

VUNERABILIDAD Y RIESGO DE LOS SISTEMAS ENERGÉTICOS DE AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE ANTE LAS AMENAZAS DEL CAMBIO CLIMÁTICO.

1. INTRODUCCIÓN

A partir de la alerta que han dado los expertos sobre la necesidad imperiosa de mantener el calentamiento por debajo de los 2.0 °C para evitar consecuencias catastróficas, que amenacen la sostenibilidad de las próximas generaciones, la cual se puso de manifiesto durante la COP 21 del año 2015 y que llevó a la firma del Acuerdo de París en el año 2016, todos los países suscriptores de este acuerdo, se comprometieron a emprender o acelerar sus políticas de descarbonización de su economías, de manera de contribuir a la meta global de llegar al año 2050 con emisiones nulas de carbono a la atmósfera, iniciativa conocida como NET ZERO 2050.

En el marco de este Acuerdo, cada uno de los países suscriptores, procedieron a elaborar sus NDCs estableciendo metas y compromisos para un desarrollo más limpio y sostenible a mediano y largo plazo y a reorientar sus políticas públicas hacia el cumplimiento de dichas metas. Los países de ALC no fueron la excepción, ejecutando acciones en este sentido en los diferentes sectores socioeconómicos. Específicamente en el sector energético, se ha ido impulsando el mayor uso de fuentes renovables y el incremento de la tasa de eficiencia energética.

Si bien esta postura de la región es coherente con la coyuntura mundial, el impacto de sus acciones respecto al objetivo global de mitigación del cambio climático es relativamente bajo, tomando en cuenta que toda la región de ALC, contribuye solamente con alrededor del 8 % de las emisiones totales de CO₂e del planeta y su sector energético con apenas un 3.5 %. Sin embargo, pese a esta baja responsabilidad en el calentamiento global, sus sistemas energéticos nacionales pueden resultar muy sensibles a los efectos del cambio climático, existiendo riesgos tanto de pérdidas de productividad como de estabilidad e integridad de la infraestructura.

En este contexto, los países miembros de OLADE mediante diferentes decisiones ministeriales, han instruido a esta Organización para que gestione y ejecute estudios relacionados con adaptación del sector energético al cambio climático. Bajo esta directiva, OLADE, con el apoyo financiero de sus cooperantes multilaterales ha llevado a cabo o ha participado en proyectos tales como: “Vulnerabilidad al cambio climático de los sistemas de producción hidroeléctrica en Centroamérica y sus opciones de adaptación”, “Vulnerabilidad al cambio climático y medidas de adaptación de sistemas hidroeléctricos en países andinos”, “Evaluación del impacto del cambio climático en la generación eléctrica de países del Cono Sur”, y el estudio “Incidencia del cambio climático en la planificación energética: screening para la evaluación global de la vulnerabilidad y los riesgos climáticos del sistema energético de América Latina y el Caribe – Screen-ALC”, siendo un resumen de la metodología y los resultados de este último, el tema a ser abordado en el presente artículo.

2. DATOS GENERALES DEL PROYECTO SCREEN- ALC

2.1. Objetivo

Incrementar la resiliencia del sector energético de América Latina y El Caribe frente al cambio climático, mediante el análisis de los riesgos y la vulnerabilidad de la infraestructura, y la

determinación de los cambios que deben implementarse en la planificación y operación de los sistemas, permitiendo establecer prioridades diferenciadas en la definición de planes energéticos y estrategias de adaptación y resiliencia.

2.2. Entidad cooperante

El estudio se llevó a cabo gracias al financiamiento de la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo AECID, en el marco del Programa ARAUCLIMA.

2.3. Países participantes:

En el proyecto participaron activamente 12 países de la región de ALC miembros de OLADE: Argentina, Bolivia, Brasil, Chile, Ecuador, El Salvador, Honduras, Panamá, Paraguay, Perú, República Dominicana y Uruguay.

2.4. Asistencia Técnica

Para la ejecución del proyecto, OLADE contó con la asistencia técnica de la Fundación Tecnalia, una firma española especializada en ciencia y tecnología.

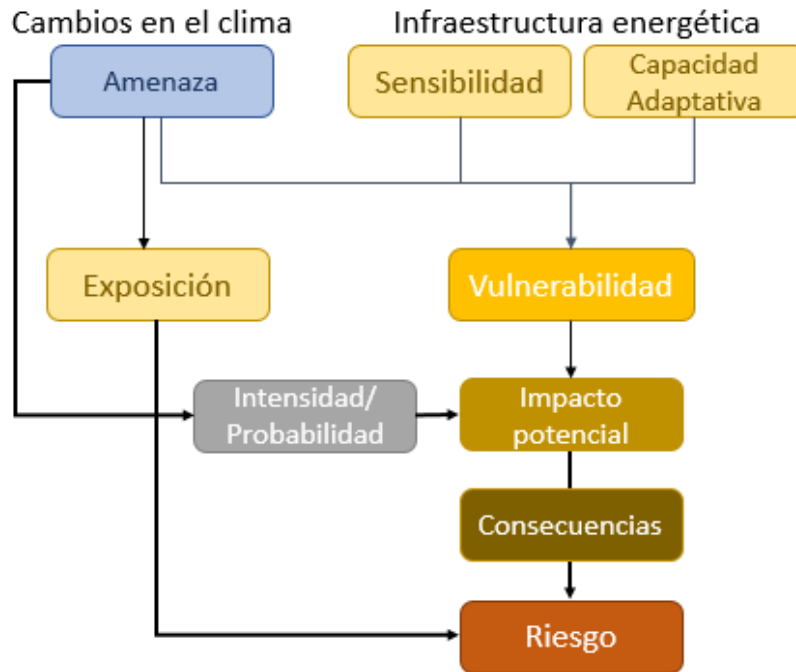
2.5. Período de ejecución

El proyecto se ejecutó entre los años 2020 y 2021. Con 21 meses de duración.

3. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA METODLOGÍA

La metodología planteada para el estudio, abarca el análisis de cada uno de los aspectos que integran el término “RIESGO”. Siguiendo las recomendaciones del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), el riesgo queda definido por la relación existente entre las amenazas asociadas con el clima, la exposición de los sistemas a ellas y su vulnerabilidad. La figura 1. que se muestra a continuación esquematiza la relación entre los diferentes factores que intervienen.

Figura 1. Aspectos generales de la metodología



Fuente: Informe final Proyecto Screen-ALC, Tecnalia, 2021

Dentro de este marco conceptual, la metodología se ha dividido en cuatro etapas:

- I. Caracterización de la amenaza del cambio climático.
- II. Análisis de exposición y vulnerabilidad del sector energético ante el cambio climático.
- III. Evaluación de impacto potencial.
- IV. Evaluación preliminar de riesgo

3.1. Caracterización de la Amenaza del Cambio Climático.

Los objetivos de esta etapa son la definición de los escenarios climáticos a analizar y la descarga y tratamiento de los datos para obtener, como resultado, los indicadores climáticos que servirán para estimar las amenazas más críticas y el impacto potencial del cambio climático sobre la infraestructura en estudio.

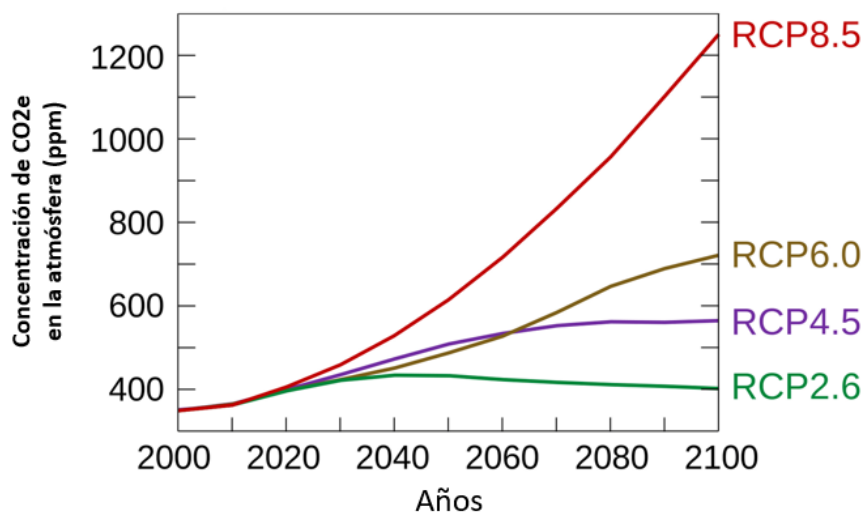
La disponibilidad de información en las bases de datos climáticas (nivel de información disponible y su calidad) condicionará el alcance de esta etapa, definiendo aspectos como los escenarios (horizontes temporales, RCP), la resolución y los modelos a emplear. Las actuales brechas de conocimiento requieren en muchos casos aproximaciones cualitativas, el empleo de escenarios y la realización de hipótesis o asunciones.

Actualmente no se conoce cómo evolucionará socioeconómicamente el planeta ni cómo será la trayectoria de los Gases de Efecto Invernadero (GEI) en la atmósfera ni si los modelos que generan las proyecciones climáticas y de amenazas extremas son suficientemente precisos. Es importante, por tanto, ser conscientes de estas incertidumbres y presentarlas e interpretarlas de manera transparente, realizando una gestión adecuada de las mismas. Es por ello que se estudian diferentes escenarios y se aporta un abanico de posibles valoraciones del riesgo.

Para la definición de los escenarios climáticos a ser analizados, se realiza, para cada variable climática o ECV¹, un estudio de todas las combinaciones de modelos, RCP² y horizontes temporales disponibles de cara a homogeneizar los escenarios para todas las variables consideradas en el estudio.

Específicamente para este estudio se seleccionó como escenarios climáticos para el análisis, la RCP 4.5 como un escenario de repercusión media y el RCP 8.5 como un escenario de repercusión drástica.

Figura 2. Trayectorias representativas de concentración (RCP)



Fuente: Informe final Proyecto Screen-ALC, Tecnalia, 2021

Como criterio general, se utilizan varios escenarios de futuro y un escenario de referencia (histórico), con el fin de realizar comparaciones. Asimismo, es importante evaluar períodos suficientemente amplios para capturar la variabilidad inter e intra-anual. En este caso, se manejan períodos de 30 años.

¹ “Essential Climate Variable” o variable climática esencial Se denominan de este modo cada una de las variables físicas, biológicas o químicas (o un conjunto de las mismas) que contribuyen de manera crítica a la caracterización del clima global.

² “Representative Concentration Pathway” o “Trayectorias Representativas de Concentración” que describen diferentes posibles futuros climáticos dependiendo del volumen de gases de efecto invernadero (GEI) emitidos y capturados en los próximos años y el efecto que su acumulación en la atmósfera tendría en términos de calentamiento global.

Por otro lado, para la cuantificación del riesgo, es necesario especificar y calcular, para cada ECV, los indicadores climáticos que condicionarán el impacto y cómo éstos se ven modificados con respecto a unas determinadas escalas y umbrales críticos definidos en base a información histórica y estimaciones. No basta con especificar que un cambio en la temperatura ambiente (ECV) tiene un impacto sobre un determinado elemento, sino que, para cuantificarlo, es necesario especificar si es el cambio en la temperatura media, máxima o mínima (indicador climático) la que tiene ese efecto. La definición de estos indicadores climáticos está totalmente condicionada por la caracterización de la sensibilidad y los índices de impacto e irán acompañados en muchos casos de valores “umbral” que definen el rango de valores en el que se observan los impactos.

Para este estudio en particular, las observaciones de las ECVs se obtuvieron de conjuntos de datos de reanálisis como ERA5-Land y ERA5, mientras que para sus predicciones se utilizaron conjuntos de modelos climáticos como CORDEX y CMIP5, como se puede observar en la siguiente tabla:

Tabla 1. Relación entre las variables climáticas y los conjuntos de datos de reanálisis y modelos climáticos.

VARIABLE CLIMÁTICA	OBSERVACIÓN	PREDICCIÓN
Temperatura en tierra	ERA5-LAND	CORDEX
TEMPERATURA DEL MAR	ERA5	CMIP5
VELOCIDAD DEL VIENTO	ERA5-LAND	CORDEX
RADIACIÓN SOLAR	ERA5-LAND	CMIP5
ABASTECIMIENTO DE AGUA	AQUEDUCT	

Fuente: Informe final Proyecto Screen-ALC, Tecnalia, 2021

3.2. Análisis de exposición y vulnerabilidad del sector energético ante el cambio climático

En el ámbito del cambio climático, se puede definir la vulnerabilidad como la propensión o predisposición de un elemento a verse afectado negativamente por el cambio climático y depende de la sensibilidad o susceptibilidad al daño del propio elemento y su falta de capacidad para hacer frente y adaptarse. Aplicándolo al sector energético, para valorar su vulnerabilidad, se deberán conocer qué elementos lo componen y sus características (definirán su sensibilidad y capacidad adaptativa) y su exposición a las amenazas originadas por el cambio climático. A continuación, se describen los pasos a dar en este proceso.

3.2.1. Identificación preliminar de las tecnologías energéticas existentes en el ámbito del estudio

De cara a definir el alcance del análisis de vulnerabilidad, resulta necesario conocer las particularidades del sector en estudio en cada uno de los países participantes. Tomando en

cuenta toda la cadena energética (obtención, tratamiento y almacenamiento de materias primas, generación de energía, transporte y distribución de combustibles y energía eléctrica), obteniéndose como resultado, un listado con las tecnologías o tipologías de infraestructura para las que se evaluará la sensibilidad al cambio climático.

3.2.2. Análisis de sensibilidad

Comienza con un análisis bibliográfico de la sensibilidad de las diferentes tecnologías identificadas ante cualquier amenaza originada por el clima. La sensibilidad define: si un determinado elemento (tecnología/instalación) podría verse afectado por los cambios proyectados en las variables climáticas en caso de verse expuesto a ellos. De qué manera se vería afectado (por ejemplo, disminución del rendimiento, parada de la actividad, cierre de la planta, etc.). En algunos casos, la bibliografía ofrece “índices de impacto” (valores “tipo”) que permiten cuantificar la magnitud de dicho impacto.

Como resultado de este análisis de sensibilidad, se obtiene una matriz que muestra, en filas, todas las tecnologías identificadas y, en columnas, todas las amenazas climáticas que podrían afectarles en caso de encontrarse expuestas. En el cruce de ambas se describe de forma resumida, la forma en que la amenaza podría afectar a cada elemento (afección al recurso, a la operación, a la integridad de la infraestructura, etc.) añadiendo, si está disponible, un índice de impacto “tipo” que permita cuantificar la magnitud de dicho impacto. Este dato es clave, pues condicionará el alcance final del estudio.

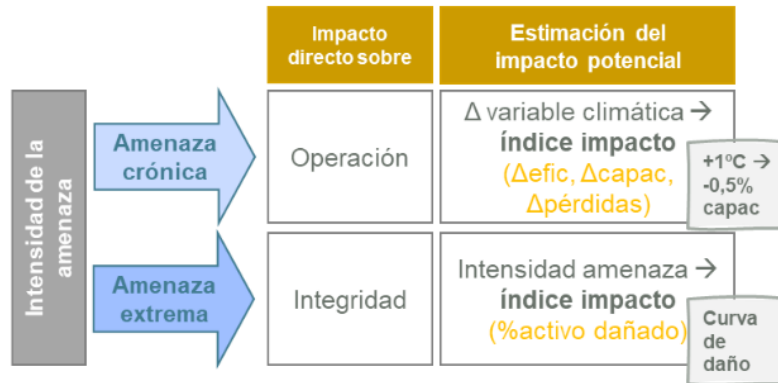
Este primer estudio de sensibilidad no incluye información a nivel de instalación (exposición de la infraestructura ni características concretas que definen su capacidad adaptativa) pero permite filtrar o priorizar para cada tipo de tecnología, las amenazas para las que podría mostrar un grado alto de sensibilidad.

3.3. Evaluación de impacto potencial

La cuantificación del impacto potencial se realiza en base a “índices de impacto tipo”, obtenidos de bibliografía especializada para cada tecnología o tipología de infraestructura. Estos relacionan, para cada tecnología, la magnitud de la amenaza (para diferentes escenarios futuros) con la magnitud del impacto o daño causado. Se han manejado dos tipos de índices de impacto:

- Los que cuantifican un impacto sobre la operación de una instalación (afección a la producción, capacidad), que aparecen generalmente más ligados a amenazas crónicas, olas de frío y olas de calor.
- Los que cuantifican un impacto sobre la integridad física de una instalación (daños a la infraestructura), que aparecen generalmente más ligados a amenazas extremas.

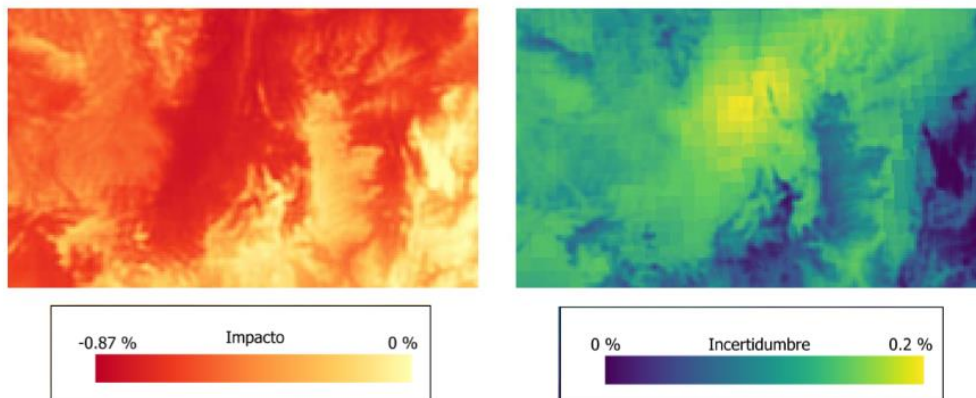
Figura 3. Metodología de estimación del impacto potencial



Fuente: Informe final Proyecto Screen-ALC, Tecnalia, 2021

El resultado de esta evaluación de impacto será una serie de capas raster. Para un escenario concreto, el impacto que podría tener una determinada amenaza sobre una determinada tecnología (según donde se encuentre ubicada) vendrá definido por pares de capas: una que muestra el impacto y otra que muestra la incertidumbre (apartado 6.1). La Figura 8 muestra un ejemplo del tipo de resultado que se obtendría. En este caso, se muestra el impacto potencial que los cambios proyectados en la temperatura ambiente tendrían, para un determinado escenario de futuro, sobre las instalaciones solares fotovoltaicas que se ubiquen en la zona mostrada.

Figura 4. Ejemplo de capas de impacto potencial: impacto del incremento temperatura ambiente sobre la producción/capacidad solar fotovoltaica



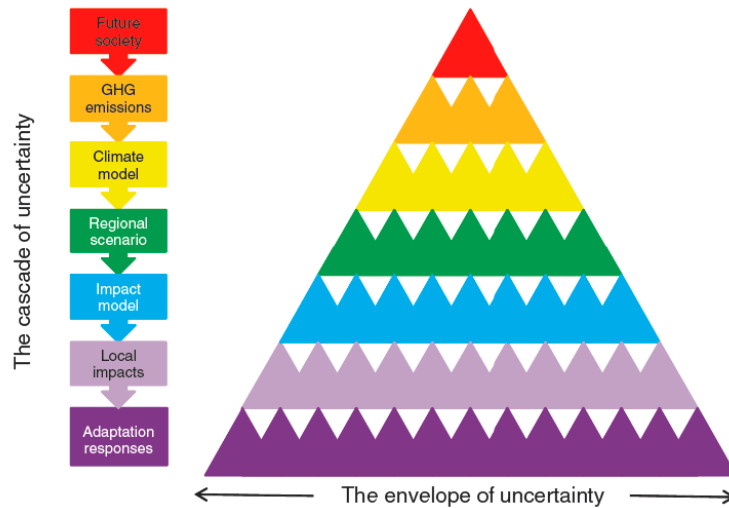
Fuente: Informe final Proyecto Screen-ALC, Tecnalia, 2021

La imagen de la izquierda muestra el cambio que podría darse en la producción de la instalación (en este caso, se podría dar una reducción de la producción de entre el 0% y el 0.87% según la ubicación exacta de la instalación). La imagen de la derecha muestra la incertidumbre de estos resultados (entre el $\pm 0\%$ y el $\pm 0.2\%$).

3.4. Evaluación preliminar del riesgo

Esta última etapa contempla un screening en el que se obtiene el riesgo al que podría enfrentarse cada una de las instalaciones contempladas en el estudio en diferentes escenarios futuros. Esta información permitirá realizar una priorización de acciones a futuro.

Figura 5. Cascada de incertidumbres asociada a la evaluación del riesgo climático

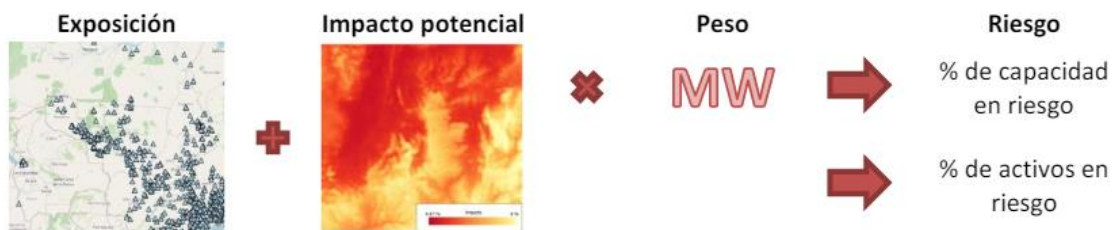


Fuente: Informe final Proyecto Screen-ALC, Tecnalia, 2021

Para valorar el riesgo es necesario conocer las consecuencias de que se produzcan los impactos potenciales identificados en la etapa anterior, es decir, lo crítico que puede llegar a ser para el sistema energético que determinada actividad se vuelva inoperativa. Para ello es esencial conocer la contribución de cada instalación al sistema energético analizando su actividad energética (su potencia/capacidad o la energía que produce, trata, consume, distribuye, ..., según el tipo de instalación). Este concepto se recoge bajo el término “peso” de la instalación.

Así, para la estimación del riesgo, se realizará el cruce de las capas de infraestructuras (exposición) con las capas de impacto potencial y se aplicará el “peso” de cada instalación, cuantificando de esta forma el “daño relativo” para el sistema energético. El resultado final serán una serie de tablas/gráficos que recojan los valores de riesgo obtenidos para las instalaciones analizadas en cada uno de los escenarios de futuro contemplados.

Figura 6. Metodología de estimación preliminar del riesgo



Fuente: Informe final Proyecto Screen-ALC, Tecnalia, 2021

4. SENSIBILIDAD Y RIESGO POR TIPO DE INSTALACIÓN ENERGÉTICA

A partir de los aspectos metodológicos generales descritos anteriormente y del estudio detallado de los diferentes tipos de instalaciones energéticas, se obtuvieron matices de sensibilidad y riesgo ante el cambio climático para los diferentes tipos de instalaciones energéticas analizadas, para las diferentes variables climáticas esenciales (ECVs) y una matriz de sensibilidad priorizada de donde se ha extraído algunos ejemplos presentados a continuación:

Tabla 2. Matriz resumida de sensibilidad priorizada.

Variable climática	Indicador	Tipo de instalación	Tecnología	Umbral	Sensibilidad
Temperatura ambiente	Cambio de temperatura (absoluto)	Central fotovoltaica	Silicio cristalino	25°C	Si sube 1°C por encima del umbral, cae un 0.66 % la producción de energía.
Temperatura ambiente	Cambio de temperatura (absoluto)	Central termoeléctrica	Ciclo combinado	15°C	Si sube 1°C, cae un 0.25% la capacidad efectiva.
Temperatura ambiente	Cambio de temperatura (absoluto)	Transporte de electricidad	Línea de transmisión	20°C	Si sube 1°C, cae un 0.4% la energía transportada
Temperatura ambiente	Cambio de temperatura (absoluto)	Transporte de gas natural	Gasoducto		Integridad: el aumento de la temperatura puede derretir el permafrost y provocar el hundimiento del suelo, ocasionando daños en las tuberías. Operación: En el transporte por conducto, posible reducción de la capacidad de transmisión de los gasoductos. Expansión del gas en conductos Posibles problemas de seguridad del

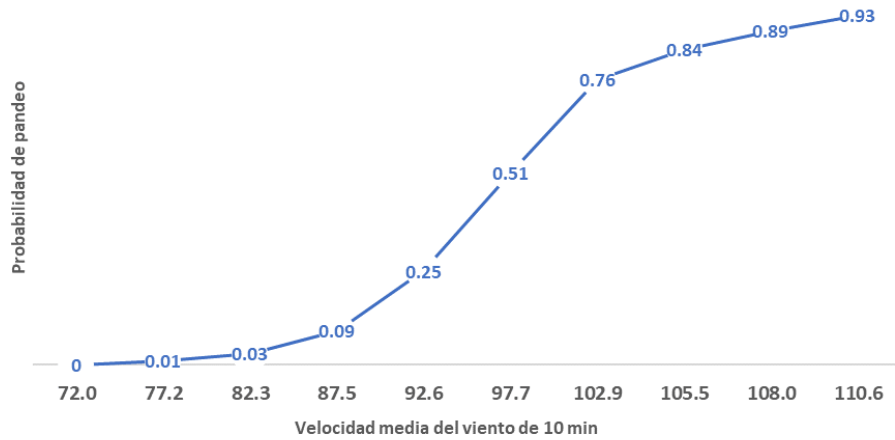
					suministro si las estaciones de compresión no están diseñadas para funcionar a temperaturas elevadas.
Temperatura ambiente	Cambio de temperatura (absoluto)	Granjas agro energéticas (producción de biocombustibles)			Operación: Cambios en la temperatura podrían aumentar o disminuir la productividad de la materia prima y, con ello, la producción de energía correspondiente. Podría afectar a la superficie necesaria para cultivar las materias primas y a los costos y, con ello, a la producción de materia prima. Podrían darse impactos positivos y negativos según el tipo de cultivo. por ejemplo, una reducción de las heladas mejoraría la productividad de los cultivos de caña de azúcar.
Temperatura del agua de mar	Cambio de temperatura (absoluto)	Central termoeléctrica	Refrigeración con agua marina	5 °C	Si sube 1°C, cae un 0.2% la producción de energía.
Radiación	Cambio en la radiación (porcentaje)	Central fotovoltaica	Todas		Si baja un 1%, cae un 3% la producción de energía

Viento	Cambio en la velocidad media del viento (absoluto) a la altura del rotor (se asume 100 metros)	Central eólica	Todas	Entre 1m/s y 25m/s	Si baja 1 m/s la velocidad media del viento, cae un 6.67% la producción de energía. Si sube 1 m/s la velocidad media del viento, aumenta un 6.67% la producción de energía
Viento	Cambio en la velocidad media del viento (absoluto)	Transporte de electricidad			Si sube 1m/s la velocidad media del viento, aumenta un 20% la capacidad de transporte
Caudal	Cambio en el caudal (porcentaje)	Central hidroeléctrica			Si baja un 1% el caudal, puede caer un 1% la producción de energía. Si aumenta un 1% el caudal, puede aumentar un 1% la producción de energía.
Viento extremo	Velocidad del viento extrema de 10 min a la altura del rotor	Central eólica	Active yaw systems		Curvas de daño Figura 7 ³

Fuente: Informe final Proyecto Screen-ALC, Tecnalia, 2021

Figura 7. Curva de daño de una central eólica por ráfaga de viento

³ Para variables climáticas que involucren probabilidad de daño en la integridad física de la infraestructura, se asocia la sensibilidad a una curva de daño, que relaciona la magnitud de la variable con la probabilidad de ocurrencia del daño.



Fuente: Informe final Proyecto Screen-ALC, Tecnalia, 2021

5. EJEMPLOS DE MEDIDAS DE ADAPTACIÓN PROPUESTAS

Adicionalmente a la evaluación de la sensibilidad, impacto potencial y riesgo de la infraestructura energética ante los efectos del cambio climático, el estudio incluyó también el identificar posibles medidas de adaptación que podrían ser implementadas de acuerdo al tipo de instalación, tecnología y tipo de impacto. A continuación, algunos ejemplos de medidas de adaptación propuestas.

Tabla 3. Ejemplos de medidas de adaptación propuestas.

Riesgo	Medida propuesta	Tipo de instalación
Incremento excesivo de las aportaciones de agua de escorrentía y sedimentos a los cauces y embalses.	Gestión de usos del suelo: restauración forestal. Una adecuada reforestación de las cuencas permite reducir el riesgo de daños en la infraestructura y de colmatación de embalses.	Central hidroeléctrica
Incremento de la disponibilidad de agua.	Aumentar la altura de la presa y/o construir nuevas pequeñas presas aguas arriba.	Central hidroeléctrica
Que se produzcan daños graves en la presa y los equipos de generación causados por avenidas extremas y aumenten las necesidades de mantenimiento de las instalaciones y embalses.	Mejora de los métodos de predicción de avenidas para evaluar la adecuación de la infraestructura para toda la vida útil de la instalación y anticiparse a posibles situaciones de emergencia. Será necesario manejar información de calidad sobre los patrones de precipitación, tormentas y avenidas futuras, que podrían verse modificados por el cambio climático. Resulta clave realizar un seguimiento periódico de la información climática y	Central hidroeléctrica

	modelos disponibles para asegurar que se maneja la mejor información disponible y minimizar la incertidumbre.	
Cambio excesivo del patrón de generación por cambios en el recurso derivados del cambio climático.	Introducir diseños de turbinas más adaptados a las nuevas condiciones, capaces de operar en un rango más amplio de velocidades del viento (por ejemplo, las de eje vertical) y soportar mayores velocidades de viento, ráfagas y cambios de dirección.	Central eólica
Afección a la producción por aumento de la temperatura ambiente.	Introducir diseños más resistentes al calor y componentes de módulos diseñados para soportar picos altos de temperatura.	Central fotovoltaica
Afección a la capacidad por aumento de la temperatura ambiente.	Emplear líneas de materiales más resistentes a altas temperaturas.	Redes eléctricas
Que se incremente la frecuencia y gravedad de los daños como consecuencia de eventos extremos de tormenta y viento.	Adaptar los diseños para dotarlos de mayor robustez (particularmente en alta mar) desarrollando e implementando estándares estructurales más altos para edificios/ infraestructura nueva o renovada o empleando diseños o materiales más resistentes (hormigón en lugar de metal, por ejemplo).	Extracción y transporte de combustibles fósiles
Disminución de la eficiencia de la planta como consecuencia de un aumento excesivo de la temperatura ambiente que redunde en una pérdida de eficiencia y de producción.	Adaptación de centrales térmicas ante incrementos de temperatura ambiente mediante la adición de nuevos elementos (por ejemplo, una enfriadora adicional a la entrada del compresor para mejorar el funcionamiento y rendimiento de la turbina de gas) o la sustitución de los sistemas existentes por otros alternativos (por ejemplo, cambio de sistemas de refrigeración por aire por refrigeración por agua o mixtos, que se vean menos afectados por los incrementos de temperatura ambiente).	Centrales termoeléctricas
Que el agua proveniente de eventos climáticos extremos (desbordamiento de ríos, oleaje, tormentas,...) o de aumentos del nivel del mar, alcance y dañe infraestructura sensible.	Elevación o reubicación de equipos o infraestructura sensible para situarlos en lugares protegidos ante inundación.	Cualquier instalación ubicada en zonas inundables

Fuente: Informe final Proyecto Screen-ALC, Tecnalia, 2021

6. CONCLUSIONES

- Si bien las instalaciones energéticas son diseñadas para mantener su integridad durante su vida útil y operar de manera eficiente de acuerdo a las condiciones climáticas del lugar de su emplazamiento, el cambio climático puede alterar drásticamente estas condiciones generando amenazas y riesgo de potenciales impactos negativos, que pueden poner en peligro tanto la integridad física como la productividad de dichas instalaciones, por lo que es necesario que en sus estudios de diseño y en la planificación de su operación, se incluya una metodología de evaluación de riesgos inherentes al mismo.
- Incluso para instalaciones que se encuentran ya contraídas y en operación, es importante evaluar su vulnerabilidad ante potenciales impactos del cambio climático e identificar de manera anticipada las posibles medidas de adaptación que permitan incrementar su resiliencia ante dichos impactos.
- Considerando que la matriz de generación eléctrica de la región de América Latina y el Caribe es predominantemente dependiente de fuentes de energía directa como la hidroenergía, que a su vez es altamente dependiente del clima, la sensibilidad de este sector y su vulnerabilidad ante variaciones climáticas extremas, son factores que deben ser evaluados y anticipados, para tomar las medidas de adaptación correspondientes, a fin de evitar desabastecimientos de energía o inclusive eventos catastróficos.