

MÉTODO BOWTIE PARA LA GESTIÓN INTEGRAL DE RIESGOS EN UN PARQUE SOLAR FOTOVOLTAICO

BOWTIE METHOD FOR INTEGRATED RISK MANAGEMENT IN A PHOTOVOLTAIC SOLAR PARK

Gabriel Montesino Figueroa¹  <https://orcid.org/0009-0003-6487-1198>

Jesús Salomón Llanes¹  <https://orcid.org/0000-0003-0273-0990>

Liuba Luisa Arteché Hidalgo¹  <https://orcid.org/0009-0004-3282-3500>

Víctor Marcos Santana Martínez¹  <https://orcid.org/0009-0004-0442-481X>

Martín Iríán Barrios Rivera¹  <https://orcid.org/0000-0002-9152-3709>

Iván Pérez Iñiguez¹  <https://orcid.org/0009-0000-9225-6449>

Maritza Mengana López¹  <https://orcid.org/0000-0002-8510-9974>

Mercedes Hernández Alguezabal¹ 

¹ Escuela Superior de Cuadros del Estado y del Gobierno (ESCEG), La Habana, Cuba

✉ gabriel@esceg.cu ✉ jsalomonllanes84@gmail.com

✉ liuba@esceg.cu ✉ vmarcos@esceg.cu ✉ martin@esceg.cu, ✉ ivan@esceg.cu,

✉ maritza@esceg.cu, ✉ mhernandez@esceg.cu

* Autor para la correspondencia: gabriel@esceg.cu

Clasificación JEL: H11, H75, O32

DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.18556410>

Recibido: 13/09/2025

Aceptado: 21/12/2025

Resumen

La expansión de la energía solar fotovoltaica en nuestro país, conlleva la necesidad de desarrollar metodologías de gestión de riesgos robustas y de fácil comprensión para garantizar la seguridad

MÉTODO BOWTIE PARA LA GESTIÓN INTEGRAL DE RIESGOS EN UN PARQUE SOLAR FOTOVOLTAICO

operacional, la protección de los activos y la continuidad de su empleo. Las metodologías tradicionales, a menudo basadas en listas de verificación o análisis puramente cuantitativos, pueden pasar por alto la interconexión entre causas, controles preventivos y mitigantes. Este artículo tiene como objetivo, aplicar el método Bowtie como herramienta gráfica y semicualitativa para la evaluación de riesgos, en un parque solar fotovoltaico, caso estudio el parque de la Escuela de Cuadros del Estado y del Gobierno, empleado como polígono de buenas prácticas en la preparación del personal. El análisis del método cualitativo, identifica y modela los riesgos críticos como incendio, descargas eléctricas, daños por fenómenos meteorológicos; con una visualización clara de las barreras de control, los puntos débiles en los sistemas de seguridad y facilita la comunicación del riesgo a todos los niveles de la organización. El método aplicado es una adición valiosa al arsenal de gestión de riesgos en el sector de las energías renovables, se adapta a plataformas digitales, lo que permite su integración con software de monitoreo y análisis de datos en tiempo real y la promoción de una cultura de seguridad proactiva.

Palabras clave: gestión de riesgos, método Bowtie, parque solar fotovoltaico, seguridad operacional, barreras de control.

Abstract

The expansion of photovoltaic solar energy in our country necessitates the development of robust and easily understood risk management methodologies to ensure operational safety, asset protection, and continuity of use. Traditional methodologies, often based on checklists or purely quantitative analyses, can overlook the interconnection between causes, preventive controls, and mitigating factors. This article aims to apply the Bowtie method as a graphical and semi-qualitative tool for risk assessment in a photovoltaic solar park, using the State and Government Cadre School Park as a case study. This park serves as a testing ground for best practices in personnel training. The qualitative method analysis identifies and models critical risks such as fire, electrical discharges, and damage from weather events, providing a clear visualization of control barriers and weaknesses in safety systems. It also facilitates risk communication at all levels of the organization. The applied method is a valuable addition to the risk management arsenal in the renewable energy sector. It adapts to digital platforms, allowing for integration with real-time data monitoring and analysis software and promoting a proactive safety culture.

Keywords: risk management, Bowtie method, photovoltaic solar park, operational safety, control barriers.

Introducción

La transición energética en Cuba ha posicionado a la energía solar fotovoltaica como una piedra angular. Sin embargo, la operación de parques solares fotovoltaicos (PSFV) no está exenta de riesgos significativos. Estos incluyen, entre otros, los eléctricos de alta y baja tensión, los incendios en paneles, inversores y cableado, estrés térmico para los componentes, daños por eventos climáticos extremos como granizo, viento, inundaciones y riesgos para la seguridad del personal durante las actividades de operación y mantenimiento.¹

MÉTODO BOWTIE PARA LA GESTIÓN INTEGRAL DE RIESGOS EN UN PARQUE SOLAR FOTOVOLTAICO

Los métodos de evaluación de riesgos convencionales, como el Análisis de Modo y Efecto de Fallos o el Análisis de Peligros y Riesgos Laborales, son útiles, pero a menudo se centran en aspectos específicos o carecen de una representación gráfica integral que conecte las causas de un evento con sus consecuencias y los controles asociados. Esta desconexión puede dificultar la toma de decisiones y la comunicación efectiva del riesgo.²⁻⁵

El método Bowtie, originado en la industria petrolera y gasífera, ha ganado reconocimiento por su capacidad para visualizar de manera intuitiva la trayectoria de un riesgo desde sus causas hasta sus consecuencias, colocando en el centro el "evento principal" no deseado.⁶ El diagrama resultante, que se asemeja a una corbata (Bowtie), permite mapear de un lado las "amenazas" (causas) y las "barreras preventivas", y del otro las "consecuencias" y las "barreras mitigantes".

El método Bowtie es una técnica de análisis de riesgos que combina los árboles de fallos y sucesos, enfoque que permite: identificar de forma sistemática los peligros; evaluar los riesgos asociados; establecer barreras preventivas y de mitigación y comunicar los riesgos de manera clara a todos los niveles de la organización, cuando existen caminos independientes y claros que tratan el fallo. Además, ayuda a comprender la relación entre causas, evento y consecuencias, involucra a diferentes áreas en la gestión del riesgo, el diagrama sirve como evidencia documental.⁷⁻⁹

El Bowtie se ha consolidado como un método eficaz en la gestión de riesgos industriales, incluye los sistemas de generación de energía como los parques solares fotovoltaicos (PSFV). De hecho, la aplicación del Bowtie a un PSFV, permite identificar fallos potenciales como cortocircuitos, sobrecalentamientos, fallos en inversores y otros asociados a la ocurrencia de eventos climáticos extremos y establece controles técnicos, operativos para evitar que estos sucesos se materialicen o escalen.

Entre las ventajas del método Bowtie que facilita su utilización en la gestión de riesgos y en la capacitación del personal podemos mencionar:⁷⁻¹⁰

- El enfoque integral (ambiental, social y tecnológico) para identificar, prevenir y mitigar riesgos en parques solares fotovoltaicos (PSFV).
- La disposición para entender los complejos árboles de fallos y de sucesos, al representar gráficamente los escenarios de riesgo, conectando los peligros con sus posibles consecuencias a través de un "evento central" y mostrando las barreras preventivas y de mitigación.
- La facilidad que brinda a la comunicación entre los distintos actores involucrados en la operación y mantenimiento de un PSFV. Al ser una herramienta visual, permite que tanto técnicos como personal administrativo comprendan fácilmente los riesgos y las medidas de control asociadas.
- La mejora en la cultura de seguridad del personal, al promover una toma de decisiones más informada, donde la interacción entre sistemas eléctricos, estructuras físicas y condiciones ambientales es constante, contar con una herramienta que clarifique los riesgos y sus interrelaciones es esencial para mantener la continuidad operativa y evitar incidentes graves.

El método Bowtie, permite integrar la gestión de riesgos con sistemas de cumplimiento normativo y auditoría. Al documentar de forma clara las barreras existentes y los responsables de su mantenimiento, facilita la evaluación periódica de la eficacia de los controles. En el caso de los PSFV, esto es especialmente relevante para cumplir con estándares de seguridad eléctrica y medioambiental. El método

MÉTODO BOWTIE PARA LA GESTIÓN INTEGRAL DE RIESGOS EN UN PARQUE SOLAR FOTOVOLTAICO

también se adapta bien a plataformas digitales, lo que permite su integración con software de monitoreo y análisis de datos en tiempo real, y su utilización en la capacitación del personal en la gestión eficiente de los PSFV.

El objetivo del artículo es aplicar el método de Bowtie en la gestión de riesgos de los parques solares fotovoltaicos (PSFV) y sus beneficios, con la utilización como caso de estudio del parque instalado en la Escuela Superior de Cuadros del Estado y del Gobierno, empleado como polígono de buenas prácticas en la preparación del personal, fundamentalmente para directivos.

Materiales y Métodos

Para concebir qué herramientas utilizar para el desarrollo de la investigación, se empleó el método dialéctico materialista con enfoque mixto, combinando métodos teóricos (análisis-síntesis, histórico-lógico) y empíricos (observación, consulta a expertos, método Delphi), como se muestra en la **Tabla 1**.

El trabajo adopta un enfoque de investigación-acción aplicado, desarrollado en el contexto de un parque solar fotovoltaico. El método cualitativo de análisis de riesgos Bowtie, se emplea para evaluar de manera integral los principales peligros asociados a la operación del PSFV, de 90 KW de capacidad, ubicado en la escuela Superior de Cuadros del Estado y del Gobierno.⁶ La instalación funciona con un doble propósito: como fuente de generación de energía renovable para la universidad y como un polígono de buenas prácticas para la investigación, la docencia y la divulgación.

El método Bowtie fue seleccionado por su capacidad para proporcionar una visualización clara y comprensible de la relación entre causas, controles y consecuencias de un evento de riesgo, facilitando la comunicación y la gestión de barreras de seguridad.¹⁰ Además, de diseñar, implementar y validar un marco de gestión de riesgos integral y educativo para el PSFV **Figura 1**.

MÉTODO BOWTIE PARA LA GESTIÓN INTEGRAL DE RIESGOS EN UN PARQUE SOLAR FOTOVOLTAICO



Figura 1. Secuencia de análisis del método Bowtie

Fuente: Metodología Bowtie, análisis y gestión de riesgos, 2022

Las fuentes de datos e Información utilizadas fueron los esquemas simplificados de funcionamiento, elaborados a partir de los planos de ingeniería consultados en los manuales de operación y mantenimiento de los PSFV instalados, las consultas realizadas a 10 expertos y la revisión de diferentes fuentes relacionadas con el tema.¹¹⁻¹⁷

Para la construcción y documentación de los diagramas Bowtie, se utilizó el código ARCONWIN, software para estudios de confiabilidad y seguridad en plantas industriales y otras instalaciones de alto riesgo, que realiza los principales análisis cualitativos del método. El uso del software especializado mejora la consistencia y el detalle de los diagramas, lo que permite una gestión más eficaz de la información.¹⁸

El proceso de implementación del método Bowtie se desarrollará en las siguientes etapas, siguiendo el marco propuesto por,⁶⁻¹⁰ tal como se explica a continuación:

- 1. Identificación de Peligros y Eventos Principales.** Se identifican los peligros, aquellos elementos o puntos de partida con el potencial de causar daños a la instalación, las personas, el medio ambiente y la producción (materia prima del riesgo).^{8,19,20,21} Se determina el evento tope, posteriormente se elabora la lista consensuada de amenazas, barreras y consecuencias que influyen en la interrupción total o parcial de generación eléctrica, se dividen en dos grupos, los causados por fallos en componentes, sistemas críticos y los provocados por eventos climáticos extremos.²²⁻²⁵
- 2. Construcción del Diagrama Bowtie.** Para cada evento principal seleccionado, se construye un diagrama Bowtie se seleccionan los pasos siguientes:⁶⁻¹⁰
 - a) **Identificación y codificación de las amenazas:** Se listan todas las causas potenciales (amenazas) que podrían conducir al evento principal.

MÉTODO BOWTIE PARA LA GESTIÓN INTEGRAL DE RIESGOS EN UN PARQUE SOLAR FOTOVOLTAICO

- b) Identificación y codificación de las consecuencias: Se definen los impactos negativos potenciales resultantes de la materialización del evento principal.
- c) Definición y codificación de las barreras preventivas: Para cada amenaza, se identifican las barreras (controles) existentes destinadas a prevenir que la amenaza desencadene el evento principal.⁵
- d) Definición y codificación de las barreras de mitigación: Para cada consecuencia, se identifican las barreras destinadas a reducir su impacto, en caso de que el evento principal ocurriera.
- e) Establecer prioridades para la gestión de riesgos del PSFV: Este paso es crucial para evaluar la resiliencia del sistema ante los peligros y sus consecuencias. Se realiza una propuesta de acciones a realizar por la entidad, para ello, se utilizan las evidencias, basados en los datos históricos, existentes en los planes de prevención de riesgos y reducción de desastres.

3. Validación y Verificación. Los diagramas Bowtie preliminares y las acciones a incluir en Plan de reducción de riesgos fueron presentados y revisados con un grupo de expertos. La información se analiza mediante el trabajo en equipos de los miembros del Consejo de Dirección y otros expertos, con un conjunto de estructurado de preguntas o declaraciones identifican según nivel de complejidad, costos y tiempo de implementación, así como las acciones inmediatas.^{8,11}

Resultados y discusión

Los principales peligros asociados a la explotación de un PSFV son: eléctricos, sustancias toxicas, ambientales, errores humanos y operacionales, que constituyen el punto de partida para que ocurra el evento tope seleccionado, la interrupción total o parcial de generación eléctrica por fallos en componentes, sistemas críticos y eventos climáticos extremos.¹⁴⁻¹⁶

La aplicación del método Bowtie permitió sistematizar los principales riesgos operativos del Parque Solar Fotovoltaico (PSFV). El diagrama resultante revela una estructura asimétrica, en el lado izquierdo (causas) **Figura 1**, se representan las amenazas más críticas las que se originan en fallos técnicos ocurridos en paneles, estructuras, inversores, sistema SCADA, circuitos eléctricos y protecciones de corriente directa y alterna y los sistemas de puesta a tierra, se identifican seis vías de fallo.^{12,13}

Entre las amenazas también se encuentran los eventos climáticos extremos (huracanes, tormentas eléctricas, intensas lluvias, altas temperaturas, caída de granizo, altas concentraciones de polvo, se identifican seis vías de fallo.^{14,15,16}

En la **Figura 2**, están representadas las barreras preventivas, para estas causas son predominantemente: los mantenimientos, predictivo o planificados, el diagnóstico con equipos o sin estos, el diseño y montaje de instalaciones seguras y redundantes, el monitoreo meteorológico avanzado, la ubicación en lugares adecuados, el uso de sistemas de monitoreo redundante.¹⁴⁻¹⁶

En el lado derecho (consecuencias) **Figura 3**, el impacto más severo se asocia con las pérdidas en la producción energética, los daños estructurales o colapso parcial o total de las estructuras y paneles, los riesgos de incendio o electrocución del personal.

MÉTODO BOWTIE PARA LA GESTIÓN INTEGRAL DE RIESGOS EN UN PARQUE SOLAR FOTOVOLTAICO

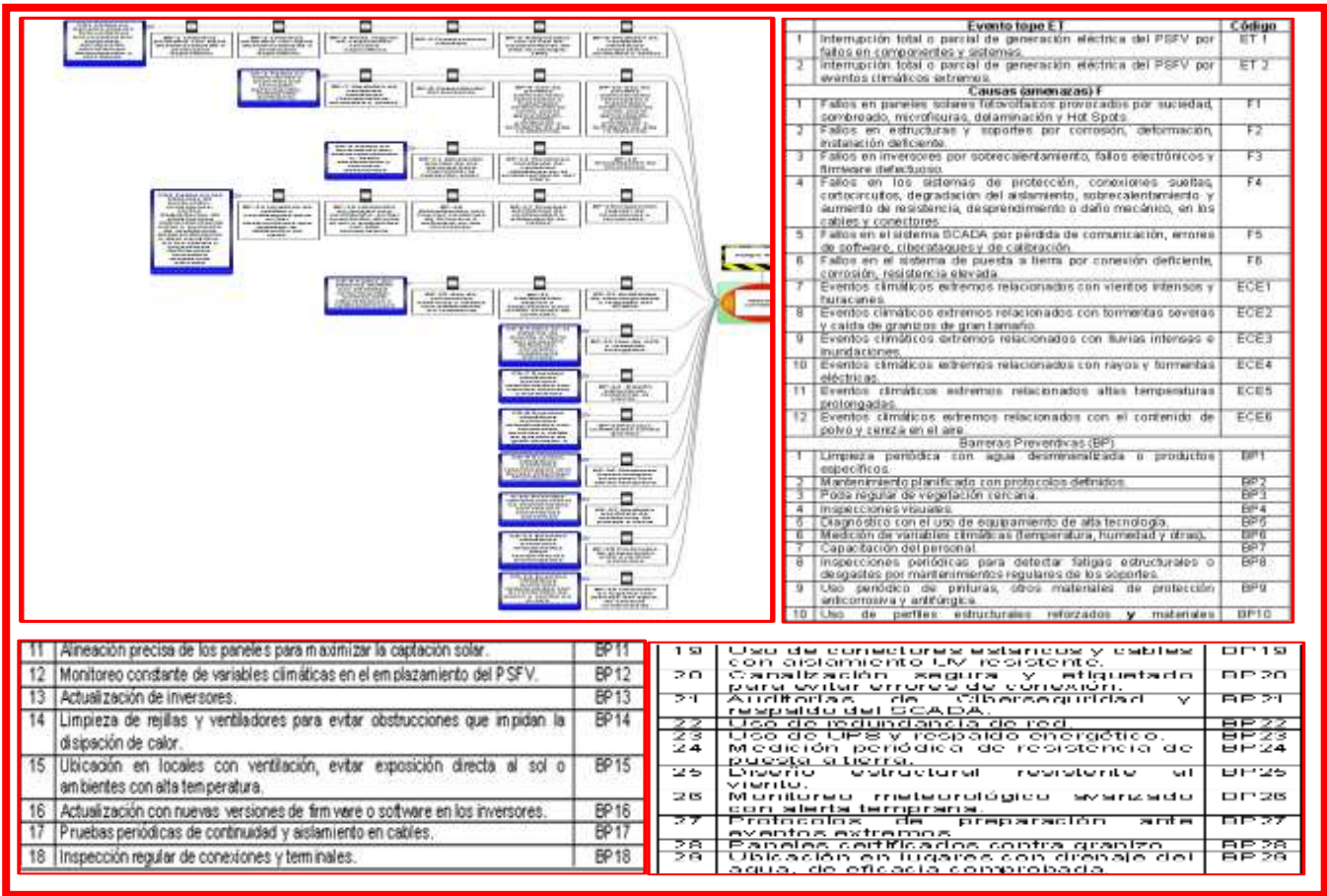


Figura 2. Lado izquierdo del Bowtie (amenazas, barreras preventivas)

Fuente: Elaboración propia

MÉTODO BOWTIE PARA LA GESTIÓN INTEGRAL DE RIESGOS EN UN PARQUE SOLAR FOTOVOLTAICO

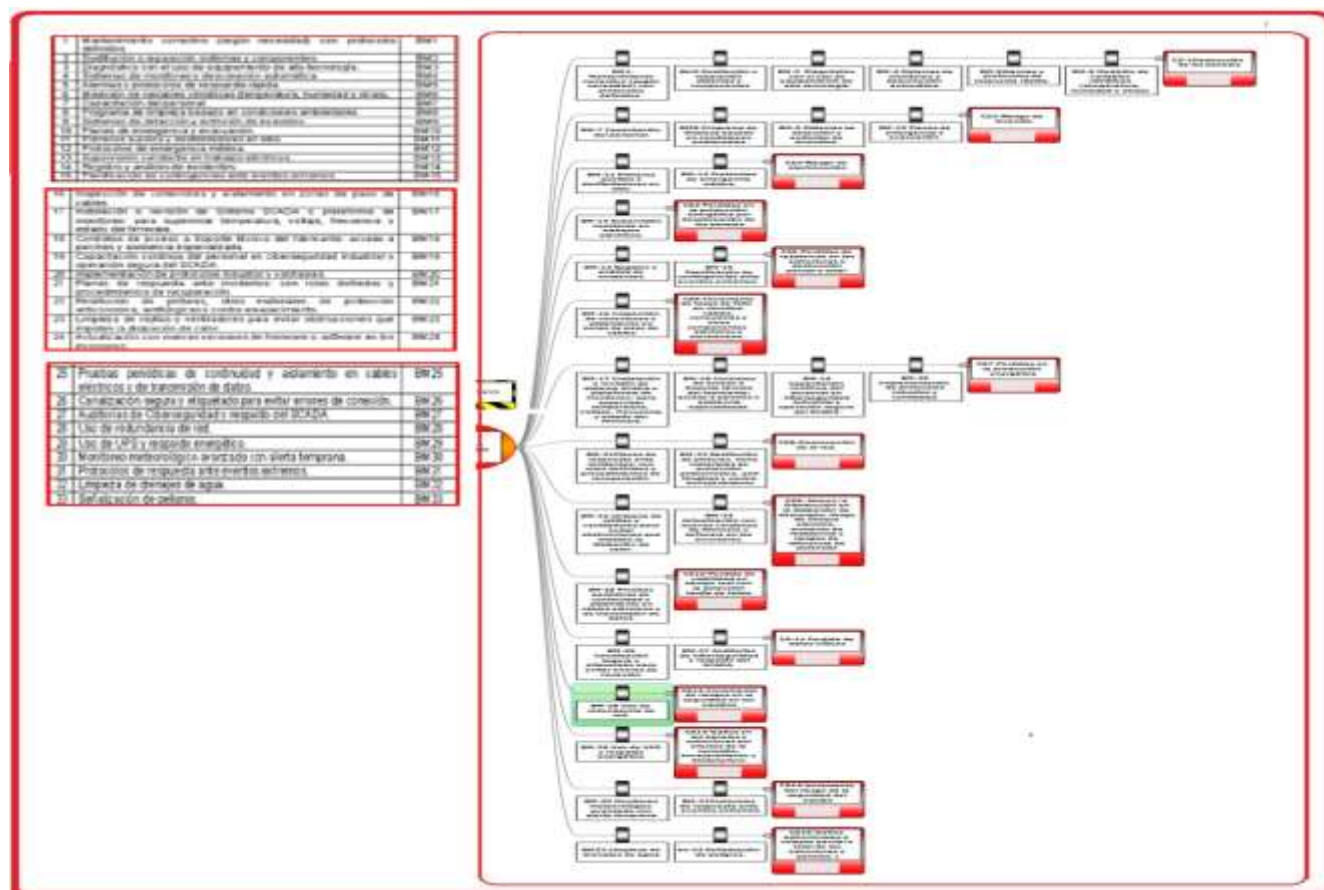


Figura 3. Lado derecho del Bowtie (consecuencias, barreras de mitigación)

Fuente: Elaboración propia

Las barreras de mitigación de la **Figura 3** incluyen mantenimientos correctivos (según necesidad) con protocolos definidos, la reparación o sustitución de componentes dañados, las alarmas y protocolos de respuesta rápida ante la ocurrencia de eventos no deseados, el uso de redundancia de red, el empleo de UPS y respaldo energético, el monitoreo meteorológico avanzado con alerta temprana y los protocolos de respuesta ante eventos extremos. Otro elemento de gran peso es la capacitación constante del personal.

El análisis de la **Figura 2**, reveló que la efectividad del sistema de gestión de riesgos depende fundamentalmente de la robustez e interdependencia de sus barreras, evidencia que la mayor resiliencia del PSFV no reside en barreras individuales, sino en la fortaleza del sistema. La falla de una barrera preventiva, como la limpieza periódica, debe ser capturada por otra, como la inspección visual o la monitorización del rendimiento por grupos de paneles o de la instalación con el sistema Scada.^{12,13}

Esta estrategia de capas múltiples de defensa, concepto central en la gestión de riesgos de alta confiabilidad, es la que garantiza la sostenibilidad operativa, económica y de seguridad de la instalación.^{1,10-13}

MÉTODO BOWTIE PARA LA GESTIÓN INTEGRAL DE RIESGOS EN UN PARQUE SOLAR FOTOVOLTAICO

En la **Tabla 1**, se resumen los principales eventos identificados en el grafico del Bowtie e incluye los códigos utilizados para su identificación.

Tabla 1. Codificación de los eventos, amenazas, barreras y consecuencias del PSFV

	Evento tope ET	Código
1	Interrupción total o parcial de generación eléctrica del PSFV por fallos en componentes, sistemas y eventos climáticos extremos.	ET 1
Causas (amenazas) F		
1	Fallos en paneles solares fotovoltaicos provocados por suciedad, sombreado, microfisuras, delaminación y Hot Spots.	F1
2	Fallos en estructuras y soportes por corrosión, deformación, instalación deficiente.	F2
3	Fallos en inversores por sobrecalentamiento, fallos electrónicos y firmware defectuoso.	F3
4	Fallos en los sistemas de protección, conexiones sueltas, cortocircuitos, degradación del aislamiento, sobrecalentamiento y aumento de resistencia, desprendimiento o daño mecánico, en los cables y conectores	F4
5	Fallos en el sistema SCADA por pérdida de comunicación, errores de software, ciberataques y de calibración.	F5
6	Fallos en el sistema de puesta a tierra por conexión deficiente, corrosión, resistencia elevada.	F6
7	Eventos climáticos extremos relacionados con vientos intensos y huracanes.	ECE1
8	Eventos climáticos extremos relacionados con tormentas severas y caída de granizos de gran tamaño.	ECE2
9	Eventos climáticos extremos relacionados con lluvias intensas e inundaciones.	ECE3
10	Eventos climáticos extremos relacionados con rayos y tormentas eléctricas.	ECE4
11	Eventos climáticos extremos relacionados altas temperaturas prolongadas.	ECE5
12	Eventos climáticos extremos relacionados con el contenido de polvo y ceniza en el aire.	ECE6
Barreras Preventivas (BP)		
1	Limpieza periódica con agua desmineralizada o productos específicos.	BP1
2	Mantenimiento planificado con protocolos definidos.	BP2

MÉTODO BOWTIE PARA LA GESTIÓN INTEGRAL DE RIESGOS EN UN PARQUE SOLAR FOTOVOLTAICO

3	Poda regular de vegetación cercana.	BP3
4	Inspecciones visuales.	BP4
5	Diagnóstico con el uso de equipamiento de alta tecnología.	BP5
6	Medición de variables climáticas (temperatura, humedad y otras).	BP6
7	Capacitación del personal.	BP7
8	Inspecciones periódicas para detectar fatigas estructurales o desgastes por mantenimientos regulares de los soportes.	BP8
9	Uso periódico de pinturas, otros materiales de protección anticorrosiva y antifúngica.	BP9
10	Uso de perfiles estructurales reforzados y materiales anticorrosivos como acero galvanizado, aluminio anodizado y tornillería de alta resistencia.	BP10
11	Alineación precisa de los paneles para maximizar la captación solar.	BP11
12	Monitoreo constante de variables climáticas en el emplazamiento del PSFV.	BP12
13	Actualización de inversores.	BP13
14	Limpieza de rejillas y ventiladores para evitar obstrucciones que impidan la disipación de calor.	BP14
15	Ubicación en locales con ventilación, evitar exposición directa al sol o ambientes con alta temperatura.	BP15
16	Actualización con nuevas versiones de firmware o software en los inversores.	BP16
17	Pruebas periódicas de continuidad y aislamiento en cables.	BP17
18	Inspección regular de conexiones y terminales.	BP18
19	Uso de conectores estancos y cables con aislamiento UV resistente.	BP19
20	Canalización segura y etiquetado para evitar errores de conexión.	BP20
21	Auditorías de ciberseguridad y respaldo del SCADA.	BP21
22	Uso de redundancia de red.	BP22
23	Uso de UPS y respaldo energético.	BP23
24	Medición periódica de resistencia de puesta a tierra.	BP24
25	Diseño estructural resistente al viento.	BP25
26	Monitoreo meteorológico avanzado con alerta temprana.	BP26

MÉTODO BOWTIE PARA LA GESTIÓN INTEGRAL DE RIESGOS EN UN PARQUE SOLAR FOTOVOLTAICO

27	Protocolos de preparación ante eventos extremos.	BP27
28	Paneles certificados contra granizo.	BP28
29	Ubicación en lugares con drenaje del agua, de eficacia comprobada.	BP29
Consecuencias (Cs)		
1	Destrucción de paneles.	Cs1
2	Riesgo de incendio	Cs2
3	Riesgo de electrocución.	Cs3
4	Perdidas en la producción energética por desalineación de los paneles	Cs4
5	Perdida de resistencia en las estructuras y destrucción parcial o total	Cs5
6	Perdidas en la producción energética.	Cs6
7	Incremento de las tasas de fallo en circuitos, cables, conexiones y otros componentes eléctricos y electrónicos.	Cs7
8	Desconexión de la red.	Cs8
9	Disminución en la disipación de descargas; riesgo de choque eléctrico, aumento de resistencia y riesgos de diferencia de potencial	Cs9
10	Perdida de visibilidad en tiempo real con la detección tardía de fallos.	Cs10
11	Perdida de datos críticos	Cs11
12	Incrementos de riesgos en la seguridad de los equipos.	Cs12
13	Daños en los paneles y estructuras por efectos de la corrosión, conexiones deficientes y resistencias elevadas	Cs13
14	Incrementos de riesgos en la seguridad de los equipos.	Cs14
15	Daños estructurales o colapso parcial o total de las estructuras y paneles.	Cs15
Barreras de mitigación (BM)		
1	Mantenimiento correctivo (según necesidad) con protocolos definidos.	BM1
2	Sustitución o reparación sistemas y componentes.	BM2
3	Diagnóstico con el uso de equipamiento de alta tecnología.	BM3
4	Sistemas de monitoreo y desconexión automática.	BM4
5	Alarmas y protocolos de respuesta rápida.	BM5

MÉTODO BOWTIE PARA LA GESTIÓN INTEGRAL DE RIESGOS EN UN PARQUE SOLAR FOTOVOLTAICO

6	Medición de variables climáticas (temperatura, humedad y otras).	BM6
7	Capacitación del personal.	BM7
8	Programa de limpieza basado en condiciones ambientales.	BM8
9	Sistemas de detección y extinción de incendios.	BM9
10	Planes de emergencia y evacuación.	BM10
11	Primeros auxilios y desfibriladores en sitio.	BM11
12	Protocolos de emergencia médica.	BM12
13	Supervisión constante en trabajos eléctricos.	BM13
14	Registro y análisis de incidentes.	BM14
15	Planificación de contingencias ante eventos extremos.	BM15
16	Inspección de conexiones y aislamiento en zonas de paso de cables.	BM16
17	Instalación o revisión de Sistema SCADA o plataforma de monitoreo: para supervisar temperatura, voltaje, frecuencia y estado del firmware.	BM17
18	Contratos de acceso a Soporte técnico del fabricante: acceso a parches y asistencia especializada.	BM18
19	Capacitación continua del personal en ciberseguridad industrial y operación segura del SCADA.	BM19
20	Implementación de protocolos robustos y confiables.	BM20
21	Planes de respuesta ante incidentes: con roles definidos y procedimientos de recuperación.	BM21
22	Restitución de pinturas, otros materiales de protección anticorrosiva, antifúngicas y contra envejecimiento.	BM22
23	Limpieza de rejillas y ventiladores para evitar obstrucciones que impidan la disipación de calor.	BM23
24	Actualización con nuevas versiones de firmware o software en los inversores.	BM24
25	Pruebas periódicas de continuidad y aislamiento en cables eléctricos y de transmisión de datos.	BM25
26	Canalización segura y etiquetado para evitar errores de conexión.	BM26
27	Auditorías de ciberseguridad y respaldo del SCADA.	BM27
28	Uso de redundancia de red.	BM28

MÉTODO BOWTIE PARA LA GESTIÓN INTEGRAL DE RIESGOS EN UN PARQUE SOLAR FOTOVOLTAICO

29	Uso de UPS y respaldo energético.	BM29
30	Monitoreo meteorológico avanzado con alerta temprana.	BM30
31	Protocolos de respuesta ante eventos extremos.	BM31
32	Limpieza de drenajes de agua.	BM32
33	Señalización de peligros.	BM33

Fuente: Elaboración propia

La **Tabla 2** presenta un grupo de acciones inmediatas a realizar por la entidad para fortalecer las barreras preventivas y de mitigación de las amenazas y consecuencias de ocurrencia del evento tope en el PSFV según orden de prioridad y la validación por 10 expertos sobre las barreras necesarias en la gestión de riesgos en el PSFV de la institución. Como resultado de la consulta y su identificación por el método Bowtie, se identificaron las siguientes barreras preventivas técnicas, humanas u organizativas y se proponen acciones a realizar en el fortalecimiento de las mismas.

Tabla 2. Acciones a realizar para fortalecer las barreras preventivas y de mitigación identificadas en la gestión de riesgos en PSFV

No	Acciones preventivas inmediatas	Clasificación de Barreras	Tipo de acciones
1	Señalización de los peligros.	Preventivas Mitigación	Técnicas
2	Limitar el acceso de personas ajenas al PSFV, mediante barreras físicas.	Preventivas	Técnicas
3	Elaborar el Plan de Mantenimiento técnico del PSFV.	Preventivas	Organizativas
4	Limpieza de desagües y poda de la vegetación.	Preventivas Mitigación	Técnicas
5	Incrementar los puntos contraincendios del PSFV y realizar estudios de factibilidad para instalar sistemas para detectar y apagar incendios.	Preventivas	Técnicas - organizativas
6	Elaborar e implementar protocolos de actuación, ante afectaciones al personal por incendios o descargas eléctricas, completar equipos y medicamentos para primeros auxilios.	Preventivas Mitigación	Organizativas - humanas
7	Realizar inspecciones visuales planificadas.	Preventivas Mitigación	Técnicas

MÉTODO BOWTIE PARA LA GESTIÓN INTEGRAL DE RIESGOS EN UN PARQUE SOLAR FOTOVOLTAICO

8	Revisión del sistema de puesta a tierra.	Preventivas Mitigación	Técnicas
9	Registro y análisis de incidentes.	Preventivas	Organizativas
10	Elaborar e implementar protocolos de actuación ante la ocurrencia de eventos extremos (incendios, electrocución de personas y climáticos).	Preventivas Mitigación	Organizativas
11	Capacitación del personal, según protocolos de actuación ante la ocurrencia de eventos extremos.	Preventivas Mitigación	Humanas
12	Instalar y realizar auditorías del sistema SCADA, para monitorear el funcionamiento del PSFV.	Preventivas Mitigación	Físicas
13	Realizar estudios de factibilidad para el uso de UPS y respaldo energético e implementar su uso.	Preventivas Mitigación	Organizativas
14	Elaborar contratos para realizar asistencia especializada durante la explotación del PSFV.	Preventivas	Organizativas
15	Realizar estudios de factibilidad para el uso de sistemas de monitoreo meteorológico avanzado con alerta temprana y su implementación	Preventivas Mitigación	Organizativas
16	Mantenimiento correctivo (según necesidad) con protocolos definidos.	Preventivas	Técnicas
17	Elaborar la base material de estudio, para convertir el PSFV en un polígono de buenas prácticas	Preventivas	Organizativas

Fuente: Elaboración propia

Conclusiones

El trabajo muestra las amplias posibilidades y bondades que brinda el uso del método Bowtie, aplicado a la gestión eficiente de un parque solar fotovoltaico. La realización del estudio de caso, en el PSFV ubicado en la Escuela Superior de Cuadros del Estado y del Gobierno, permite fortalecer los planes de reducción de riesgo de la entidad, la identificación de las barreras preventivas y de mitigación, por nivel de prioridad, que aseguren el uso eficiente de la instalación.

MÉTODO BOWTIE PARA LA GESTIÓN INTEGRAL DE RIESGOS EN UN PARQUE SOLAR FOTOVOLTAICO

La realización del estudio contribuye al empleo de los PSFV como polígonos de buenas prácticas, su aplicación integra en una visión única los problemas y soluciones existentes durante el uso de la energía fotovoltaica, el alcance de formas interactivas de trabajo, que contribuyen decisivamente en el proceso de toma de decisiones, lo cual facilita la preparación de los especialistas y directivos en la gestión de estas instalaciones. La investigación contribuye al desarrollo de los futuros Monitores de Riesgo, sobre la gestión de los PSFV.

Referencias bibliográficas

1. International Energy Agency (IEA). Trends in Photovoltaic Applications 2023. IEA PVPS T1-46:2023; 2023. [Consultado 2 septiembre 2025]. Disponible en: https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2023/10/PVPS_Trends_Report_2023_WEB.pdf
2. OFICINA NACIONAL DE NORMALIZACIÓN (ONN) (2015b): NC- ISO 31010. Gestión del riesgo-Técnicas de apreciación del riesgo, La Habana. [Consultado 2 septiembre 2025]. Disponible en: <http://biblioteca.ucf.edu.cu/normas-cubanas/calidad/NC-ISO%2031000%20Gestion%20del%20riesgo%20-%20Principios.pdf>
3. Sonawane PR, Bhandari S, Patil RB, Al-Dahidi S. Reliability and Criticality Analysis of a Large-Scale Solar Photovoltaic System Using Fault Tree Analysis Approach. *Sustainability* [Internet]. 2023;15:4609 [Consultado 2 septiembre 2025]. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/5/4609>
4. Pinto G, Lacasta AM, Navarro A, et al. Failure mode and effect analysis of photovoltaic systems for quantifying the risk of fire. *Renewable Energy Focus*[Internet]. 2022; 41:186-197 [Consultado 2 septiembre 2025]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/277884547_Failure_mode_and_effect_analysis_for_photovoltaic_systems .
5. Chiacchio F, D'Urso D, Compagno L, et al. A FMECA and TLC integrated approach for the maintenance management of industrial photovoltaic plants. *Measurement*[Internet].2019;133:241-250 [Consultado 2 septiembre 2025]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.10.019>.
6. de Ruijter A, Guldenmund F. The Bowtie method: A review. *Saf Sci* [Internet]. 2016; 88:211-218 [Consultado 3 septiembre 2025]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2016.03.001>.
7. IEC 31010: 2019.Risk management – Risk assessment techniques. International Electrotechnical Commission [Internet].2019. [Consultado 5 septiembre 2025] Disponible en: <https://mdcpp.com/doc/materialDownload/IEC%2031010-2019%20EN.pdf>
8. BowtiePro. (s.f.). *Metodología Bowtie*. PDF descargableBowtie Pro[Internet]. [Consultado 5 septiembre 2025] Disponible en: <https://downloads.bowtiepro.com/es-BowtieMethodology.pdf>
9. Prysmex. Análisis BowTie: sus aportes a la gestión de riesgos. *Prysmex* [Internet]. 2023. [Consultado 5 septiembre 2025] Disponible en: <https://www.prysmex.com/>
10. EALDE Business School. (s.f.). *Análisis BowTie: qué es y cómo aplicarlo en gestión de riesgos*. *EALDE Business School* [Consultado 6 septiembre 2025] Disponible en: <https://www.ealde.es/bow-tie-analisis-de-riesgos/>
11. Molina González S. Metodología Bowtie: análisis y gestión de riesgos. [Internet]. 2022. [Consultado 6 septiembre 2025] Disponible en: <https://posipedia.com.co/wp->

MÉTODO BOWTIE PARA LA GESTIÓN INTEGRAL DE RIESGOS EN UN PARQUE SOLAR FOTOVOLTAICO

-
- content/uploads/2022/07/08.-PRESENTACION%CC%81N-METODOLOGIA%CC%81A-BOWTIE-ANA%CC%81LISIS-Y-GESTION%CC%81N-DE-RIESGOS.pdf
12. Muñoz Arjona, A. Aplicación de la herramienta BOW-TIE para la identificación y gestión de los riesgos en instalaciones de procesos. [Internet]. 2021[Tesis de Maestría]. Universidad de Sevilla, Sevilla. [Consultado 1 septiembre 2025]. Disponible en: <https://idus.us.es/server/api/core/bitstreams/eca5efa5-3ea9-46ff-9d95-813af3d87f9a/content>
 13. OCAMPO Cristian D, TAMAYO Johnny, CASTANO Harold M. Gestión del Riesgo en la Implementación de Sistemas Fotovoltaicos en Proyectos de Extracción de Oro en Colombia a partir del Proceso de Análisis Jerárquico (AHP). *Inf. tecnol.* [Internet]. 2019;30(3):127-136. [Consultado 26 septiembre 2025]. Disponible en: <https://www.scielo.cl/pdf/infotec/v30n3/0718-0764-infotec-30-03-00127.pdf>
 14. Martínez Jiménez L. Análisis de riesgos en instalaciones fotovoltaicas de autoconsumo en cubiertas industriales.[Internet]. 2023.[Tesis de Grado]. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y Energía. Universidad Politécnica de Madrid, España. [Consultado 8 septiembre 2025] Disponible en: https://oa.upm.es/75725/1/TFG_Lorenzo_Martinez_Jimenez.pdf
 15. HM Castaño Cardenas. Metodología para diagnosticar el riesgo en la implementación de sistemas fotovoltaicos. [Internet]. [Tesis de maestría]. Universidad Nacional de Colombia. 2018. [Consultado 8 septiembre 2025] Disponible en: <https://bfrrepositorio.unal.edu.co/server/api/core/bitstreams/96d379ad-aafd-4ec2-9474-97a99c54a3d1/content>
 16. Gómez-Ramírez, G. A., & Bolaños-Jiménez, C. A. Metodología para la implementación de sistemas fotovoltaicos con almacenamiento para pequeñas industrias. *Revista Tecnología En Marcha* [Internet]. 2022;36(1):18–32. Disponible en: <https://doi.org/10.18845/tm.v36i1.5843>
 17. Salomón J. Manual de ARCON. La Habana; Servicio de Publicaciones, ISCTN; 2015.
 18. López JCR, García MVR, et al. Impact of hail storms on PV module performance and durability: Field data analysis and modeling. *Sol Energy*. [Internet]. 2023;257:455-59. [Consultado 10 septiembre 2025]. Disponible en: https://www.politesi.polimi.it/retrieve/d61fdf27-8b89-42b9-9412-6d74ed54b628/2025_04_Ballerio.pdf
 19. Rodríguez LH, Zhang P, et al. Structural failure analysis of rooftop PV arrays under extreme wind loads: CFD simulations and full-scale testing. *J Wind Eng Ind Aerodyn*. [Internet]. 2022;228:105102. [Consultado 10 septiembre 2025]. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2022.105102>.
 20. Fluixá-Sanmartín, J., Altarejos-García, L., Morales-Torres, A., and Escuder-Bueno, I.: Review article: Climate change impacts on dam safety, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* [Internet]. 2018; 18: 2471–2488. [Consultado 10 septiembre 2025]. Disponible en: <https://doi.org/10.5194/nhess-18-2471-2018>
 21. Sadegh M, Rosenberg DE, Welling S, Waniellstaedt T, Fang X. Overtopping breach of levees and embankment dams due to snowmelt flood: a case study of the failure of the Sandy River levees. *J Hydrol Eng*. [Internet]. 2010;15(11):871-83. [Consultado 10 septiembre 2025]. Disponible en: doi: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000264.
 22. Viseu MI, de Almeida AB, Rita M. Impact of climate change on the failure of masonry dam spillways. *Water*. 2022;14(3): 317. [Consultado 11 septiembre 2025]. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/w14030317>
-

MÉTODO BOWTIE PARA LA GESTIÓN INTEGRAL DE RIESGOS EN UN PARQUE SOLAR FOTOVOLTAICO

23. Pinto G, Santoni P, Krueger S, et al. Fire risk assessment in photovoltaic plants: A case study in southern Italy. Fire Safety Journal [Internet]. 2021; 120:103-115. [Consultado 11 septiembre 2025]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2020.103115>
24. Behrani P, Nizam Isha A SH, Salleh R, Al-Baraa Abdulrahman Al Mekhlafi, (2023), "Determination of Occupational Health and Safety Risks in Solar Energy" in International Conference on Environmental, Social and Governance, KnE Social Sciences, [Internet]. 2023;142–150. [Consultado 11 septiembre 2025] Disponible en: <https://doi.org/10.18502/kss.v8i20.14599>
25. Almeida R, Santos J, Tamayo J. Risks in large-scale photovoltaic installations: a review and taxonomy. Renewable and Sustainable Energy Reviews [Internet]. 2019; 102:30-42. [Consultado 11 septiembre 2025] Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.11.030>.
26. Ali Omar Ghaleb Al-Aqqad 1 and Jozsef Menyhart. Solar panels problem after end-of-life and waste management (SWOT analysis for the global directives of PV's waste management). International Review of Applied Sciences and Engineering 14 [Internet]. 2023; 2: 220–229 [Consultado 11 septiembre 2025] Disponible en: <https://akjournals.com/view/journals/1848/14/2/article-p220.xml>

Conflictos de intereses:

Los autores refieren no presentar conflictos de intereses.

Contribución de los autores:

- Gabriel Montesino Figueroa: Conceptualización, Análisis formal, Investigación, Metodología, Escritura, Borrador original, Redacción: revisión y edición.
- Jesús Salomón Llanes: Conceptualización, Análisis formal, Investigación, Metodología, Redacción: revisión y edición.
- Liuba Luisa Arteché Hidalgo: Análisis formal, Investigación, Metodología, Escritura, Borrador original, Redacción: revisión y edición.
- Víctor Marcos Santana Martínez: Análisis formal, Investigación, Metodología
- Martín Irían Barrios Rivera: Análisis formal, Investigación, Escritura, Borrador original, Redacción: revisión y edición.
- Iván Pérez Iñiguez: Análisis formal Metodología, Escritura, Borrador original, Redacción: revisión y edición.
- Mercedes Hernández Alguézabal: Escritura, Borrador original, Redacción: revisión y edición.
- Maritza Mengana López: Redacción: revisión y edición.