

IX CONGRESO INTERNACIONAL

Almacenamiento
DE ENERGÍA ⚡
una **nueva era** de alta Confiabilidad



El rol del almacenamiento en la flexibilidad y resiliencia del Sistema Interconectado Nacional - SIN.

Jorge Esteban Tobón

Octubre 16 2025



20 años
Hechos por Colombia

“Las baterías son ahora lo suficientemente baratas como para **liberar todo el potencial de la energía solar**, aportando la rentabilidad de proporcionar electricidad las 24 horas del día, los 7 días de la semana y los 365 días del año al 97% de los lugares más soleados.”

Fuente: Solar electricity every hour of every day is here and it changes everything – EMBER

Hacemos parte de



Organizan:



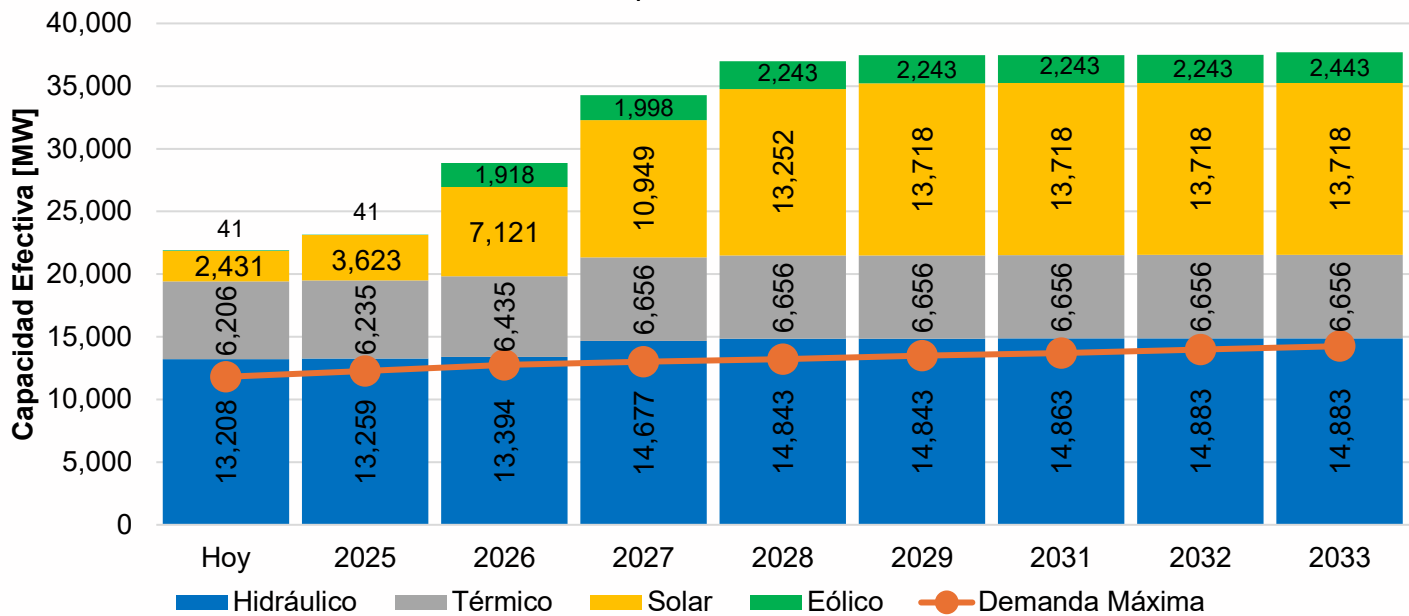
Proyecciones de Crecimiento del SIN

Evolución de la matriz de generación de energía eléctrica en Colombia 2025 – 2033

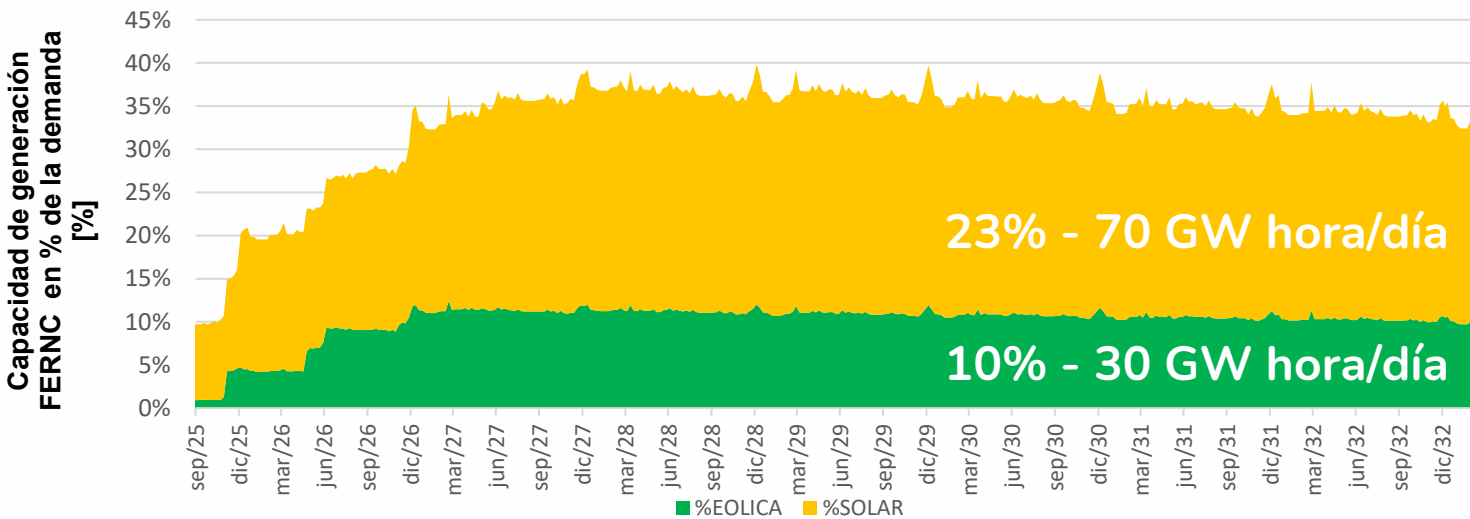
A 2030, se proyecta una capacidad Efectiva para generación de energía eléctrica cercana a los 38 GW, impulsado principalmente por fuentes solares (13.7 GW) y con baja incorporación de hidráulicas y térmicas.

Energéticamente, la integración de Fuentes renovables esperada a 2030 (16 GW) equivale a una planta tradicional de 4GW con capacidad de atender la demanda los 24 periodos del día.

La participación proyectada en la matriz de generación, redefine la operación del sistema.



*Cifras considerando los conceptos de conexión aprobados por la UPME



**Se asume un factor de planta anual de 0.21 para la Solar y 0.51 para la eólica

¿Cómo conseguimos una operación segura en un nuevo entorno?

Estudios de flexibilidad y resiliencia del Sistema

Los estudios realizados por XM permiten Identificar los principales atributos para la operación segura y confiable del sistema en un escenario de alta incorporación de FERNC



Suficiencia energética

Capacidad de satisfacer las necesidades energéticas de la sociedad de manera adecuada



1 Suficiencia energética

Contar con el suministro futuro de electricidad en el mediano y largo plazo:
Disponibilidad, Complementariedad, Almacenamiento

Seguridad eléctrica

Propender por la disponibilidad y confiabilidad de suministro de energía a la sociedad, en todos los horizontes temporales



2 Flexibilidad en potencia

Mantener el balance generación – demanda :
Rampas, Desviaciones, Ciclaje.



3 Capacidad de transporte

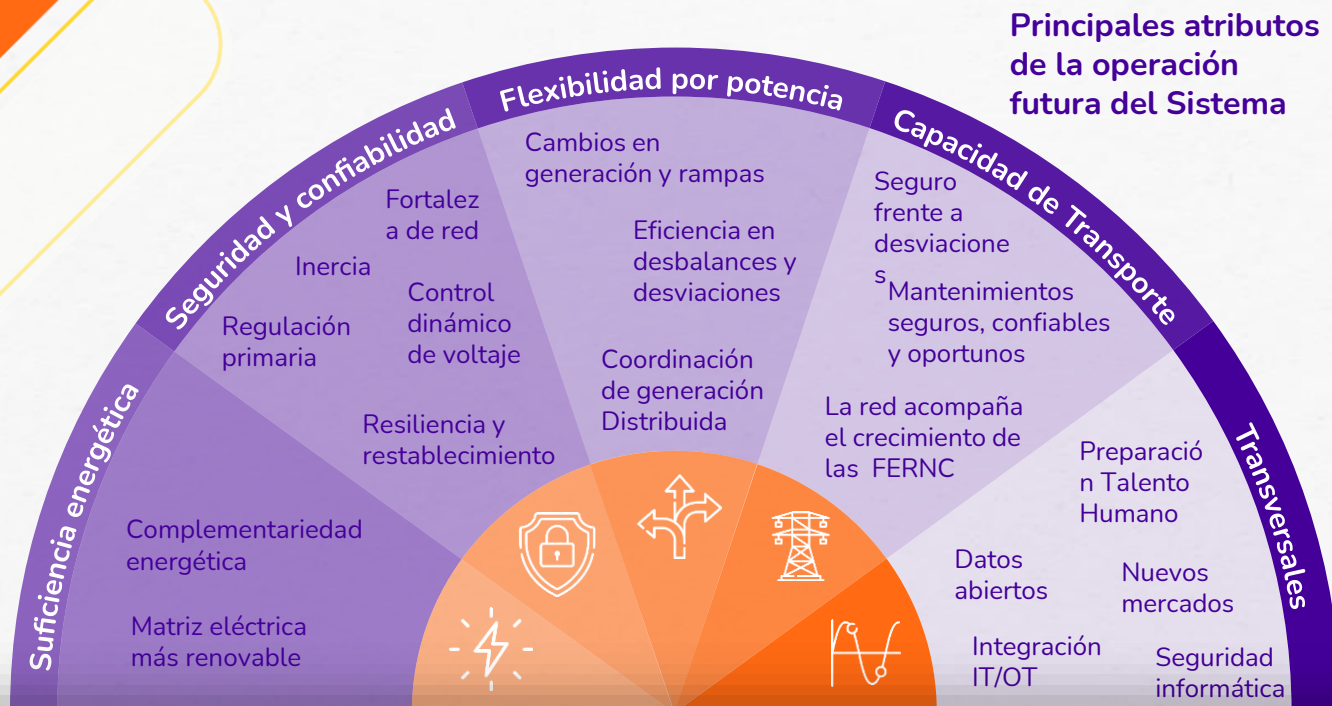
Poder transportar la energía manteniendo la seguridad:
Congestionamientos, Control de voltaje, Esquemas de protección.



4 Calidad, Seguridad y Confiabilidad

Capacidad del sistema para responder de forma adecuada a perturbaciones, manteniendo la estabilidad

Estudio de flexibilidad 2029-2030



Año	Horizonte	Solar [MW]	Eólica [MW]	Tot. FERNC [MW]	Proyectos gen. [MW]
2019	2023-2024	527	1.565	2.092	4.287
2021-1	2024-2025	1.941	2.490	4.431	6.812
2021-2	2024-2025	5.634	2.531	8.165	10.126
2022-1	2024-2027	8.451	2.732	11.183	13.278
2024-1	2028 - 2029	13.750	2.432	16.182	17.986

2018 - IRENA hizo el primer estudio para la UPME utilizando la herramienta FlexTool.

Segundo y tercer estudio de XM, ajustes metodológicos, 3 hidrologías 2021-22 y 2024-25. Recomendaciones del CNO.

Quinto estudio de XM, Consolidación de la operación con una matriz renovable (2029-2030)

2016

2017

2018

2019

2020

2021

2022

2023

2024

Primer estudio de XM, 3 escenarios de proyectos a 2023-24, 3 hidrologías.

Cuarto estudio de XM, nuevos indicadores, 3 periodos de análisis desde el 2024 hasta el 2027.

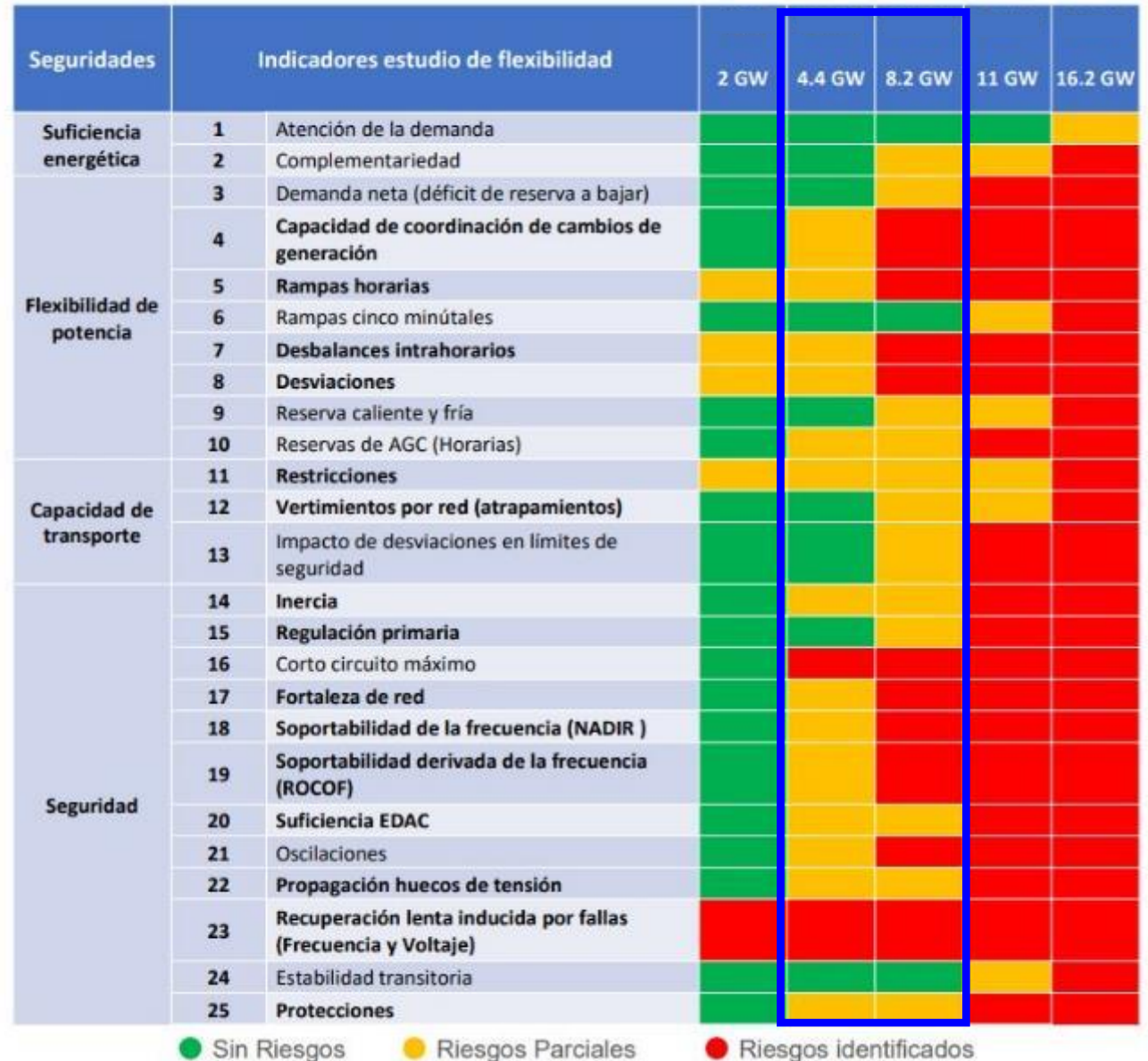


Desde la flexibilidad y resiliencia, los desafíos son articulados y priorizados

buscando un sistema flexible, al ser adaptable ante las condiciones cambiantes, y resiliente, al estar mejor preparado para responder a eventos en la infraestructura

- Matriz eléctrica flexible, complementaria y resiliente.
- Materializar los planes de expansión (generación y transmisión)
- Modernizar la red de transmisión
- Modernizar el mercado, integrando nuevos productos y servicios
- Desarrollar y mantener el talento humano
- Ampliar y evolucionar la infraestructura tecnológica

indicador de riesgos según los estudios realizados por XM



¿Qué se requiere para operar un Sistema con alta integración de generación **solar y eólica**?

Adaptada de: <https://www.youtube.com/@PowerSystemsOperation/videos>



100% Síncrono
0% IBR's



75% Síncrono
25% IBR's



25% Síncrono
75% IBR's



0% Síncrono
100% IBR's

- Establecer requisitos y servicios complementarios para ser estable, seguro y confiable (i.e. regulación, inercia y fortaleza de red)

(flexible) $\leftrightarrow$ (resiliente)

Respuesta primaria
Regulación de frecuencia y voltaje
Inercia y costo circuito emulada
Control Dinámico de Voltaje

Basados en acciones de control

Electrónica de potencia

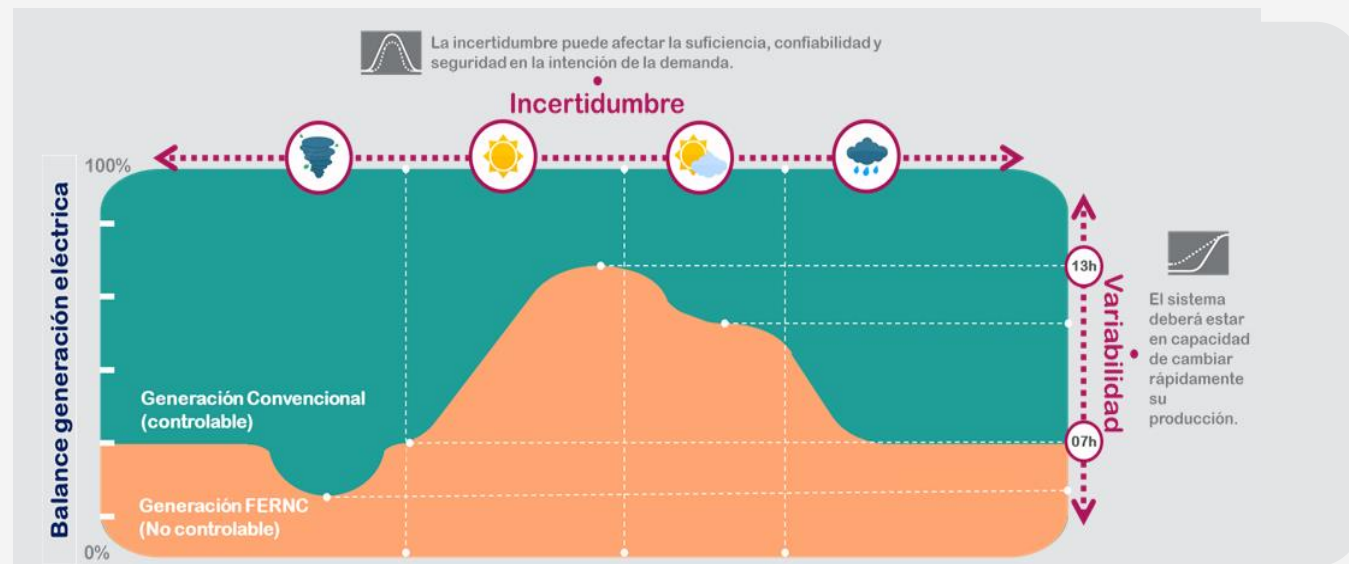
HVDC, SVC, STATCOM
IBG (Solar y Eólica)
Baterías GridForming

Torque sincronizante
Inercia síncrona real
Corrientes de cortocircuito real

Basados en respuestas naturales

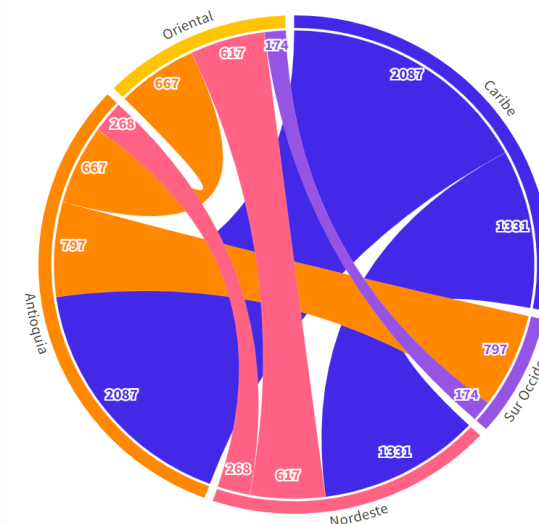
Síncronos

Generadores Síncronos
Condensadores Síncronos



- Flexibilidad en el parque de generación para adaptarse a la incertidumbre y variabilidad de las nuevas fuentes de producción.

- Una red de transmisión robusta, que permita movilizar grandes bloques de potencia a lo largo de todo el sistema, y aprovechar la complementariedad de los recursos disponibles en todo el país.



Distribución de los intercambios [MW] por los cortes entre áreas [2030-02-16 HB]
6.8 GW de generación en caribe



Suficiencia energética

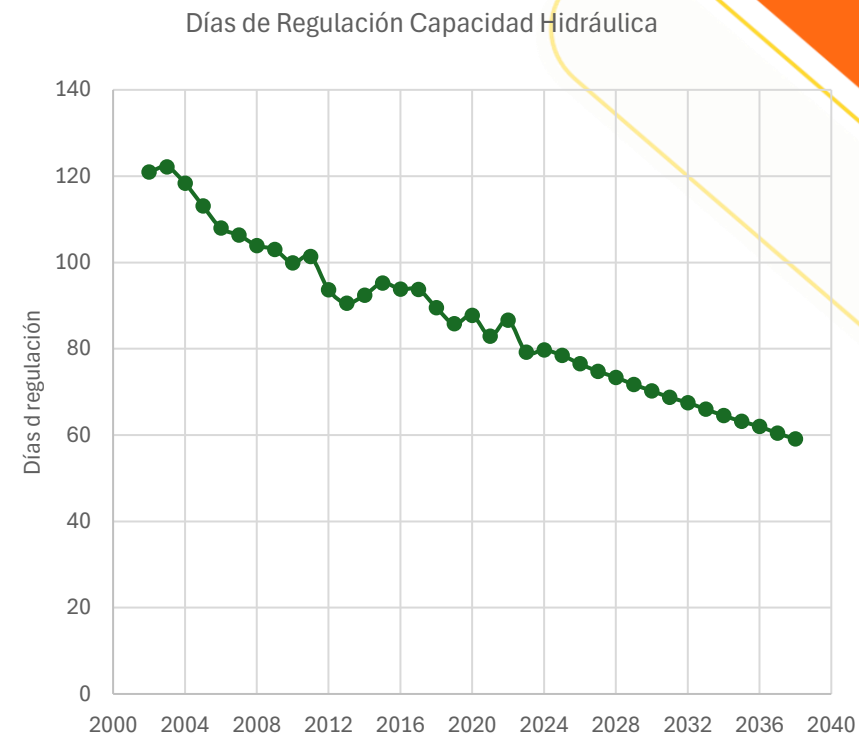
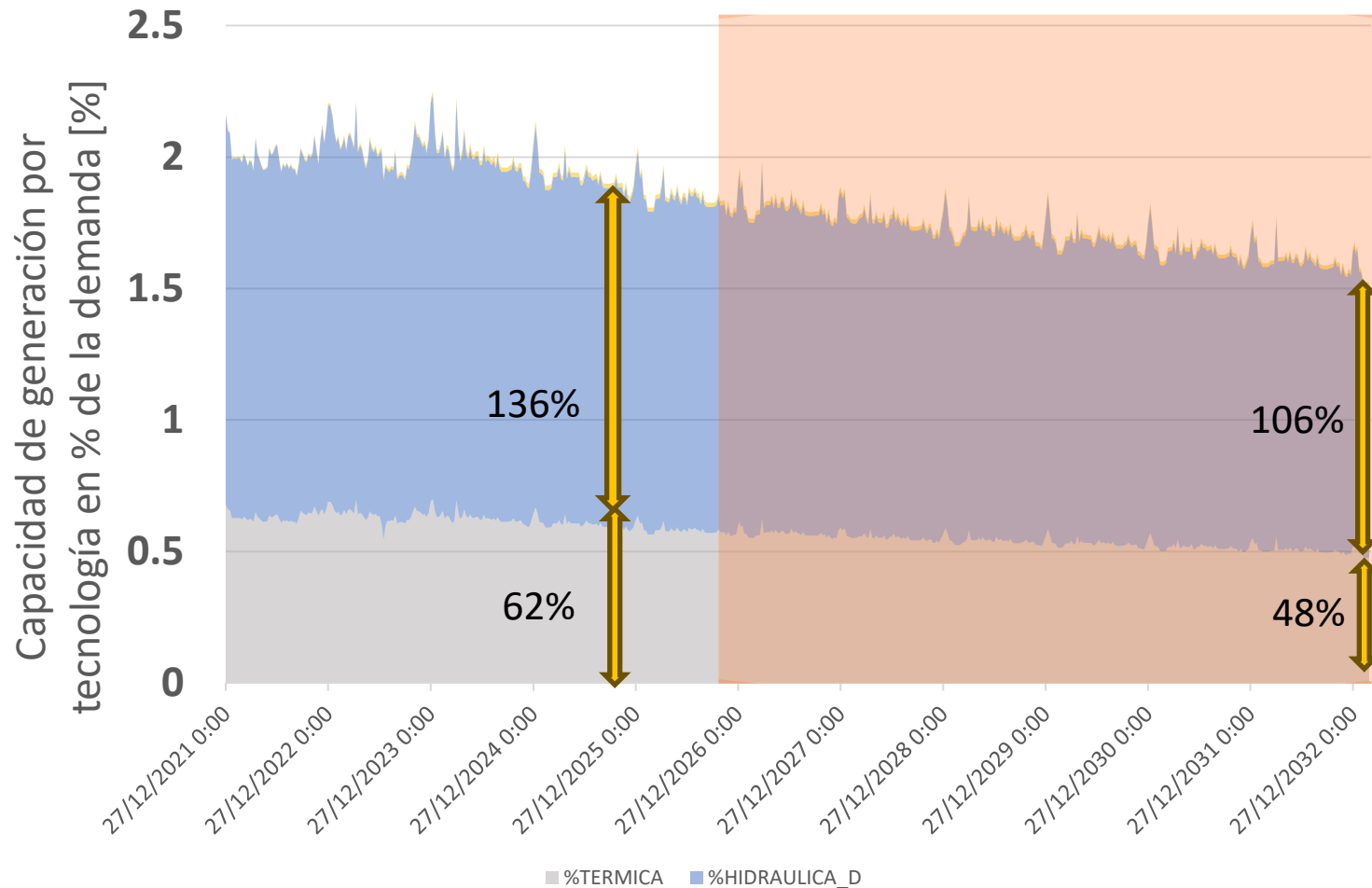
Se debe mantener una matriz diversificada, con fuentes de producción renovable a lo largo del territorio y aprovechar la complementariedad estacional y diaria de los recursos hidráulicos, térmicos, eólicos y solares frente a condiciones meteorológicas como los fenómenos de El Niño y La Niña.





➤ Evolución de la capacidad instalada

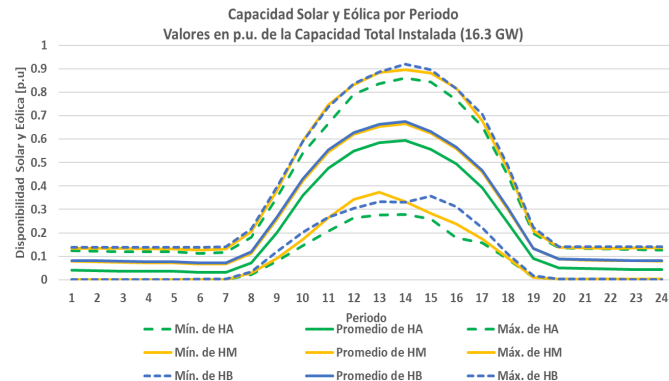
Escenario sin la inclusión de nuevos proyectos



De no materializar los planes de expansión de generación en los próximos años, la capacidad instalada del sistema respecto a la demanda se ubicará en mínimos históricos (156% Aproximadamente).

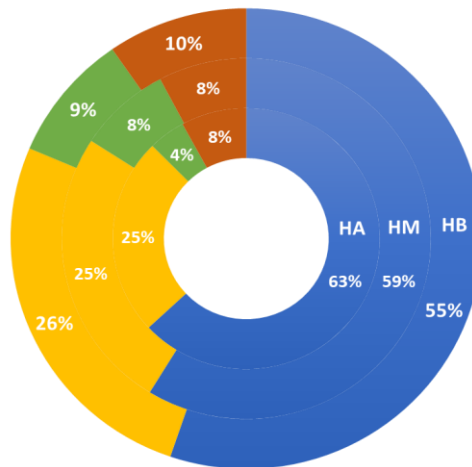


➤ Impacto generación solar

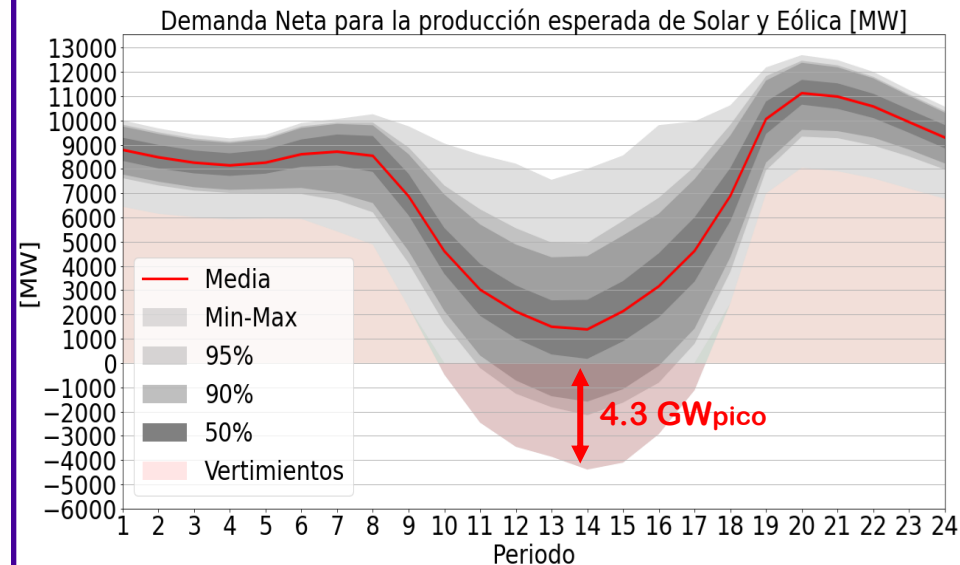


Los resultados indican alta variabilidad del recurso eólico y solar, con disponibilidades del recurso que varían a nivel horario entre el **90% y el 22%** de la capacidad instalada.

CASOS 2029-2030



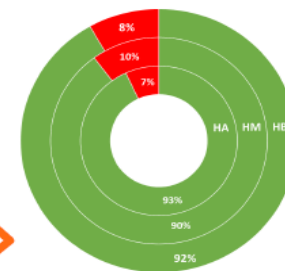
Las fuentes solares y eólicas atienden entre **el 29% y el 35%** de la demanda energética en todos los escenarios, con valores de máxima producción horaria que superan el **85%** de la demanda, el parque térmico complementa los periodos de baja capacidad de producción solar, eólica e hídrica.



En los tres escenarios evaluados en el estudio, se encuentran vertimientos de generación solar y eólica superiores al 8% de la capacidad en todas las hidrologías.

En los tres escenarios, los vertimientos solares y eólicos alcanzan al menos 7.8 GWh por día.

Vertimientos Solar y Eólica 2029-2030



Generación Solar y Eólica Vertimientos Solar y Eólica

La **instalación de recursos de generación solar y eólica con capacidad de almacenamiento** ayudaría a que la energía disponible en periodos de alta radiación y viento puedan ser inyectadas al sistema en periodos en los cuales se cuente con menor recurso primario, evitando vertimientos y mejor uso de la infraestructura.



➤ Acciones requeridas

Suficiencia Energética



Entrada oportuna de proyectos

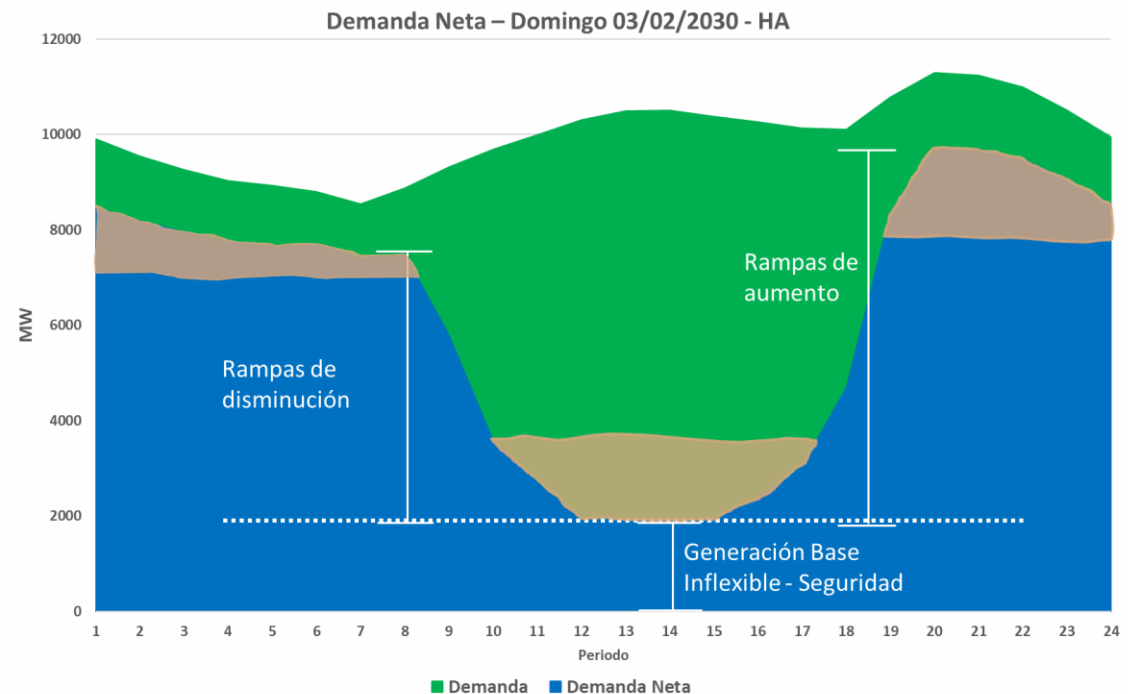
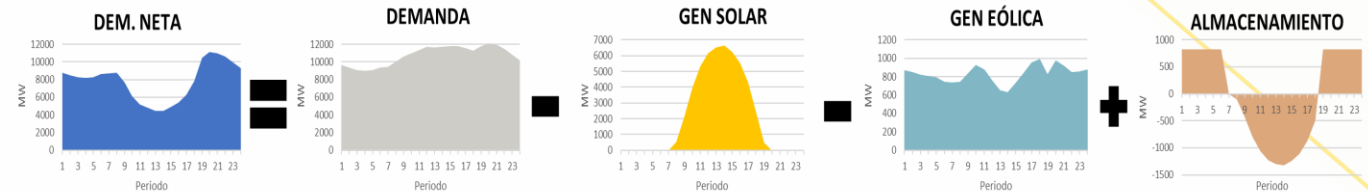
Realizar **coordinación interinstitucional** para asegurar la **entrada en operación de los proyectos de generación y transmisión** que permitan atender el crecimiento de la demanda con los niveles de calidad, confiabilidad y economía esperados por la sociedad.

Almacenamiento

Incentivar la **instalación de baterías y la hibridación de recursos de generación solar y eólica con capacidad de almacenamiento**, para un mejor aprovechamiento del recurso

Evitar la concentración de producción

Tener en cuenta en la **asignación de puntos de conexión** **criterios de complementariedad** energéticas y de potencia, con el fin de disminuir los riesgos de reducciones masivas de la producción durante condiciones atmosféricas adversas en regiones con alta concentración de recursos solares y eólicos.





Flexibilidad en potencia

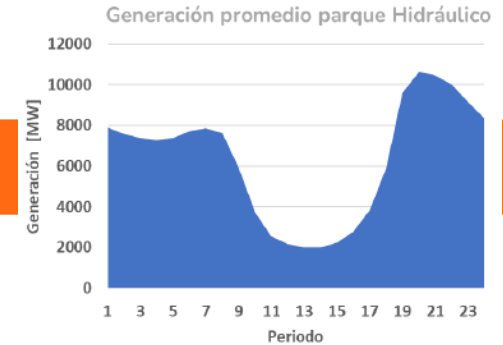
Con la incorporación de 16 GW de generación renovable, el patrón de balance entre la carga y generación a lo largo del día cambia significativamente, producto principalmente del ciclo diario de producción de la generación solar.

Se observan requerimientos de rampas de bajada de generación en la mañana, y de rampas de subida en la tarde, que exigirán mayor flexibilidad del parque generador existente, así como otras dinámicas y comportamientos que revisten importancia para la atención segura y confiable de la demanda.

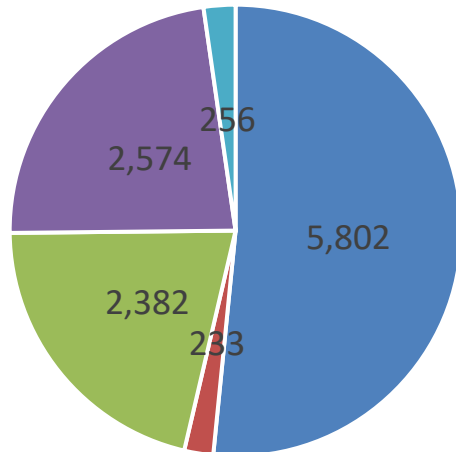


A 2024, Colombia cuenta con 11.3 TWh de almacenamiento en embalses*, con una potencia pico de 11 GW aproximadamente.

Capacidad del almacenamiento hidráulico

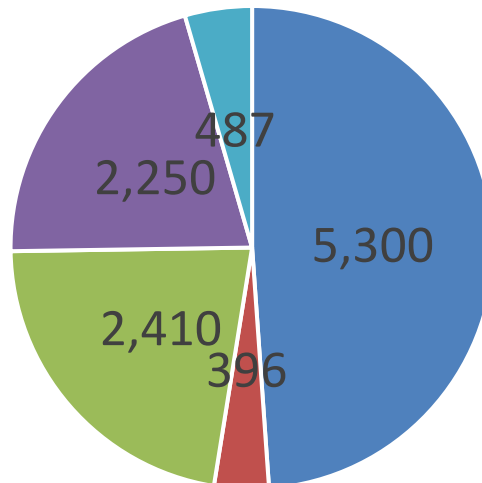


Capacidad de almacenamiento - GWh



11254 GWh

Potencia MW



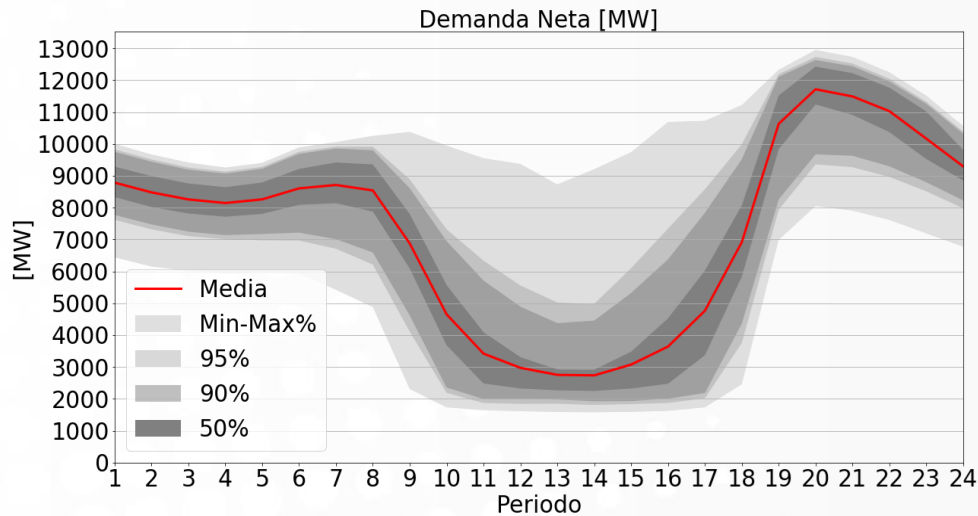
11 GW pico

Contar con capacidad de almacenamiento hidráulico, le permite al sistema eléctrico colombiano administrar de forma eficiente la variabilidad e incertidumbre asociada a las fuentes renovables no convencionales, permitiendo el traslado de grandes bloques de energía a nivel diario, horario y entre las temporadas secas y lluviosas.

* Se considera únicamente embalse principal de cada planta (exceptuando Urra, Salvajina, Betania y Ituango), no se consideran aportes ni acoplamientos hidráulicos como cadenas. El ejercicio es comparativo frente a una situación similar de una batería.

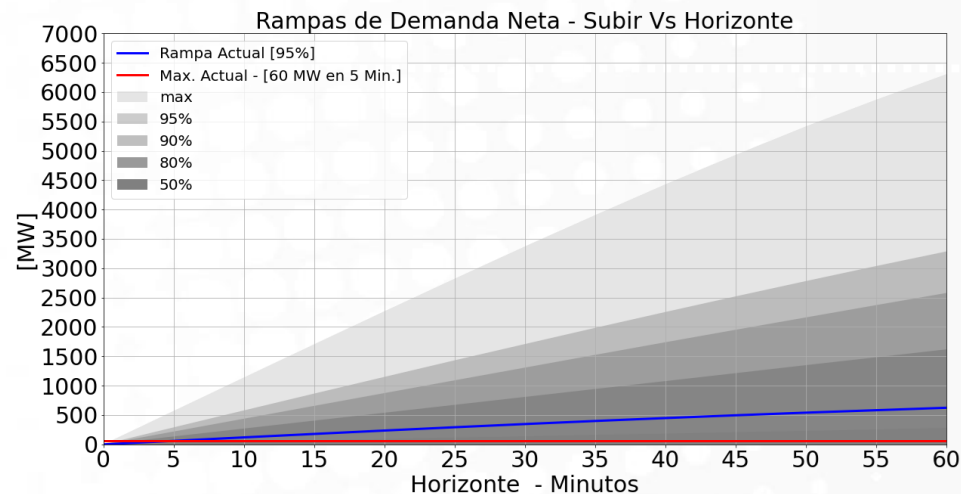


► Flexibilidad en potencia



Complementariedad intra-horaria

Los escenarios de expansión muestran concentración de producción solar en los periodos de sol, y altos requerimientos de generación hidráulica y térmica en los periodos de punta.



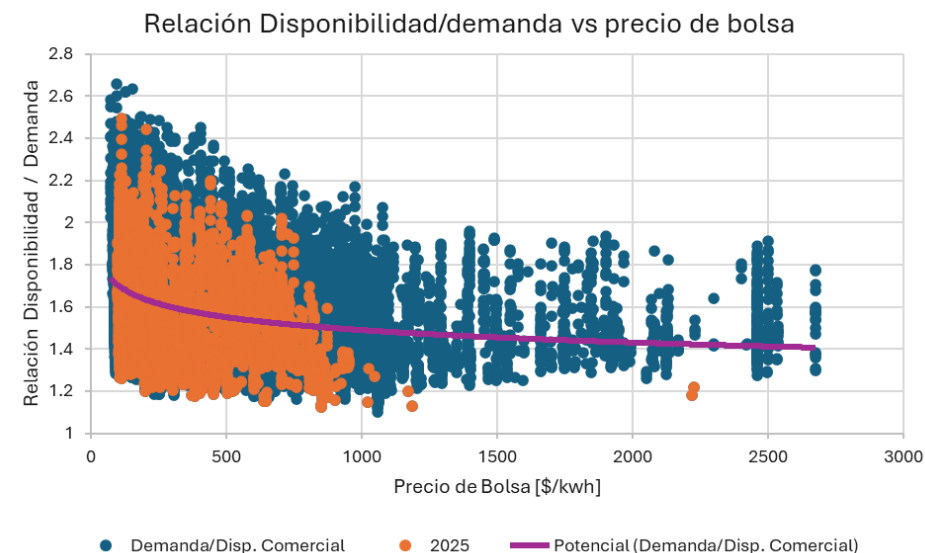
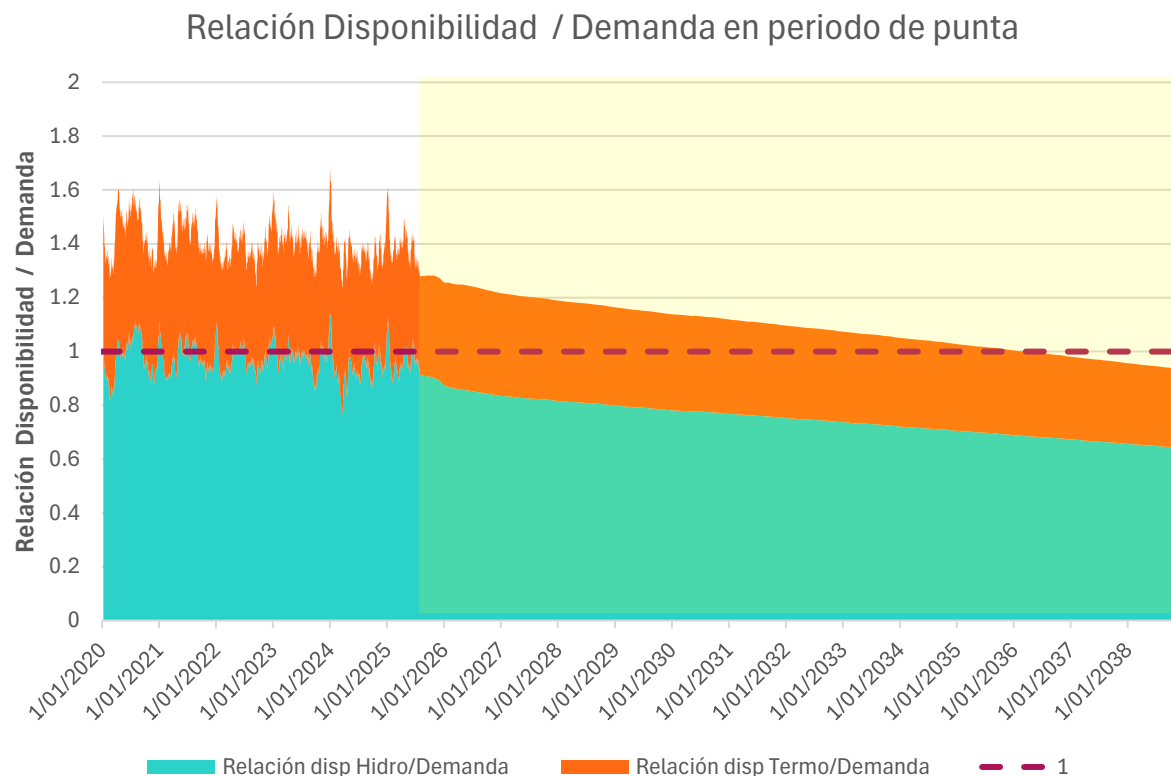
Rampas de demanda neta

Necesidades de flexibilidad para mantener la estabilidad del SIN frente tasas de incremento de los requerimientos de regulación de hasta 6000 MW en una hora.



► Potencia en punta

La disponibilidad real promedio hidráulica esperada en los periodos de punta se encuentra por debajo de la demanda máxima actual.

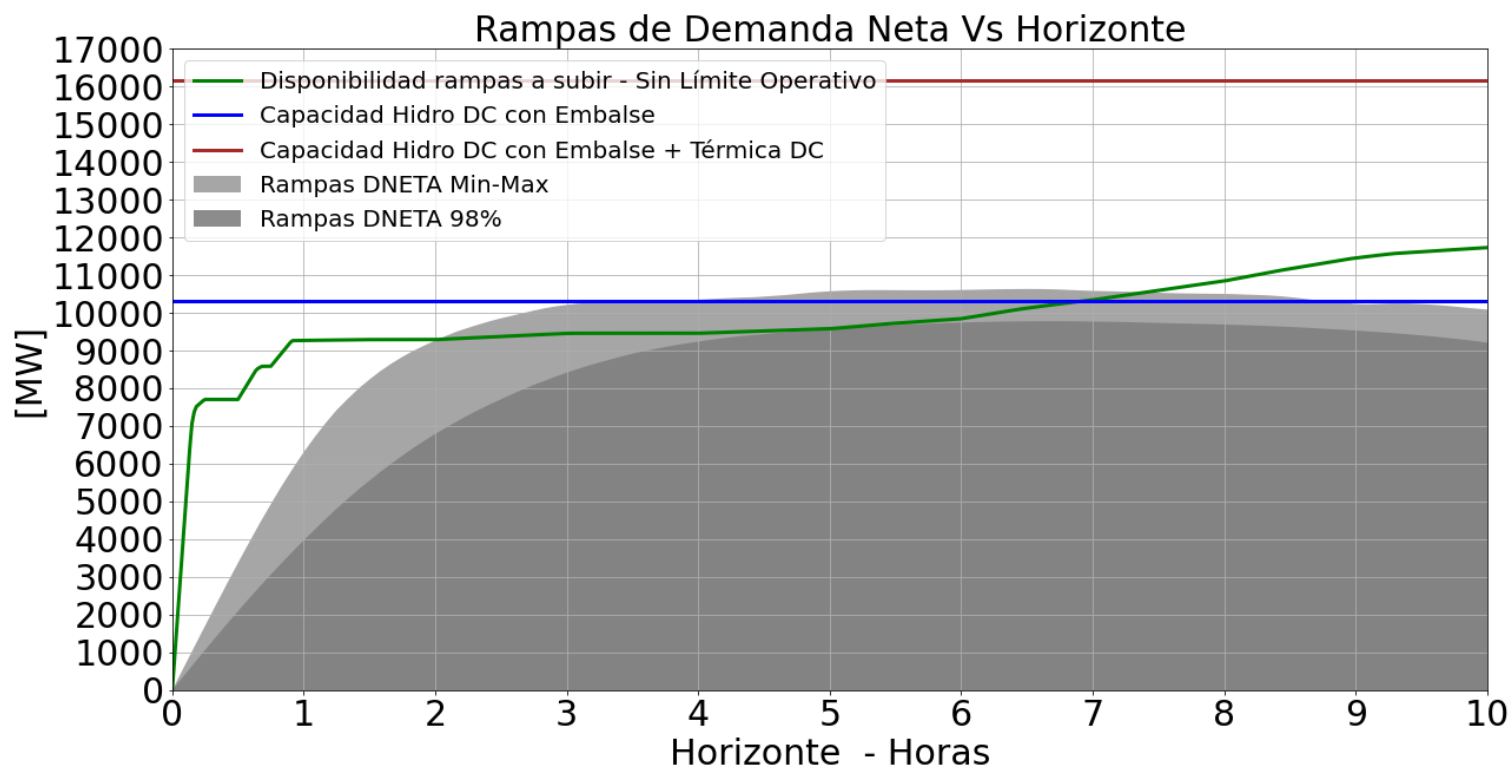


La menor relación del parque de generación gestionable vs la demanda, implica:

- Menor flexibilidad del sistema
- Mayor utilización del parque térmico para atención de demanda.



Capacidad de Rampas



Disponibilidad de rampas considerando tiempo de aviso
por re-nominación de gas

Complementariedad intra-horaria

En función de la disponibilidad del parque hidráulico gestionable y la flexibilidad del parque térmico, para los valores de rampas identificados se podrían presentar condiciones de déficit del servicio.



➤ Acciones requeridas

Flexibilidad en potencia



➤ Flexibilidad del parque solar y eólico

Incentivar desde la asignación de puntos de conexión o desde mecanismos de mercado la integración de **plantas de generación mixtas que incorporen baterías y permitan atender la demanda de energía en los picos de consumo.**

➤ Baterías para servicios complementarios

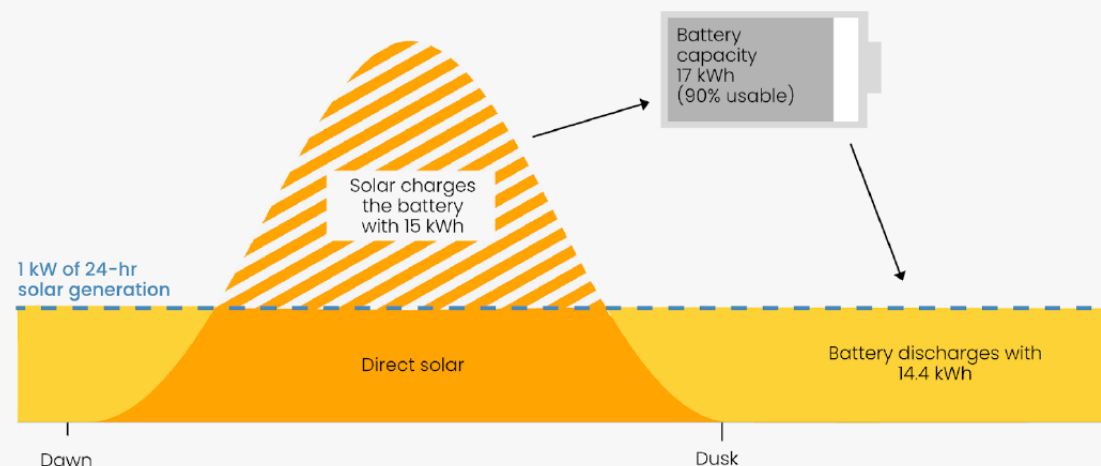
Incentivar la instalación de baterías para la presentación de nuevos servicios de red, requeridas para balancear continuamente el sistema (AGC, rampas, reserva primaria).

➤ Potencia en punta

Incentivar la instalación de baterías para el servicio de reserva y la atención de potencia en punta durante periodos de escases de potencia.

17 kilowatt hours of battery are enough to flatten solar to 1 kilowatt of 24-hour solar generation

Modelled operation of 5kW solar and 17 kWh battery on an average day in Las Vegas, kW per hour



Source: Ember analysis of JRC hourly solar radiation data
Assumptions: Solar PV (fixed system), DC-coupled with battery; Losses: 3.8% PV to grid; 5.6% PV to grid via battery; 90% usable battery capacity
Solar output profile based on the average generation per hour across 2022

EMBER

Fuente: Solar electricity every hour of every day is here and it changes everything - EMBER



Capacidad de transporte

La red de transporte es un actor clave para el aprovechamiento eficiente de la matriz de generación, garantizar la entrada oportuna de proyectos de expansión, desplegar nuevas tecnologías, repotenciar la red existente y abordar las problemáticas asociadas al envejecimiento de la infraestructura y el aumento de los niveles de cortocircuito, resulta indispensable para integrar mayor capacidad de FERNC al sistema.

Restricciones eléctricas operativas y por agotamiento de la capacidad de corto

51 subestaciones que superan el nivel de cortocircuito

167 restricciones eléctricas y operativas en red completa

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

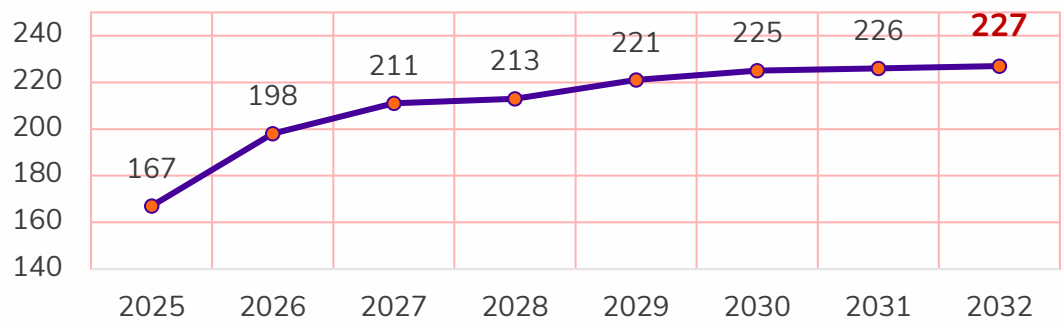
81 nodos en configuración radial



Congestiones en la red de transmisión

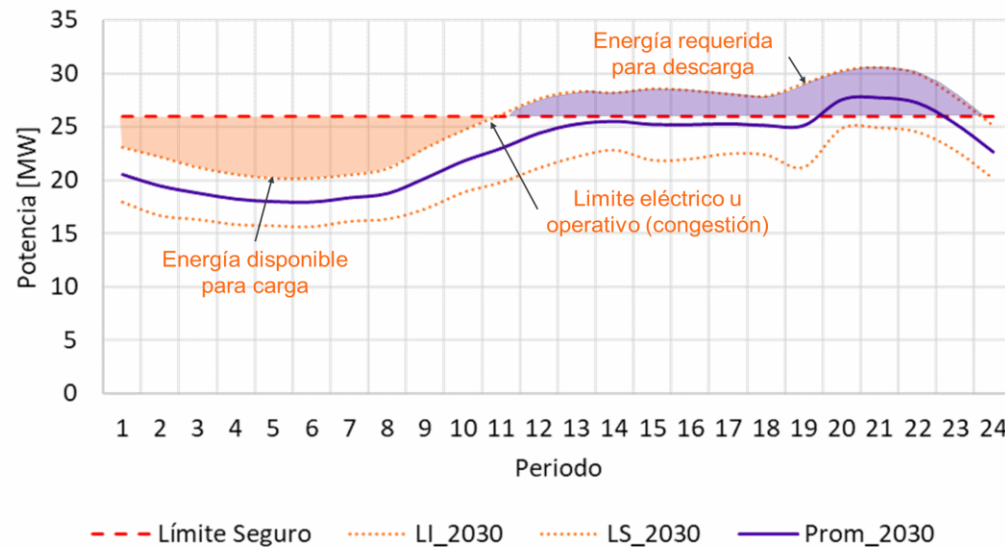
- 1 GCM – (Guajira-Cesar-Magdalena)**
Agotamiento capacidad de transformación 220/115 kV.
Riesgo de demanda no atendida.
Dependencia de generación térmica.
- 2 Bolívar**
Falta definición de proyectos estructurales de expansión
Riesgo de demanda no atendida
Dependencia de generación térmica
- 3 Norte de Santander**
Falta definición de proyectos estructurales de expansión.
Dependencia de generación térmica.
- 4 Bogotá**
Riesgo de demanda no atendida en la Sabana Norte de Bogotá
Dependencia de la generación de Termozipa.
- 5 Atlántico**
Agotamiento capacidad de transformación 220/115 kV.
Riesgo de demanda no atendida.
Dependencia de generación térmica.
- 6 Córdoba - Sucre**
Agotamiento capacidad de transformación 500/110 kV.
Riesgo de demanda no atendida.
- 7 Red DISPAC – Chocó**
Bajas tensiones ante contingencias sencillas.
Riesgo de demanda no atendida.
Definición de obras sin selección de inversionistas.
- 8 Cauca - Nariño**
Bajas tensiones ante contingencias sencillas.
Riesgo de demanda no atendida.
Limita la capacidad de exportación a Ecuador.

Evolución de las restricciones 2025 - 2032

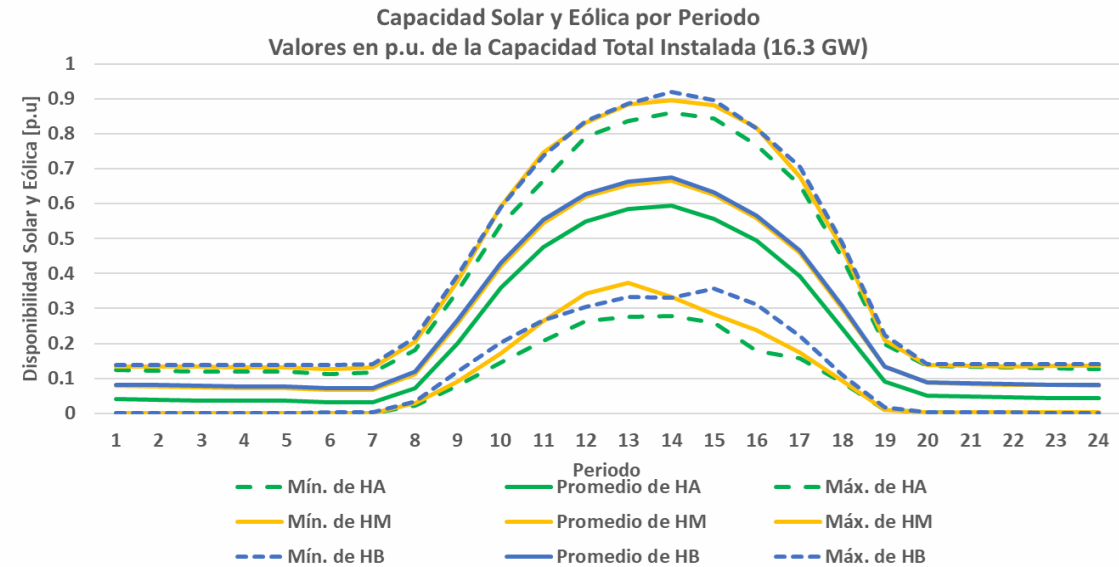


➤ Capacidad de transporte

Disponibilidad de capacidad de transporte de energía para efectuar ciclos de carga/descarga



Disponibilidad del recurso para efectuar ciclos de carga.

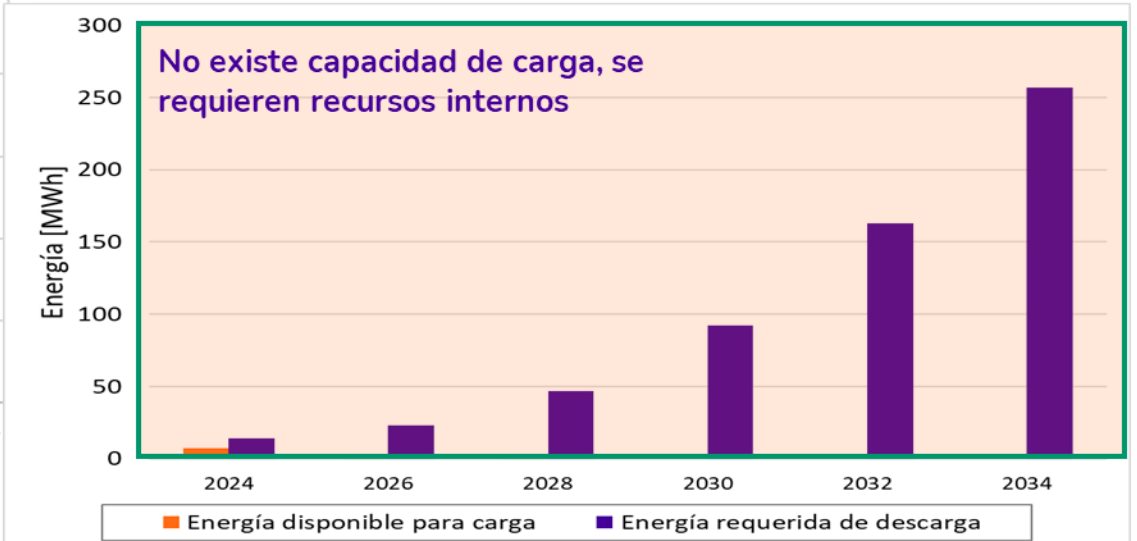
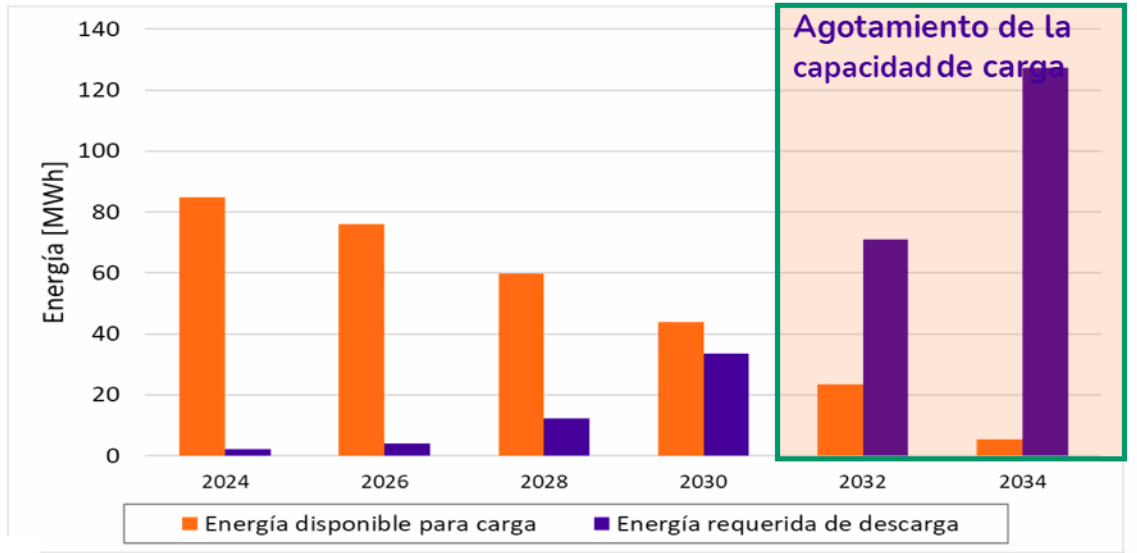
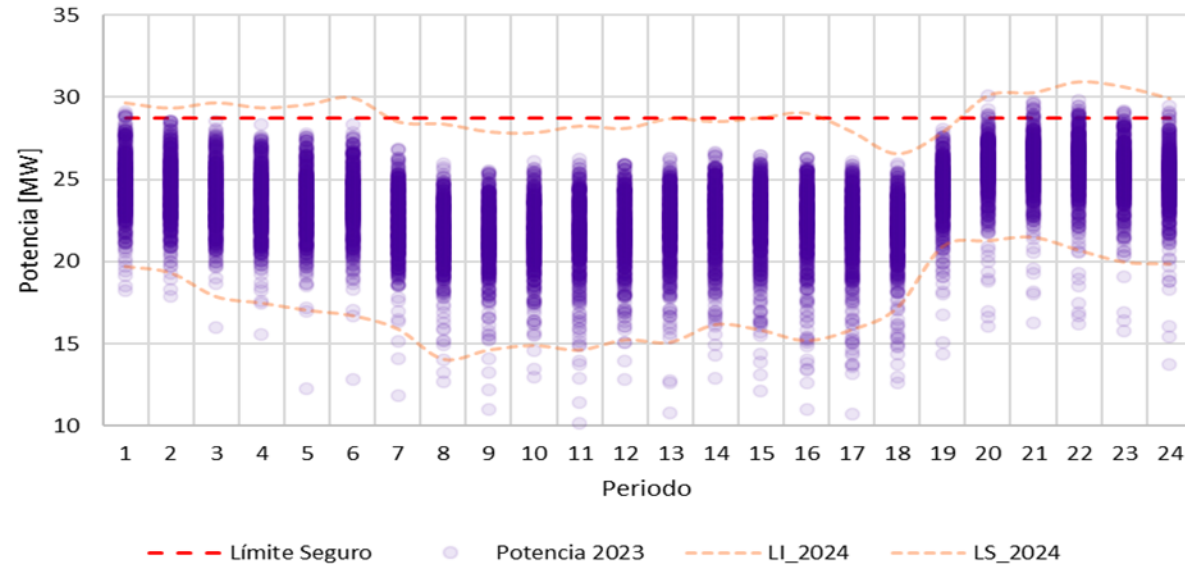
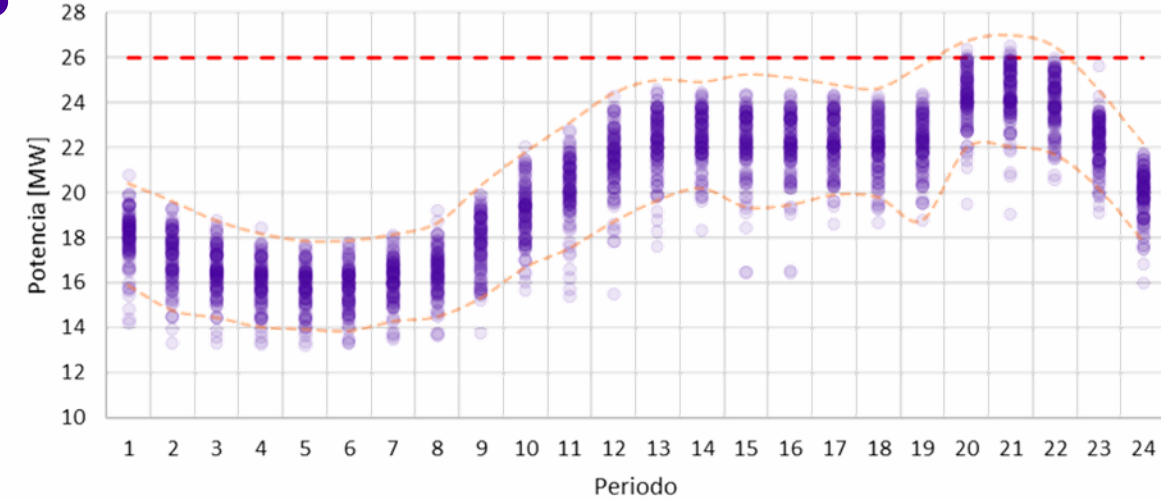


En escenarios de amplia integración de generación variable y retrasos en el desarrollo de la infraestructura, la utilización de baterías para mitigar restricciones eléctricas y operativas no elimina la necesidad de desarrollar la red de transporte. Administrar de forma eficiente la variabilidad de las fuentes primarias de producción y la capacidad de transporte de la red, y coordinar estas acciones con el desarrollo de la infraestructura de transportes es fundamental en un escenario de transición energética acelerada.





► Capacidad de transporte – Ejemplos baterías





➤ Acciones requeridas

Capacidad de transporte



➤ Aplanamiento de la curva de demanda

Considerar las **baterías como mecanismo para mitigar problemas de infraestructura de transporte y/o aplanamiento de la curva de consumo y producción**, frente a lo cual se recomienda:

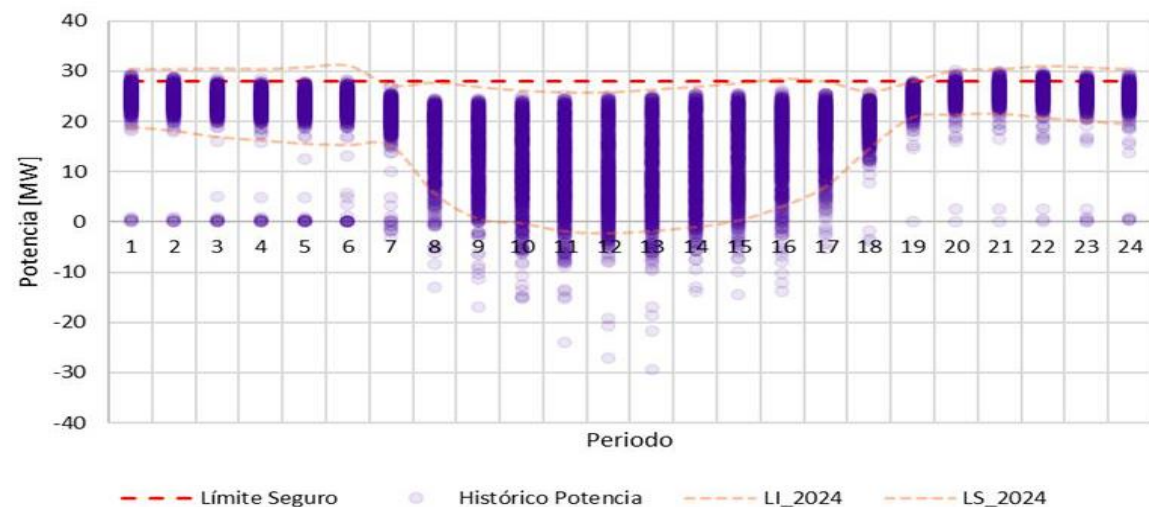
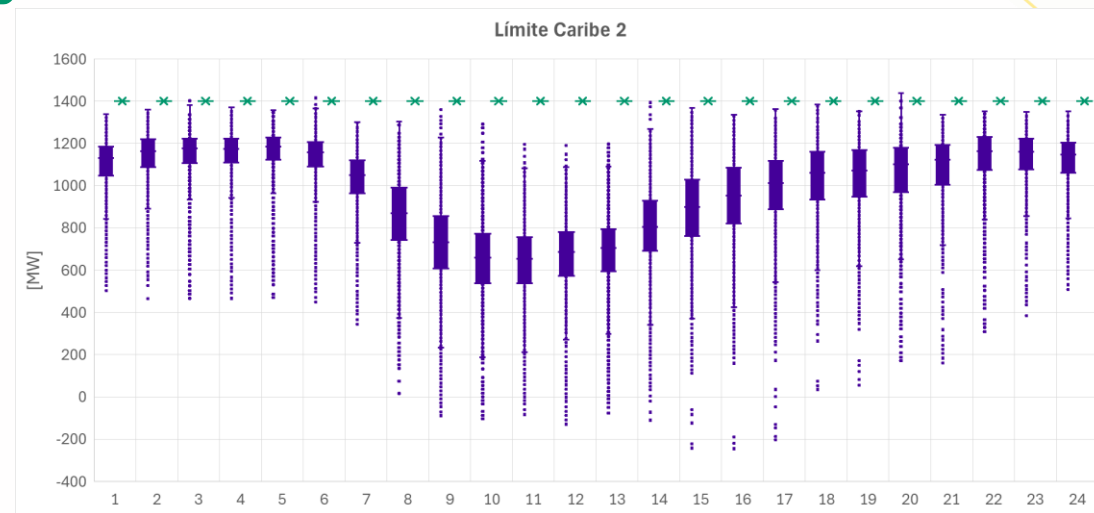
- Considerar en la asignación de puntos de conexión, la **priorización de proyectos de generación mixtos**, con capacidad de almacenamiento y ubicados en cercanía a la demanda.
- Incentivar que los planes de expansión de los Operadores de Red **incluyan baterías y/o soluciones de generación localizada, para atender el crecimiento en la demanda de electricidad y mitigar problemáticas de agotamiento de la red de transmisión**, en aquellos casos que aplique.

➤ Restricciones eléctricas y operativas

Actualizar la resolución CREG 098 de 2018, permitiendo la incorporación de baterías para la solución de restricciones eléctricas y operativas

➤ Generación localizada

Incentivar y priorizar soluciones de generación localizada, incluidas plantas solares y eólicas con baterías para la solución de restricciones eléctricas y operativas.





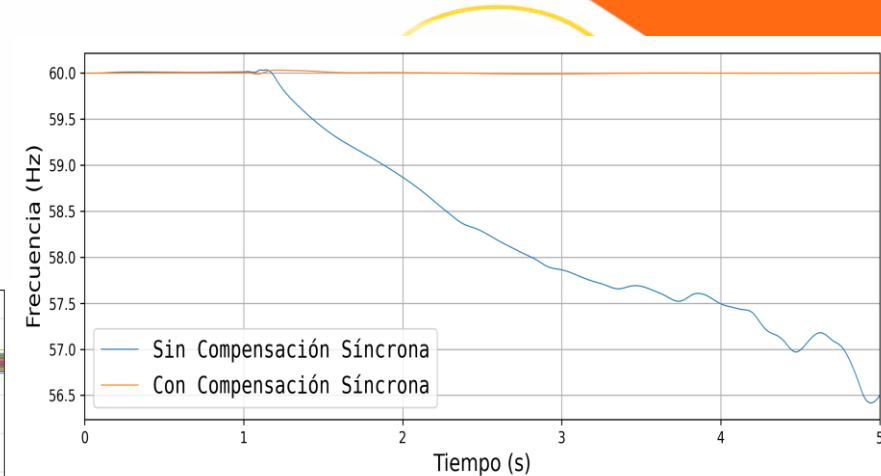
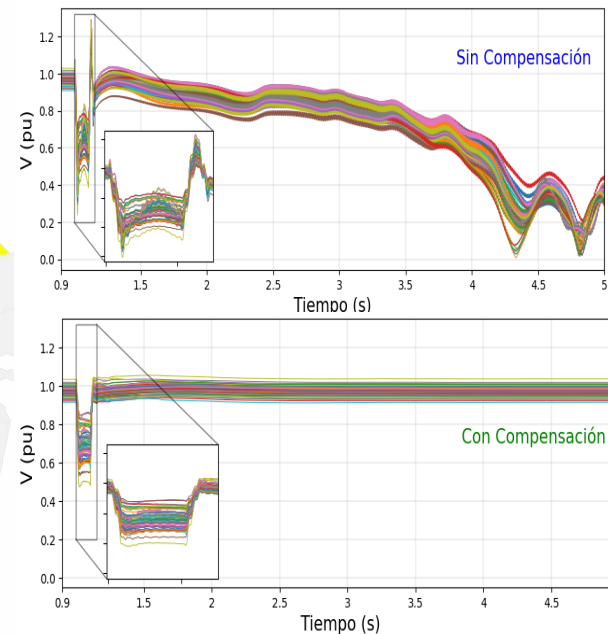
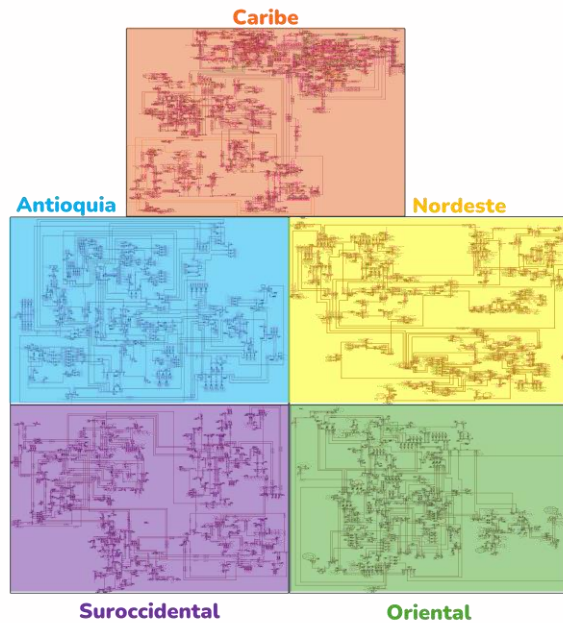
Calidad, seguridad y confiabilidad

La calidad seguridad y confiabilidad en la operación del sistema eléctrico con la integración de 16 GW de generación no síncrona, será posible en la medida que los déficits de fortaleza de red (aporte de corto circuito “real”), inercia y servicios de contención de la frecuencia sean abordados desde la regulación y la planeación de la expansión, y desplegadas las herramientas requeridas para mantener la operación estable en este escenario.

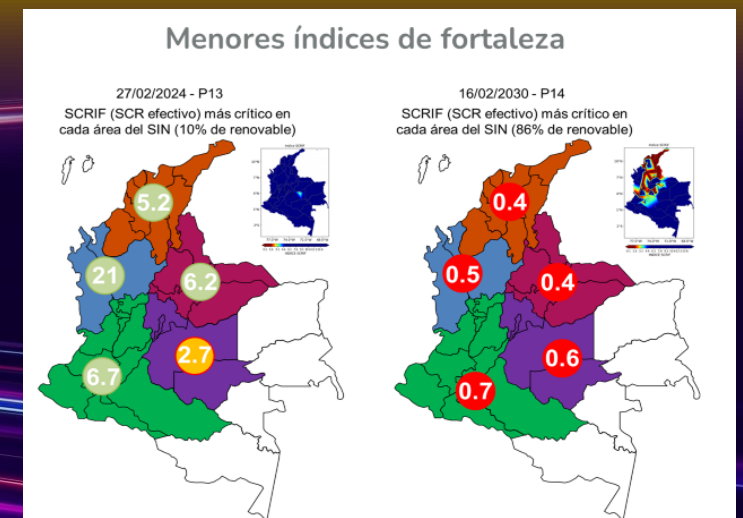
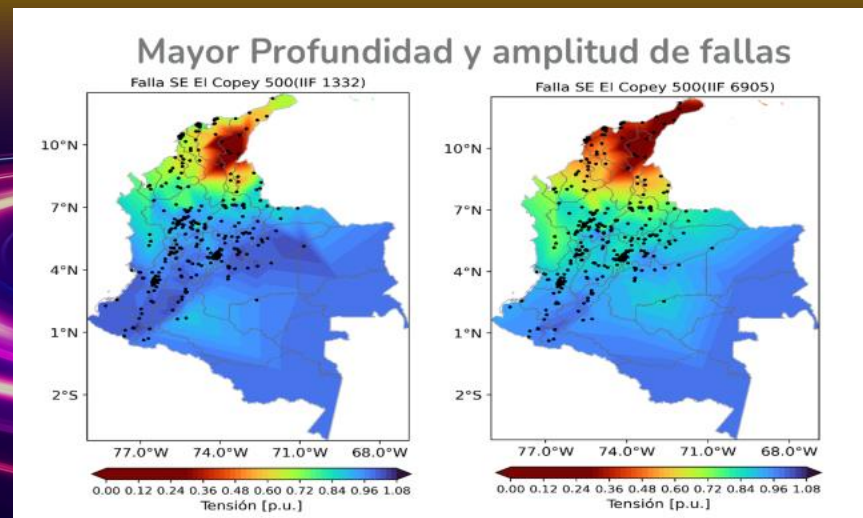




➤ Déficit de corto circuito e inercia

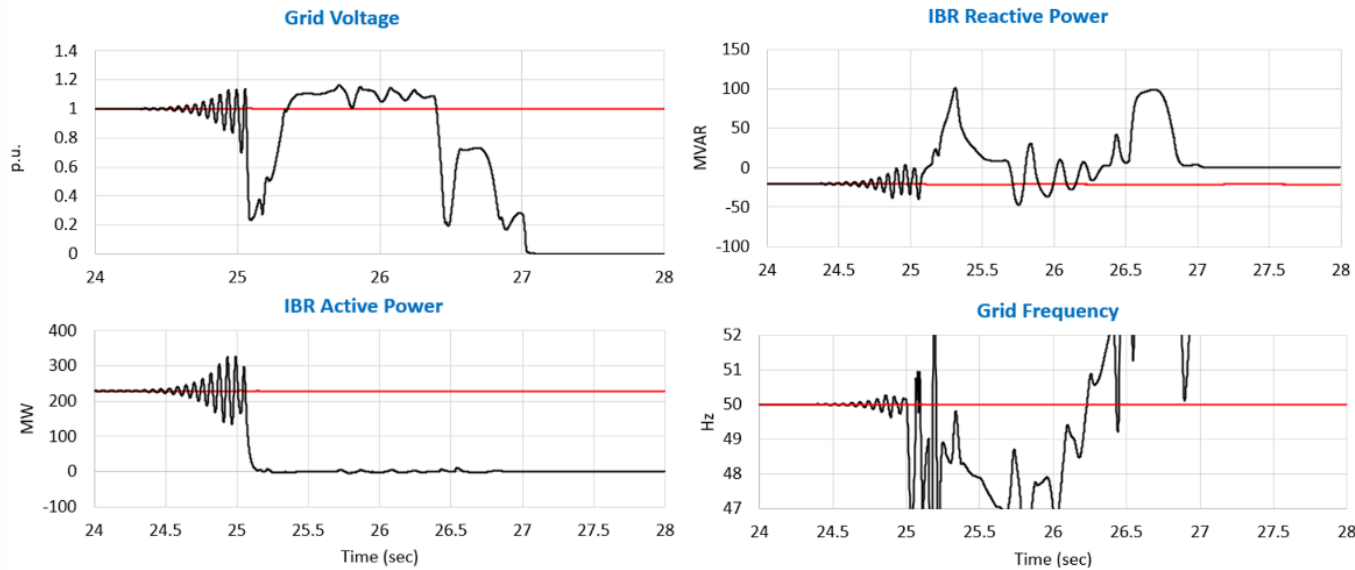


Se han observado condiciones de red débil y baja inercia que podrían causar inestabilidad en el sistema y desconexiones masivas de IBRs





► Baterías en la estabilización de la red



Fuente: Australian Energy Market Operator, «Voluntary Specification for Grid-Forming Inverters,» pp. 1-23, 2023

Baterías formadoras de red

Aun cuando existen restos técnicos importante para la incorporación de la tecnología GridForming a gran escala (estándares, limitación de corriente, eventos simultáneos frecuencia - voltaje), su despliegue es necesario para mejorar la confiabilidad y seguridad de la red eléctrica

Aporte de inercia sintética
Aporte de corriente de corto circuito
Amortiguamiento (damping)
Capacidad de arranque autónomo
Sobrecarga temporal



Pruebas de desempeño en ambiente EMT

Estándar Grid Forming

XM en compañía de agentes del sector, organizaciones internacionales y fabricantes avanza en la definición de marco conceptual de GRIDFORMING para Colombia.





➤ Acciones requeridas

Calidad, Seguridad y Confiabilidad



➤ Servicio de inercia y Corto Circuito

Regular los servicios de aporte de nivel de cortocircuito y aporte de inercia, así como los niveles mínimos de fortaleza de red y propagación de huecos de tensión aceptables para el sistema.

➤ Desplegar equipos para mejorar los índices de desempeño dinámico del sistema

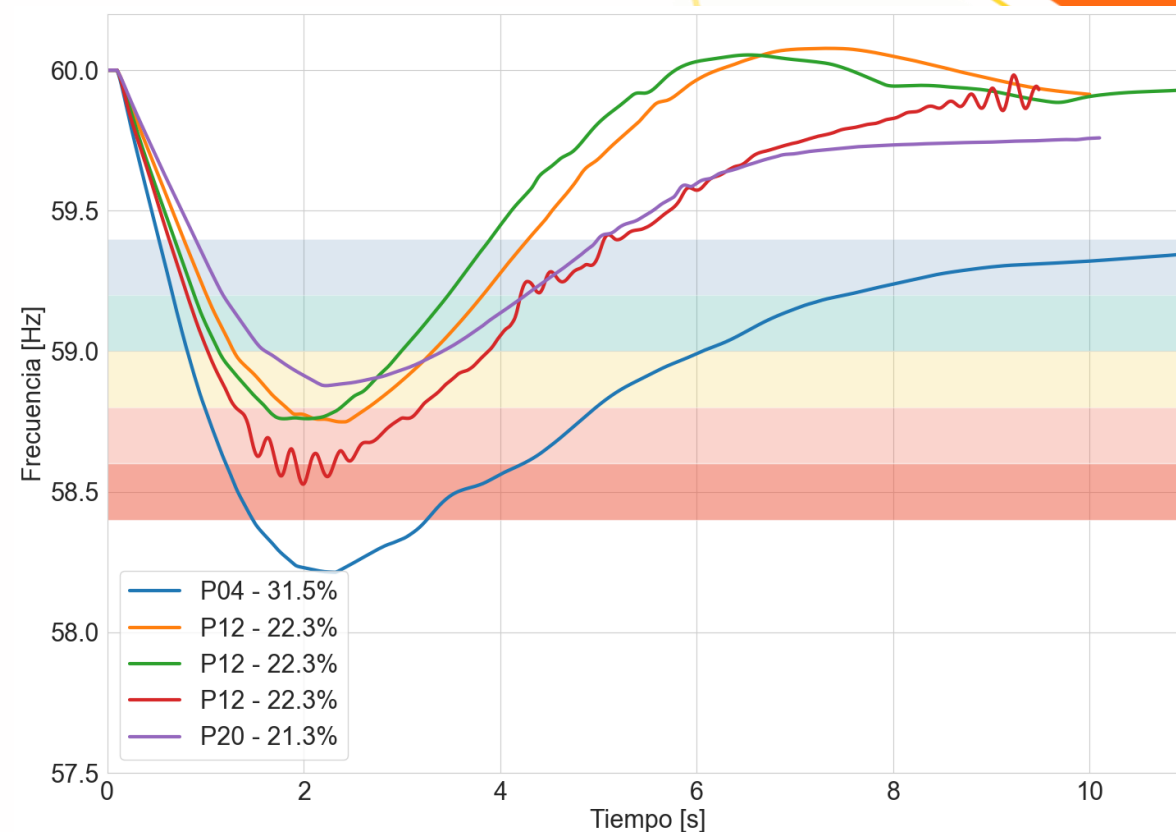
Desarrollar el fortalecimiento del sistema mediante el despliegue a gran escala de **equipos que garanticen los niveles de fortaleza e inercia requeridos para la operación con altos volúmenes de generación solar y eólica.**

➤ Regulación primaria de frecuencia

Habilitar la prestación del servicio de regulación primaria de frecuencia en la plantas solares y eólicas.

➤ GridFormig

Definir la obligatoriedad de que todas las baterías que se integren al SIN sean GridForming, así como los servicios que las mismas deben prestar.



Respuesta en frecuencia, EDAC, inercia

Avanzamos como sector en identificación de los marcos normativos requeridos, buscando mantener **las luces encendidas en todo lugar y en todo momento**



¡Muchas gracias por su atención!

La transición energética es una realidad que requiere **coordinación sectorial e institucional** para hacer frente a los desafíos en la infraestructura, el mercado y la operación.

Jorge Esteban Tobon Villa

Gestor Analisis Eléctrico



IX
CONGRESO
INTERNACIONAL

Almacenamiento
DE ENERGÍA
una **nueva era** de alta Confiabilidad

Hacemos parte de



Organizan:



Centro de Ciencia
y Sensibilización
Ambiental



corferias®
Generadores de
Oportunidades y Progreso

