Disponible en: <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKewjVzavXgMv2AhUtQzABHdZEDGkQFnoECAUQAQ&url=https%3A%2F%2Fweb.stanford.edu%2Fgroup%2Fefmh%2Fjacobson%2Farticles%2FI%2FCombiningRenew%2FHartJacRenEnMar11.pdf&usq=AOvVaw27WVqZhae7sV-6AwVHqtsM>
- [4]. UNIDAS, N. "Estrategia para el fomento de las fuentes renovables de energía en América Central". Distribución limitada, Consulta en internet 20 enero 2013, 2004. LC/MEX/L.620. Disponible en: <https://www.cepal.org/es/publicaciones/25671-estrategia-fomento-fuentes-renovables-energia-america-central>
- [5]. QUIJANO, R., S. Botero, and J.Dominguez. "MODERGIS application: Integrated simulation platform to promote and develop renewable sustainable energy plans, Colombian case study". Elsevier, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012. vol. 16, n. 7, p. 5176-5187. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032112003346>
- [6]. STONE, L. "Paneles fotovoltaicos y televisión comunitaria". Revista Energía y Tú. Revista científico-popular trimestral de Cubasolar. ISSN 1028-9925. RNPS-0597, art. 3. Disponible en: <http://www.cubasolar.cu/25-32/>
- [7]. L. Jorge Isaac and G.L. Viamonte. "Parques eólicos cubanos: resultados operacionales durante 2010". Boletín informativo. Disponible en: <https://www.evwind.com/2012/04/30/eolica-en-cuba-ocho-parques-eolicos-en-proyecto-con-280-mw/>
- [8]. RODRÍGUEZ, M., Vázquez, A., Castro, M., Vilaragut, M. "Sistemas fotovoltaicos y la ordenación territorial". Ingeniería Energética, vol. 34, n. 3, septiembre-diciembre, 2013, p. 247-259. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/3291/329128758008.pdf>
- [9]. SANTOS, R., Castro, M., Santos, A., Vilaragut, M. "Análisis de la influencia del ángulo de inclinación en la generación de una central fotovoltaica". Ingeniería Energética. 2018, vol. 39, n. 3, p. 124-132. Disponible en: <https://www.redalyc.org/journal/3291/329158816002/html/>
- [10]. SARMIENTO, A., Castillo, O., Rodríguez, M., Vázquez, A. "Sistemas Integrados de energías con fuentes renovables, requisitos y opciones". Ingeniería Energética, 2014, vol. 35, n. 1, p. 70-78, enero/abril, ISSN 1815-5901. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4712559>
- [11]. SCHNEIDER Electric. "Guía de soluciones de Eficiencia Energética". 2009. Disponible en: https://download.schneider-electric.com/files?p_enDocType=Application+solutions&p_File_Name=Guia-soluciones-eficiencia-energetica-2a-edicion.pdf&p_Doc_Ref=600026H09

- [12]. PARDO, R., Rodríguez, Y. ``Clasificación de tormentas tropicales según lluvias asociadas: (1) estado del arte``. Ingeniería Hidráulica y Ambiental. vol. 35, n. 2. 2014.
http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1680-03382014000200002

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

María Rodríguez Gámez: <https://orcid.org/0000-0003-3178-0946>

Conformación de la idea de la Investigación. Recopilación de los datos necesarios, simulaciones, diseños y redacción del artículo. Participación de los análisis de los resultados, redacción del borrador del artículo, revisión crítica de su contenido y aprobación final.

Antonio Vázquez Pérez: <https://orcid.org/0000-0002-2994-8626>

Diseño de la investigación, recolección de datos y modelación matemática. Participó en el análisis de los resultados, redacción del borrador del artículo, la revisión crítica de su contenido y en la aprobación final.

Mirelys Torres Pérez: <https://orcid.org/0000-0001-7266-420X>

Conformación de la idea de la Investigación. Recopilación de los datos necesarios, simulaciones, diseños y redacción del artículo. Participación de los análisis de los resultados, redacción del borrador del artículo, revisión crítica de su contenido y aprobación final.

Miriam Vilaragut Llanes: <https://orcid.org/0000-0002-5453-1136>

Conformación de la idea de la Investigación. Recopilación de los datos necesarios, simulaciones, diseños y redacción del artículo. Participación de los análisis de los resultados, redacción del borrador del artículo, revisión crítica de su contenido y aprobación final.

Miguel Castro Fernández: <https://orcid.org/0000-0002-3983-469X>

Conformación de la idea de la Investigación. Recopilación de los datos necesarios, simulaciones, diseños y redacción del artículo. Participación de los análisis de los resultados, redacción del borrador del artículo, revisión crítica de su contenido y aprobación final.