

Riesgos ambientales en parques solares fotovoltaicos del occidente de Cuba

Environmental risks in photovoltaic solar parks in western Cuba

José Antonio García Gutiérrez¹ y Javier Pozo Bejerano² y Ángel René Díaz Deulofeu¹

¹- UIC Pinar del Río, INVESCONS ENIA. Rafael Morales 242 Sur (altos), Pinar del Río

²- ECOVIDA. Kilómetro 2½ carretera a Luis Lazo, Pinar del Río. Email: javier@ecovida.cu

Fecha de recepción: 5 de septiembre de 2019 Fecha de aceptación: 19 de diciembre de 2019

RESUMEN. El aprovechamiento de las fuentes renovables de energía (FRE) es parte de los programas de desarrollo económico y social de Cuba, previendo pasar de un 4,3 % de participación de estas en 2013 a un 24 % en 2030, lo que incluye la instalación de 700 MW en parques solares fotovoltaicos (PSFV) conectados al Sistema Electroenergético Nacional (SEN). Por su posición geográfica, la región occidental de Cuba es la más expuesta a diferentes fenómenos tropicales, principalmente huracanes, los que representan una amenaza potencial para el sistema de parques solares fotovoltaicos a instalar. El objetivo del trabajo fue analizar los niveles de riesgo que representan para dicho sistema la incidencia de este y otros peligros naturales, proponiendo varias medidas para mitigar sus efectos. Como conclusión, se obtuvo que los peligros de desastre más significativos para los parques solares de la región son los ciclones tropicales, lluvias intensas, tormentas locales severas y sismos, siendo los vientos intensos producidos por huracanes y tornados el principal factor de peligro. El total de pérdidas anuales esperadas debido a huracanes de cualquier categoría serán iguales al 4,3 % del valor de los sistemas fotovoltaicos (paneles y mesas), comparable a la depreciación anual de los paneles (4 %), lo que es un elemento positivo a favor de la construcción de parques solares. Los restantes peligros analizados (inundación y sismos) no representan amenazas significativas para los mismos si se realiza una adecuada microlocalización.

Palabras clave: parque solar fotovoltaico, riesgo ambiental, peligro, vulnerabilidad

ABSTRACT. The use of renewable energy sources (RES) is part of Cuba's economic and social development programs, anticipating going from a 4,3 % participation of the RES in 2013 to 24 % in 2030, which includes the 700 MW installation in photovoltaic solar farms connected to the National Electroenergetic System. Due to its geographical position, the western region of Cuba is the most exposed to different tropical phenomena, mainly hurricanes, which represent a potential threat to the system of photovoltaic solar farms to develop in its territory, especially in its southern part. The objective of the work is to analyze the levels of risk that the incidence of this and other natural hazards represent for this system, indicating some measures to mitigate its effects. As a general conclusion, it was obtained that the most significant disaster hazards for photovoltaic solar farms in the western region of Cuba are tropical cyclones, heavy rains, severe local storms and earthquakes, with intense winds produced by hurricanes and tornadoes as the main risk factor. In turn, the total expected annual losses due to hurricanes of any category will be equal to 4,3 % of the value of photovoltaic systems (panels and tables), comparable to the annual depreciation of the panels (4 %), which is a positive element in favor of the construction of photovoltaic solar farms. The remaining hazards analyzed (flood and earthquakes) do not represent a significant threat.

Keywords: photovoltaic solar farm, environmental risk, hazard, vulnerability

INTRODUCCIÓN

El aprovechamiento de las fuentes renovables de energía (FRE) es parte de los programas de desarrollo económico y social de Cuba, previendo pasar de un 4,3 % de participación de las FRE en 2013 a un 24 % en 2030, lo que incluye la instalación de 700 MW en parques solares fotovoltaicos (PSFV) conectados al Sistema Electroenergético Nacional (SEN). Entre las ventajas de la tecnología fotovoltaica se incluyen que la generación de electricidad es instantánea, prácticamente no utiliza agua, provoca un bajo impacto al medio ambiente, posee costos de operación y mantenimiento bajos, es versátil y silenciosa, y posee poco riesgo tecnológico (Sarmiento, 2013). Entre sus desventajas actuales se refieren su elevado costo inicial de inversión y el carácter intermitente (solo diurna) de la generación FV.

Por su posición geográfica, la región occidental de Cuba es la más expuesta a diferentes fenómenos tropicales, principalmente huracanes, los que representan una amenaza potencial para el sistema de parques solares fotovoltaicos a emplazar. El objetivo de este trabajo es analizar los niveles de riesgo que representan para dicho sistema la amenaza de este y otros peligros naturales, proponiendo algunas medidas para mitigar sus efectos.

La mayoría de los parques solares fotovoltaicos en explotación o construcción en la región occidental del país se caracterizan por potencias comprendidas entre 2,5 y 5 MWp, ocupando áreas que varían entre 4 y 8 ha. De acuerdo a los Certificados de Microlocalización, los costos de inversión son del orden de 10 a 15 millones de pesos cada uno. Los mismos no son solo de interés para el sitio de emplazamiento, por cuanto el funcionamiento del parque solar genera un ahorro considerable de combustible convencional en la generación de electricidad, al tiempo que evita la contaminación de la atmosfera, representando una solución ecológica mediante la cual se beneficia la sociedad. No constituye una fuente de empleo a resaltar por cuanto requiere de un mínimo de fuerza de trabajo (5 trabajadores).

Breve descripción de los parques solares

En la composición de los parques solares se destacan, en primer lugar, los sistemas fotovoltaicos (SFV), constituidos por los módulos o paneles fotovoltaicos y la estructura soporte o mesa. Los módulos fotovoltaicos utilizados son de silicio policristalino, potencia nominal de 250 Wp y

una vida útil estimada de 25 años. Su producción actual en Cuba está a cargo de la Empresa de Componentes Electrónicos "Ernesto Guevara" de Pinar del Río, cumpliendo los requerimientos de la norma cubana NC IEC 61215:2012.

Los mismos se colocan, más a menudo, en mesas de 10 módulos cada una, dispuestos con su lado menor (ancho) hacia abajo, distribuidos en dos filas de cinco módulos cada una. La mesa presenta una inclinación de 15 grados respecto a la horizontal y una orientación de su eje transversal entre el sur y el sureste para maximizar la exposición solar. Los módulos fotovoltaicos se agrupan por cadenas conectadas a cajas metálicas o plásticas, diseñadas para instalación en exteriores y resistentes a la radiación ultravioleta. Las mismas se colocan cada 3 ó 4 filas en la parte inferior de la estructura de una mesa soporte.

Los restantes componentes del parque solar son el inversor, el cual convierte la corriente directa en alterna trifásica; transformador, que eleva el voltaje de salida hasta el valor requerido para su conexión a una línea eléctrica aérea de 34,5 kV/13,8 kV del SEN; cabina de control, que alberga el equipamiento de control automático y comunicaciones; estación meteorológica para el monitoreo de la temperatura del aire y de los módulos, radiación solar y velocidad del viento; y garitas de vigilancia y acceso. Dispone para su protección de un cercado perimetral de malla peerles, con una entrada principal y una secundaria.

Como infraestructura técnica, cuenta con los sistemas eléctricos, de comunicaciones y puesta a tierra, siendo todas las líneas eléctricas internas soterradas. El sistema de protección contra descargas atmosféricas es mediante pararrayos de puntas franklin de acero inoxidable, colocados en las torres de iluminación. El sistema de puesta a tierra es de tipo malla, enterrado en el suelo adyacente. Para satisfacer la demanda de agua potable, se dispone de cisterna, abastecida, generalmente, mediante carros pipa, mientras que para la captación y tratamiento de los residuales líquidos se construyen fosas moura. La solución definitiva de drenaje de toda el área se especifica en el proyecto de construcción civil, aprovechando las pendientes naturales del terreno.

MATERIALES Y MÉTODOS

La clasificación de los peligros de desastre identificados se realizó según lo especificado en la Directiva No. 1 del Presidente del Consejo de Defensa Nacional (CDN, 2010), la cual los clasifica, por su origen, en naturales, tecnológicos y sanitarios.

Para la evaluación del riesgo de los sistemas fotovoltaicos ante los fuertes vientos producidos por huracanes de diferentes categorías, se empleó la expresión:

$$\text{Resp} = 100 \cdot P \cdot V$$

donde:

Resp: Riesgo específico, %;

P: Probabilidad anual de ocurrencia del peligro, %;

V: Vulnerabilidad ante el peligro (0 a 1).

El riesgo específico caracteriza el porcentaje anual de pérdidas esperadas debido a la ocurrencia del peligro dado. La probabilidad anual de ocurrencia se ha calculado a partir de la cantidad de huracanes que han afectado a la región occidental en el intervalo de 1851 a 2018 (ONEI, 2019), multiplicada por 0,5 para tener en cuenta solo las trayectorias que originan vientos de componente norte sobre las mesas de apoyo. A su vez, la vulnerabilidad ante huracanes se ha valorado en una escala de 0 a 1, basada en una hipótesis elaborada por los autores que tiene en cuenta la presión que ejerce el viento –proporcional al cuadrado de la velocidad– y la ubicación de las mesas en el parque solar. La estimación de la sismicidad de la región de estudio está basada en la norma cubana NC 46:2017 (ONN, 2017).

RESULTADOS

Los peligros de desastre más significativos para el sistema de parques solares fotovoltaicos que se construye en la región occidental de Cuba clasifican como de origen natural, los que se relacionan a continuación con los principales factores de peligro que los caracterizan:

- Ciclones tropicales: vientos fuertes, lluvias intensas
- Lluvias intensas de origen ciclónico y no ciclónico
- Tormentas locales severas: vientos fuertes, lluvias intensas de corta duración, actividad eléctrica, caída de granizos
- Sismos

En casos puntuales, en el análisis de riesgos pueden ser incluidos otros peligros, como incendios en áreas rurales y rotura de presas, este último clasificado como de origen tecnológico.

Ciclones tropicales

La temporada ciclónica en Cuba se extiende del 1 de junio hasta el 30 de noviembre, con alto riesgo para los parques solares fotovoltaicos por los fuertes vientos que la acompañan, siendo la región occidental de Cuba la que mayor frecuencia de afectación tiene por estos fenómenos. El viento máximo registrado en Cuba es de 340 km/h, asociado al huracán *Gustav*, en la Estación Meteorológica de Paso Real de San Diego, el 28 de agosto de 2008.

Los períodos de retorno promedio de los huracanes que han afectado a la región occidental en el intervalo de 1791 a 2018 (168 años) se muestran en la **Tabla 1**. En la última columna, se presenta la probabilidad de ocurrencia en 25 años (período de vida útil de los paneles solares), mediante una aplicación de la distribución estadística de Gumbel.

Tabla 1. Períodos de retorno de huracanes en la región occidental (1851 a 2018).

| Categoría | Viento sostenido, km/h | Cantidad | Uno cada, años | Probabilidad anual | Probabilidad en 25 años, % |
|-----------|------------------------|----------|----------------|--------------------|----------------------------|
| SS1 | 119 a 153 | 32 | 5,25 | 0,191 | 99,5 |
| SS2 | 154 a 177 | 24 | 7,0 | 0,143 | 97,9 |
| SS3 | 178 a 208 | 11 | 15,3 | 0,065 | 81,5 |
| SS4 | 209 a 251 | 11 | 15,3 | 0,065 | 81,5 |
| SS5 | 252 ó más | 2 | 84,0 | 0,012 | 25,9 |

Fuente: Oficina Nacional de Estadísticas e Información (ONEI, 2019) con elaboración propia.

Los huracanes más frecuentes, con período de recurrencia inferior a 10 años, son los de categorías 1 y 2 de la escala Saffir-Simpson. Además, resulta muy alta la probabilidad (casi del 100 %) de que la región será afectada en los próximos 25 años por huracanes de estas categorías, y alta (81,5 %) por un huracán de gran intensidad de categorías 3 y 4.

Vulnerabilidad a los fuertes vientos

Según la norma internacional adoptada en Cuba de fabricación de paneles solares (ONN, 2012), las superficies frontal y trasera del módulo deben resistir una presión de 2 400 pascal aplicada uniformemente, la cual corresponde a una presión de viento de 130 km/h (\cong 800 pascal), con un factor de seguridad de 3 para las ráfagas de viento. Para los sistemas fotovoltaicos, los valores de resistencia al viento dados por los fabricantes corresponden, generalmente, a velocidades de 160 a 170 km/h.

Hasta el momento, no se dispone de estudios documentados sobre los efectos de los vientos huracanados en los parques solares fotovoltaicos conectados a la red que funcionan en el país. En el caso de otros países de la región del Caribe, resulta significativo el destrozo causado por el huracán de gran intensidad *María* (septiembre de 2017) sobre el parque solar fotovoltaico Humacao, situado en la porción sureste de Puerto Rico, con vientos sostenidos cercanos a 250 km/h (**Fig. 1**).



Figura 1. Efectos del huracán de gran intensidad María (2017) en el parque solar fotovoltaico Humacao, Puerto Rico.

Como se aprecia en la figura, los mayores efectos destructivos se produjeron por el desprendimiento de los paneles fotovoltaicos de las mesas.

Basados en referencias bibliográficas consultadas y estudios de campo (Parnás *et al.*, 2012; Stolik, 2014; ProAmbiente ENIA, 2015), se ha establecido un grupo de aspectos que más influyen en la vulnerabilidad de los sistemas fotovoltaicos (SFV) a los fuertes vientos:

- La resistencia que opone el SFV al viento disminuye con el aumento del tamaño y la inclinación de la mesa soporte de los paneles fotovoltaicos.
- Dada la inclinación de las mesas en dirección sur, los vientos más dañinos serán los de componente norte, debido a la carga de viento resultante que actúa en dirección hacia afuera de la mesa (succión). Esta presión máxima actuante fue calculada para mesas soporte de 10 paneles mediante la aplicación de la norma cubana NC 285:2003 (ONN, 2003), obteniéndose un valor de 1,73 kN/m² (1 730 Pa) para los paneles superiores y 0,85 kN/m² (850 Pa) para los inferiores

(Parnás *et al.*, 2012), equivalentes a la ejercida por vientos de 188 km/h (huracán categoría 3) y 133 km/h (huracán categoría 1), respectivamente (**Fig. 2**).

- Debe señalarse, sin embargo, que de actuar vientos de mayor intensidad a los considerados en la norma –período de retorno de 50 años–, las cargas de viento actuantes sobre la superficie de la mesa serán superiores a las calculadas.

- Los vientos huracanados de dirección este u oeste que soplan entre filas también deben ser tenidos en cuenta en el análisis de vulnerabilidad por los efectos de turbulencia que provocan bajo las mesas, con tendencia a levantar los módulos. En cuanto a la estabilidad estructural de la mesa soporte en esa dirección, se recomienda colocar elementos en forma de cruceta en ese sentido (Parnás *et al.*, 2012).

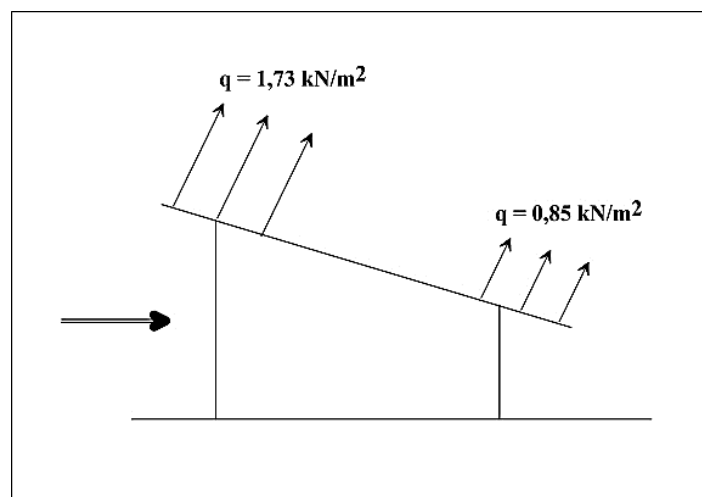


Figura 2. Succión producida por el viento en la mesa de apoyo de los paneles solares. (Basado en Parnás *et al.*, 2012).

- Las características de la mesa soporte de los módulos fotovoltaicos juega un papel de primer orden en su resistencia a los fuertes vientos. Resulta conveniente que cuente con vigas de cierre por sus bordes que reduzcan la movilidad de los paneles ante los efectos del viento, y que las presillas de sujeción de los paneles abarquen una adecuada área de recubrimiento, que eviten la liberación del panel ante movimientos vibratorios producidos por las rachas de viento.

Hasta el momento, se han empleado con mayor frecuencia dos sistemas de cimentación para las mesas: micropilotes fundidos *in situ* y micropilotes metálicos hincados en el terreno. Estos deben garantizar la suficiente resistencia a tracción o fricción lateral que evite su extracción por

la presión del viento actuante sobre la mesa durante un evento severo, siempre que la unión de la estructura de la mesa con los mismos cumpla con las solicitaciones requeridas. Cuando se garantiza la seguridad de la cimentación, la vulnerabilidad del sistema fotovoltaico ante los fuertes vientos es una función dependiente del diseño estructural de la mesa soporte y, sobre todo, de la fijación y resistencia de los módulos solares situados sobre la misma.

Nivel de riesgo de los PSFV ante huracanes

Para la estimación del nivel de riesgo de los parques solares ante huracanes, se ha empleado la ecuación general del riesgo, donde este queda expresado como el producto de la probabilidad de ocurrencia de huracanes de diferente categoría por la vulnerabilidad ante la fuerza de los vientos correspondientes a cada una de ellas. Como se indicó antes, la primera se ha tomado de la tabla 1, multiplicada por 0,5 para tener en cuenta solo las trayectorias que originan vientos de componente norte sobre las mesas (Pc). Por su parte, los valores de vulnerabilidad asumidos para las diferentes categorías se muestran en la **Tabla 2**.

Tabla 2. Hipótesis de vulnerabilidad para diferentes categorías de huracán.

| Categoría | Vientos sostenidos, km/h | Vulnerabilidad | Observaciones |
|-----------|--------------------------|----------------|----------------------------------|
| SS1 | 119 a 153 | 0,05 | Resistencia dada por fabricantes |
| SS2 | 154 a 177 | 0,10 | Resistencia dada por fabricantes |
| SS3 | 178 a 208 | 0,40 | Se afecta el 40 % de los paneles |
| SS4 | 209 a 251 | 0,65 | Se afecta el 65 % de los paneles |
| SS5 | 252 ó más | 0,80 | Se afecta el 80 % de los paneles |

Referente a la ubicación de los SFV, se ha seguido el orden siguiente: los más vulnerables a los fuertes vientos son los situados en los bordes del parque solar, sobre todo del lado norte y en los extremos de filas, y como los menos vulnerables (75 % del valor anterior), los situados hacia el centro del campo solar. Para la distribución de las mesas, se ha asumido que el 30 % de las mismas se localizan en los bordes del parque solar y el 70 % restante en el interior del mismo.

Los resultados finales de la estimación del nivel de riesgo específico están mostrados en la **Tabla 3**.

Tabla 3. Evaluación del riesgo ante huracanes en parques solares de la región occidental.

| Categoría | Probabilidad anual (P), % | Probabilidad anual corregida (Pc), % | Vulnerabilidad por viento y posición | | | Riesgo específico, % |
|-----------|---------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|----------|-------|----------------------|
| | | | Bordes | Interior | Total | |
| SS1 | 19,1 | 9,55 | 0,05 | 0,04 | 0,04 | 0,4 |
| SS2 | 14,3 | 7,15 | 0,10 | 0,08 | 0,08 | 0,6 |
| SS3 | 6,5 | 3,25 | 0,40 | 0,30 | 0,33 | 1,1 |
| SS4 | 6,5 | 3,25 | 0,65 | 0,49 | 0,54 | 1,8 |
| SS5 | 1,2 | 0,6 | 0,80 | 0,60 | 0,66 | 0,4 |
| Total | | | | | | 4,3 |

Según refleja la tabla, las mayores pérdidas anuales a esperar serán las provocadas por huracanes de categoría 4, debido a su alta probabilidad de ocurrencia y efecto destructivo de sus vientos. El total de pérdidas anuales esperadas por los fuertes vientos que acompañan a los huracanes serán del orden del 4,3 % del valor de los SFV. Si tenemos en cuenta que la pérdida anual asumida por concepto de deterioro de los paneles, cuya vida útil es igual a 25 años, es de un 4 %, resulta que las pérdidas anuales estimadas debido a este peligro natural son comparables a éstas, lo que es un elemento positivo a favor de la construcción de parques solares fotovoltaicos.

Es preciso recordar que estos son estimados probabilísticos, que reflejan tendencias a largo plazo, lo que no excluye la probabilidad de que un parque solar sea afectado por un huracán de gran intensidad (SS3 o mayor), con la consiguiente generación de pérdidas considerables, estimadas entre un 33 y un 66 % de los sistemas fotovoltaicos.

Intensas lluvias. Peligro de inundación

La probabilidad de ocurrencia de intensas lluvias (≥ 100 mm en 24 horas), provocadas por ciclones tropicales u otros eventos meteorológicos, es alta en casi cualquier localidad del territorio nacional. En la **Tabla 4** se muestran las intensidades máximas de lluvia registradas en la región occidental de Cuba, donde se observa que durante estos eventos extremos la lluvia máxima en 24 horas alcanzó valores hasta de 740 mm, mientras que la intensidad máxima fue de 5,60 mm/min.

Tabla 4. Intensidades máximas de lluvia registradas en la región occidental de Cuba.

| Evento | Fecha | UM | Intervalo de tiempo, minutos | | | | | | | | | |
|---------------------|------------|--------|------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | | | 5 | 10 | 20 | 40 | 60 | 90 | 150 | 300 | 720 | 1440 |
| Ciclón del 26 | 20/10/1926 | mm | 28 | 47 | 72 | 96 | 115 | 130 | 162 | 216 | 280 | - |
| | | mm/min | 5,60 | 4,70 | 3,60 | 2,40 | 1,92 | 1,44 | 1,08 | 0,72 | 0,39 | - |
| Ciclón Laura | 18/9/1971 | mm | 22 | 36 | 65 | 110 | 150 | 200 | 240 | 321 | 396 | - |
| | | mm/min | 4,40 | 3,60 | 3,25 | 2,75 | 2,50 | 2,22 | 1,60 | 1,07 | 0,55 | - |
| Ciclón Frederick | 9/9/1979 | mm | 8 | 14,4 | 24,8 | 46 | 64,2 | 90 | 132 | 222 | 418 | 490 |
| | | mm/min | 1,60 | 1,44 | 1,24 | 1,15 | 1,07 | 1,00 | 0,88 | 0,74 | 0,58 | 0,34 |
| Ciclón Alberto | 2-3/6/1982 | mm | 14 | 25 | 49 | 90 | 127 | 172 | 255 | 400 | 620 | 740 |
| | | mm/min | 2,80 | 2,50 | 2,45 | 2,25 | 2,12 | 1,91 | 1,70 | 1,33 | 0,86 | 0,51 |
| Baja, Pinar del Río | 24/6/1992 | mm | 11,1 | 21,7 | 37,1 | 67,1 | 94,3 | 136 | 194 | 309 | 428 | 579 |
| | | mm/min | 2,22 | 2,17 | 1,86 | 1,68 | 1,57 | 1,51 | 1,29 | 1,03 | 0,59 | 0,40 |

Fuente: Batista y Sánchez (2010).

Peligro de inundación

Las inundaciones por intensas lluvias pueden ser de dos tipos: fluviales, cuando se produce el desbordamiento de ríos y arroyos, o pluviales, propias de áreas relativamente bajas, donde el drenaje natural del terreno o de las obras técnicas construidas resulta insuficiente. En la mayoría de los casos, el proceso de microlocalización de las áreas destinadas a la construcción de parques solares da preferencia a lugares elevados y con buen drenaje natural, alejados de cauces de ríos, arroyos y otros cuerpos de agua que, al desbordarse, pudieran afectar a los mismos. Sin embargo, esto no excluye la necesidad de analizar este peligro dentro de los estudios de riesgos.

Una primera aproximación para determinar si la parcela de ubicación del parque solar es inundable la aportan los Estudios de Peligro, Vulnerabilidad y Riesgo (PVR) que se ejecutan en las diferentes provincias del país, según los lineamientos metodológicos establecidos por la Agencia de Medio Ambiente del CITMA. No obstante, por la escala de trabajo utilizada en dichos estudios, se requiere siempre particularizar con más detalle en el análisis de los factores (hidrografía, relieve, permeabilidad del terreno, datos históricos) que pueden incidir en la manifestación de este peligro en el área propuesta. A manera de ilustración, se presenta un resumen del análisis detallado del peligro de inundación efectuado durante el estudio de riesgo del parque solar Surí, en el municipio de Guane de la provincia de Pinar del Río (ProAmbiente, 2017).

De acuerdo a información y evidencias fotográficas ofrecidas por el Centro de Gestión para la Reducción del Riesgo del citado municipio, se pudo precisar el alcance de la inundación ocurrida entre el 28 de mayo y el 8 de junio de 2013, donde la intensidad máxima de la lluvia registrada en la cercana estación meteorológica de Isabel Rubio fue de 200,7 mm en 24 horas, la que se corresponde con un periodo de recurrencia de 5 años (peligro alto). Se estimó que la cota de inundación para eventos de esta magnitud y frecuencia en la zona donde se microlocalizó la parcela del parque solar se encuentra alrededor de los 8 m sobre el nivel medio del mar, por lo que una parte apreciable del área (alrededor del 40 %) se encontraba dentro de la zona inundada, con tirantes de inundación de 0 a 1,5 m (**Fig. 3**).



Figura 3. Nivel alcanzado por la inundación de junio de 2013.

Otros eventos, como el ciclón *Alberto* en 1982, presentaron lluvias más intensas y mayores acumulados que dieron lugar a inundaciones más extensas. Basado en las evidencias aportadas, se concluyó que el peligro de inundación en la parcela seleccionada clasificaba como alto, por lo que se recomendó una nueva ubicación del área del parque solar.

Vulnerabilidad ante intensas lluvias

En la mayoría de los casos, la vulnerabilidad a inundaciones fluviales y pluviales de las áreas destinadas a parques solares fotovoltaicos es de muy baja a baja, si se realiza una adecuada microlocalización de la obra. En este caso, la mayor vulnerabilidad la presenta el equipamiento y cableado situado próximo al nivel del terreno, por lo que requiere ser protegido convenientemente.

Tormentas locales severas (TLS)

Las tormentas locales clasifican como severas cuando está presente al menos uno de los siguientes fenómenos: trombas marinas, tornados, granizos y vientos lineales superiores a 25 m/s (90 km/h), conocidos como aeroavalanchas. Además, en ocasiones producen intensas lluvias en poco tiempo y se acompañan de gran actividad eléctrica. Estos eventos ocurren en Cuba en cualquier época del año, aunque son más frecuentes en los meses de mayo y junio. Generalmente se forman en horas de la tarde, sobre todo entre la una y las seis, con excepción de la Isla de la Juventud, donde ocurren casi siempre de noche.

Durante el período invernal, con frecuencia anteceden a los frentes fríos las líneas de tormenta prefrontales. Estos sistemas pueden provocar vientos fuertes, como tornados y aeroavalanchas, y estar acompañados de intensa actividad eléctrica. Los eventos de TLS más intensos y destructivos registrados en Cuba estuvieron asociados a sistemas invernales, entre ellos los sucedidos en marzo de 1983 (la llamada *Tormenta del Siglo*), 1987 y 1993.

Un estudio realizado sobre la distribución espacial de las TLS ocurridas en Cuba durante el período 1980 a 2007 (28 años) (Bermúdez *et al*, 2014) determinó que las regiones occidental y central son las más afectadas por estos eventos meteorológicos, en menor medida la provincia de Pinar del Río y el municipio especial de Isla de la Juventud. A su vez, la provincia de Matanzas registró la mayor cantidad de casos, debido a que sus características físico-geográficas favorecen una actividad convectiva alta durante el período lluvioso.

Dentro de las TLS, el granizo es el fenómeno que más a menudo afecta al territorio cubano. Desde el punto de vista espacial, puede decirse que ninguna región está exenta de ocurrencia de este evento, aunque presenta cierta preferencia en zonas del interior y del sur desde La Habana a Camagüey, donde la inestabilidad vespertina y el calentamiento diurno son más intensos en los meses de verano.

Las aeroavalanchas o vientos lineales fuertes en un tiempo corto es el fenómeno severo que, después de las granizadas, afectan con más frecuencia al país. En la región occidental, las aeroavalanchas son más frecuentes en el interior de las provincias de Artemisa y Mayabeque, y en el interior y norte de la provincia de Matanzas.

La mayoría de los tornados ocurridos en Cuba clasifican como poco intensos, correspondientes a las categorías EF0, EF1 y EF2 de la escala Fujita Modificada (**Tabla 5**), aunque también se

han reportado varios de las categorías EF3 y EF4, sobre todo en las regiones occidental y central, con daños considerables. En Pinar del Río y la Isla de la Juventud la ocurrencia de tornados es muy escasa.

Tabla 5. Escala Fujita Modificada para la intensidad de los tornados.

| Categoría | Viento, mph | Viento, km/h | Daños |
|-----------|-------------|--------------|----------------|
| EF0 | 65-85 | 105-137 | Mínimos |
| EF1 | 86-110 | 138-177 | Moderados |
| EF2 | 111-135 | 178-218 | Significativos |
| EF3 | 136-165 | 219-266 | Severos |
| EF4 | 166-200 | 267-322 | Devastadores |
| EF5 | Más de 200 | Más de 322 | Increíbles |

Fuente: Administración Nacional del Océano y Atmósfera de EE.UU.

Aunque la probabilidad de ocurrencia de tormentas locales severas es alta en toda la región, sus áreas de formación y desarrollo son relativamente reducidas, lo que limita la probabilidad de coincidencia con un parque solar.

Vulnerabilidad y riesgo ante las TLS

Los parques solares fotovoltaicos presentan desiguales grados de vulnerabilidad ante la ocurrencia de los diferentes fenómenos que acompañan a las tormentas locales severas, en particular la caída de granizos y los intensos vientos.

Con relación a la caída de granizos, los paneles solares deben cumplir durante su fabricación el “ensayo de granizo”, consistente en el lanzamiento de una bola de hielo de 25 mm de diámetro a 23 m/s dirigida contra 11 puntos de impacto, sin producir daños visuales importantes (ONN, 2012). En caso de que se excedan estos valores de diámetro o velocidad de impacto durante la ocurrencia de una tormenta local severa, deben producirse daños, en una cantidad difícil de predecir, en la superficie externa de los paneles solares, siendo casi nula la posibilidad de protegerlos por la rapidez de formación de este fenómeno.

La vulnerabilidad de los sistemas fotovoltaicos ante los fuertes vientos que producen los tornados de ocurrencia más probable en el territorio nacional (EFO a EF2), comprendidos entre 105 y 218 km/h, es comparable a la referida anteriormente para huracanes hasta de categoría SS4, aunque con un tiempo de duración mucho menor. En el caso de tornados de las categorías

EFO3 y EFO4, con vientos que pueden superar los 300 km/h, los efectos en un parque solar serían devastadores.

Sismos

La región occidental se caracteriza por una baja ocurrencia de eventos sísmicos, que se asocian, en su mayoría, a dislocaciones tectónicas que han manifestado actividad en las etapas más recientes de la evolución geólogo-tectónica del territorio. Sin lugar a dudas, el sismo más importante fue el del 23 de enero de 1880 en la región entre San Cristóbal y Candelaria, el cual alcanzó una magnitud estimada de 6,0 en la escala de Richter y una intensidad MSK de 8 grados, y que fue sentido en zonas tan diferentes como Cienfuegos y Cayo Hueso. Está considerado entre los terremotos fuertes reportados en Cuba (Chuy, 2002).

Según la norma cubana NC 46:2017 (ONN, 2017), los 62 municipios de la región occidental están incluidos en las zonas 1 y 2 del Mapa de Zonificación Sísmica con fines de Ingeniería de Cuba. La primera se caracteriza por un peligro sísmico muy bajo sin efectos dañinos para las construcciones, mientras que la zona 2 presenta un peligro sísmico bajo que puede ocasionar daños en las construcciones debiéndose tomar medidas sismo-resistentes en las estructuras y obras en función de la categoría ocupacional de las mismas, lo que no procede en este tipo de obra.

En la evaluación de la vulnerabilidad sísmica, el principal elemento de análisis en los parques solares es la susceptibilidad a la licuefacción de los suelos del emplazamiento. En la región de estudio, es casi nula la probabilidad de ocurrencia de este fenómeno debido al perfil litológico subyacente en los sitios de microlocalización de los parques solares y a la máxima intensidad sísmica esperada. Por consiguiente, atendiendo a las características de los objetos de obra y a la historia sísmica de la región, se concluye que la vulnerabilidad a sismos es baja.

DISCUSIÓN

La frecuente ocurrencia de huracanes intensos en la región occidental constituye el principal riesgo ambiental para el sistema de parques solares fotovoltaicos, conectados al Sistema Electroenergético Nacional, a desarrollar en la misma. No obstante, como ha sido demostrado, la pérdida anual esperada en los sistemas fotovoltaicos por los fuertes vientos que acompañan a estos fenómenos es comparable a la pérdida anual por concepto de depreciación de los

paneles, cuya vida útil se estima en 25 años, lo que resulta un elemento a favor de su emplazamiento en la región por las notables ventajas energéticas y ambientales que aportan.

No obstante, es preciso apuntar que las técnicas del análisis de riesgo están basadas en estimados probabilísticos, que reflejan tendencias a largo plazo, lo que no excluye la posibilidad de que un parque solar sea afectado por un huracán de gran intensidad, con la consiguiente generación de pérdidas considerables, si no se toman las medidas preventivas recomendadas.

Con relación a los restantes peligros analizados (lluvias intensas, granizadas, sismos) los niveles de afectación a esperar sobre los parques solares de la región son de menor significación que los producidos por los vientos intensos (más de 180 km/h).

Medidas recomendadas ante fuertes vientos

Comprende un conjunto de medidas preventivas que deben ser aplicadas con el objetivo de garantizar que los valores de vulnerabilidad ante eventos peligrosos puedan ser disminuidos. Una parte de las mismas deben llevarse a cabo durante la etapa de construcción o inicios de la fase de explotación del parque, mientras que las restantes deben tenerse en cuenta durante la elaboración del Plan de Reducción de Desastres de la instalación.

- Construcción de cortinas rompevientos alrededor del parque, especialmente en dirección norte, con especies apropiadas para estos casos.
- Ante la amenaza de azote de vientos huracanados fuertes, debe realizarse el anclaje de los paneles fotovoltaicos mediante medios de sujeción (correas, cintas) que los cubran y les otorguen una mayor resistencia a los vientos.
- Evitar la deposición de materiales, tanto en el interior como en áreas cercanas al exterior de la instalación, que puedan ser levantados por los fuertes vientos y convertirse así en proyectiles que puedan dañar los paneles o equipos.
- Ante la amenaza de un evento hidrometeorológico severo, deben reforzarse las ventanas y puertas de las cabinas y garitas para evitar la entrada de vientos y agua a su interior.
- Ante la inminente afectación de un ciclón tropical, deben asegurarse las cubiertas ligeras de las viviendas aledañas, ya que las tejas desprendidas pueden impactar sobre los paneles fotovoltaicos del parque solar.

- No es recomendable el desmontaje de los módulos fotovoltaicos ante la amenaza de un evento severo, siendo preferible su protección *in situ*.

CONCLUSIONES

Los peligros de desastre más significativos para el sistema de parques solares fotovoltaicos que se construye en la región occidental de Cuba son los ciclones tropicales, lluvias intensas, tormentas locales severas y sismos. El principal factor de peligro son los vientos intensos producidos por huracanes y tornados.

Las mayores pérdidas anuales a esperar serán las provocadas por huracanes de categoría 4, debido a su alta probabilidad de ocurrencia y efecto destructivo de sus vientos. - El total de pérdidas anuales esperadas debido a huracanes de cualquier categoría serán iguales al 4,3 % del valor de los sistemas fotovoltaicos (paneles y mesas), comparable a la depreciación anual de los paneles, lo que es un elemento positivo a favor de la construcción de parques solares fotovoltaicos en la región.

Con relación a la conclusión anterior, es preciso apuntar que estos son estimados probabilísticos, lo que no excluye la posibilidad de que el parque solar sea afectado por un huracán de gran intensidad, con la consiguiente generación de pérdidas considerables.

Las tormentas locales severas pueden ocasionar daños importantes a los parques solares, pero el carácter local de su formación y desarrollo reduce la probabilidad de coincidir con el área de ubicación de un parque. Los restantes peligros analizados (inundación y sismos) no representan una amenaza significativa si se realiza una adecuada microlocalización de los mismos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bermúdez Souza, Y., G. G. Aguilar Oro y A. Wallo Vázquez. (2014). Distribución espacial de las tormentas locales severas en Cuba. *Rev. Cubana de Meteorología*, vol. 20, no. 1, pp. 59-72.

CDN. (2010). Directiva No.1 del Presidente del Consejo de Defensa Nacional para la planificación, organización y preparación del país para las situaciones de desastres. *Consejo de Defensa Nacional*, La Habana.

Chuy Rodríguez, T. J. (2002). Precisión por zonas de la peligrosidad sísmica de Cuba con fines de su desarrollo sostenible. *Memorias II Congreso Cubano de Geofísica*, La Habana.

- ONN. (2003). NC 285:2003. Carga de viento. Método de cálculo. *Oficina Nacional de Normalización*, 69 p.
- ONN. (2012). NC IEC 61215:2012 Módulos fotovoltaicos (FV) de silicio cristalino para uso terrestre. Cualificación del diseño y homologación (IEC 61215:2005). *Oficina Nacional de Normalización*, 54 p.
- ONN. (2017). NC 46:2017 Construcciones sismorresistentes. Requisitos básicos para el diseño y construcción. *Oficina Nacional de Normalización*, 106 p.
- ONEI. (2019). Panorama ambiental Cuba 2018. *Oficina Nacional de Estadísticas e Información*, p. 11.
- Parnás, V. E., I. Fernández Lorenzo y C. Llanes Burón. (2013). Informe del estudio de vulnerabilidad estructural frente a fuertes vientos. Estructura para paneles fotovoltaicos. *Centro de Estudios para la Construcción y Arquitectura Tropical, IPSJAE*. (Copia digital)
- ProAmbiente ENIA. (2015). Estudio de peligro, vulnerabilidad y riesgo Parque Solar Fotovoltaico Pinar 220. UIC Pinar del Río, ENIA, 40 p.
- ProAmbiente ENIA. (2017). Estudios ingeniero geológicos y ambientales (PSFV Surí). Equipo de Estudios Ambientales, UIC Pinar del Río, ENIA, 44 p.
- Sarmiento Sera, A. (2013). Energía solar fotovoltaica. Temas seleccionados. Ed. Academia, La Habana, 302 p.
- Stolik Novygrad, D. (2014). Sistemas fotovoltaicos vs. ciclones. *Rev. Energía y tú*, No. 68 (oct.-dic., 2014), CUBASOLAR.