Ingeniería Energética,
Vol. 47(2026): publicación continua
ISSN 1815-5901

Universidad Tecnológica de La Habana
José Antonio Echeverría

Artículo de investigación científica y tecnológica

Ejemplo ilustrativo de estudio de riesgo tecnológico de un parque fotovoltaico

Illustrative example of a technological risk study of a photovoltaic park

Antonio Torres Valle[I, *], Lauren Elías Hardí[I], Ana Teresa Carbonell Siam[II], Manuel Perdomo Ojeda[I], Raul Armas Cardona[I]

[I]Universidad de la Habana, Cuba
[II]DINVAI Construcciones, MICONS
*Autor de correspondencia: **atorres@instec.cu**, **antoniotorresvalle@gmail.com**

Recibido: 29 de agosto de 2026 Aprobado: 12 de noviembre de 2026

Este documento posee una licenciaCreativeCommonsReconocimiento-NoComercial4.0internacional

RESUMEN/*ABSTRACT*

Los análisis de riesgo han encontrado aplicación en múltiples sectores de la tecnología y la sociedad. El área de la sostenibilidad energética también se ha visto favorecida con esta posibilidad. Una de las capacidades fundamentales de este tipo de estudios es la determinación, con carácter preventivo, de las principales debilidades que caracterizan a una instalación. Cuando se trata de estudios de riesgo tecnológico en áreas donde existen carencias de datos de confiabilidad es común recurrir a métodos cualitativos o semicuantitativos. En esta investigación se emplea el método de matriz de riesgo tridimensional para determinar el riesgo tecnológico de un parque fotovoltaico, con énfasis en el diseño de las secuencias accidentales. A cada contribuyente se le asignan clasificaciones en base a criterios de experto y/o datos históricos. En el estudio se emplea el sistema SECURE-MR-FMEA. El estudio concluye recomendando alternativas de compensación para los fallos tecnológicos de mayor importancia**.**

Palabras clave: Análisis de riesgo; parque fotovoltaico; cambio climático; energías renovables, sostenibilidad energética.

Risk analyses have found application in multiple sectors of technology and society. The field of energy sustainability has also benefited from this possibility. One of the fundamental capabilities of these types of studies is the preventive determination of the main weaknesses that characterize a facility. When it comes to technological risk studies in areas where there is a lack of reliability data, it is common to use qualitative or semi-quantitative methods. In this research, the three-dimensional risk matrix method is used to determine the technological risk of a photovoltaic park, with an emphasis on the design of accidental sequences. Each contributor is assigned ratings based on expert criteria and/or historical data. The study uses the SECURE-MR-FMEA system. The study concludes by recommending compensation alternatives for the most important technological failures.

Keywords: *Risk analysis; photovoltaic park; climate change; renewable energy, energy sustainability.*

INTRODUCCIÓN

Los análisis de riesgo han encontrado aplicación en múltiples sectores de la tecnología y la sociedad. Dado que, la sostenibilidad energética es un problema multifacético, en el cual se integran la seguridad energética (interpretada como estabilidad y calidad de la energía generada), la equidad social (relacionada con el derecho a la energía de toda la sociedad) y la sostenibilidad ambiental (asociada a la generación de energía con bajo impacto al medioambiente) [1], es necesario abordar cada dimensión con aproximaciones metodológicas particulares. Esta investigación se centra en el área de seguridad energética donde alcanzan relevancia los estudios de riesgo tecnológico.

Uno de los retos esenciales de los estudios de riesgo tecnológico es la disponibilidad de datos de confiabilidad, puesto que, las aproximaciones cuantitativas de los análisis de riesgo resultan las más recomendables. Sin embargo, no siempre se encuentran disponibles estos datos. Su obtención requiere, en general, del acopio de información de fallos y mantenimientos, para lo cual se necesitan sistemas de vigilancia en línea (tipo *SCADA - Supervisory Control and Data Acquisition*), los cuales no siempre están ubicados en las instalaciones objeto de estudio. La búsqueda bibliográfica realizada revela que tampoco se han localizado referencias que hayan publicado tal información. Como alternativa a esta dificultad, es posible aplicar herramientas de análisis de riesgo cualitativas o semicuantitativas. Por la experiencia en el empleo de métodos matriciales y la disponibilidad de software, se ha decidido emplear, para el caso de esta investigación de riesgo tecnológico de un parque fotovoltaico (FV), el método de la matriz tridimensional de riesgo [2].

El método de la matriz tridimensional de riesgo requiere del diseño de las secuencias accidentales (frecuencia de iniciador, probabilidad de fallo de barreras y magnitud de consecuencias) representativas del modelo o patrón de riesgo del sistema analizado, las que tributan al riesgo de la instalación. A cada contribuyente del riesgo, según la secuencia, se le asignan clasificaciones en base a criterios de experto y/o datos históricos. El sistema SECURE-MR-FMEA, empleado en este caso puede procesar archivos de múltiples secuencias accidentales y determinar los niveles de riesgo para la instalación, a nivel de cada secuencia, así como los contribuyentes fundamentales por su tipo [2].

El objetivo principal de esta investigación es desarrollar el análisis de riesgo tecnológico de un parque fotovoltaico para determinar las principales debilidades de la instalación y las medidas compensatorias recomendables.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para la estimación del riesgo tecnológico del parque FV se utiliza el método de matriz de riesgo tridimensional [2], para cuyo empleo es necesario diseñar las secuencias accidentales por las que pueden evolucionar los eventos que comprometen el funcionamiento adecuado de la instalación. En esta investigación se ha empleado, como material de estudio, el parque FV ubicado en la Quinta de los Molinos (Centro Demostrativo de Fuentes Renovables de Energía, Información al público y consulta a personal operador del parque FV, Quinta de los Molinos, Habana, Cuba), el cual resulta, prácticamente, la única tecnología funcional en el centro.

Cada secuencia accidental está conformada por un suceso iniciador (disparador de la secuencia accidental), sus barreras (que son los controladores del iniciador) y las consecuencias (que se manifiestan en caso de fallar las barreras). Una vez postulada cada secuencia accidental, el cálculo de su riesgo se realiza a partir de la conjugación semicuantitativa de sus términos de frecuencia del iniciador, probabilidad de fallo de las barreras y magnitud de las consecuencias. Para ello se emplea la matriz presentada en la figura 1.

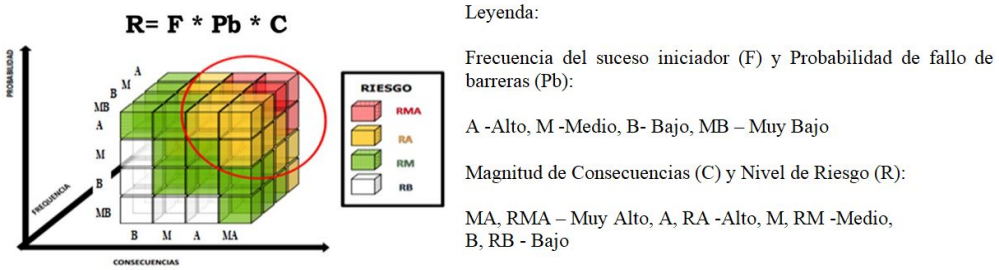


Fig. 1. Representación de la matriz de riesgo y sus factores

Para cumplir todo el proceso de evaluación de riesgos tecnológicos y productivos se sigue el algoritmo que se muestra en la figura 2, [3].

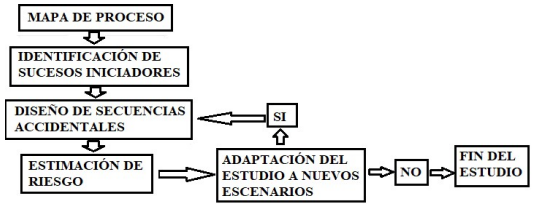


Fig. 2. Algoritmo para la evaluación de riesgos tecnológicos y productivos

El **mapa de proceso** es el ordenamiento cronológico de las diferentes etapas en que pueden transcurrir los riesgos. En el caso objeto de estudio se han identificado las etapas de Emplazamiento, Construcción, Puesta en servicio y Operación. El próximo paso es la **identificación de sucesos iniciadores**. En cada subproceso o etapa podrán ocurrir varios sucesos iniciadores (SI) que conllevan a fallos dentro del subproceso correspondiente. Estos sucesos iniciadores son los mecanismos mediante los cuales se manifiesta el peligro. Ejemplos de sucesos iniciadores por cada etapa se presentan en la tabla 1.

Tabla 1. Ejemplos de sucesos iniciadores por etapa

Etapa	Suceso iniciador
Emplazamiento	Colapso del emplazamiento
Construcción	Cimentación inadecuada
Puesta en servicio	Incumplimiento de los procedimientos de puesta en servicio
Operación	Fallo de los sistemas tecnológicos

En la etapa de Operación se incorporan secuencias con riesgo productivo asociado. Otro tipo de evento que puede asociarse a esta etapa es la de sucesos iniciadores de carácter externo, como por ejemplo eventos climatológicos extremos (huracán de gran intensidad). Cada SI también se acompaña, entre paréntesis, con la frecuencia que se le asigna. La asignación de la frecuencia de ocurrencia es una tarea de expertos (también puede basarse en registros históricos). Los probables valores de frecuencia que se asignan son: Alta (A), cuando ocurre frecuentemente, más 50 sucesos/año; Media (M), cuando ocurre ocasionalmente, mayor o igual que 1 y menor o igual que 50 sucesos/año; Baja (B), cuando es poco usual o raro que ocurra el evento iniciador, menos que 1 suceso/año y mayor o igual que 5 sucesos cada 100 años; y Muy Baja (MB), cuando es muy raro que ocurra el evento iniciador, menos de 5 sucesos cada 100 años o no se tiene información que haya ocurrido. Como estos SI pueden tener naturaleza tecnológica o humana, en su asignación se emplean datos estadísticos que permiten el cálculo de la frecuencia y su clasificación cualitativa ulterior [2].

Durante el **diseño de secuencias accidentales**, cada secuencia accidental se describe mediante un árbol de evento, que es un método inductivo que ilustra la evolución del suceso iniciador vinculado con el fallo de sus correspondientes barreras hasta alcanzar las consecuencias indeseadas o estado final de daño. Otro detalle a tener en cuenta en el diseño de las secuencias son las defensas que participan en estas. Se identifican tres tipos de defensas, las barreras (B), los reductores de frecuencia (RF) y los reductores de consecuencia (RC), [2]. El método ha sido adaptado para este objeto de estudio. Para la **estimación del riesgo** de cada secuencia accidental se siguen las combinaciones previstas en la matriz de la figura 1. Además, se modifican los valores de los contribuyentes al riesgo según las reglas establecidas en [2,3]. Cada defensa se identifica en la secuencia con su tipo (B, RF, RC), un número y su robustez encerrada entre paréntesis (MR – muy robusta, R – robusta, N- normal y B- blanda). Estos descriptores tienen valores numéricos correlativos que se emplean en el software SECURE-MR-FMEA durante la estimación del riesgo, para cuantificar la probabilidad de fallo de las defensas.

Como parámetro final hay que clasificar a las consecuencias y su magnitud. Las consecuencias, como ya se había expresado, para esta fase del estudio serán de dos tipos: tecnológicas (TEC) y productivas (PRO). En la definición del SI se emplea también este codificador. Las magnitudes de las consecuencias son: Muy Altas (MA), cuando significan daños notables a la tecnología o al proceso productivo con el 50 % o más del daño tecnológico o pérdida productiva asociada**,** Altas (A), cuando significan daños notables a la tecnología o al proceso productivo con entre el 25 y el 50 % del daño o pérdida productiva asociada, Medias (M), cuando significan un daño a la tecnología o al proceso productivo con menos de un 25 % del daño o pérdida productiva asociada y Bajas (B), cuando solo afectan la defensa en profundidad de las defensas en la secuencia accidental.

La clasificación final de los contribuyentes de las secuencias accidentales combina los valores originales de frecuencia del iniciador y magnitud de consecuencia con el efecto que provocan sobre dichos parámetros los correspondientes reductores de frecuencia y de consecuencia, mientras que, para la probabilidad de fallo de las barreras, se utiliza el valor combinado, según las robusteces, de las correspondientes barreras asignadas a cada secuencia. Finalmente, la entrada a la matriz de la figura 1, necesita de las tres clasificaciones cualitativas de los componentes integrantes del riesgo de cada secuencia accidental, para determinar el nivel de riesgo que corresponde a la secuencia [2, 3]. Las clasificaciones cualitativas obtenidas no constituyen unidades físicas. De manera general, la siguiente tabla 2, muestra los valores cuantitativos que adoptan las defensas, según su robustez.

Tabla 2. Equivalencia Tipo de defensa vs. Puntos equivalentes

Tipo de defensa	Robustez expresada en puntos (significado)
Enclavamiento	32 (Muy Robusta)
Alarma	16 (Robusta)
Procedimiento aplicado por varias personas	8 (Normal)
Procedimiento aplicado por una persona	4 (Blanda)

Adicionalmente, una vez multiplicados los valores numéricos que caracterizan a las defensas en cada secuencia accidental, se siguen las siguientes pautas de asignación de valores a los contribuyentes de las secuencias.

La multiplicación de la contribución de las barreras tomando en cuenta sus robusteces permite cuantificar la probabilidad de fallo de cada grupo de barreras, aplicándose el siguiente criterio:

- Si no hay barreras, la probabilidad de fallo asignada es la máxima (Alta).
- Si la multiplicación de las robusteces es menor que 32 (P1*P2*Pn<32), la probabilidad asignada es Media.
- Si la multiplicación de las robusteces es mayor o igual que 32 (P1*P2*Pn≥32), la probabilidad asignada es Baja.
- Si la multiplicación de las robusteces es mayor o igual que 64 (P1*P2*Pn>64), la probabilidad asignada es Muy Baja.

El efecto de los reductores de frecuencia sobre la correspondiente frecuencia del iniciador sigue las siguientes reglas:

- Si la multiplicación de la robustez de los reductores de Frecuencia es mayor o igual que 32 (R1*R2*R3*Rn ≥ 32) es posible reducir un nivel de Frecuencia, es decir: de FA pasa a FM, de FM pasa a FB y de FB pasa a FMB.
- Si la multiplicación de la robustez de los reductores de Frecuencia es mayor que 64 (R1*R2*R3*Rn> 64) es posible reducir dos niveles de Frecuencia, es decir: de FA pasa a FB o de FM pasa a FMB. En el caso de que sea FB solo podrá reducirse un nivel hasta FMB ya que este es el nivel más bajo concebido por la metodología.

Las reglas para cambiar los niveles de Consecuencias en el caso de los reductores de consecuencia son las siguientes:

- Si la multiplicación de la robustez de los reductores de Consecuencia es mayor o igual que 32 (R1*R2*R3*Rn ≥ 32) es posible reducir un nivel de Consecuencias, es decir: de CMA pasa a CA o de CA pasa a CM. No se incluye la reducción del nivel de consecuencias de CM hasta CB ya que, por definición las Consecuencias Bajas no pueden obtenerse por vía de los reductores.
- Si la multiplicación de la robustez de los reductores de Consecuencia es mayor que 64 (R1*R2*R3*Rn> 64) es posible reducir dos niveles de Consecuencias, es decir: de CMA pasa a CM. No se incluye la reducción del nivel de consecuencias de CA hasta CB ya que por definición las Consecuencias Bajas no pueden obtenerse por vía de los reductores. Lógicamente, será posible bajar un escalón de CA a CM.

El proceso de diseño de secuencias y estimación del riesgo es un proceso iterativo que se repite, tal como lo muestra el bloque **Adaptación del estudio a nuevos escenarios** de la figura 2. El modelo o patrón final de riesgo de la instalación es el resultado del diseño y cuantificación de todas las secuencias accidentales. El riesgo del modelo se asigna de acuerdo al mayor riesgo calculado entre todas las secuencias accidentales integrantes del patrón. El método utiliza el principio de Pareto para determinar los mayores contribuyentes a nivel de secuencias y de defensas. La metodología esbozada tiene carácter probabilista y permite, si fuese necesario, completar el estudio con algún método determinista. Por ejemplo, es posible que, durante la etapa constructiva, se requieran cálculos estructurales.

Para la ejecución del estudio se cuenta con el código SECURE-MR-FMEA [2]. El sistema incluye métodos prospectivos (matriz de riesgo y análisis de modos y efectos de fallo – FMEA) y métodos reactivos, basados en la disponibilidad de registros previos de accidentes e incidentes relativos a la actividad. De los métodos contenidos en el código, esta investigación emplea el de matriz de riesgo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Resultados

De acuerdo con el orden establecido en el algoritmo presentado en la figura 2, se postula el mapa de proceso, conformado por cuatro subprocesos, según la tabla 3.

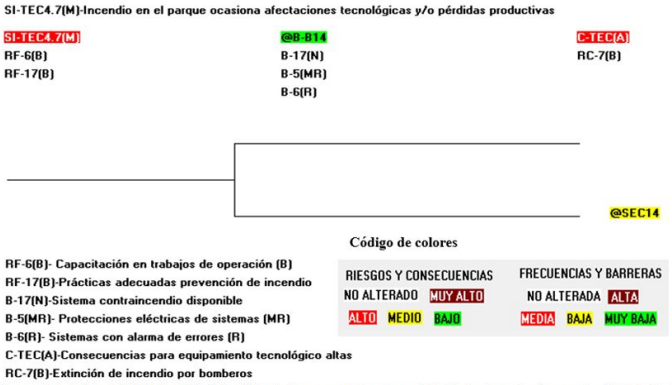
Tabla 3. Subprocesos para el estudio de riesgos tecnológicos del parque FV

No.	Codificación	Descripción
1	EMP	Emplazamiento
2	CON	Construcción
3	PES	Puesta en servicio
4	OPE	Operación

Los sucesos iniciadores que se postulan en cada etapa están justificados por la información técnica suministrada por los expertos del parque FV, por los criterios de las bases metodológicas [2, 3] y por la consulta de numerosas referencias, algunas útiles para fallos generales [4-6] o para fallos de inversores [7,8], otras para determinar influencia de las condiciones ambientales sobre los parques [9, 10], o los riesgos de incendio [11] y de rayos [12, 13], incluidas las relativas a protecciones eléctricas [14], interacciones de los parques con las redes interconectadas [15, 16], así como las relacionadas con capacidades predictivas de los mantenimientos [17]. Determinados los sucesos iniciadores se ejecuta el diseño de las secuencias accidentales derivadas del estudio, las cuales comienzan con la ocurrencia del suceso iniciador que las identifica, y se completa con sus defensas y consecuencias correspondientes. Durante la modelación de las defensas se han tomado criterios de similitudes con otras prácticas, los cuales también han servido para asignar la magnitud de consecuencia que se alcanza en cada secuencia [2, 3].

Además, se ha empleado, según corresponde, la información acopiada en las referencias anteriormente enumeradas. Una vez diseñado el patrón de riesgos tecnológicos y productivos para el parque FV, este se introduce en el sistema SECURE-MR-FMEA [2, 3]. Como características generales del patrón de riesgo obtenido para la instalación se modelaron 14 secuencias accidentales, para igual cantidad de sucesos iniciadores, 17 barreras, 16 reductores de frecuencia y 6 reductores de consecuencia. A modo ilustrativo se presenta una secuencia accidental (figura 3), para el suceso iniciador "Incendio en el parque ocasiona afectaciones tecnológicas y/o pérdidas de generación". En esta secuencia destacan la presencia de medidas de defensa para todos los contribuyentes al riesgo de dicha secuencia (Frecuencia de SI, Probabilidad de fallo de barreras y Magnitud de Consecuencias).

En la figura 3, se aprecia la ocurrencia de un suceso iniciador de tipo tecnológico SI-TEC4.7 (ver siglas TEC, además correspondiente al subproceso 4 u Operación), que no puede ser controlado por los reductores de frecuencia (RF) asignados {RF-6, RF-17}, dado que los mismos son de baja robustez (B). La existencia de las barreras provoca una bifurcación en la secuencia. Estas barreras {B-17, B-5 y B-6}, por su robustez combinada, tienen una probabilidad de fallo muy baja. Por ese camino, las consecuencias son Altas y no pueden ser mitigadas por la baja robustez del reductor de consecuencia correspondiente {RC-7}. La combinación de los tres contribuyentes aporta una secuencia de riesgo medio {SEC14}, tal como se aprecia en la figura 3.



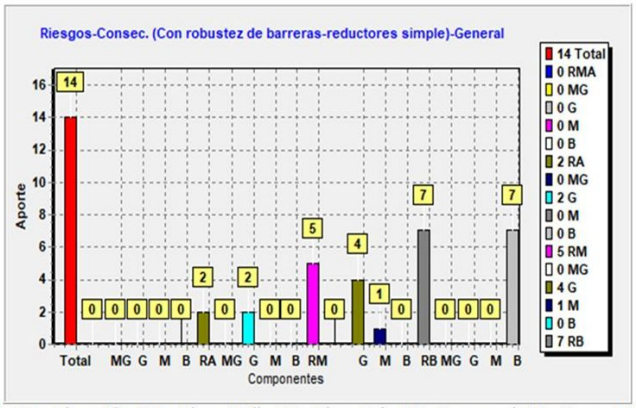
Leyenda: SI-Código de Suceso iniciador, @B- Probabilidad de fallo de barreras, B- barreras, RF- Reductores de frecuencia, RC- Reductores de Consecuencia, C- Consecuencias, @SEC# – Secuencia accidental, (X) – Clasificación de contribuyentes

Fig. 3. Ilustración de secuencia accidental del parque FV

De la misma forma en que se ha diseñado la secuencia ilustrada se realiza el diseño de las restantes secuencias del proceso. Cada grupo de secuencias quedan enlazadas con su correspondiente subproceso los cuales, a su vez, se enlazan al proceso (que representa el fallo del parque FV).

Los resultados del procesamiento de la información del patrón de riesgo, permiten obtener el perfil de riesgo que se muestra en la figura 4. Para esta modelación se ha supuesto la inhabilitación de las defensas siguientes:

- B-17(N) – Sistema contraincendio disponible
- B-19(MR) – Protección del parque contra sobretensión
- B-20(MR) – Sistema de pararrayos
- B-21(R) – Empleo de cintas o lingas de protección (abrazaderas sobre los paneles ancladas al terreno).



Leyenda: RA – Riesgo Alto, RM – Riesgo Medio, RB – Riesgo Bajo, MG- Consecuencia Muy Grave o Muy Alta, G- Consecuencia Grave o Alta, M – Consecuencia Media, B – Consecuencia Baja

Fig. 4. Perfil de riesgo tecnológico y productivo del parque FV

En el perfil se visualizan 14 secuencias accidentales, dos con riesgo alto (ver columna RA) y consecuencias graves (G) y cuatro riesgos medios (ver columna RM) con consecuencias graves (G). Considerando el nivel de riesgo de las secuencias con mayor riesgo, se concluye que la instalación tiene un riesgo Alto (RA).

Los riesgos altos (RA) se ubican en la etapa de Operación. Las secuencias más importantes se ordenan según la siguiente lista:

- SEC11 que corresponde a SI-TEC4.4(B) con riesgo Alto y Consecuencias Altas, Destrucción del parque por evento climatológico extremo (huracán de gran intensidad)
- SEC13 que corresponde a SI-TEC4.6(M) con riesgo Alto y Consecuencias Altas, Fallo del parque FV por sobretensión debida a descarga atmosférica
- SEC8 que corresponde a SI-TEC4.3(M) con riesgo Medio y consecuencias Altas, Fallo o desajuste de equipos del parque por fluctuación eléctrica externa.
- SEC9 que corresponde a SI-PRO4.2(M) con riesgo Medio y consecuencias Altas, Fallo de paneles FV del parque.
- SEC10 que corresponde a SI-PRO4.3(M) con riesgo Medio y consecuencias Altas, Fallo de inversores del parque FV.
- SEC14 que corresponde a SI-TEC4.7(M) con riesgo Medio y consecuencias Altas, Incendio en el parque ocasiona afectaciones tecnológicas y/o pérdidas productivas

La recuperación de las barreras inhabilitadas {B-17(N), B-19(MR), B-20(MR) y B-21(R)} provoca un cambio en el perfil de riesgo, en el cual desaparecen las secuencias de fallo del parque FV por sobretensión debida a descarga atmosférica y destrucción del parque por huracán, pasando ambas de RA a RM. Ello significa que, el nuevo perfil de riesgo no contendría riesgos altos.

De disponerse de todas las barreras posibles, su importancia se mide, preferiblemente, por la medida “Riesgos aumentados al inhabilitarse barreras” [2, 3]. En este caso, las barreras más importantes son:

- B-1(N) - Trabajo interdisciplinario de equipos de expertos (N)
- B-5(MR) - Protecciones eléctricas de sistemas (MR)
- B-6(R) - Sistemas con alarma de errores (R)

Estas tres barreras provocan, al inhabilitarse, el incremento del riesgo en dos secuencias cada una. Un estudio similar puede realizarse para reductores de frecuencia y de consecuencia, pero los cambios de riesgo producidos en el patrón de riesgo son poco importantes (afectan en el peor de los casos, a una secuencia por cada defensa inhabilitada).

Finalmente, la siguiente lista resume las medidas preventivas que podrían ser empleadas en la compensación de los riesgos más importantes del parque FV.

- Retirada de los paneles preventivamente a un evento climatológico extremo
- Cintas o lingas de protección
- Capacitación en trabajos de operación
- Procedimientos de trabajo según instrucciones de operación
- Protecciones eléctricas de sistemas
- Protección del parque FV por sobretensión
- Sistema de pararrayos
- Sistemas con alarma de errores
- Reservas calientes en el sistema eléctrico
- Mantener carga de trabajo moderada
- Ejecución de tareas con verificación redundante
- Mantenimiento preventivo periódico
- Sistema contraincendio disponible
- Prácticas adecuadas de prevención de incendio
- Trabajo interdisciplinario de equipos de expertos
- Utilizar pronóstico meteorológico para toma de decisiones
- Apagado y desconexión del parque FV previo al evento

Discusión

Cuando se cuenta con datos de confiabilidad suficientes, resulta recomendable que, para instalaciones tecnológicas de este tipo, se empleen métodos cuantitativos de análisis de riesgo, como los relativos a FMEA [18], árboles de fallos [19-21], métodos jerárquicos de redes [22], sistemas de decisión multicriterio [23] o métodos mixtos [24, 25]. Las carencias de datos de confiabilidad para el objeto de estudio (no existen referencias que aporten esta información) de esta investigación justifican la decisión de realizar el análisis de riesgo por métodos semicuantitativos como el asumido [2, 3]. Debe aclararse que tampoco se ha localizado ninguna referencia que muestre el empleo del método matricial para estudios de riesgo de parques FV.

Es necesario apuntar que el diseño de la matriz descriptora de la instalación ha dependido de las especificidades de Cuba (representa el caso en que las interfaces con el sistema eléctrico son muy trascendentes), por lo cual pueden existir experiencias que no acoplan con las particularidades de otros países. Sin embargo, tras la consulta de la información sobre fallos más comunes en instalaciones fotovoltaicas [4-6] se han encontrado algunas coincidencias de sucesos iniciadores como "No considerar correctamente las cargas de viento…" (que acopla con "Destrucción del parque por evento climatológico extremo - huracán de gran intensidad") y "Elegir una estructura inadecuada para el tipo de cubierta o terreno", así como "Subestimar la importancia del material de la estructura" y "Utilizar tornillería y fijaciones inadecuadas" (que acoplan con los errores de emplazamiento y construcción de nuestro modelo).

Por otro lado, esas mismas referencias [4-6] confirman problemas en la determinación de la carga de viento, pero además incluyen temas como que "No hay protección contra descargas atmosféricas, puesta a tierra y protección contra sobretensiones". Esta última situación también se reconoce durante la instalación física de componentes [12, 13]. Por otra parte, experiencias particulares de investigaciones [9, 10] también recomiendan tener en cuenta las cargas de vientos por huracanes.

Un caso paradigmático respecto al suceso iniciador "Fallo o desajuste de equipos del parque por fluctuación eléctrica externa" lo constituye el evento ocurrido en España y Portugal. Se trata de la inestabilidad registrada en el sistema eléctrico español, fechada el 28 de abril de 2025. En este caso, se produjo un apagón que afectó a millones de usuarios en la península. En un informe realizado por 49 expertos (Asociación de Ingenieros del ICAI, Informe final del Panel de Expertos Europeo sobre el Apagón Ibérico, 2026 Disponible en: https://www.icai.es/informe-final-del-panel-de-expertos-europeo-sobre-el-apagon-iberico/) se concluye que el evento fue multifactorial, emergiendo de la interacción de varios factores técnico organizativos.

En la descripción técnica del evento se enfatiza que, el escenario de producción de energía estaba principalmente dominado por fuentes renovables (~70% solar y eólica), por lo que la inercia del sistema era insuficiente para absorber cambios bruscos de tensión debido a la naturaleza de la generación basada en inversores, sin elementos giratorios de acumulación de energía cinética. Esta situación destaca la importancia del iniciador mencionado, más para el caso de Cuba, donde va tomando importancia el empleo de fuentes FV de energía en un sistema donde las disponibilidades de fuentes de generación de otra naturaleza son, con alta frecuencia, escasas.

También resulta importante, tal como lo refleja la referencia [11], considerar el suceso iniciador incendio en el parque. Específicamente, se confirma la gran importancia que la Unión Europea presta a la "protección contra incendios" en paneles FV.

Respecto a las defensas posibles, aunque en las referencias no se realiza una clasificación sistemática de las mismas ni una priorización por importancia, si se reconocen algunas de las consideradas en el modelo diseñado en la investigación. A modo de ejemplo, para este análisis, se han tomado las defensas correspondientes a los riesgos más elevados. De esta forma, algunas de las defensas equivalentes a las del modelo diseñado, incluyen:

- Para "Destrucción del parque por evento climatológico extremo (huracán de gran intensidad)": asegurar el anclaje y la fijación de las estructuras, instalar lingas de protección [10]
- Para "Fallo del parque FV por sobretensión debida a descarga atmosférica": uso de pararrayos externos, Sistema de Protección contra Descargas Tipo I y II en DC y AC, y una puesta a tierra equipotencial, ubicados según la distancia de cables y el riesgo de impacto atmosférico [12, 13]
- Para "Fallo o desajuste de equipos del parque por fluctuación eléctrica externa": empleo de Protecciones FV completas (SPD, fusibles, disyuntores, tierras, anti isla), TVSS (Protección contra sobretensiones transitorias) en cascada + filtros activos + regulación de voltaje, BESS (Sistema de almacenamiento de energía en baterías) si la red es muy inestable, Diagnóstico continuo de calidad de energía y Diseño correcto de strings y MPPT (Seguimiento del punto de máxima potencia) [14]. También se emplean control volt-var, limitación de rampas, almacenamiento, estabilización de tensión y protecciones activas que mantengan los parámetros dentro de los límites normativos [15, 16]
- Para "Incendio en el parque ocasiona afectaciones tecnológicas y/o pérdidas productivas": se aprecian empleo de componentes certificados, Dimensionamiento correcto del sistema, Separación y compartimentación de módulos, Canalizaciones ignífugas y sellado de pasos de cubierta, Distancias de seguridad, Accesos seguros para bomberos y operadores, Detectores de arco eléctrico, Sistemas de desenergización rápida, Detectores térmicos lineales bajo paneles, Extintores y sistemas automáticos de extinción, Cortafuegos y barreras físicas entre filas de paneles, Compartimentación de grandes campos solares, Revisiones periódicas, Protección contra rayos y sobretensiones mediante pararrayos y descargadores y Monitorización en tiempo real [11]

Debe reconocerse que, los detalles técnicos de muchas de las defensas postuladas en los documentos consultados consiguen un nivel de resolución y especialización que no ha sido alcanzado en el modelo de riesgo postulado para esta investigación. Sin embargo, su descripción general en el modelo de riesgo del parque FV, permite considerar que la inclusión de dichas defensas en el mismo ha sido lograda con éxito.

Algunas de las medidas de defensa propuestas en el modelo de riesgo para el parque FV de esta investigación son el resultado de experiencias propias y no tienen reflejo en las referencias consultadas. Entre ellas se pueden citar: "Retirada de los paneles preventivamente al evento climatológico extremo", "Reservas calientes en el sistema eléctrico" y "Apagado y desconexión del parque FV previo al evento". Aunque todas estas propuestas tienen lógica, algunas como la primera (Retirada de los paneles preventivamente al evento climatológico extremo), no son operativas cuando se trata de instalaciones de gran envergadura.

La investigación tiene antecedentes en algunas referencias que han realizado estudios sobre empleo de FMEA [18], para estudios de fallos en parques FV y métodos de detección de fallos en dichas instalaciones [4]. Los resultados de las investigaciones referidas muestran similitudes con los obtenidos por este estudio resaltando la importancia de las actuaciones de protecciones, incendios y sobretensiones [6, 11, 14].

CONCLUSIONES

Los análisis de riesgo constituyen una oportunidad novedosa para apoyar los estudios de sostenibilidad energética, en este caso están dirigidos a estudiar la dimensión seguridad energética, que, como se conoce, resulta una de las tres componentes de dicha sostenibilidad. El empleo de la matriz de riesgo tridimensional consigue superar la insuficiencia de los datos de confiabilidad disponibles, logrando postular un modelo de riesgo que muestra el patrón de riesgo del parque FV en forma de secuencias accidentales. Es válido reconocer que la calidad del modelo puede verse afectada por la subjetividad de los juicios de experto al diseñar las estructuras de secuencias y asignar la magnitud de los contribuyentes.

En el caso ejemplificado, el perfil de riesgo obtenido muestra 14 secuencias accidentales, dos con RA (con consecuencias Graves o Altas) y cuatro con RM (con consecuencias Graves). Los resultados ilustran la importancia de algunos iniciadores con origen externo como los huracanes, las descargas atmosféricas y las influencias de la red eléctrica en los fallos de la instalación. También destacan eventos como el incendio y otros propios del parque, como fallos de paneles e inversores. Entre las medidas de defensa de mayor eficacia trascienden las barreras y reductores de frecuencia como protecciones eléctricas y por sobretensión, sistemas de pararrayos y reservas disponibles en el sistema electroenergético, donde se encuentra instalado el parque FV. El diseño logrado del modelo de riesgo de un parque FV ofrece oportunidades de completamiento, a partir de nuevos datos e investigaciones, así como, acompaña la posibilidad de identificación de contribuyentes prioritarios y de las medidas de defensa de mayor impacto.

REFERENCIAS

[1] Lafuente, A. "Sostenibilidad en el sector energético". Real Academia de Ciencias Económicas y Financieras, Barcelona, 2025. ISBN-978-84-09-80999-8. Disponible en: https://racef.es/archivos/publicaciones/web_racef_mo104_25.pdf

[2] Torres, A., *et al*. "Gestión de riesgo en las prácticas médicas con radiaciones ionizantes". An Acad Cienc Cuba. 2023, vol. 13, n. 2. ISSN 2304-0106. Disponible en: https://revistaccuba.sld.cu/index.php/revacc/article/view/1314

[3] Torres, A., y Sierra, K. "Matriz de riesgo tridimensional aplicada a una evaluación de bioseguridad en una práctica de hemodiálisis". Rev Cubana Salud Trab. 2020, vol. 21, n. 1, p. 13-21. ISSN 1991-9395. Disponible en: https://revsaludtrabajo.sld.cu/index.php/revsyt/article/view/128

[4] Al, H., *et al*. "A review of photovoltaic module failure and degradation mechanisms: causes and detection techniques". Solar. 2024, vol. 4, p. 43-82. ISSN 1471-1257. Disponible en: https://doi.org/10.3390/solar4010003

[5] Zeb, K., *et al*. "Faults and fault ride through strategies for grid-connected photovoltaic system: a comprehensive review". Renew Sustain Energy Rev. 2022, vol. 158. ISSN 1364-0321. Disponible en: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032122000533

[6] Kull, K., *et al*. "Faults, failures, reliability, and predictive maintenance of grid-connected solar systems: a comprehensive review". Applied Sciences. 2025, vol. 15, n. 21. ISSN 2076-3417. Disponible en: https://doi.org/10.3390/app152111461

[7] Malik, A., *et al*. "Overview of fault detection approaches for grid connected photovoltaic inverters". e-Prime Adv Electr Eng Electron Energy. 2022, vol. 2. ISSN 2772-6711. Disponible en: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2772671122000079

[8] Friedman, D., *et al*. "Photovoltaic inverter reliability: workshop summary report & proceedings". National Renewable Energy Laboratory. 2024. Disponible en: https://docs.nlr.gov/docs/fy24osti/90315.pdf

[9] Adekanmbi, A., *et al*. "Assessing the environmental health and safety risks of solar energy production". World J Biol Pharm Health Sci. 2024, vol. 17, p. 225-231. ISSN 2582-5542. Disponible en: https://wjbphs.com/sites/default/files/fulltext_pdf/WJBPHS-2024-0080.pdf

[10] Bošnjaković, M., *et al*. "Effects of extreme weather conditions on PV systems". Sustainability. 2023, vol. 15. ISSN 2071-1050. Disponible en: https://www.mdpi.com/2071-1050/15/22/16044

[11] Yang, H., *et al*. "Experimental studies on the flammability and fire hazards of photovoltaic modules". Materials. 2015, vol. 8, p. 4210-4225. ISSN 0921-5093. Disponible en: Experimental studies on the flammability and fire hazards of photovoltaic modules
[12] Hetita, I., *et al*. "Modeling and protection of photovoltaic systems during lightning strikes: a review". Renewable Energy. 2022, vol. 184, p. 134-148. ISSN 0960-1481. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/354359430_Modeling_and_Protection_of_Photovoltaic_Systems_During_Lightning_Strikes_A_Review
[13] Formisano, A., *et al*. "Modeling of PV module and DC/DC converter assembly for the analysis of induced transient response due to nearby lightning strike". Electronics. 2021, vol. 10, p. 120. ISSN 2079-9292. Disponible en: https://www.mdpi.com/2079-9292/10/2/120
[14] Seklecki, K., *et al*. "A comprehensive system for protection of photovoltaic installations in normal and emergency conditions". Energies. 2025, vol. 18, p. 1749. ISSN 1996-1073. Disponible en: www.mdpi.com/1996-1073/18/7/1749
[15] Maitanova, N., *et al*. "Quantifying power and energy fluctuations of photovoltaic systems". Energy Science & Engineering. 2022, vol. 10, n. 12. ISSN 2050-0505. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/362860810_Quantifying_power_and_energy_fluctuations_of_photovoltaic_systems
[16] Shafiullah, D., *et al*. "Grid integration challenges and solution strategies for solar PV systems: a review". IEEE Access. 2022, p. 52233-52257. ISSN 2169-3536. Disponible en: https://ieeexplore.ieee.org/stampPDF/getPDF.jsp?arnumber=9773105
[17] Esposito, M., *et al*. "Online diagnostics as a first step in the safe use of damaged photovoltaic modules". Sustainability. 2026, vol. 18, p. 1948. ISSN 2071-1050. Disponible en: https://www.mdpi.com/2071-1050/18/4/1948
[18] Pimpalkar, R., *et al*. "A comprehensive review on failure modes and effect analysis of solar photovoltaic system". Materials Today: Proceedings. 2023, vol. 77, pt. 3, p. 687-691. ISSN 2214-7853. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/366143016_A_comprehensive_review_on_failure_modes_and_effect_analysis_of_solar_photovoltaic_system
[19] Li, H., *et al*. "A failure analysis of floating offshore wind turbines using AHP-FMEA methodology". Ocean Eng. 2021, vol. 234. ISSN 1873-5258. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/352539422_A_Failure_Analysis_of_Floating_Offshore_Wind_Turbines_using_AHP-FMEA_Methodology
[20] Yazdi, M., *et al*. "Fault tree analysis improvements: A bibliometric analysis and literature review". Qual Reliab Engng Int. 2023, vol. 39, p. 1639–1659. ISSN 1099-1638. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/367272475_Fault_tree_analysis_improvements_A_bibliometric_analysis_and_literature_review
[21] Yang, X., *et al*. "Risk Analysis of Gasification Process of Nuclear Fuel Manufacturing Facilities Based on FTA". 28th International Conference on Nuclear Engineering. Vienna, Austria, 2021. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/367846296_Risk_Analysis_of_Gasification_Process_of_Nuclear_Fuel_Manufacturing_Facilities_Based_on_FTA
[22] Mi, J., *et al*. "An evidential network-based hierarchical method for system reliability analysis with common cause failures and mixed uncertainties". Reliab Eng Syst Saf. 2022, vol. 220. ISSN 1879-0836. Disponible en: https://www.semanticscholar.org/paper/An-evidential-network-based-hierarchical-method-for-Mi-Lu/9fac892621efe8ca20ee1dd913ab091f7267b352
[23] Salvador, B., *et al*. "A multi-criteria decision-making framework for site selection of offshore wind farms in Australia". Ocean Coast Manag. 2022, n. 224. ISSN 1873-524X. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/360588654_A_multi-criteria_decision-making_framework_for_site_selection_of_offshore_wind_farms_in_Australia
[24] Mohammadfam, I., *et al*. "Quantitative Risk Analysis on Rail Transportation of Hazardous Materials". Math Probl Eng. 2022. ISSN 1563-5147. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/359095034_Quantitative_Risk_Analysis_on_Rail_Transportation_of_Hazardous_Materials
[25] Li, H., *et al*. "A real-time inspection and opportunistic maintenance strategies for floating offshore wind turbines". Ocean Eng. 2022, vol. 256. ISSN 1873-5258. Disponible en: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029801822008149

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Antonio Torres Valle: https://orcid.org/0000-0001-9240-5977
Diseño y programación de software empleado en la investigación. Participó en revisión del estado del arte, diseño y validación de modelo teórico, recolección de datos, realización de aplicaciones, trabajo estadístico, análisis de los resultados, redacción del borrador del artículo, revisión crítica de su contenido y aprobación final.

Manuel Perdomo Ojeda: https://orcid.org/0000-0002-0869-0742
Participó en revisión del estado del arte, diseño y validación de modelo teórico, recolección de datos, realización de aplicaciones, trabajo estadístico, análisis de los resultados, redacción del borrador del artículo, revisión crítica de su contenido y aprobación final.

Lidia Lauren Elías Hardí: https://orcid.org/0000-0003-1826-9799
Participó en revisión del estado del arte, diseño y validación de modelo teórico, recolección de datos, realización de aplicaciones, análisis de los resultados, redacción del borrador del artículo, revisión crítica de su contenido y aprobación final.

Raul Armas Cardona: https://orcid.org/0009-0006-3616-2636
Participó en revisión del estado del arte, diseño y validación de modelo teórico, recolección de datos, realización de aplicaciones, análisis de los resultados, redacción del borrador del artículo, revisión crítica de su contenido y aprobación final.

Ana Teresa Carbonell Siam: https://orcid.org/0000-0001-6067-0709
Participó en revisión del estado del arte, diseño y validación de modelo teórico, recolección de datos, realización de aplicaciones, análisis de los resultados, redacción del borrador del artículo, revisión crítica de su contenido y aprobación final.