



COORDINADOR
ELÉCTRICO NACIONAL

Desafíos y Oportunidades de las Baterías de Carnot para el Sistema Eléctrico Nacional

Ernesto Huber J.
Gerente de Operación

26 de noviembre de 2020

1

CONTEXTO

2

ESTUDIO DE DESCARBONIZACIÓN

3

REQUERIMIENTOS DE INERCIA Y NIVEL DE CORTOCIRCUITO

4

APORTE DE BATERIAS DE CARNOT

5

COMENTARIOS FINALES

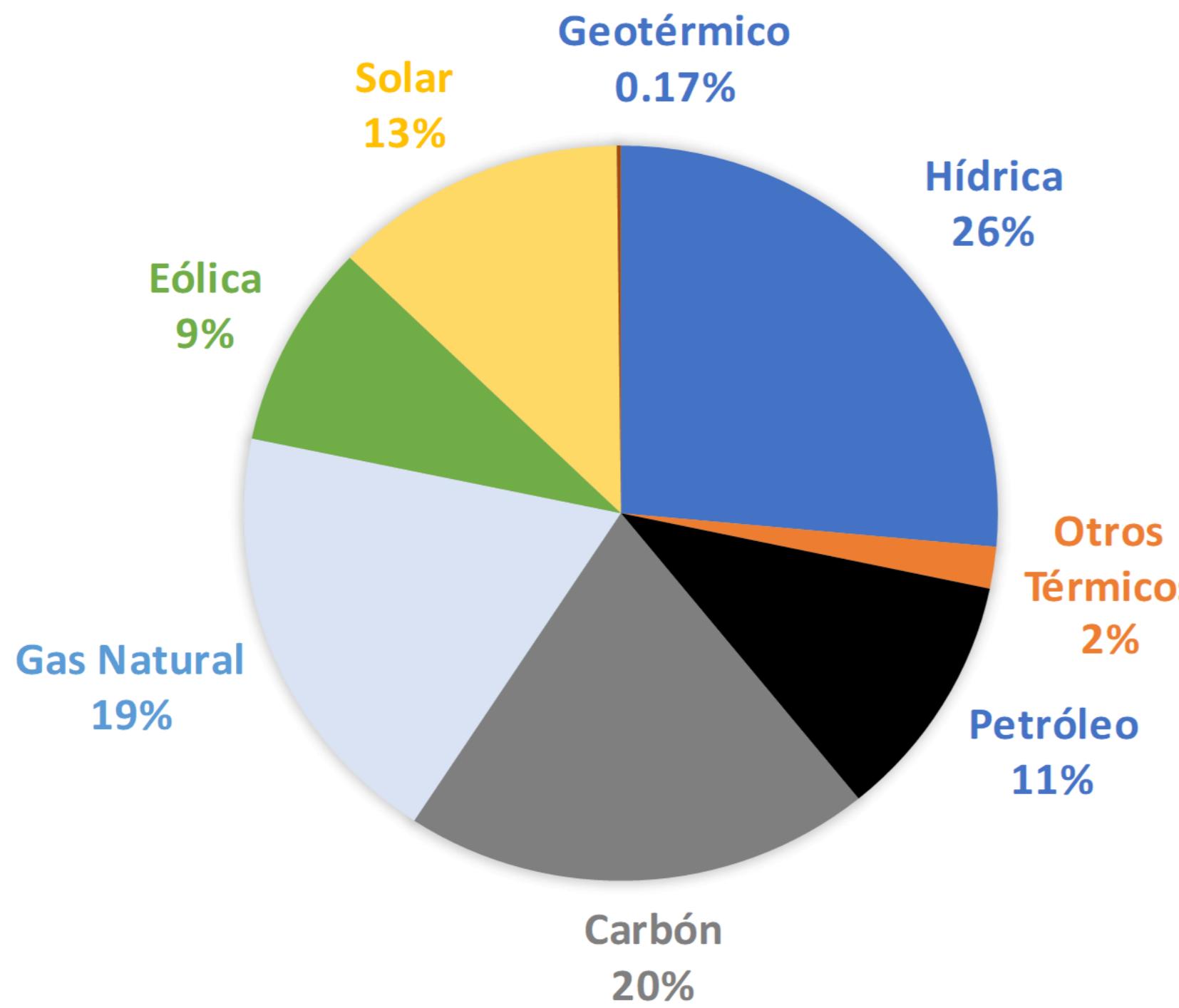
1

CONTEXTO

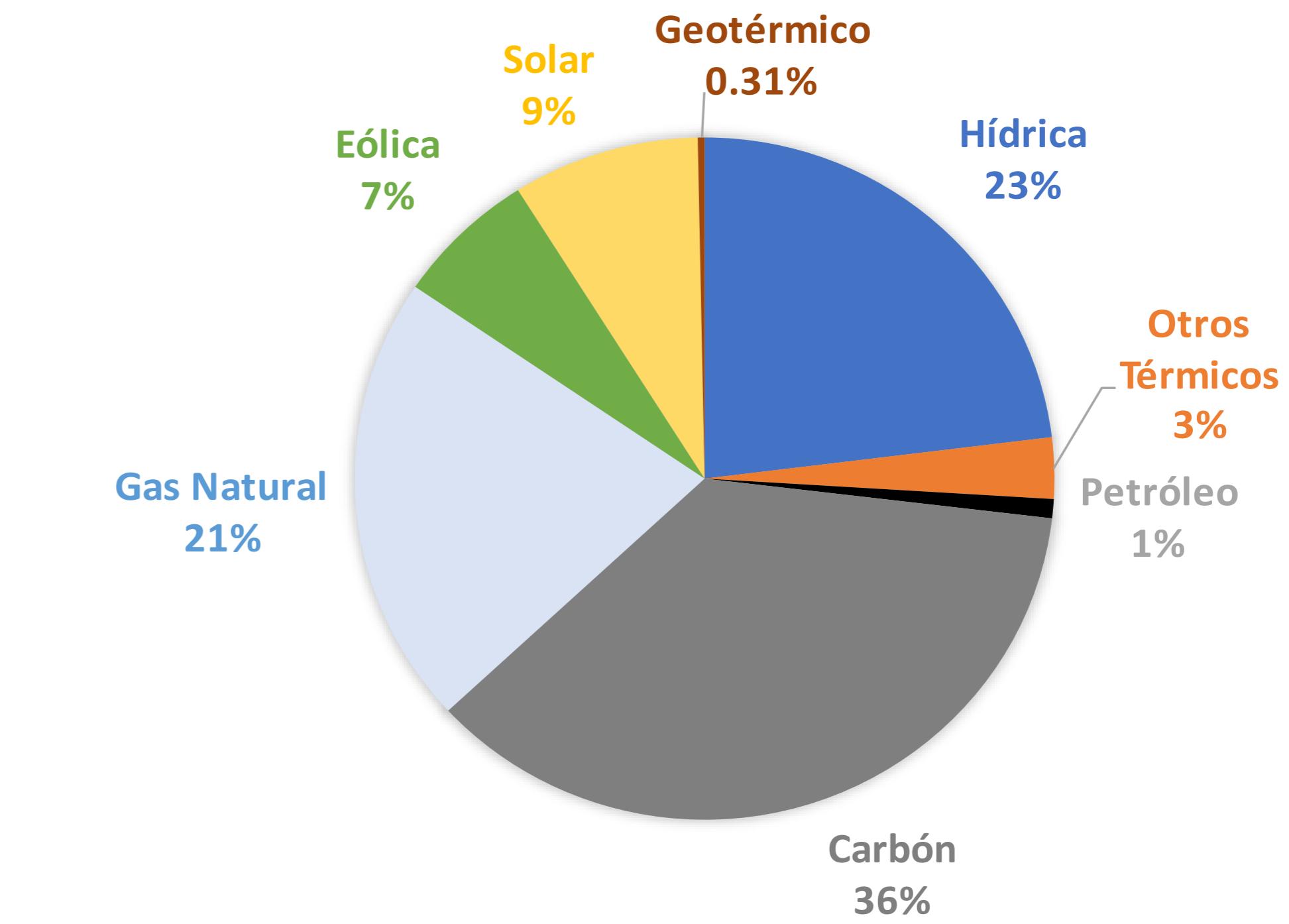
Sistema Eléctrico Nacional (octubre de 2020)



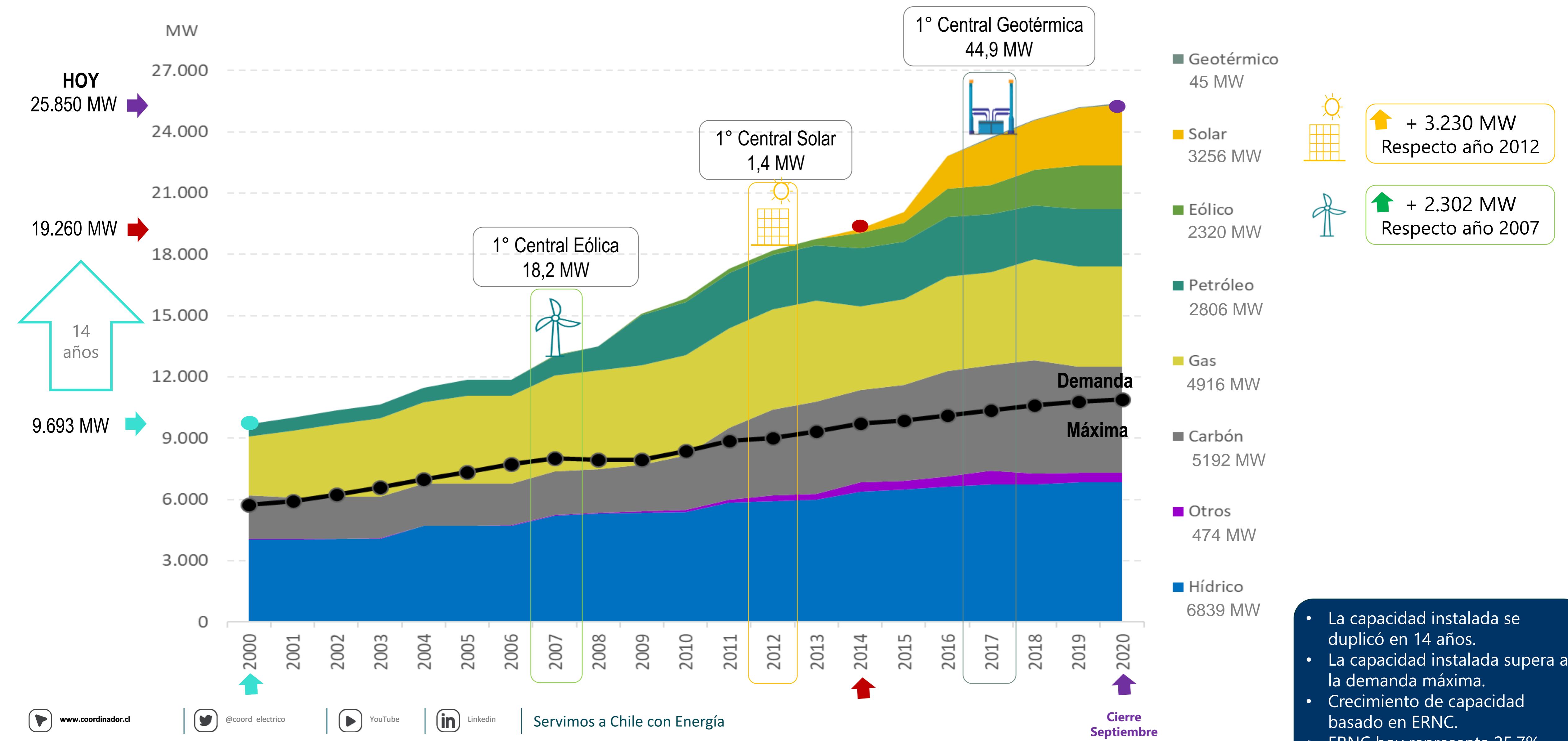
Capacidad Instalada: 25.848 MW



Energía producida (ene-oct. 2020): 57.975 GWh

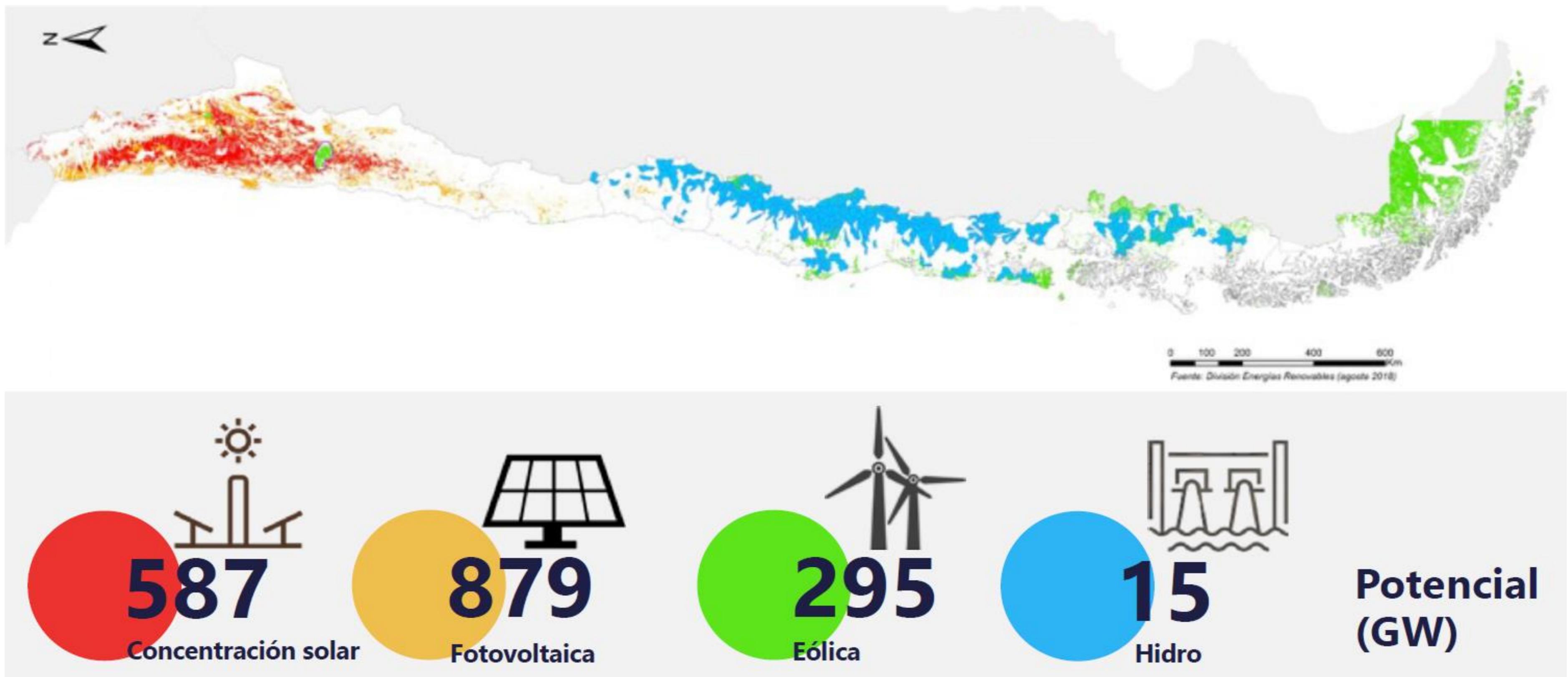


Evolución de la Capacidad Instalada



Potencial Generación Renovable

Chile tiene una basta cantidad de recursos naturales renovables: alrededor de 1.800 GW de energía eólica, solar e hidráulica.



Fuente: Presentación Ministerio de Energía <https://energia.gob.cl/mini-sitio/seminario-internacional-de-transmision-electrica-hvdc>

TREN DE INGRESO PROYECTOS DE GENERACIÓN

TOTAL MW
4.200 aprox

Geotérmica: 33 MW

Solar: 1.800 MW

Eólica: 1.462 MW

Térmica: 620 MW

Hídrica: 260 MW

Proyectos Relevantes

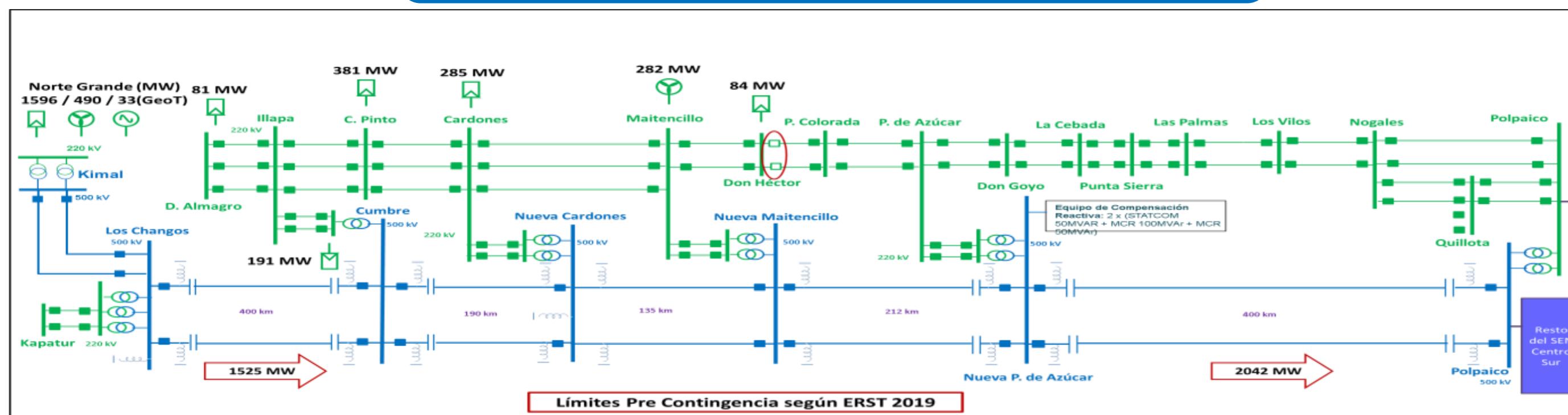
Potencia MW

Plan de Centrales a Interconectar en 2020

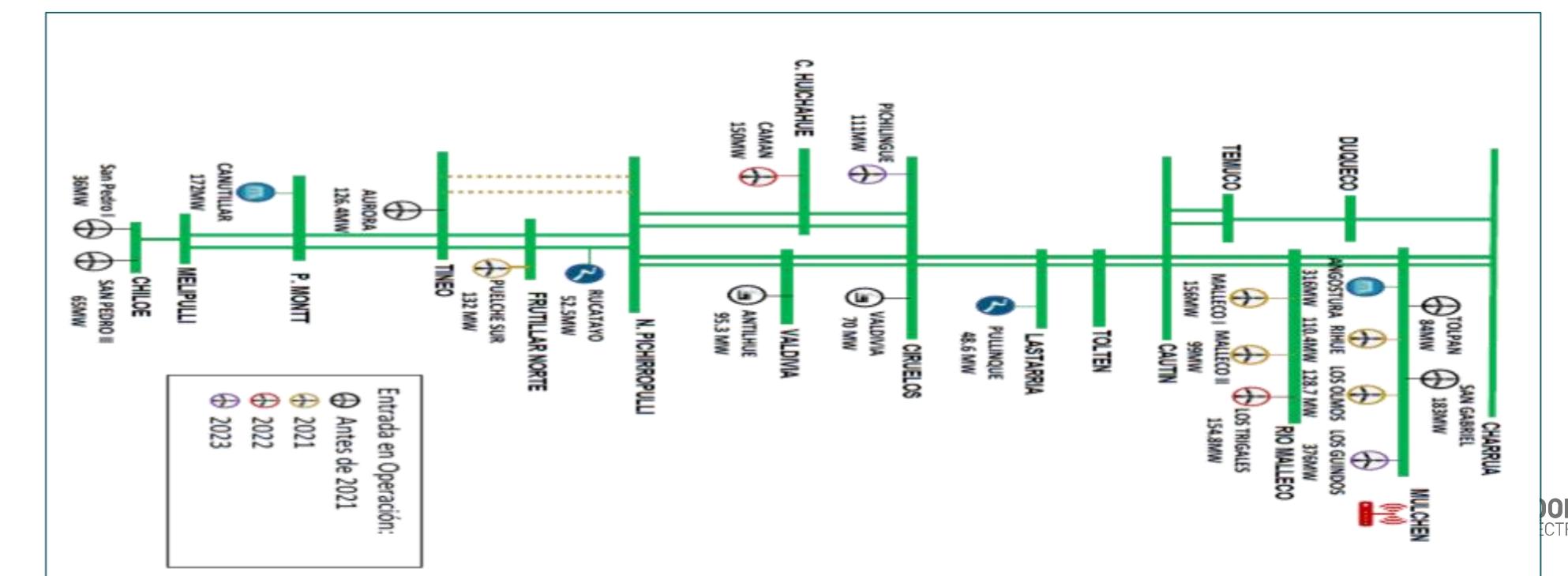
Este año se espera el ingreso de 4.200 MW,
correspondiente a 122 proyectos en desarrollo.

| ene | feb | mar | abr | may | jun | jul | ago | sept | oct | nov | dic |
|-------------------|---------|----------|-----------|-----|-----|-----|------|------|-----|-----|-----|
| | | | | | | | | | 33 | | |
| Geotérmica: 33 MW | | | | | | | | | | | |
| Solar: 1.800 MW | 30 (18) | 135 (26) | 323 (129) | 224 | 122 | 47 | 5 | 108 | 270 | 302 | 60 |
| Eólica: 1.462 MW | 40 | 9 | 87 | 9 | 204 | 84 | | 56 | 159 | 559 | 254 |
| Térmica: 620 MW | 5 | | 431 | 25 | 135 | | 25 | | | | |
| Hídrica: 260 MW | 3 | | 19 | 1 | 18 | | 22,4 | 20 | | 7 | 171 |

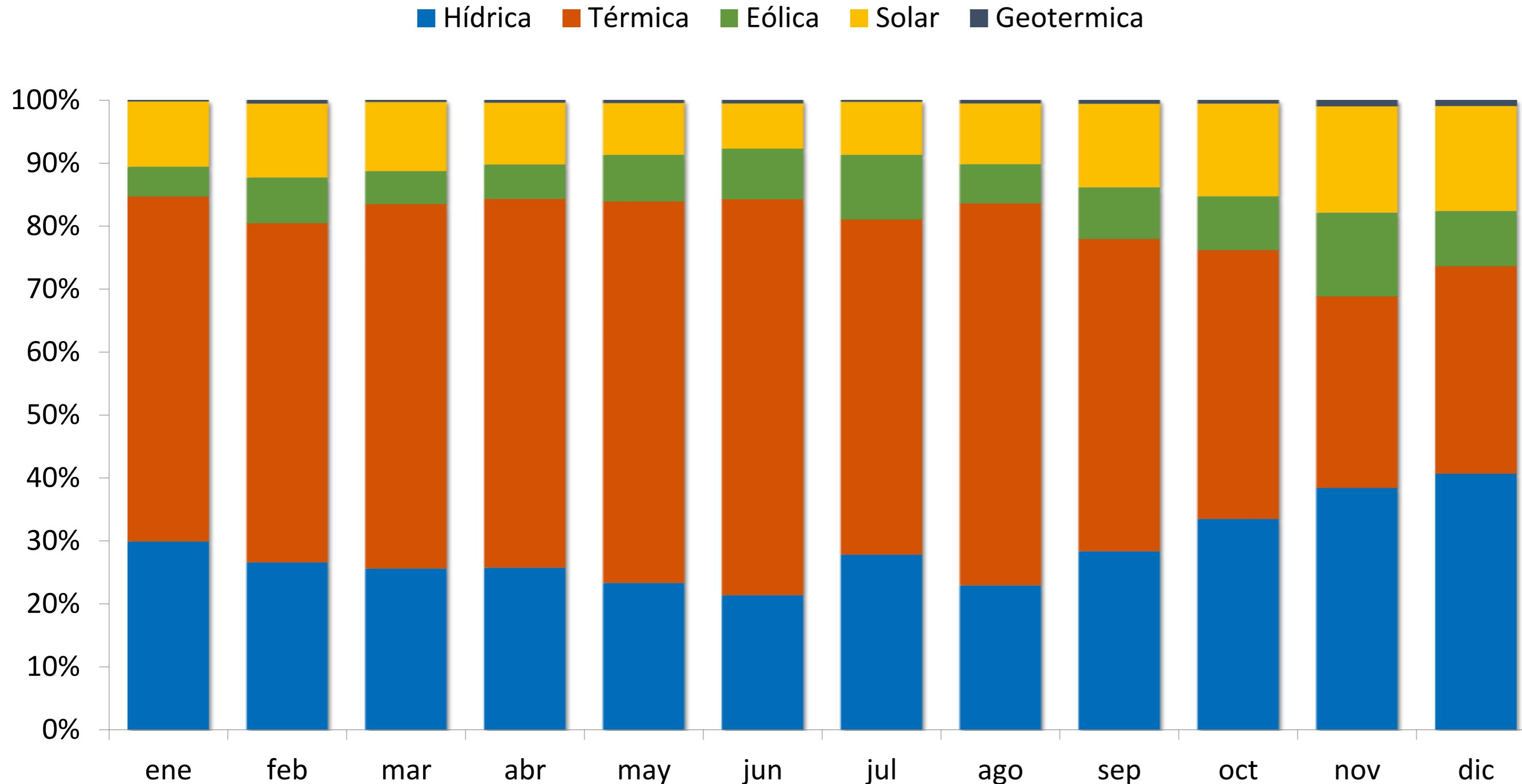
Restricciones Zona Norte: Proyectos Solares y Eólicos



Restricciones Zona Sur: Proyectos Eólicos

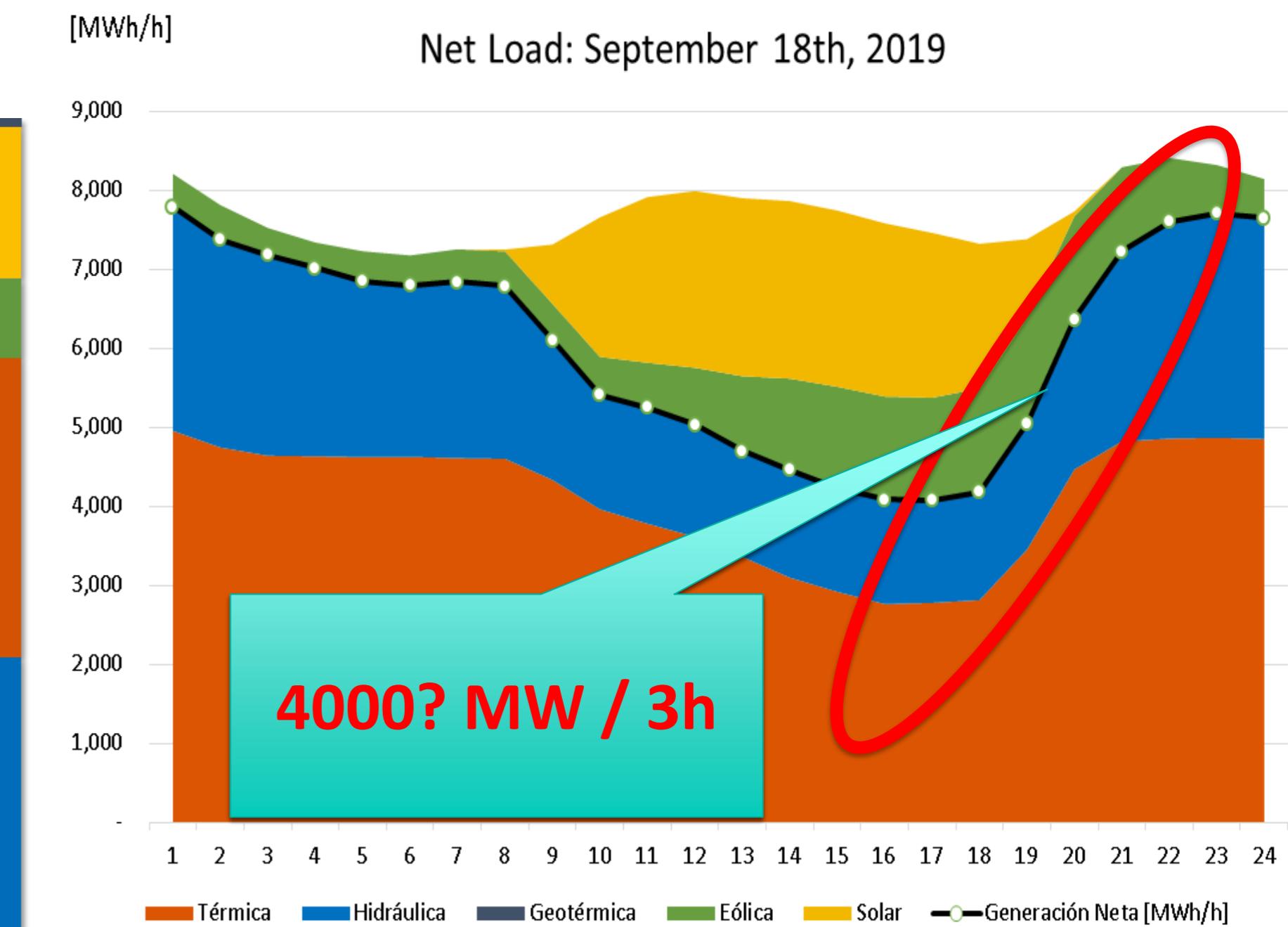


PROGRAMA DE GENERACIÓN: 2020



Aprox 15%ERV

● Participación de Generación
ERV 2020: aprox 19,2%.



Aprox 30%ERV

CENTRALES A CARBÓN

- 27 centrales a carbón con 5.500 MW aprox.
- En 2019 la operación del SEN incluyó un 36,7% de generación en base a centrales a carbón.
- En enero–marzo de 2020 la operación del SEN se realizó con un 39% en base a carbón.
- Al día de hoy el aporte de las centrales a carbón alcanza un 40.4%.
- Se ha concretado la salida de la U12 y U13 (173 MW) y CTTAR (158 MW).
- Las centrales Bocamina I y Bocamina 2 han definido su salida para diciembre 2020 y mayo 2022, y las U14 y U15 para enero de 2022.

Iquique 158 MW

Tocopilla 718 MW

Mejillones 2.176 MW

Huasco 760 MW

Puchuncaví 872 MW

Coronel 850 MW



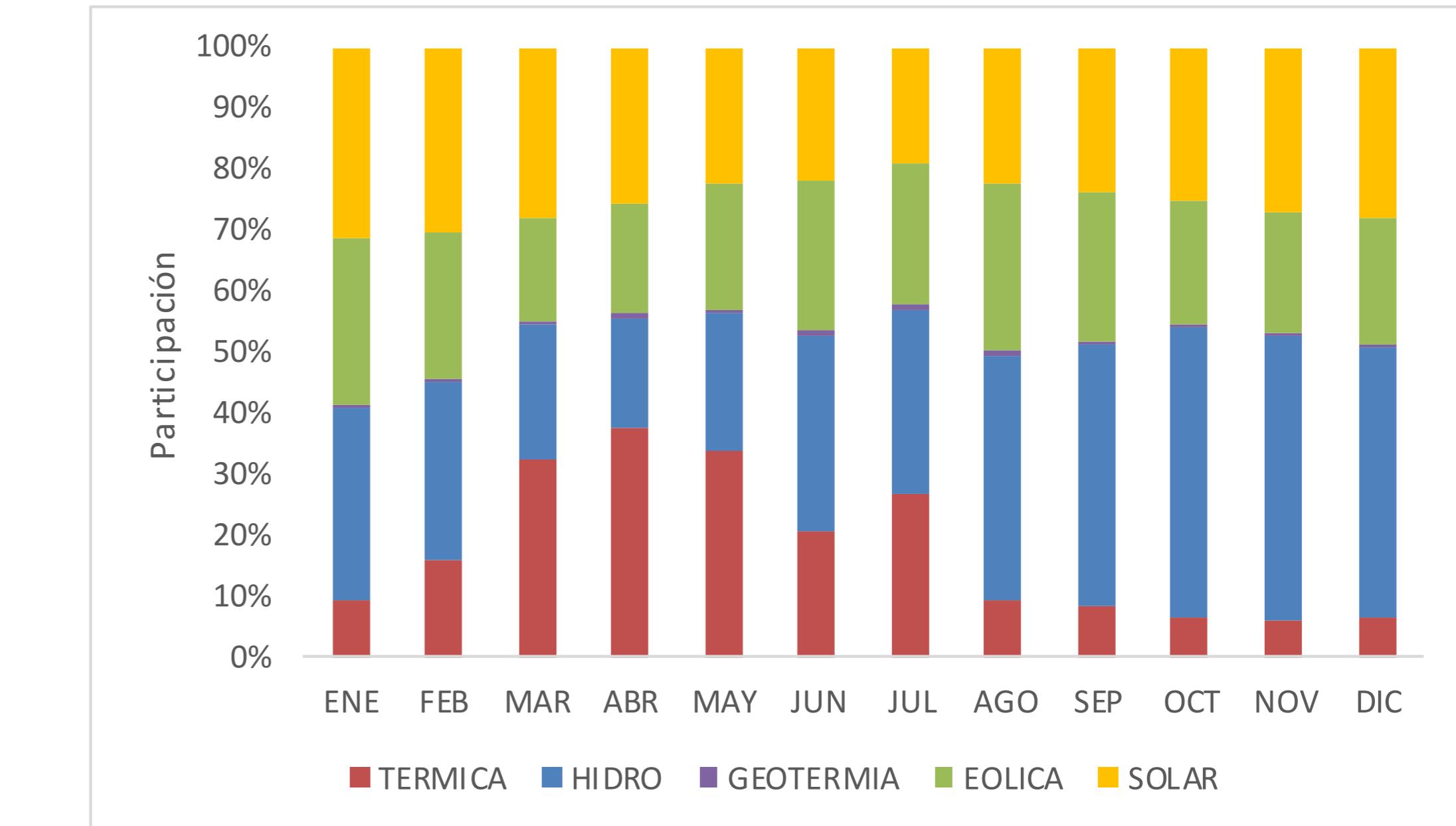
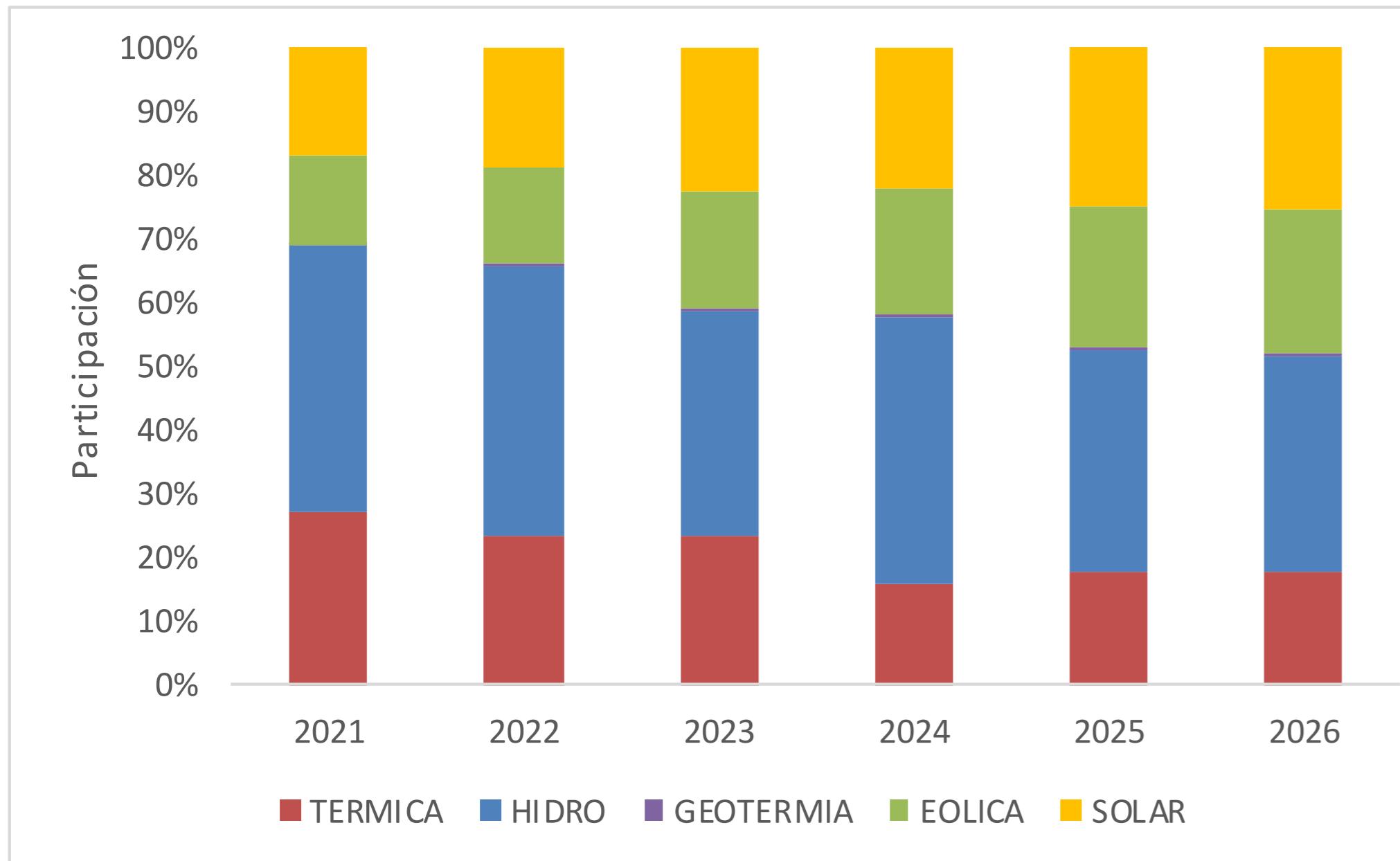
Programa de generación: 2021-2026

Participación anual por tecnología

Años: 2021-2026

Caso: Retiro Carbón el 2025

Año 2026



● Participación de Generación ERV promedio
2021-2026: aprox 40%

**2026 Aprox:
48% ERV**

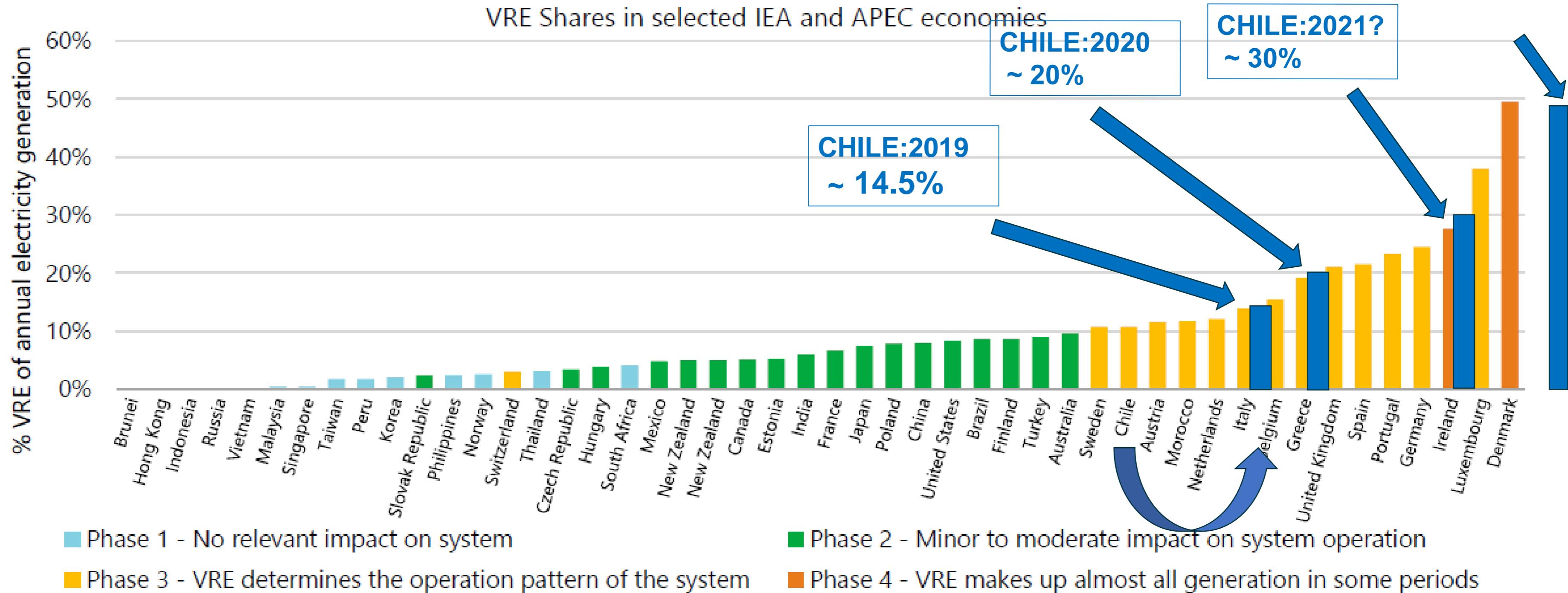
Al 2026 el SEN podría liderar la participación de ERV

Power System Transformation: VRE



Flexibility is a corner-stone of future energy systems

Chile 2026:
~ 48%



Successful integration of renewables requires coordinated action from policy makers and industry

IEA 2019. All rights reserved.

iea

Monitoreo de Inercia en el Sistema

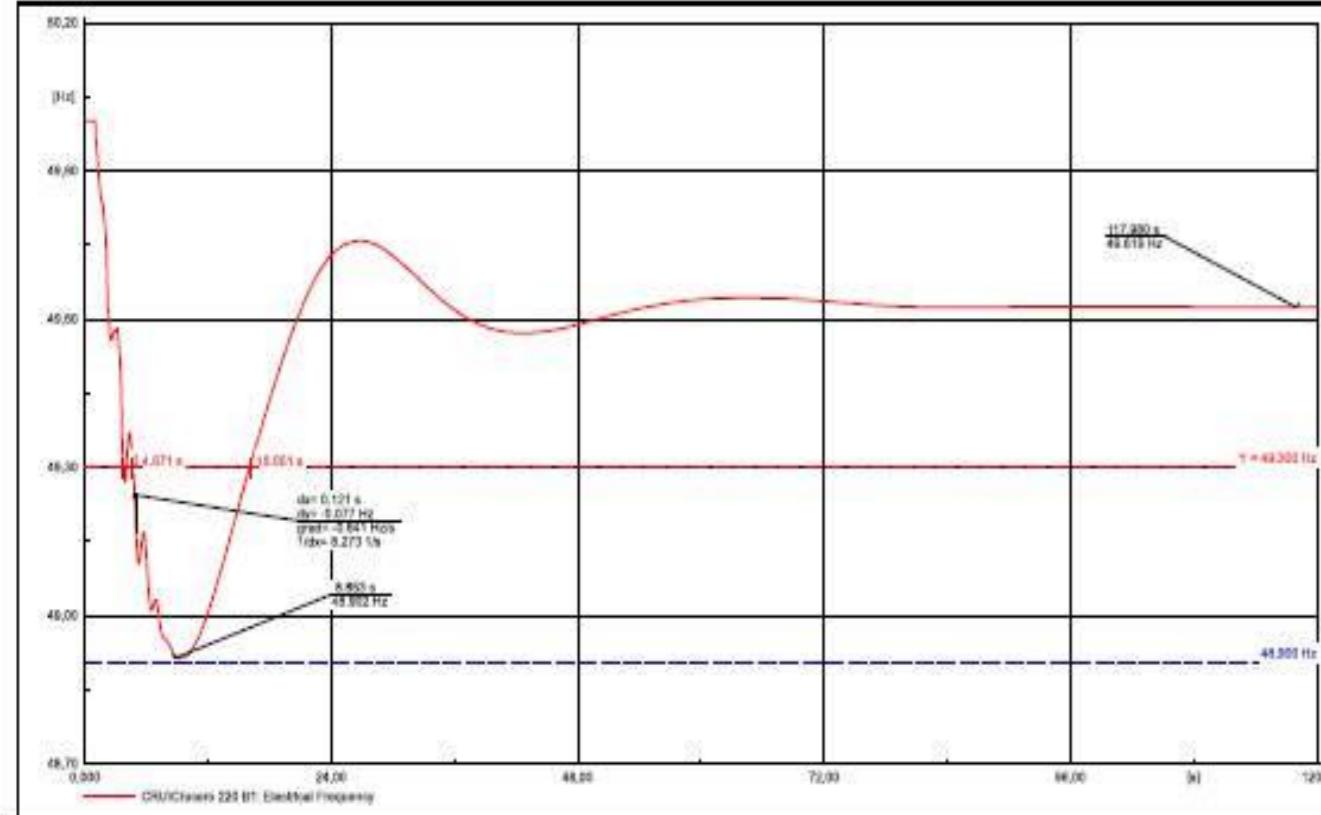


Gráfico 73. Frecuencia Sistema Eléctrico Nacional Caso 3 sin SVC extra. Desc. San Isidro

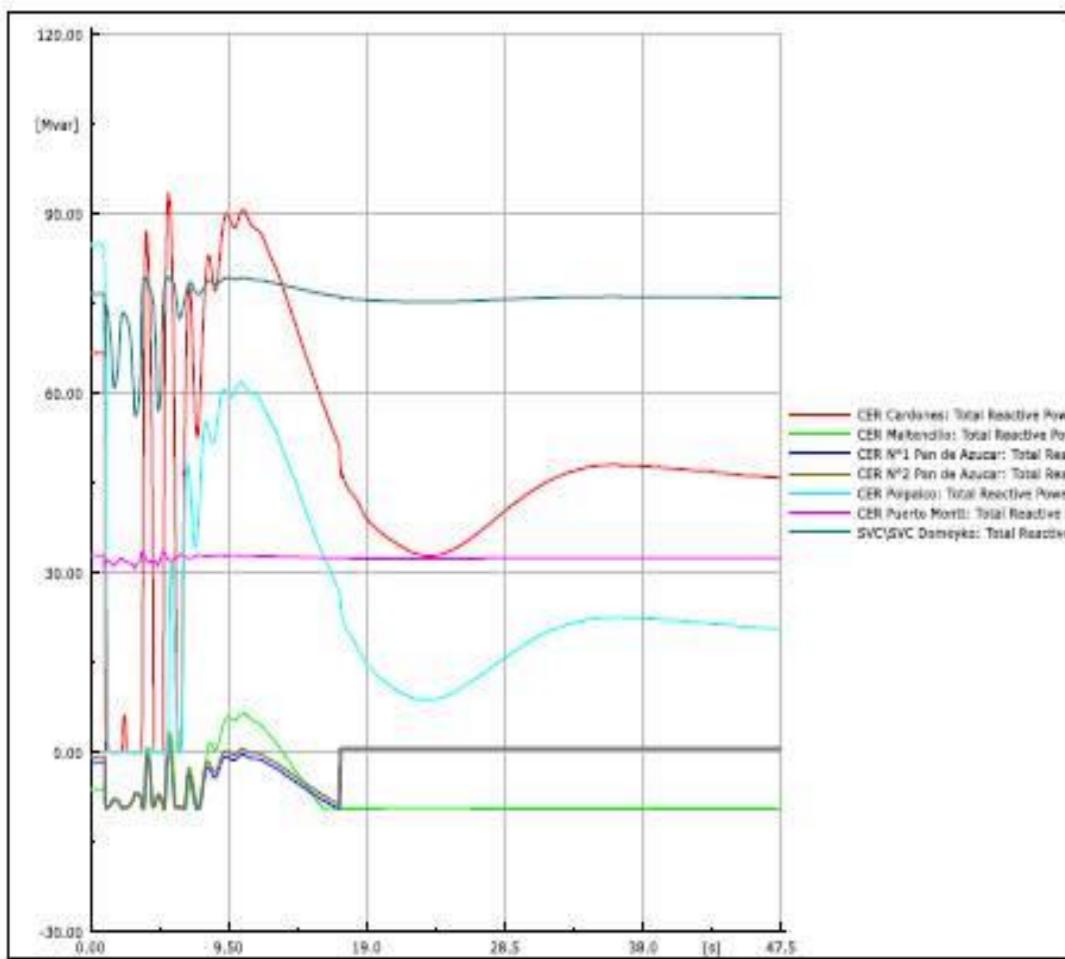
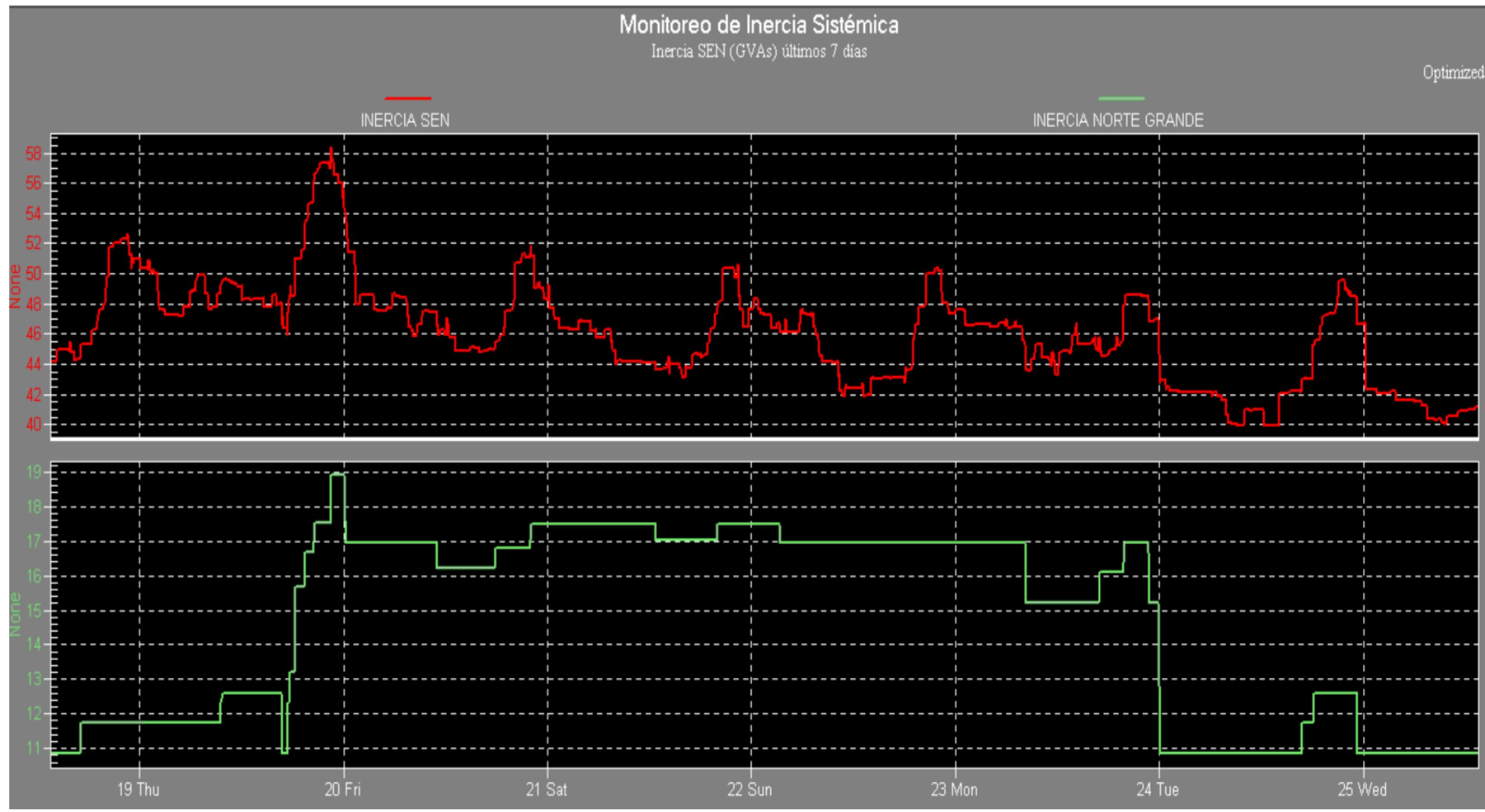


Gráfico 74. MVar SVC Sistema Eléctrico Nacional Caso 3 sin SVC extra. Desc. San Isidro



2

ESTUDIO DE DESCARBONIZACIÓN

Estudios Realizados Responder Oficio N°192/2020

Estudio de Abastecimiento de la demanda en el período 2025-2030:

- Su objetivo es determinar si la matriz energética es capaz de abastecer la demanda, identificar cuáles son las tecnologías que participan en el abastecimiento y estimar los costos de operación correspondientes.
- Este estudio es de tipo tendencial, identificando sentido de las variaciones en parámetros relevantes de desempeño del sistema eléctrico.

Estudio de la Operación con resolución horaria para una semana representativa del año 2026:

- Su objetivo es verificar el cumplimiento de restricciones de corto plazo, a partir de una modelación detallada de la operación horaria, habida cuenta que esta modelación no está considerada en el Estudio de Abastecimiento.

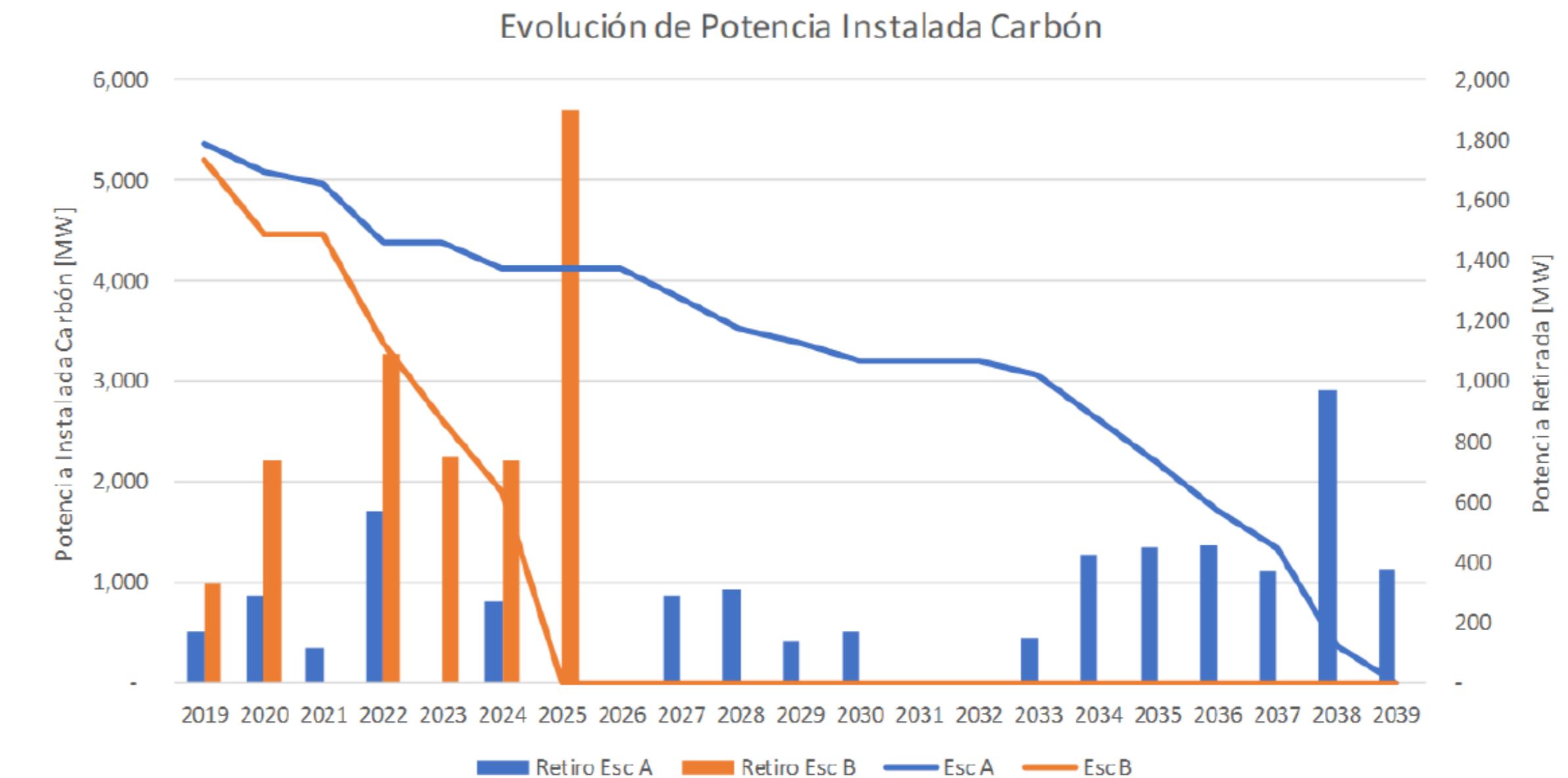
Estudio de Seguridad Operacional para los años 2021, 2022 y 2026:

- Su objetivo es analizar escenarios de operación del sistema eléctrico, para verificar el cumplimiento de la Norma Técnica de Seguridad y Calidad de Servicio, considerando las variables relevantes para la seguridad y estabilidad del sistema, tales como, tensión, frecuencia, niveles de potencia o corriente de cortocircuito e inercia.

Descarbonización Acelerada 2025

Evolución Potencia Instalada a Carbón

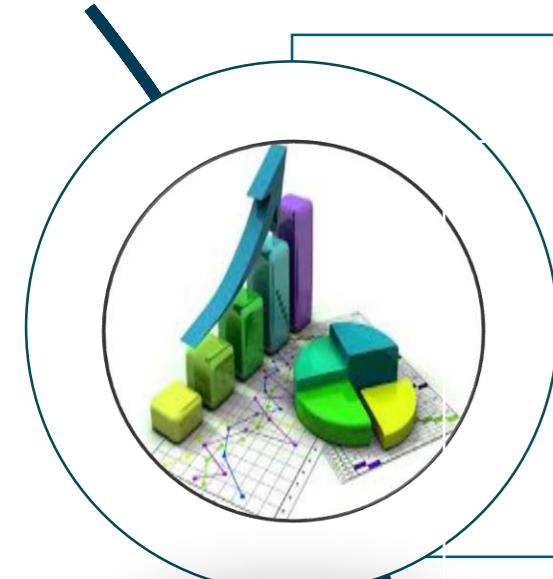
- Se utiliza como Caso Base el retiro de las centrales definido por el Ministerio de Energía en la PELP, el que se completaría el año 2040 (Escenario A).
- También se consideró el retiro de centrales carboneras al 2025 (Escenario B).



- De acuerdo con lo indicado en el **Oficio N°192/2020**, se simularon escenarios que consideraron:
 - Condiciones normales de operación
 - Niveles de indisponibilidad de generaciónLo anterior, tanto por la ocurrencia de sequías o indisponibilidad de combustibles
- Se construye escenarios consistentes con los **Estudios de Seguridad de Abastecimiento**, según lo establecido en el **DS 97/2008**.

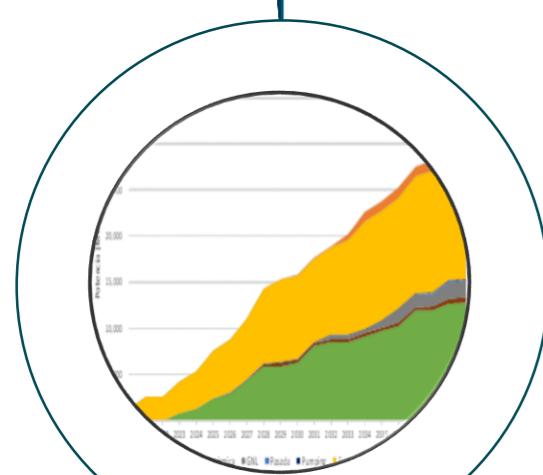
Descarbonización Acelerada 2025

Antecedentes del Estudio de Abastecimiento



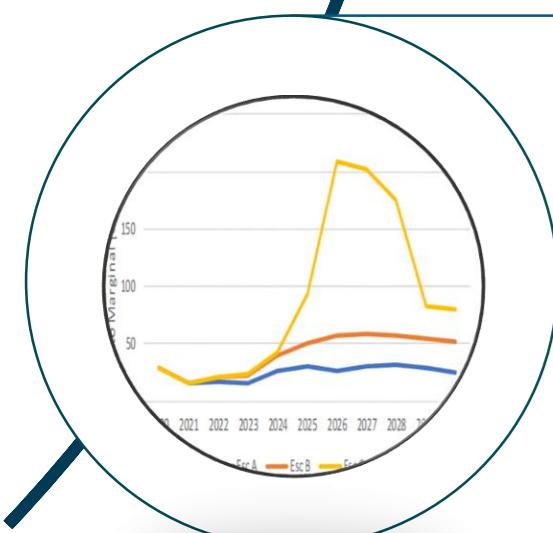
Supuestos de Estudios

- Horizonte 20 años. [Abr 2019- Mar 2039]
- 58 años hidrológicos. Presentación de resultados para Hidrología Media y Seca
- 10 Bloques de consumo. 5 día y 5 noche.
- Proyección de demanda ajustada ante COVID.
- Proyección Coordinador de Costos de combustibles
- Disponibilidad de GNL acorde al ITPN Jul 2020



Escenarios de Generación

- **Escenario A:** Salida de Carbón al año 2040
- **Escenario B1:** Salida de Carbón al año 2025
- **Escenario B2:** Salida de Carbón al año 2025, considerando que no están disponibles las centrales Nueva Renca, San Isidro y Nehuenco II durante el primer semestre de 2026.
- **Escenario B3:** Salida de Carbón al año 2025, indisponibilidad de centrales GNL señaladas en el punto anterior, y limitaciones a disponibilidad de petróleo Diésel, el 25% del tiempo de operación el primer semestre de 2026.
- **Escenario B4:** Salida de Carbón al año 2025, suponiendo una disponibilidad de GNL solamente para Nehuenco I y II, San Isidro 1 y 2, Tocopilla U 16 y CTM 3, durante el primer semestre de 2026.



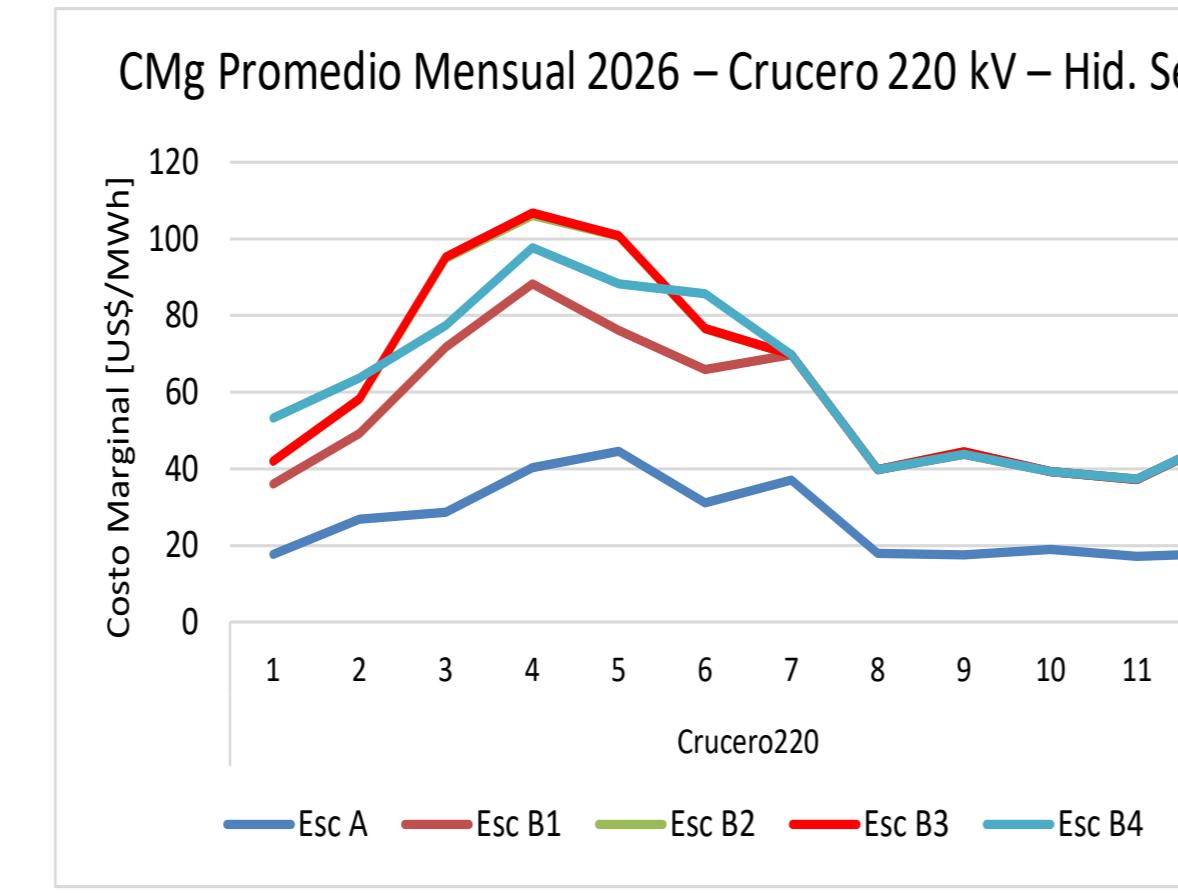
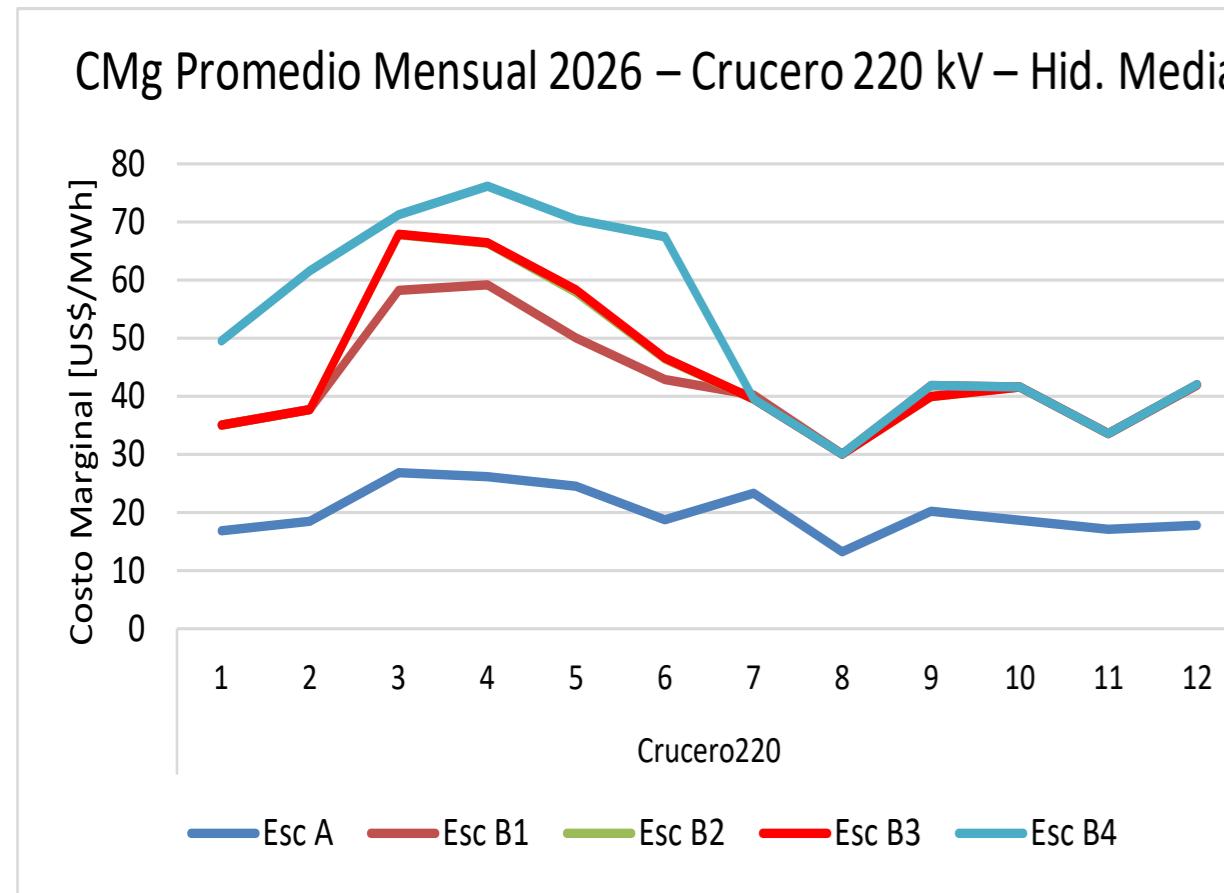
Análisis de la operación económica del SEN

- Costos marginales.
- Generación Esperada
- Costos operacionales.

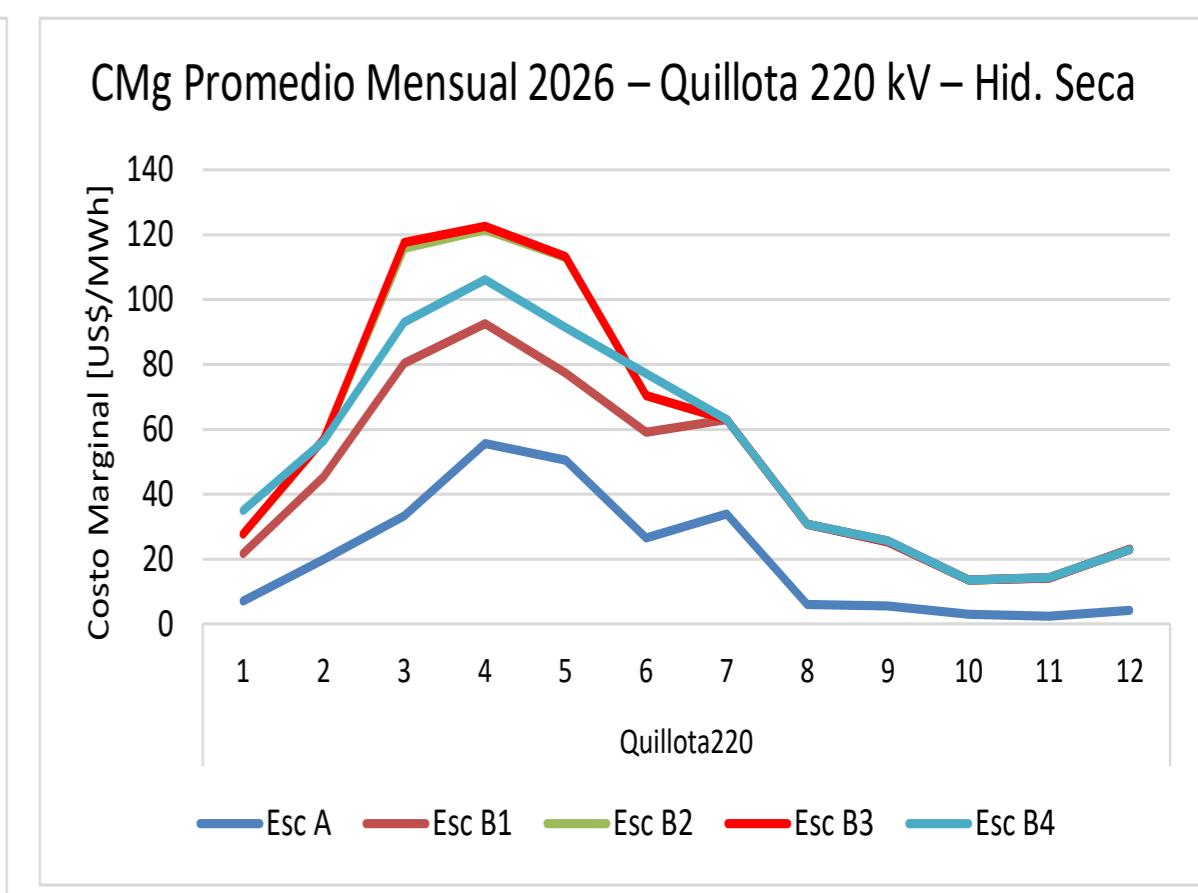
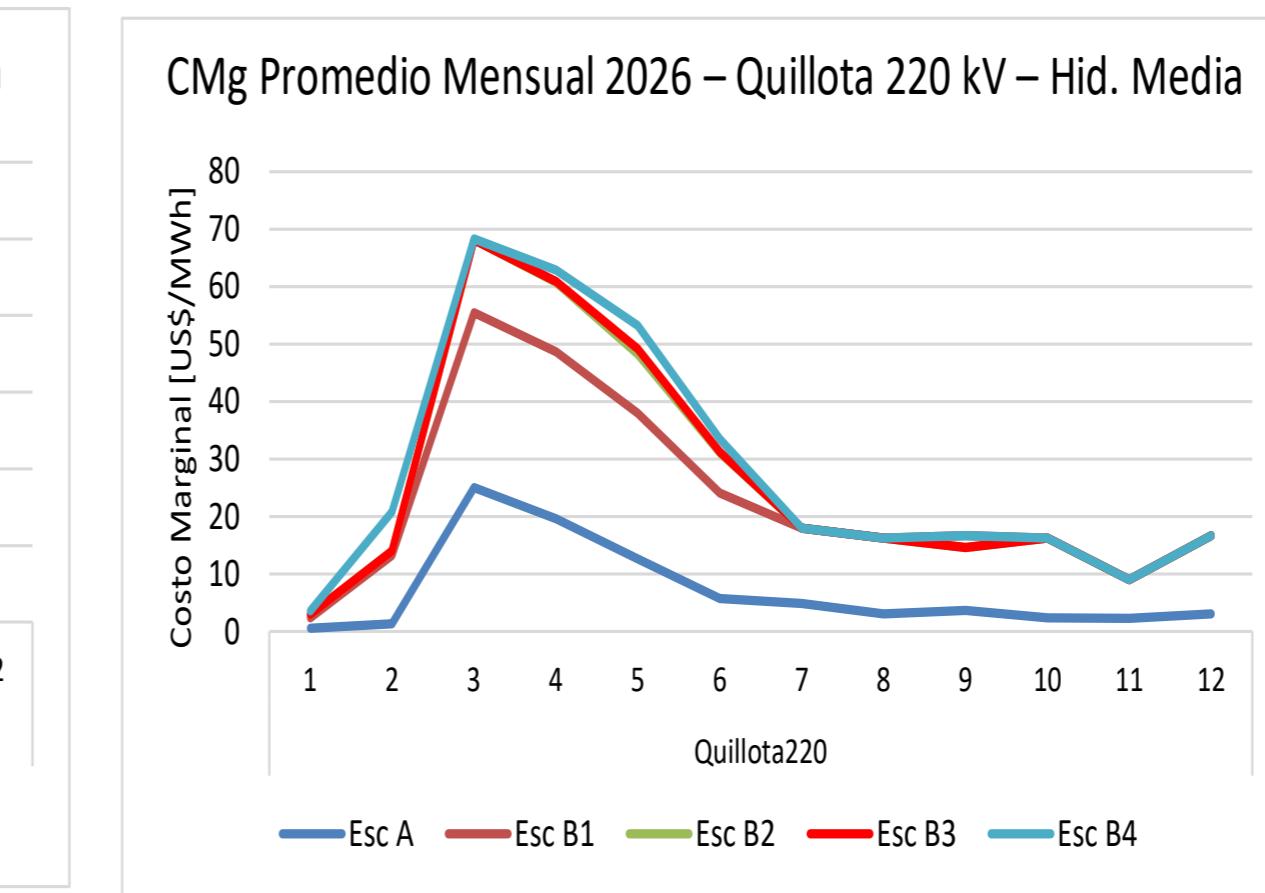
Descarbonización Acelerada 2025

Costos Marginales Promedios Anuales 2026 - Hidrología Media y Seca

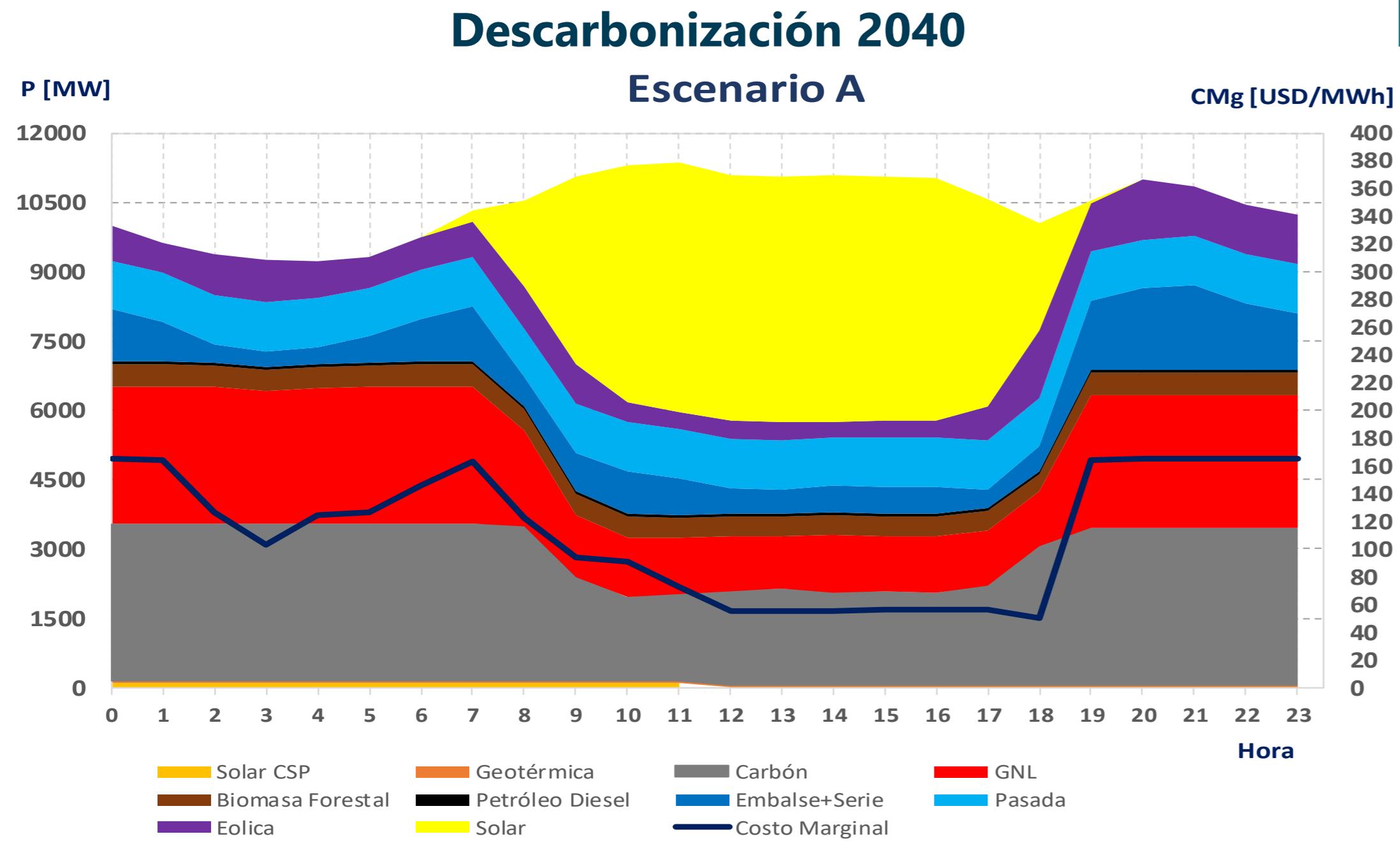
Costos marginales (promedio mensual) de la barra Crucero 220 kV



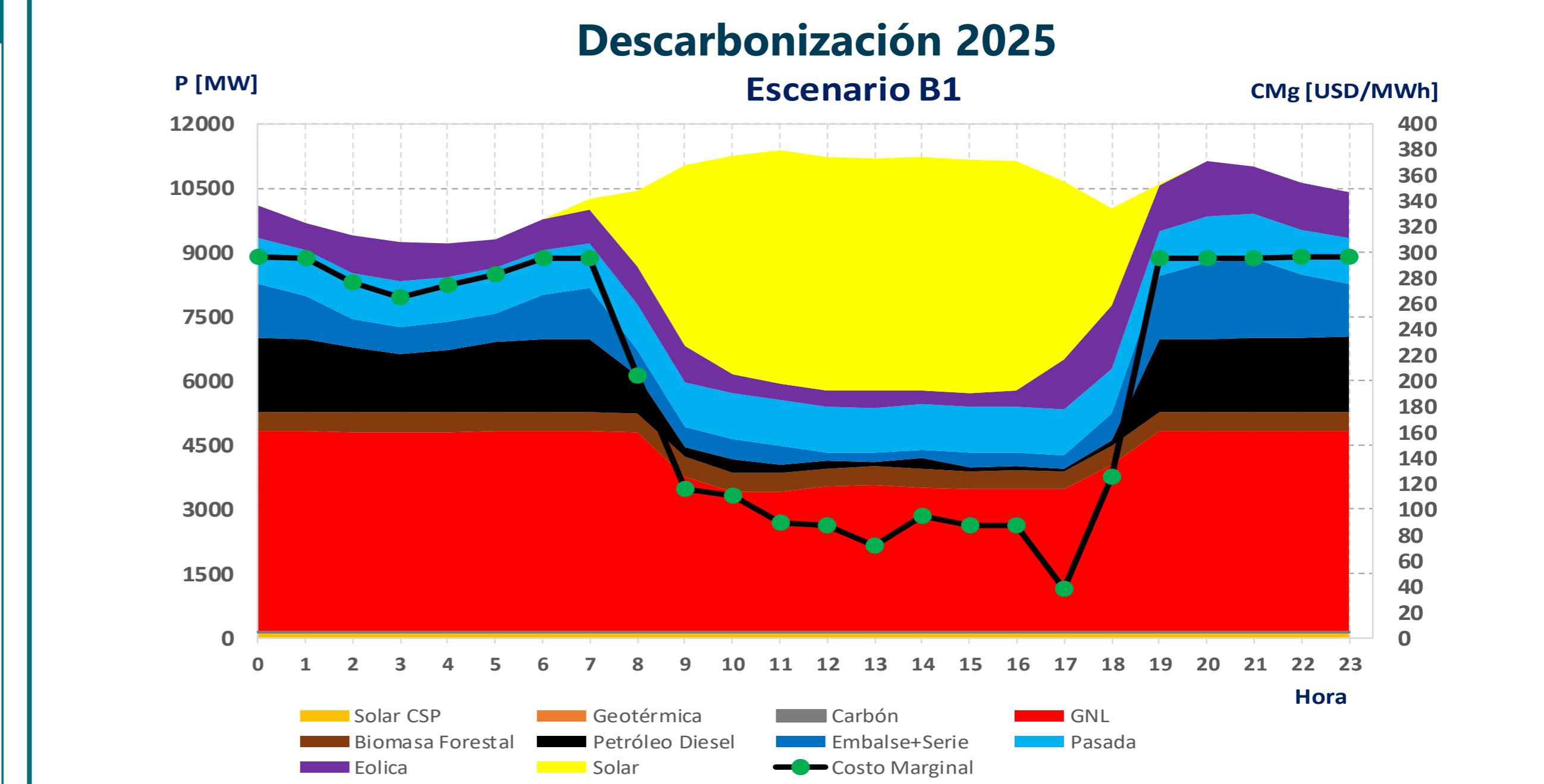
Costos marginales (promedio mensual) de la barra 220 Quillota 220 kV



Evaluación de la Operación Horaria Generación Perfil Diario 2026 – Hidrología SECA



- Escenario A muestra participación del Carbón en base. Costo marginal del orden de **160 USD/MWh**, en las horas de noche.
- No se identifica presencia de Diesel



- Escenario B1, de retiro de unidades a carbón al año 2025.
- Se despacha un porcentaje importante de unidades Diesel, alcanzando un costo marginal del orden de **300 USD/MWh**, en las horas de noche.

3

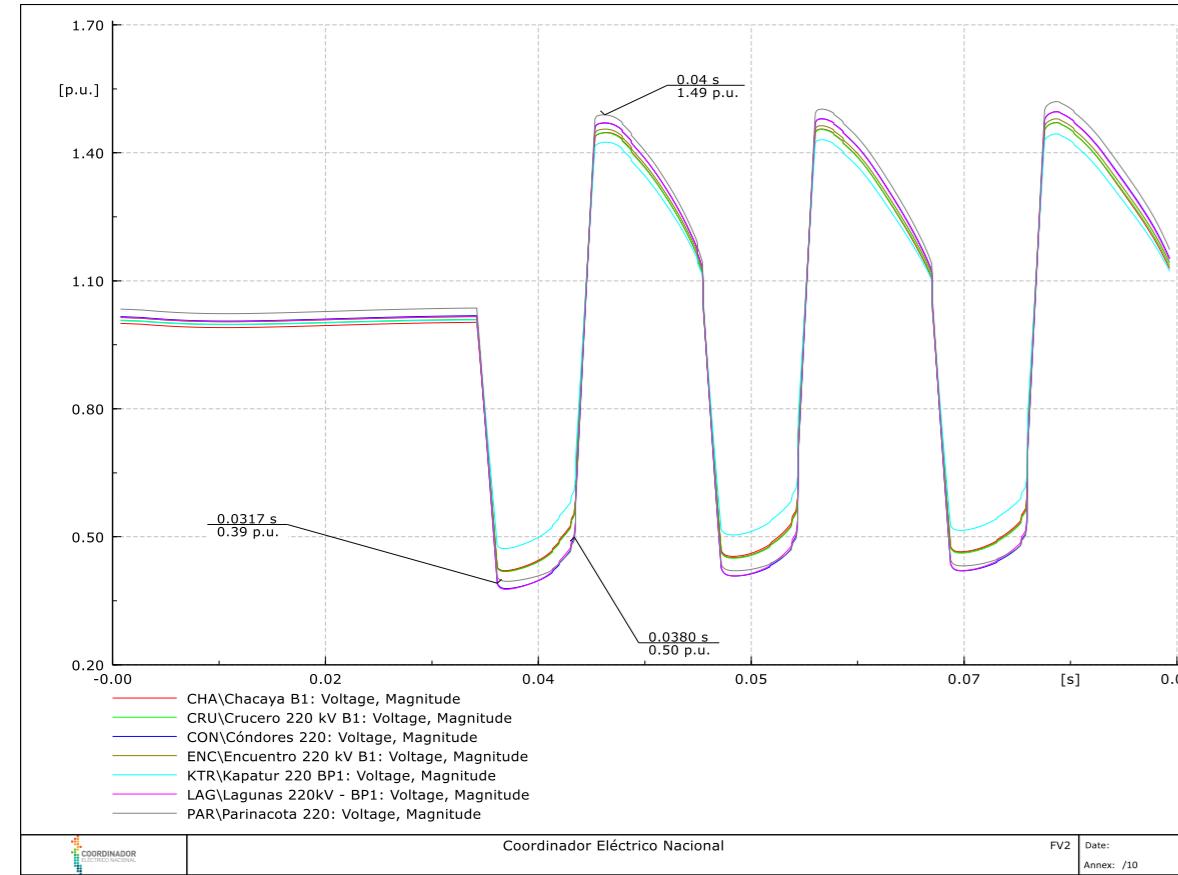
REQUERIMIENTOS DE INERCIA Y NIVEL DE CORTOCIRCUITO

Impacto en la Inercia año 2026: Simulaciones y Escenarios

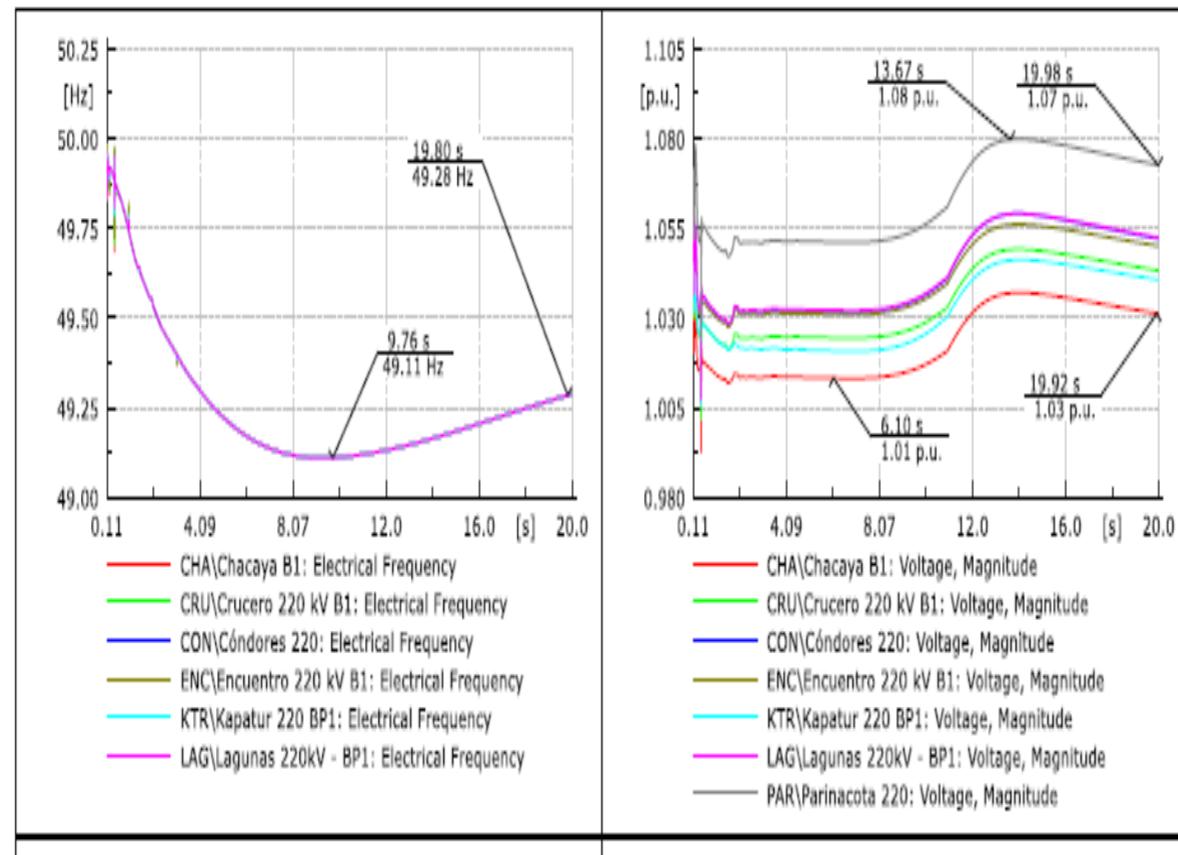
| Escenarios Inercia Sistémica en MVAs y en s | | | |
|---|---------------------|---------------------------------|-----------------------------------|
| Zona | 2025 con Carbón | 2026 Caso Base sin Carbón - Día | 2026 Caso Base sin Carbón - Noche |
| Norte Grande | 12600 MVAs (4.76 s) | 3210 MVAs (5.32 s) | 6540 MVAs (5.28 s) |
| Norte Chico | 4150 MVAs (4.54 s) | 43 MVAs (1.65 s) | 43 MVAs (1.8 s) |
| Resto del SEN | 25510 MVAs (3.54 s) | 21221 MVAs (3.11 s) | 39640 MVAs (3.73 s) |
| Total SEN | 42270 MVAs (3.93 s) | 24474 MVAs (3.28 s) | 46230 MVAs (3.88 s) |

- Disminución de la inercia sistémica es mayor para el escenario de día y para las zonas del Norte Grande y del Norte Chico (expresada en MVAs).
- Para el escenario de noche la inercia total del SEN tiene niveles comparables al caso con carbón, pero la mayor parte de ella está concentrada en la zona Centro-Sur del SEN → Inercia en el NG sigue siendo baja.

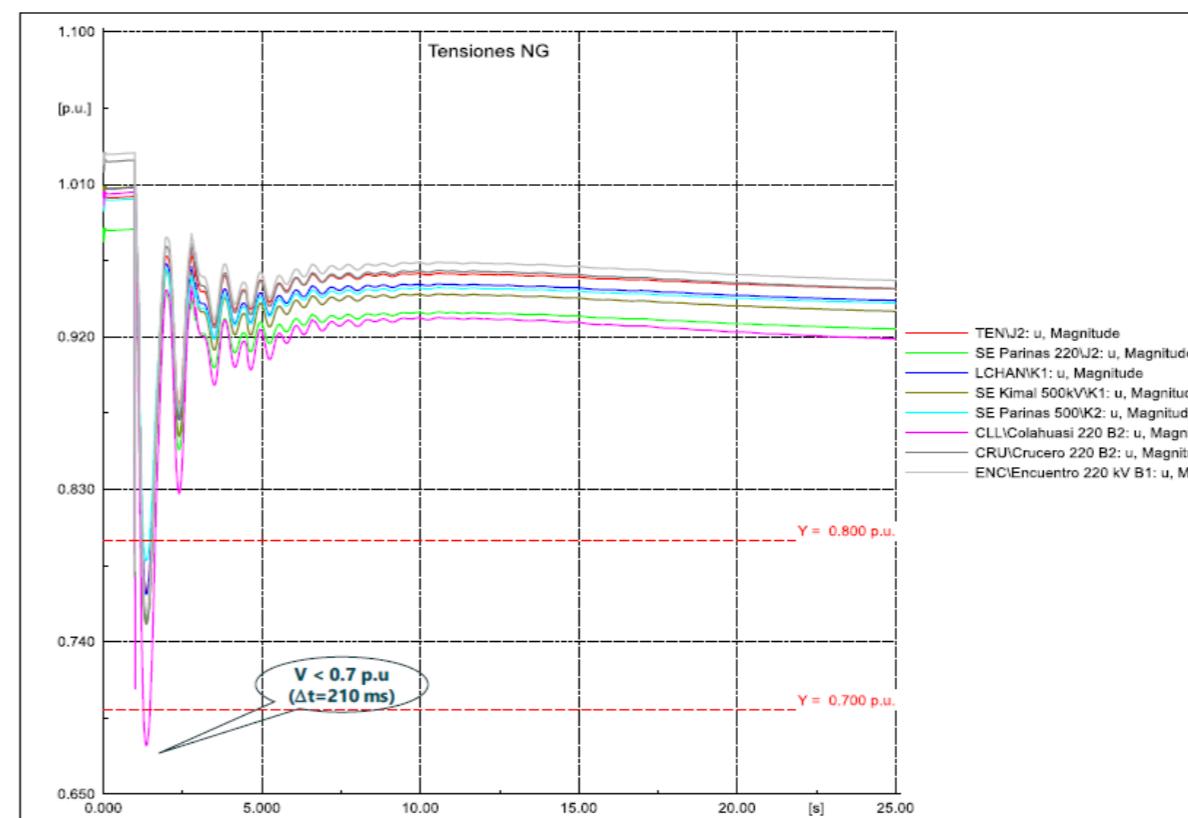
- Para **Escenario de día con máxima penetración ERV** la desconexión de la U16 (360 MW) de Tocopilla provoca colapso de tensión y frecuencia del Norte del SEN → Comportamiento oscilatorio tensión y frecuencia



- ✓ **Solución:** despacho forzado unidades síncronas adicionales en el NG (2 TG o 1TG+1TV) → Inercia mínima NG para el día: 6077 MVAs (5.84 s). Comportamiento estable y amortiguado de la frecuencia y tensión



- Para **Escenario de noche con Tx desde el sur de 1500 MW** la desconexión de la U16 (360 MW) de Tocopilla provoca recuperación dinámica de la tensión deficiente. Permanece por debajo de 0.7 pu por más de 210 ms, incumpliendo la NT



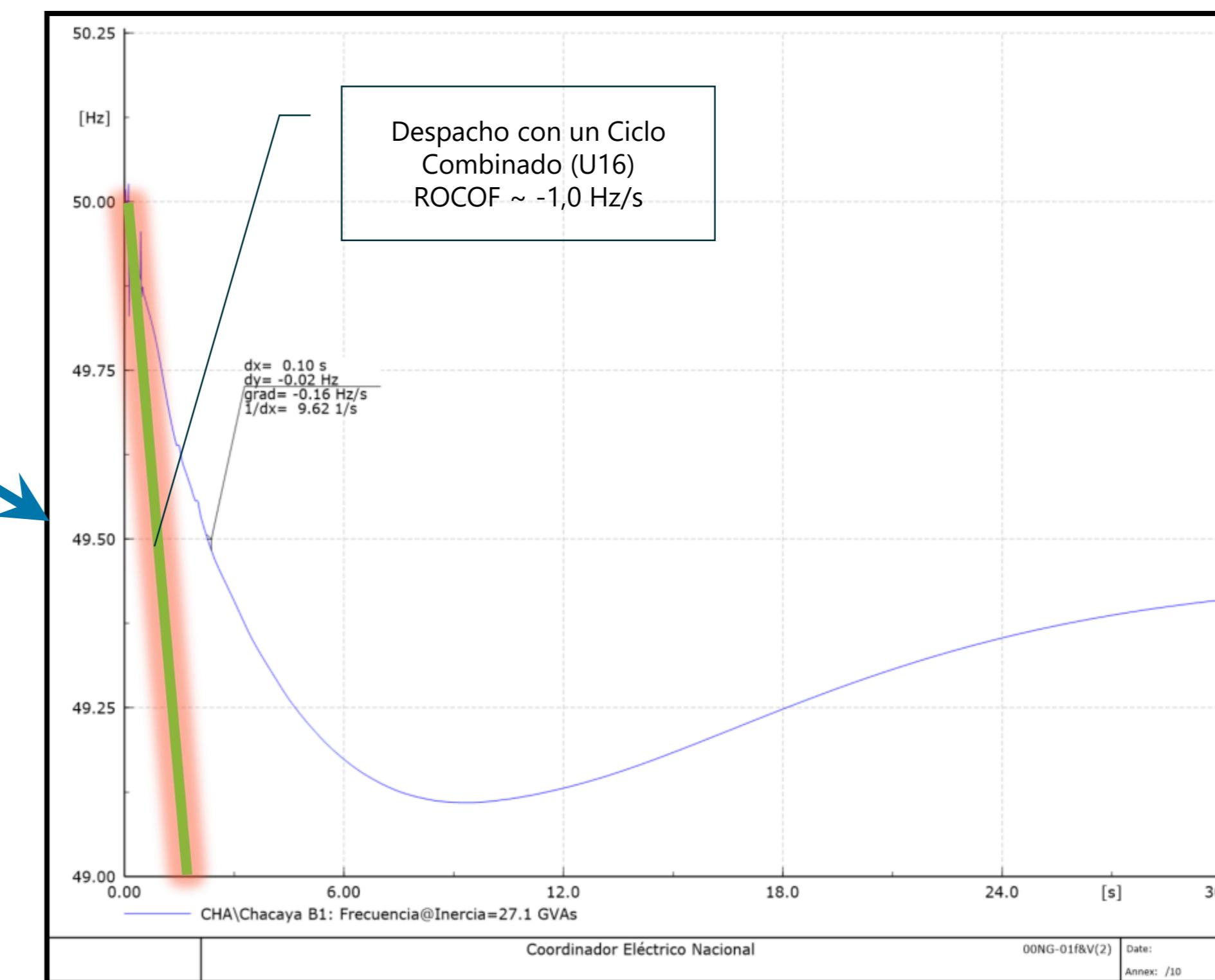
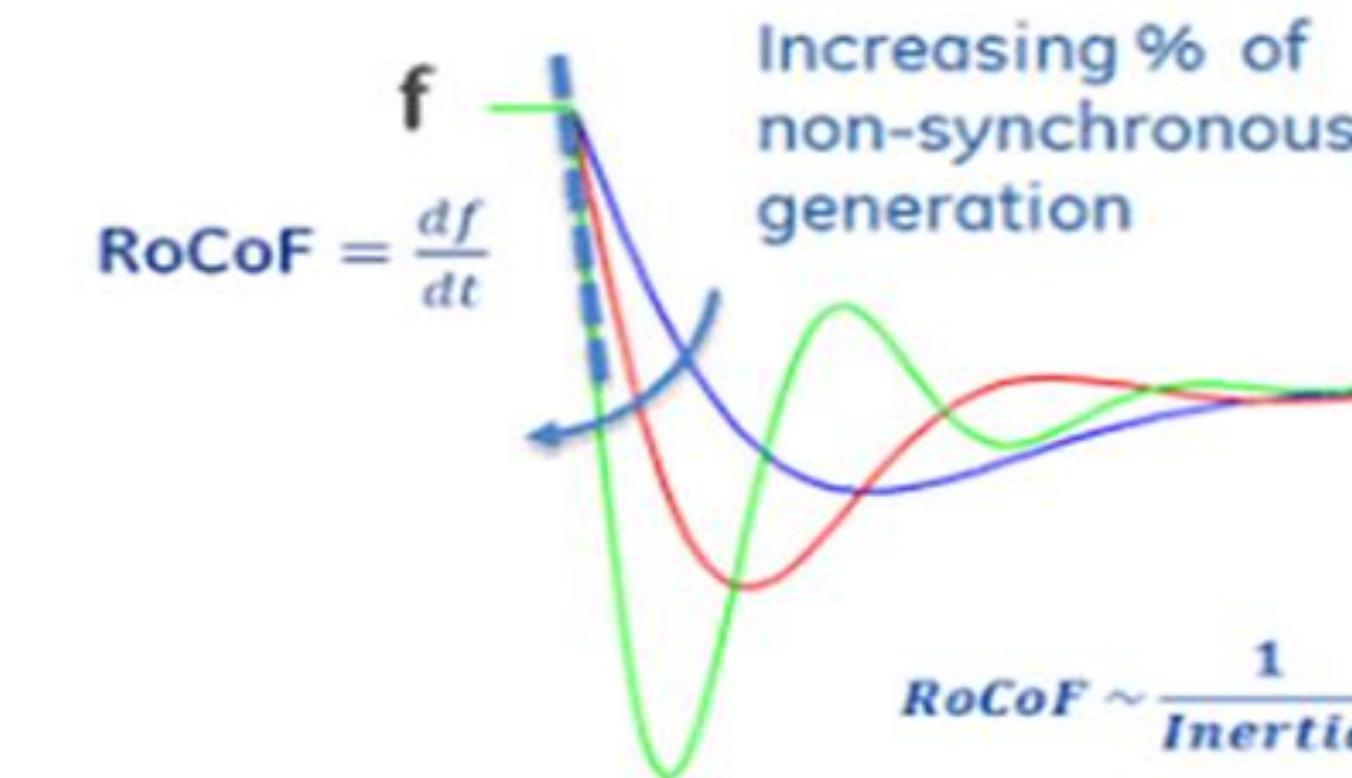
- ✓ **Solución:** despacho forzado de una unidad 1 TG (central Atacama o similar) → Agrega 1000 MVAs de inercia adicional al NG en el noche para transferencias desde el sur de unos 1500 MW → Inercia mínima en el NG para la noche: 7764 MVAs (5.64 s)

- Para transferencias desde el sur mayores a 1500 MW se requerirá agregar más inercia y soporte de reactivos.

Impacto en la Inercia año 2026: Análisis ROCOF

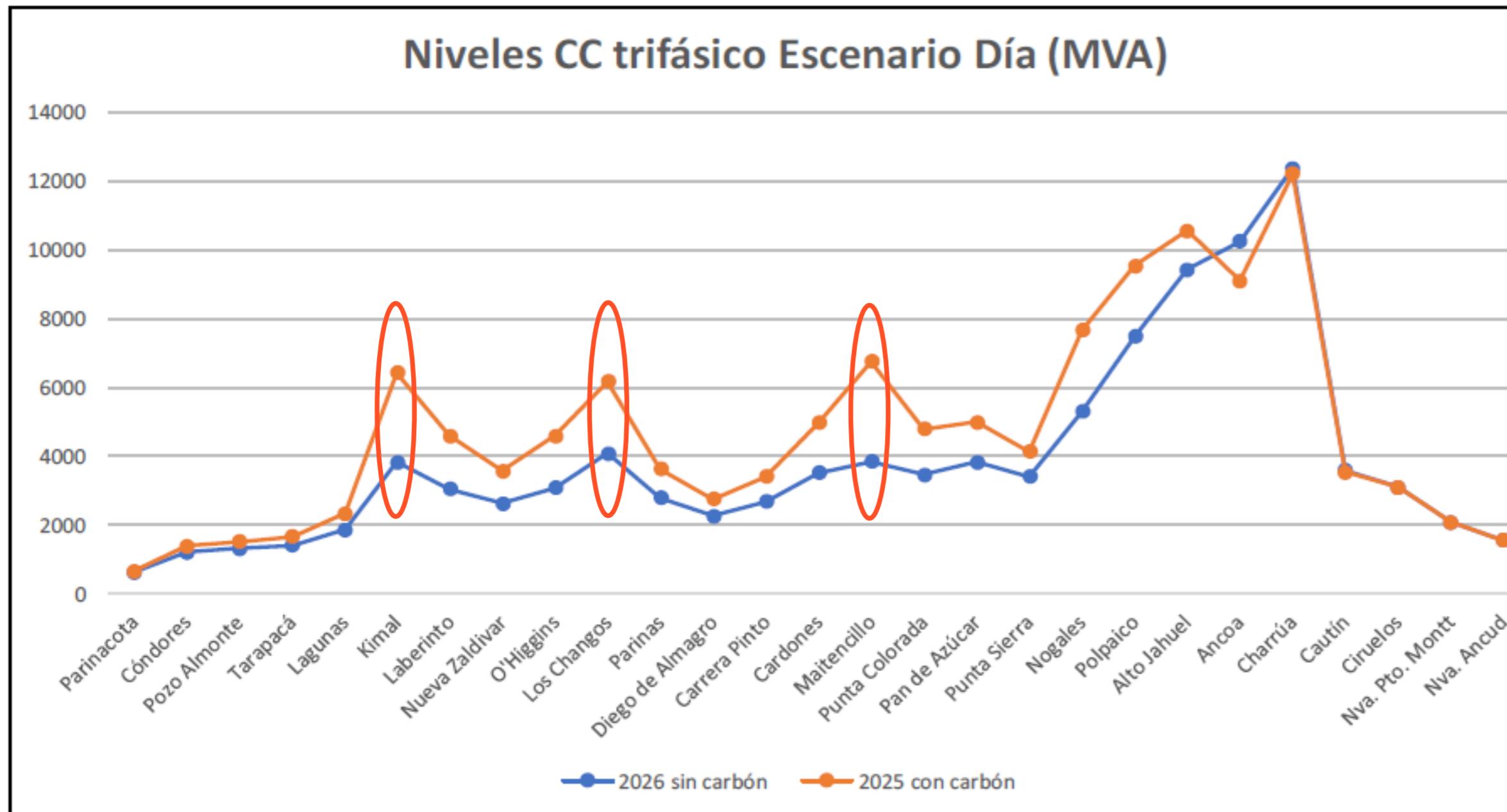
Escenario de día - año 2026 – Desconexión de la U16

| Item | Escenario 0 | Escenarios 1 |
|------------------------------------|------------------|-------------------|
| Generación Total | 10690.6 MW | 10700.8 MW |
| Generación ERV | 7338.3 MW | 7338.3 MW |
| Inercia SEN | 24.47 GVAs | 27.1 GVAs |
| Inercia NG | 3.21 GVAs | 6.1 GVAs |
| Inercia Resto SEN | 21.26 GVAs | 21.1 GVAs |
| Centrales NG | U16 | U16 |
| | - | Kelar TG1 |
| | - | Kelar TV |
| | - | - |
| | - | - |
| ROCOF⁽¹⁾ | ~ -1 Hz/s | -0.16 Hz/s |
| (1) Medido para Severidad 5 en U16 | | |

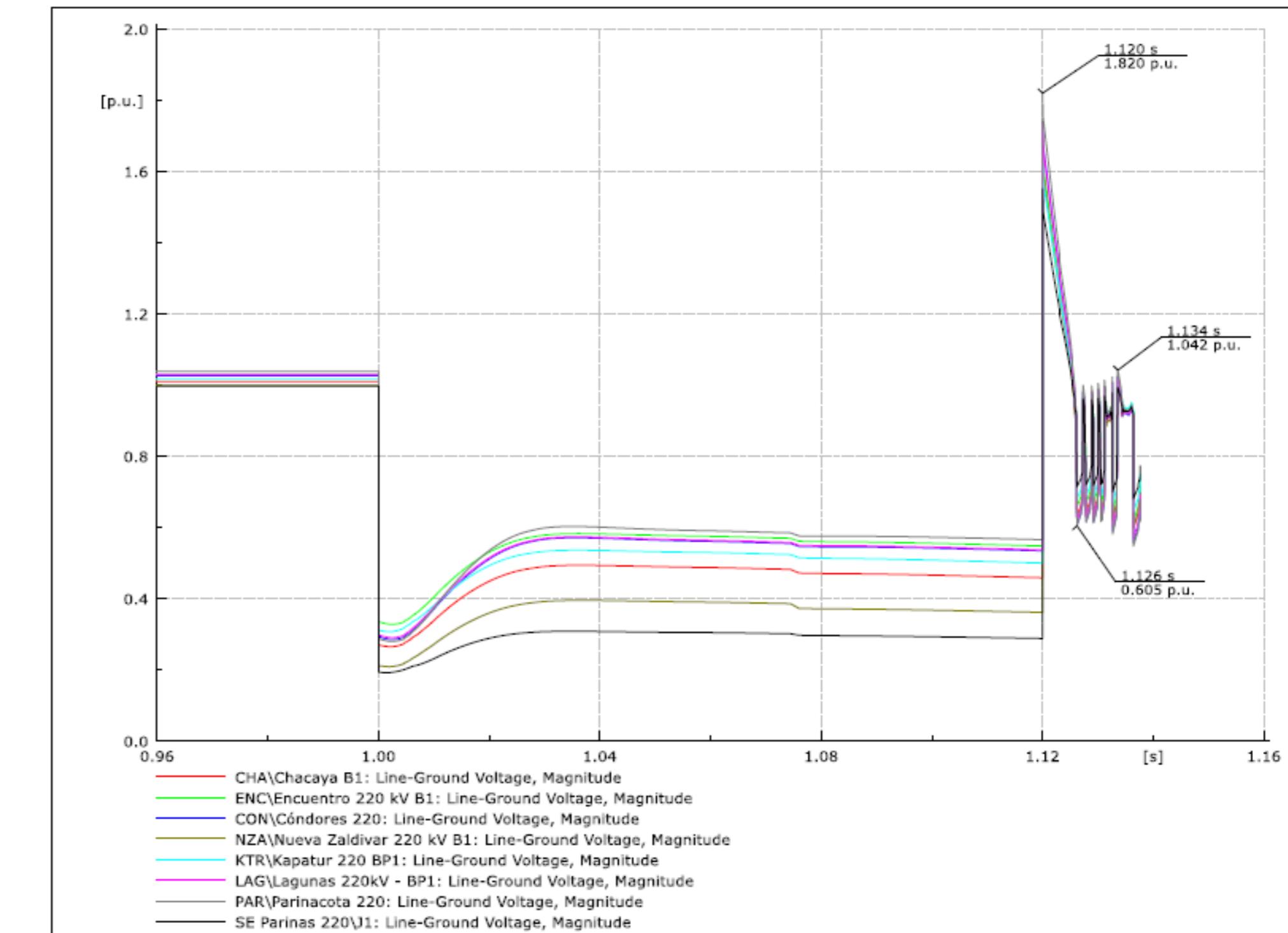


Impacto en la nivel de cortocircuito año 2026: Simulaciones y Escenarios

- Evidencia de impacto en el nivel de CC → Disminución de 35% en SS/EE Kimal, Los Changos y Maitencillo
- Red más débil para afrontar contingencias y brindar nodos fuertes para la conexión de generación ERV
- Red más débil puede llevar a **colapso de tensión** ante fallas, lo que se evidencia en la falla trifásica en la línea Parinas –Likanantai 220 kV.



- Se evidencia comportamiento dinámico de la tensión en barras del Norte claramente oscilatorio y que lleva al **colapso de tensión en la zona norte**.
- ✓ **Solución:** despacho forzado unidades síncronas adicionales en el NG (2 TG o 1TG+1TV) → Agregar unos 1000 MVA en potencia de CC → Nivel de CC mínimo aceptable en Kimal del orden 4500 MVA

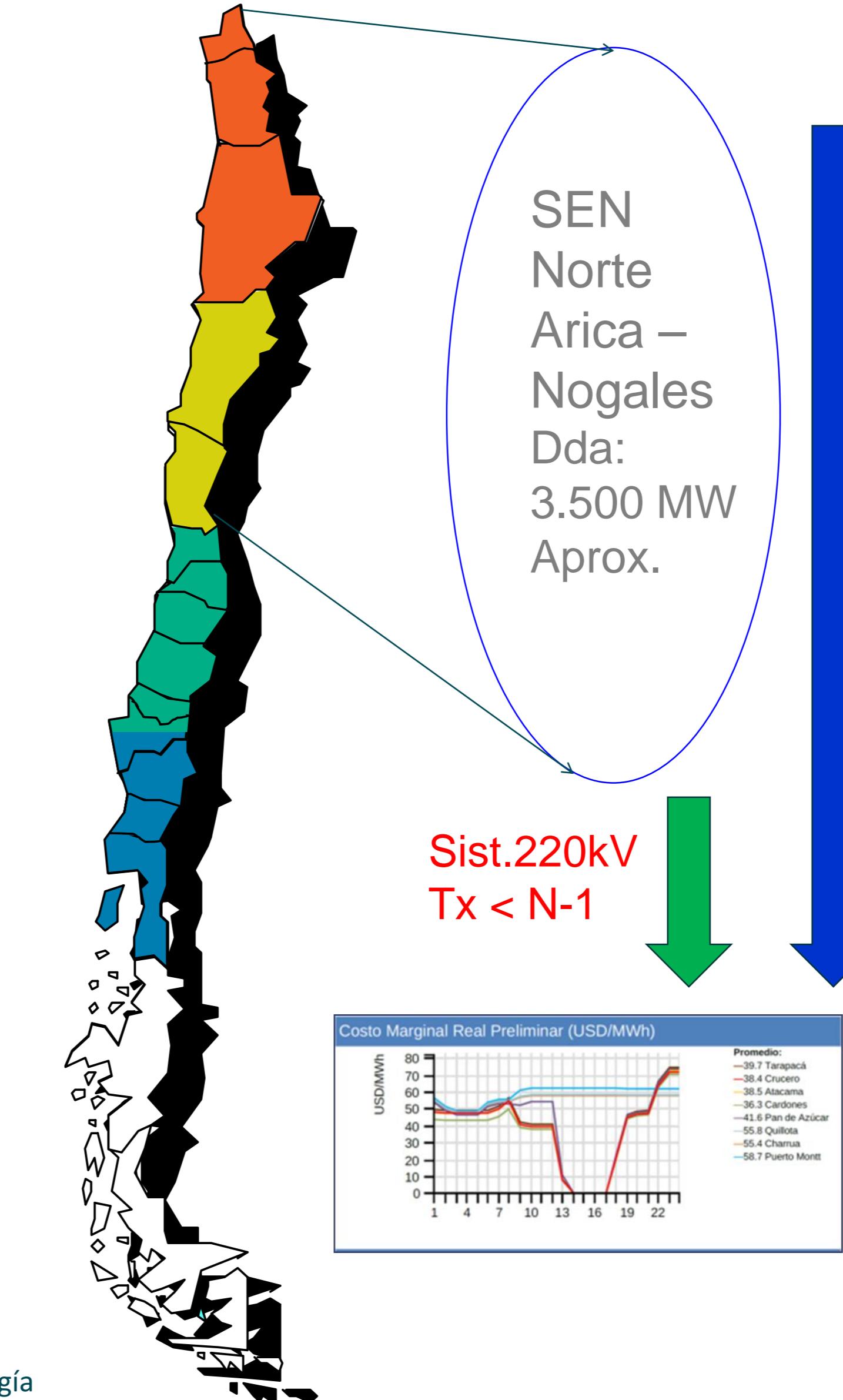


4

APORTE DE BATERIAS DE CARNOT

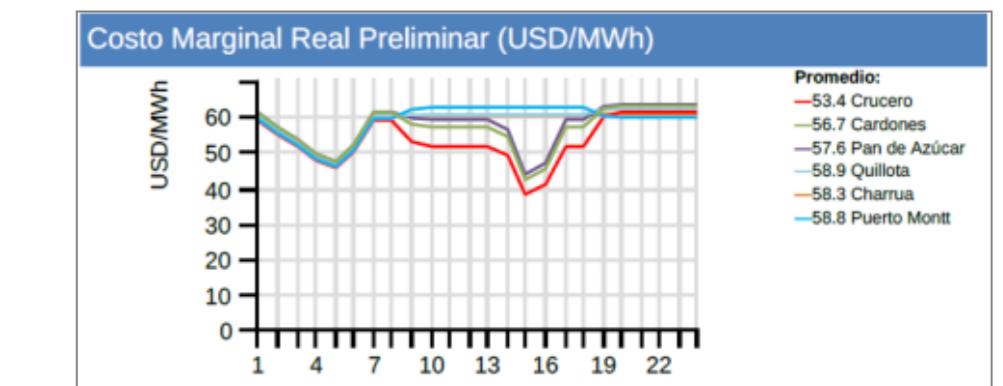
Sistema de baterías de Carnot son una alternativa tecnológica habilitante del proceso de descarbonización

- Se estima cobertura eficientes de reconversión de hasta el 70% de la capacidad instalada a carbón.
- Se logra reducción efectiva de emisiones.
- Alta complementariedad baterías de Carnot con tecnología solar FV.
- **Primeros proyectos de reconversión se requieren en la zona norte del SEN.**
- **Al ser generadores síncronos aporta inercia al sistema en modo generación y alta capacidad de reserva para control rápido de frecuencia en modo carga.**
- Alta eficiencia en el uso del sistema de transmisión y aporta a reducir condiciones de congestión en plazos inferiores al desarrollo de nuevas líneas.
- **Son un sistema de almacenamiento que transforma energía renovable variable en energía renovable gestionable.**
- Permite el reciclaje de la infraestructura eléctrica existente con aporte al medioambiente y reduce el impacto en el empleo local por cierre de centrales.
- **Potencial preliminar reconversión usando capacidad de transmisión existente alcanza 1.640 MW equivalente a 1/3 de la capacidad instalada.**



- Mitigación de restricciones de Tx Norte Grande → Sur:
- Aumento de demanda local durante la carga de Batería de Carnot: 4500 MW aprox
- Análisis de impacto de desconexión rápida en modo carga.
- Mitigación de desacoplos de cmg
- Aumento de Inercia y Nivel de Cortocircuito

Sist.500kV:
1800 MW



5

COMENTARIOS FINALES

Comentarios finales

- En el estudio de abastecimiento de descarbonización acelerada (tendencial) para el primer semestre de 2026, Escenario B3, se muestra que los costos marginales en las barras representativas, en promedio para el mes de abril se incrementan en un 100%, respecto al escenario con descarbonización al año 2040. Lo anterior se traduce en una oportunidad para la tecnología de Baterías de Carnot, mediante el abastecimiento del bloque nocturno, mitigando el riesgo de altos costos marginales en dicho bloque.
- Las situaciones de requerimientos de inercia (6,1 GVAs en Norte Grande) y nivel de cortocircuito (4500 MVA Norte Grande), también representan una oportunidad para la tecnología de Baterías de Carnot. La “reserva” consistente en la desconexión del “modo carga” permitiría resolver el problema de inercia. Analizar condiciones para mantener conexión a la red durante el modo carga, con el objetivo de aportar además, al cortocircuito.
- La transición energética requiere diversidad tecnológica para enfrentar los desafíos naturales y esperables cuando la integración de generación ERV alcanza niveles relevantes: Baterías de Carnot, BESS, CSP, Geotermia, Condensadores Síncronos, dispositivos de inyección rápida de potencia activa, dispositivos FACTS que proporcionan soporte de potencia reactiva dinámica, nuevas estrategias de control y equipamiento para las plantas ERV (VSM, GFI), refuerzos en el sistema de transmisión (línea HVDC), servicios complementarios para brindar soporte de inercia, cortocircuito y control de tensión, etc.



**COORDINADOR
ELÉCTRICO NACIONAL**

Desafíos y Oportunidades de las Baterías de Carnot para el Sistema Eléctrico Nacional

**Ernesto Huber J.
Gerente de Operación**

26 de noviembre de 2020