

Resiliencia y **flexibilidad** del Sistema:

experiencias internacionales y
oportunidades para Colombia

María Nohemi Arboleda, gerente general XM

Octubre 30 de 2025



La complejidad de los sistemas eléctricos modernos

se incrementa con la incorporación de nuevas tecnologías en generación y demanda que introducen mayor variabilidad e incertidumbre en la operación, además de nuevas dinámicas que impactan la operación del sistema y los mercados.

Sin una preparación adecuada en infraestructura, regulación, mercados y capacidades operativas, la adaptación al nuevo entorno tecnológico se ve limitada, lo que genera riesgos crecientes para el suministro eléctrico seguro, confiable y resiliente.



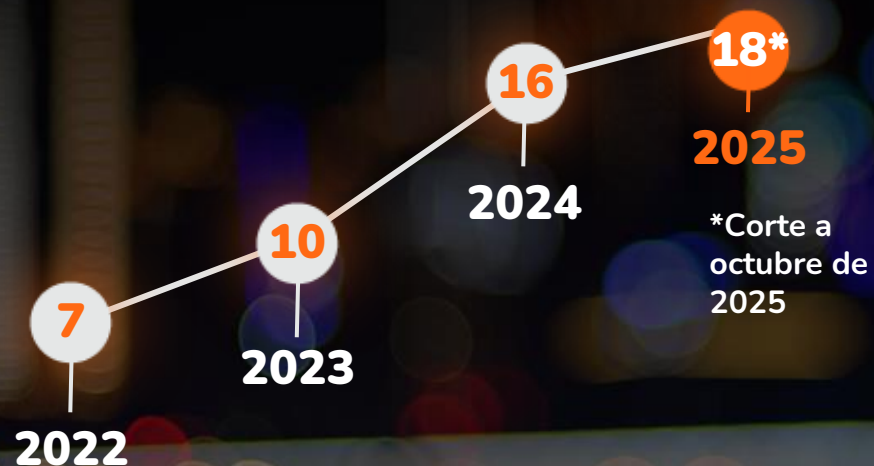
Contexto global

» Vulnerabilidad de los sistemas eléctricos:

Los sistemas eléctricos se enfrentan a vulnerabilidades **derivadas del agotamiento en la infraestructura, la creciente demanda de energía eléctrica** que exige mayor capacidad de transporte y generación y nuevas dinámicas de los equipos que se integran (IBR's y centros de datos), todo esto, **en un escenario con condiciones climáticas extremas** como consecuencia del cambio climático.

Eventos con afectación mayor a la demanda

Número de eventos

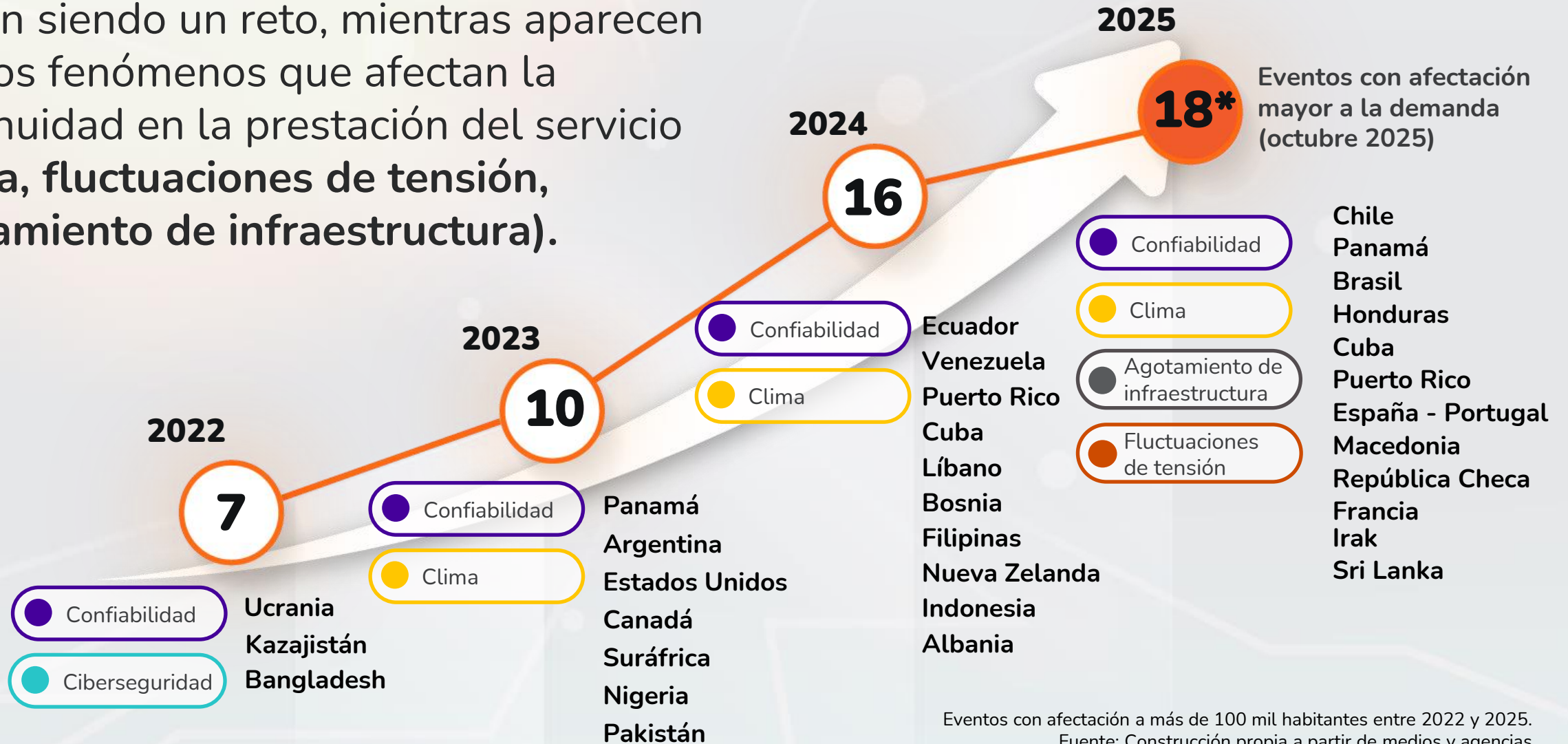


» Aumento de la frecuencia de los eventos:

Actualmente, a nivel mundial las fallas en el suministro de energía son más frecuentes, **lo que afecta la vida cotidiana, la economía y la seguridad energética de los países.**

*Eventos con afectación a más de 100 mil habitantes entre 2022 y 2025. Fuente: Construcción propia a partir de medios y agencias

La confiabilidad de los sistemas siguen siendo un reto, mientras aparecen nuevos fenómenos que afectan la continuidad en la prestación del servicio (clima, fluctuaciones de tensión, agotamiento de infraestructura).



Las causas de los eventos, generalmente, corresponden a múltiples situaciones estructurales de los sistemas, que evidencian oportunidades de mejora en el **diseño flexible y resiliente**.

● Redes congestionadas y obsoletas. Falta de materialización de la expansión y modernización.



● Deficiencias en la complementariedad de la matriz de generación.



● Bajos niveles de inercia y fortaleza de red (falta planeación anticipada de nuevos requisitos de operación y nuevos equipos como compensadores síncronos).



● Desempeño de inversores (deficiencias o falta de exigencias de requisitos, códigos de redes no actualizados).



● Falta de controlabilidad del sistema (potencia activa y reactiva), esquemas remediales (EDAC, ERAG).



Diseño resiliente y flexible del sistema

(falta de redundancia en sistemas de protección, infraestructura poco flexible ante mantenimientos, fallas N-k, matriz complementaria y controlable, ciber resiliencia).

Convenciones

● Fluctuaciones de tensión

● Confiabilidad

● Agotamiento de infraestructura

● Clima

● Ciberseguridad

En el actual escenario de cambios, la planeación basada en criterios de flexibilidad y resiliencia es esencial para que el sistema energético mantenga y mejore **los niveles de confiabilidad y seguridad en la atención de la demanda:**

1

Incremento de la demanda de la mano de la electrificación del consumo de gas natural y la incorporación de nuevas cargas intensivas eléctricamente (**centros de datos**).

2

Altos volúmenes de integración de generación solar y eólica generan mayor dependencia de la generación hidráulica y térmica como proveedores de **flexibilidad y capacidad firme en el sistema**.

3

Incremento de la necesidad de capacidad de transporte, recursos flexibles y nuevos servicios para **mantener la operabilidad, seguridad y resiliencia en la operación**.



FLEXIBLE

Un sistema que pueda responder a las diferentes condiciones de cambio en el balance generación-demanda, en todas las escalas y horizontes de tiempo.

RESILIENTE

La capacidad de anticipar, prepararse y adaptarse rápidamente a las condiciones cambiantes y de soportar, responder y recuperarse de eventos.



La transformación hacia **un futuro energético más flexible, resiliente y una red eléctrica más renovable**, exige que los sistemas eléctricos **se adapten rápidamente...**

Un sistema flexible y resiliente requiere la **modernización a gran escala** de la infraestructura

La inversiones para escalar la transición energética y alcanzar los objetivos del G20, la infraestructura de transmisión y distribución (redes) y medidas de flexibilidad, **requiere inversiones estimadas de 381 billones de dólares anuales entre 2023 y 2050.**



Mantener el incremento de la temperatura por debajo de los **1.5°C** puede requerir el **doble de la inversión en redes eléctricas (US800 billones anuales).**

“Las inversiones a 2030 para renovar redes obsoletas y ampliar la capacidad de transporte **son casi la mitad de lo que se necesita para cumplir los objetivos integración de nueva capacidad de generación renovable**”.

Fuente: IRENA - World Energy Transitions Outlook 2024

La red eléctrica muestra **señales de agotamiento**

Lo que restringe la incorporación de nueva demanda y generación requerida

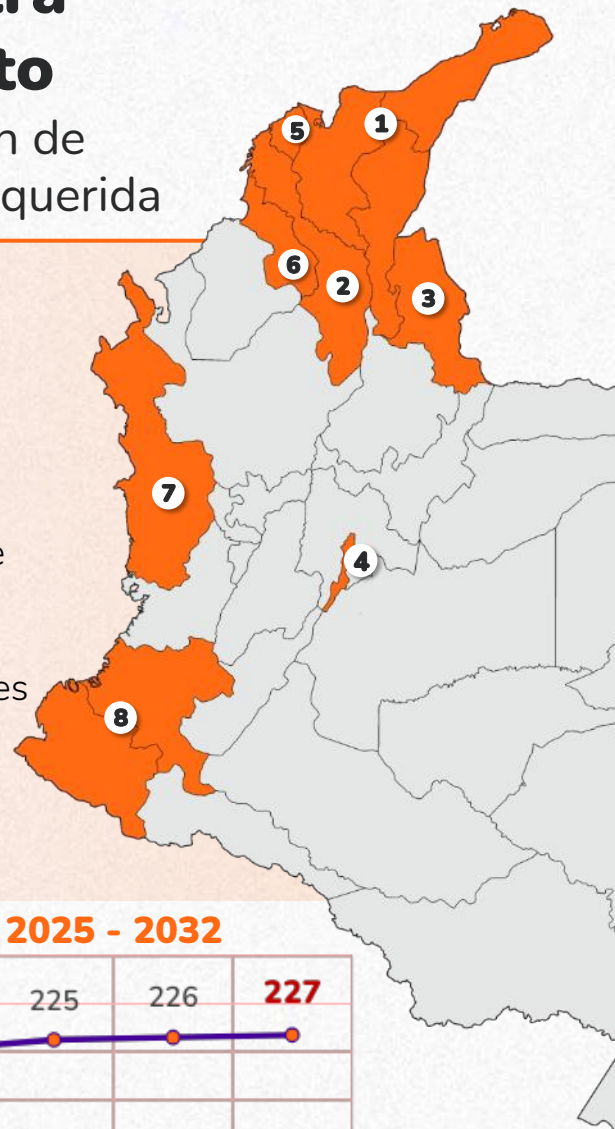
51 subestaciones que superan el nivel de cortocircuito.

167 restricciones eléctricas y operativas en red completa.

60 restricciones declaradas en estado de alerta o emergencia

28 subestaciones estratégicas y **40** cruces que podrían comprometer la seguridad y confiabilidad del Sistema.

91 Nodos en configuración radial.



Evolución de las restricciones 2025 - 2032



Avances y aspectos a considerar para un sistema resiliente y flexible en Colombia

La **articulación**, integración de nuevas tecnologías y planeación y operación **flexible y resiliente** del sistema, claves del éxito en **la transición energética**.

Frente un sistema eléctrico cambiante, la planeación y operación flexible y resiliente del sistema se ha convertido en una necesidad estratégica.

1

Anticipar (prevención y mitigación)

Un sistema con la infraestructura de generación y transmisión necesaria para integrar nuevos consumos y soportar eventos y fallas.



2

Contener

Un sistema con los sistemas de protección y control requeridos para minimizar el impacto de eventos y fallas.



3

Recuperar

Un sistema con la infraestructura de respaldo y los mecanismos de coordinación requeridos para recuperar la demanda en el menor tiempo posible.





**Anticipar
(prevención y
mitigación)**

¿Qué necesitamos para un sistema flexible y resiliente?

1

Una matriz energética complementaria.
(flexibilidad y resiliencia de fuentes primarias).

2

Desarrollar planes de choque para modernizar la red y eliminar brechas en la flexibilidad y resiliencia.

3

Incentivar el almacenamiento estacional (**agua, hidrógeno**).

Incentivar el almacenamiento diario (**baterías**).

4

Anticipar los planes de expansión a las necesidades del sistema, integrar nuevas tecnologías.

5

Mejorar la capacidad institucional para la medición y caracterización de las variables meteorológicas.

PMM: Plan Maestro de Modernización

Avances

Subasta de cargo por confiabilidad

Subastas de largo plazo

Adopción de obras urgentes

Plan Maestro de Modernización
UPME - PMM

Plan 6GW+

Proyecto de resolución
MME resiliencia

Proyecto de resolución
CREG SAEB



Contener la propagación

¿Qué necesitamos para un sistema flexible y resiliente?

1

Activar la regulación primaria en todas las tecnologías de generación.

Actualización del Esquema de Desconexión Automático de Carga - EDAC.

2

Despliegue de mecanismos de ajuste horarios e intra-horarios (despachos con menor granularidad) y mejorar las desviaciones.

3

Despliegue de condensadores síncronos (inercia y fortaleza de red) y baterías GridForming*.

4

Implementar planes institucionales de respuesta a eventos de ciber-resiliencia (CSIRT).

5

Requerimientos de modelos EMT (DigitaTwin) del sistema colombiano

Implementar mejoras en protecciones en el STN, STR y SDL.

Avances

Criterios de diseño del EDAC (impacto DER)

Modernización código de redes (proyectos de resolución CREG 086, 098 y 099 de 2025)

Propuestas de fortaleza de red PMM (condensadores síncronos y baterías GridForming)

Propuesta de resolución resiliencia (MME)



**Recuperar
el sistema**

¿Qué necesitamos para un sistema flexible y resiliente?

1

Mejorar las capacidades e incentivar el arranque autónomo de los plantas.

2

Marco normativo para la capacitación, entrenamiento y habilitación de operadores.

3

Mejorar los esquemas de comunicación operativa (redundancia en comunicaciones de voz y datos).

4

Definir criterios para la respuesta oportuna en subestaciones desatendidas.

Definir criterios de calidad y confiabilidad en servicios auxiliares.

5

Definir planes de reposición de infraestructura frente a fallos (unidades móviles y de reserva).

Avances

Actualización y socialización guías de restablecimiento

Propuesta de resolución resiliencia (MME)

Planeación y ejecución de pruebas de arranque autónomo con los agentes.

Entrenamiento conjunto XM - agentes del Mercado en restablecimiento del SIN.

Las respuestas a eventos, implementadas en otros países nos **indican que nos estamos preparando adecuadamente**

Chile



Demanda afectada: 12 GW

Tiempo de restablecimiento: 12 horas

Corto plazo: Cortes de producción (disminución del intercambio entre el norte y el sur).

Mediano plazo:

- ☒ Requerimientos de control de tensión en FERN.
- ☒ Requerimientos de control de frecuencia.
- ☐ Revisión diseño del EDAC.
- ☐ Implementación de simulaciones (EMT).
- ☐ Requerimientos técnicos para Grid Forming.
- ☒ Plan de auditorías técnicas preventivas de los sistemas de protección.
- ☒ Plan de capacitación de operadores.

Observabilidad PMGD (GD).

Criterios para la operación remota de activos.

PMGD: Pequeños Medios de Generación Distribuida

Fuente: CEN - Medidas y Recomendaciones para Fortalecer el Sistema Eléctrico Nacional

España



Demanda afectada: 31 GW

Tiempo de restablecimiento: 19 horas

Corto plazo: Cortes de producción y aumento generación síncrona.

Mediano plazo:

- ☒ Requerimientos de control de tensión en FERN.
- ☐ Mecanismos que reduzcan cambios bruscos en los flujos de potencia.
- ☐ Mecanismo de controlabilidad de la tensión.
- ☒ Desarrollos urgentes: 10 condensadores síncronos.
- ☒ Rev. ajustes de protecciones de centrales.

Observabilidad de la GD.

Fuente: ENTSO-E Grid Incident in Spain and Portugal on 28 April 2025

☒ Incluido en la resolución CREG 060 de 2019, 148 de 2021 y 011 de 2022

☐ Incluido en los proyectos de resolución CREG 088, 089 y 103 de 2025

☐ Incluido en el proyecto de resolución CREG 086 de 2025

☒ Incluido en los proyectos de resolución MME (Resiliencia)

☒ Incluido en PMM - UPME

La transición energética no es solo tecnológica, es cultural.

1



Anticipar (prevención
y mitigación)

2



Contener

3



Recuperar

Un sistema flexible y resiliente requiere invertir en el aprendizaje y formación del talento, para una transición que será intensiva en conocimiento. **Sin personas preparadas, no hay transición posible.**

La transición energética será intensiva en la digitalización, en automatización y en explotación de la inteligencia artificial. Bajo este contexto, evitar la “atrofia de habilidades”* será fundamental para garantizar la resiliencia del sistema desde la perspectiva del talento humano.

*Skill Atrophy

Fuente: www.gartner.com

¡Es momento de actuar juntos por un sistema más seguro y resiliente, preparado para la transición energética!

El sistema eléctrico colombiano atraviesa una transformación sin precedentes. La velocidad del cambio supera la capacidad actual de planificación, regulación y ejecución. **Pero este desafío también es una oportunidad histórica.**



La transición energética **no es solo un reto técnico**: es la posibilidad de construir un Sistema Interconectado Nacional más **seguro, confiable y sostenible**, que **impulse la competitividad del país y el bienestar de todos los colombianos.**

Para lograrlo, necesitamos **una visión compartida, decisiones informadas y una acción coordinada** entre todos los actores del sector.

Con anticipación, colaboración y compromiso, podemos fortalecer el sistema eléctrico y liderar una transición energética ejemplar.