

Análisis Beneficios Proyecto Cardones - Polpaico

Resultados Resumen Ejecutivo

Diciembre de 2018



Objetivos Claves

Objetivos Claves

1. Analizar los **beneficios** en términos de aportes a la **reducción de contaminantes** globales tras la viabilización de una descarbonización de la matriz energética.
2. Analizar los aportes en el robustecimiento, tanto en seguridad como confiabilidad, que entrega el proyecto Cardones – Polpaico al sistema eléctrico nacional.
3. Visualizar los **posibles impactos positivos** en los precios futuros de la energía gracias al proyecto Cardones - Polpaico.
4. Determinar los **beneficios de carácter estratégico** que aporta el proyecto a nivel país, conectando los principales centros de carga con los puntos clave de generación.



Metodología

Metodología

Análisis operación del sistema

Para visualizar los impactos de la línea a nivel sistémico se simula la operación del sistema con el software SDDP (Stochastic Dynamic Dual Programming).

Calcula la política operativa de mínimo costo para un sistema hidrotérmico considerando, entre otros, los siguientes aspectos:

- I. Representación de plantas térmica: eficiencia, generación máxima.
- II. Representación de plantas hidroeléctricas, incluyendo los respectivos embalses y sus características.
- III. Incertidumbre hidrológica.
- IV. Sistema de transmisión: Modelo de flujo de potencia DC, capacidades de transmisión por tramo y pérdidas.
- V. Etapas mensuales, con horizonte de mediano y largo plazo.

Se definen 3 escenarios de análisis detallados en la siguiente sección.

Metodología

Análisis seguridad sistémica

Se simula la operación del sistema con el software PowerFactory DigSILENT, para evaluar la estabilidad transitoria, frente a la ocurrencia de contingencias, verificando el cumplimiento de la NTSyCS de las siguientes variables:

- **Mayor excursión del ángulo del rotor.** Utilizado para determinar la estabilidad transitoria de las unidades generadoras del Sistema Eléctrico. Debe ser menor a 120° eléctricos en la primera oscilación.
- **Recuperación de la frecuencia.** Se determina el valor máximo y mínimo que alcanza la frecuencia ante las contingencias realizadas. se acepta un descenso transitorio hasta 48.3 [Hz].
- **Recuperación y control de la tensión.** Se determina el valor mínimo que alcanzan las tensiones en barras del sistema. No debe descender por debajo de 0.70 [pu] luego de 50 [ms] de despejada la contingencia.
- **Amortiguamiento de las oscilaciones electromecánicas.** Éste es medido sobre las oscilaciones de potencia activa en la línea de transmisión que transporta mayor potencia y más cercana al lugar de la contingencia. Se evalúa el factor el factor de amortiguación (ζ) de las oscilaciones, el cual debe tener un valor mínimo del 5%.

En las siguientes secciones se definen los escenarios de análisis y las contingencias consideradas.



Principales Supuestos

Supuestos

Escenarios planteados

Escenarios de modelación en SDDP

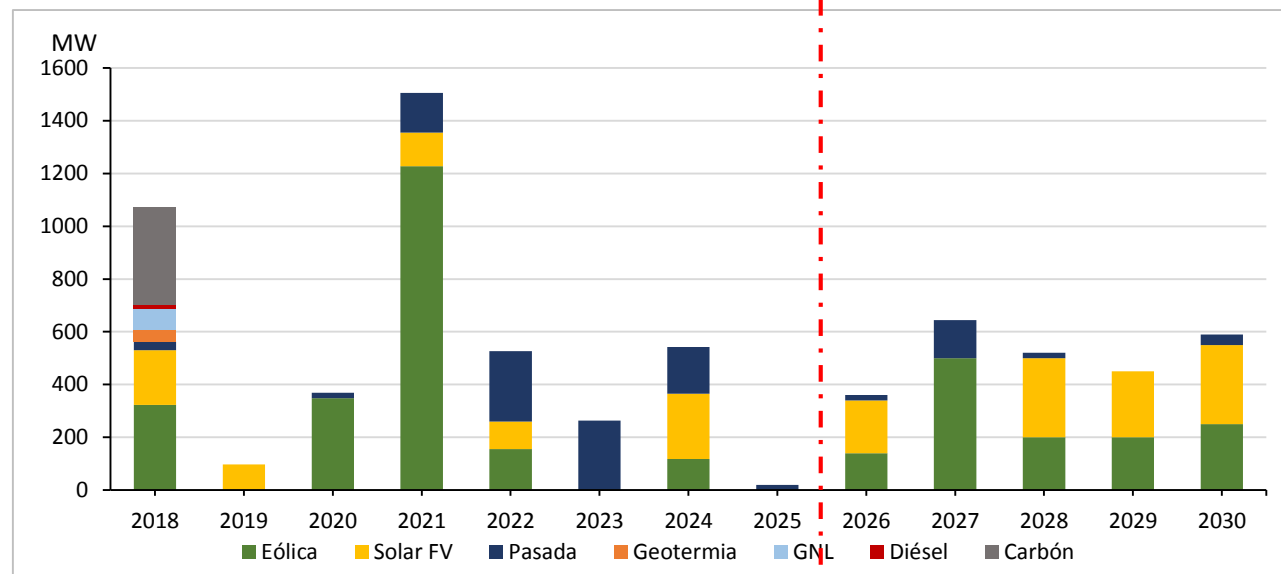
- 1) Escenario 1.** Caso base con el desarrollado esperado del sistema. **Contempla el proyecto Cardones – Polpaico.**
- 2) Escenario 2.** Caso considera un plan de cierre de unidades a carbón del 50% al año 2035, **incluyendo el proyecto Cardones – Polpaico.**
- 3) Escenario 3.** Caso de sensibilidad que se prepara a partir del escenario 1, **sin incluir el proyecto Cardones – Polpaico.**

Resultados se calculan en condiciones hidrológicas medias.

Plan de expansión de generación

Escenarios 1 y 3

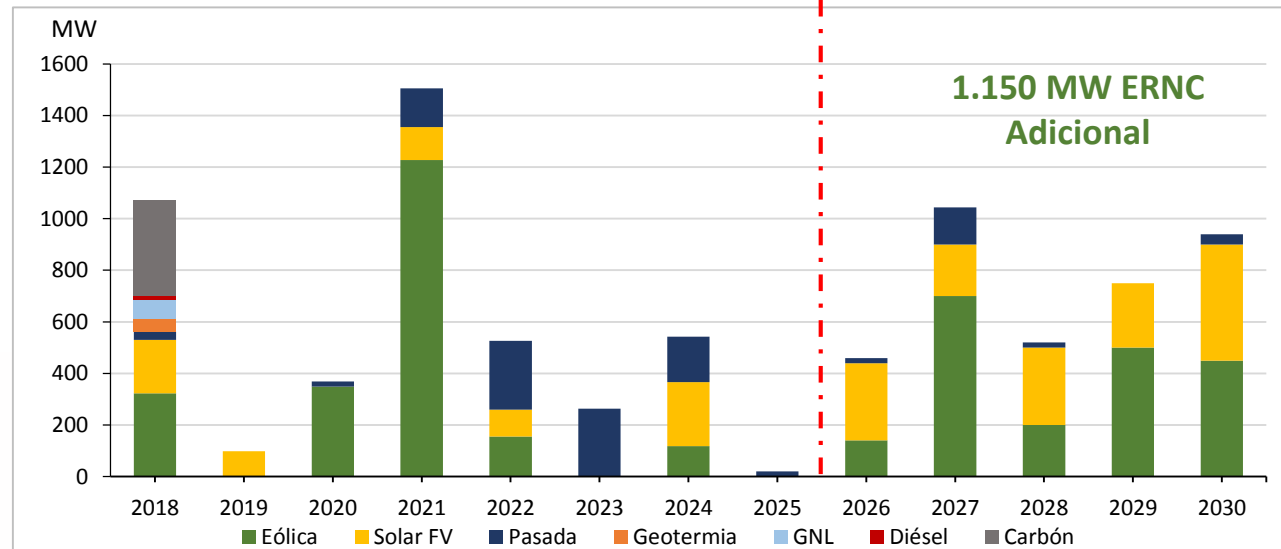
Base con y sin proyecto
Cardones - Polpaico



Escenario 2

Descarbonización

700 MW más de eólicas
450 MW más de solares



Plan de expansión de transmisión

Escenarios 1 y 3		
Fecha de ingreso	Instalación	Capacidad (MVA)
ene-19	Nueva Línea Pan de Azúcar - Polpaico 2x500 kV	2x1.500
ene-19	Nueva Línea Lo Aguirre - Cerro Navia 2x220 kV	2x1.500
nov-19	Nueva Línea Cumbres - Diego de Almagro 2x220 kV	2x600
dic-20	Nueva Línea Los Changos - Nueva Crucero-Encuentro 2x500 kV	2x1.500
jun-21	Nueva Línea Nueva Pozo Almonte - Cóndores 2x220 kV: primer circuito	1x260
jun-21	Nueva Línea Nueva Pozo Almonte - Parinacota 2x220 kV: primer circuito	1x260
jun-21	Nueva Línea Maitencillo - Punta Colorada - Pan de Azúcar 2x220 kV	2x500
jul-21	Nueva Línea Pichirropulli - Puerto Montt 2x500 kV, energizada en 220 kV	2x290
jun-22	Nueva Línea Nueva Chuquicamata - Calama 2x220 kV	2x260
jun-23	Nueva Línea Pan de Azúcar - Punta Sierra 2x220 kV	2x580
jun-23	Nueva Línea Punta Sierra - Pelambres 2x220 kV	2x580
jun-23	Nueva Línea Puerto Montt - Nueva Ancud y nuevo cruce aéreo 2x500 kV	2x290
ene-24	Nueva Línea Maitencillo - Pan de Azúcar 1x500 kV	1x1500
ene-24	Nueva Línea Pan de Azúcar - Polpaico 1x500 kV	1x1500
ene-25	Nueva Línea Charrúa - Mulchén 1x220 kV	1x500
ene-26	Nueva Línea Polpaico - Alto Jahuel 1x500 kV: cuarto circuito	1x1700
ene-27	Nueva Línea Charrúa - Ciruelos 2x500 kV, energizada en 220 kV	2x290
ene-27	Nueva Línea Ciruelos - Pichirropulli 2x500 kV, energizada en 220 kV	2x290
ene-27	Energización en 500 kV de Línea Pichirropulli - Puerto Montt 2x500 kV	2x1.700

El escenario 1 tiene la entrada del tramo Pan de Azúcar –Polpaico en enero de 2019 (31 de diciembre de 2018).

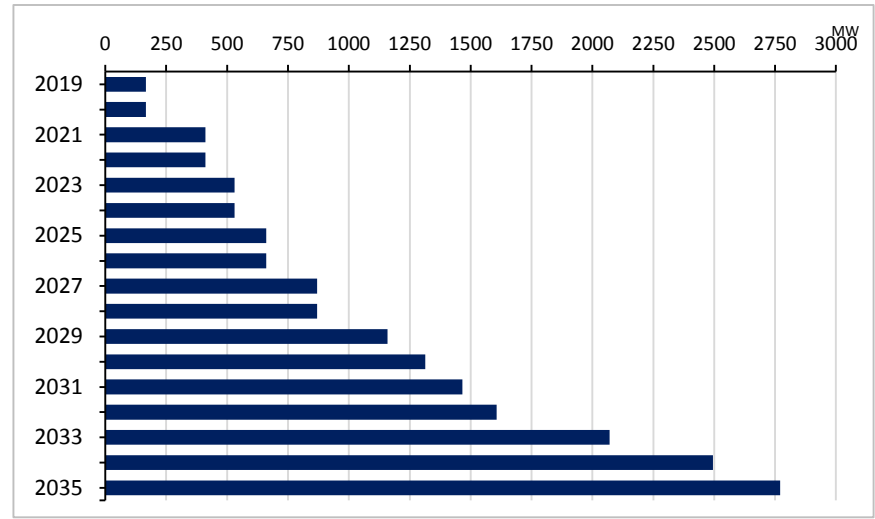
El escenario 3 no contempla la entrada del proyecto Cardones – Polpaico.

Escenario 2 (instalaciones adicionales)		
Fecha de ingreso	Instalación	Capacidad (MVA)
ene-28	Nueva Línea Charrúa - Ancoa 1x500 kV	1x1.500
ene-29	Nueva Línea Ancoa - Alto Jahuel 1x500 kV	1x1.500
ene-29	Nueva Línea Pan de Azúcar - Polpaico 1x500 kV	1x1.500
ene-29	Nueva Línea Changos - Cumbres 1x500 kV	1x1.500
ene-29	Nueva Línea Cumbres - Cardones 1x500 kV	1x1.500

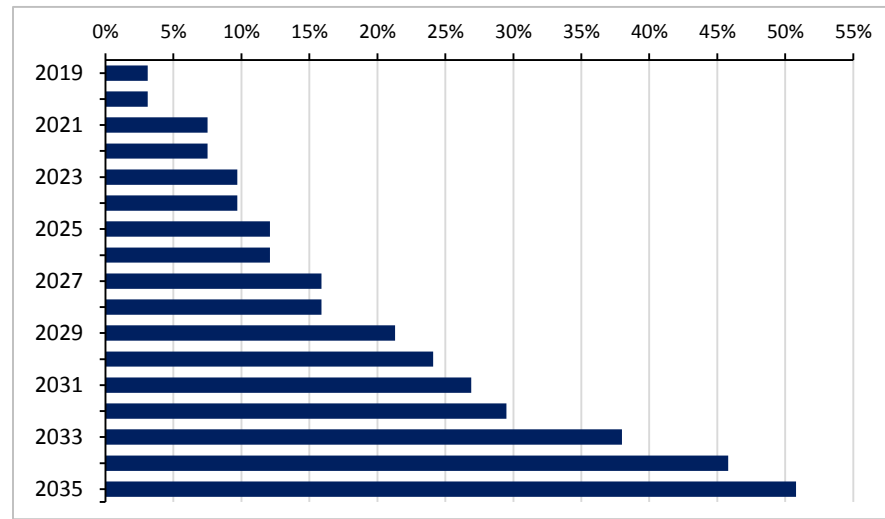
Plan de cierre de centrales a carbón

Escenario 2

Capacidad instalada retirada de centrales a carbón con respecto al año 2018



Porcentaje de capacidad instalada retirada de centrales



Fuente: Valgesta Energía

- El Escenario 2 considera que en el año **2035** se reduce en un **50%** la capacidad instalada de este tipo de centrales con la gradualidad que se indican en la figuras.

Plan de cierre de centrales a carbón

Escenario 2

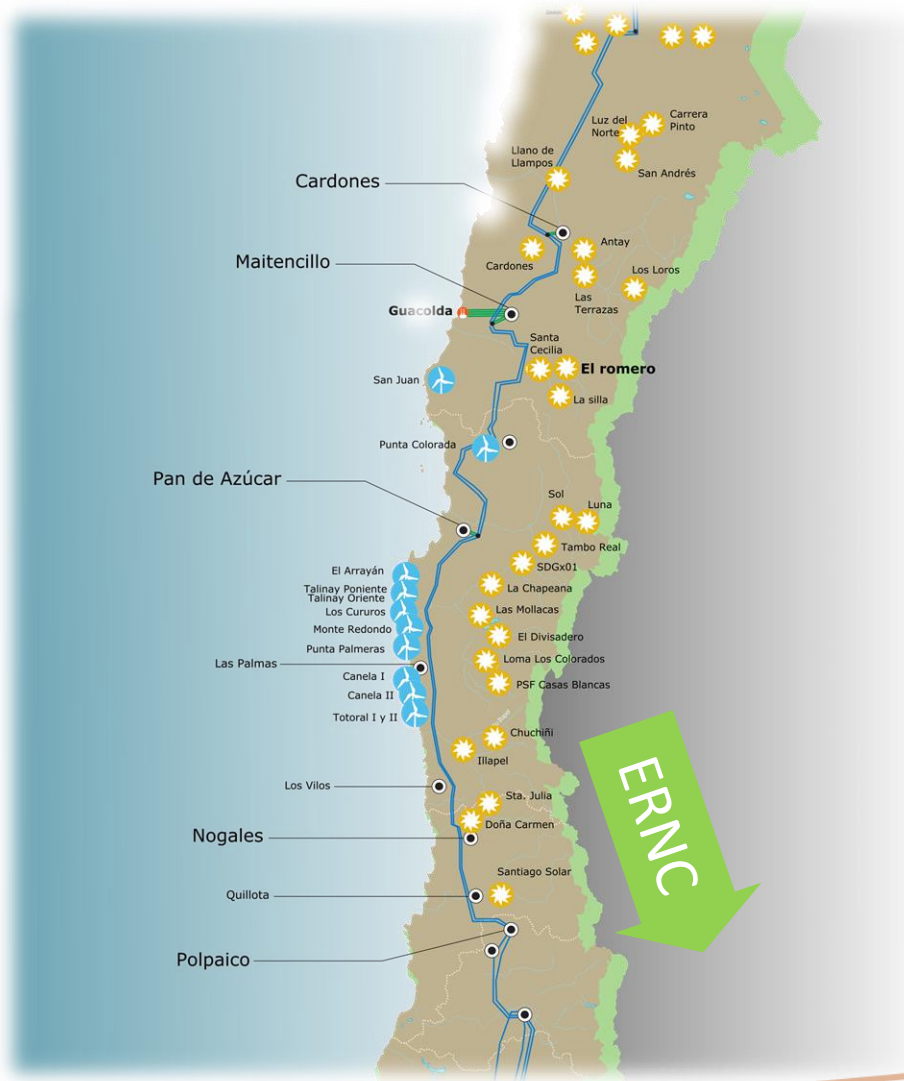
Central	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034
TERMOELÉCTRICA NORGENER (NTO2)																Sale
TERMOELÉCTRICA NORGENER (NTO1)											Sale					
COCHRANE (CCH2)																
COCHRANE (CCH1)																
TERMOELÉCTRICA ANGAMOS 1 (ANG1)																
TERMOELÉCTRICA ANGAMOS 2 (ANG2)																
Guacolda U1											Sale					
Guacolda U2													Sale			
Guacolda U3															Sale	
Guacolda U4																Sale
Guacolda U5																
Ventanas 1					Sale											
Ventanas 2									Sale							
Campiche																
Nueva Ventanas																Sale
Santa María																
TERMOELÉCTRICA TARAPACÁ (CTTAR)																Sale
Bocamina								Sale								
Bocamina II																
CENTRAL TERMOELÉCTRICA ANDINA (CTA)																
TERMOELÉCTRICA TOCOPILLA (U15)			Sale													
TERMOELÉCTRICA TOCOPILLA (U14)			Sale													
TERMOELÉCTRICA TOCOPILLA (U13)	Sale															
TERMOELÉCTRICA TOCOPILLA (U12)	Sale															
TERMOELÉCTRICA MEJILLONES (CTM2)																Sale
TERMOELÉCTRICA MEJILLONES (CTM1)												Sale				
IEM																
TERMOELÉCTRICA HORNITOS (CTH)																
Capacidad instalada retirada (MW)	167	167	411	411	531	531	661	661	869	869	1159	1314	1466	1607	2071	2495
Capacidad instalada retirada (%)	3%	3%	8%	8%	10%	10%	12%	12%	16%	16%	21%	24%	27%	30%	38%	46%

Fuente: Valgesta Energía



Principales Resultados

Generación ERNC Vertimientos



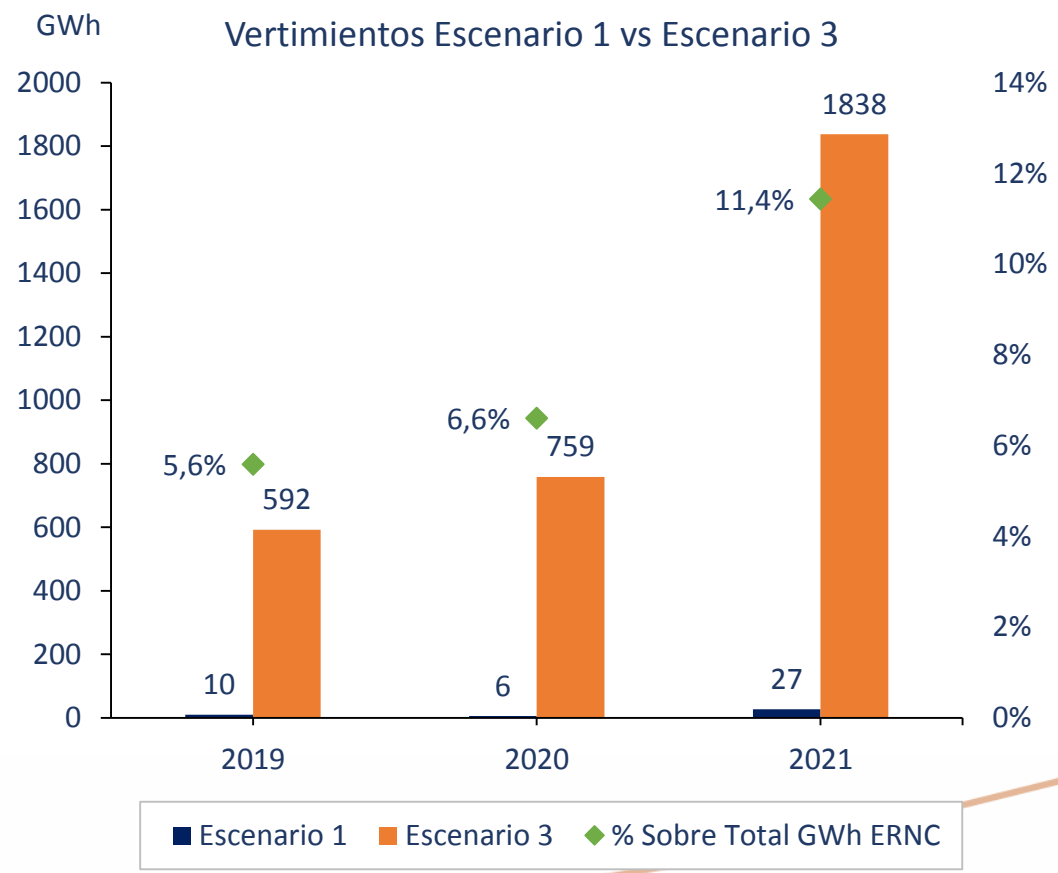
Línea Cardones-Polpaico **habilita el transporte e ingreso de energías limpias**

Generación ERNC

Vertimientos

Línea Cardones-Polpaico **reduce** significativamente el **vertimiento de ERNC**

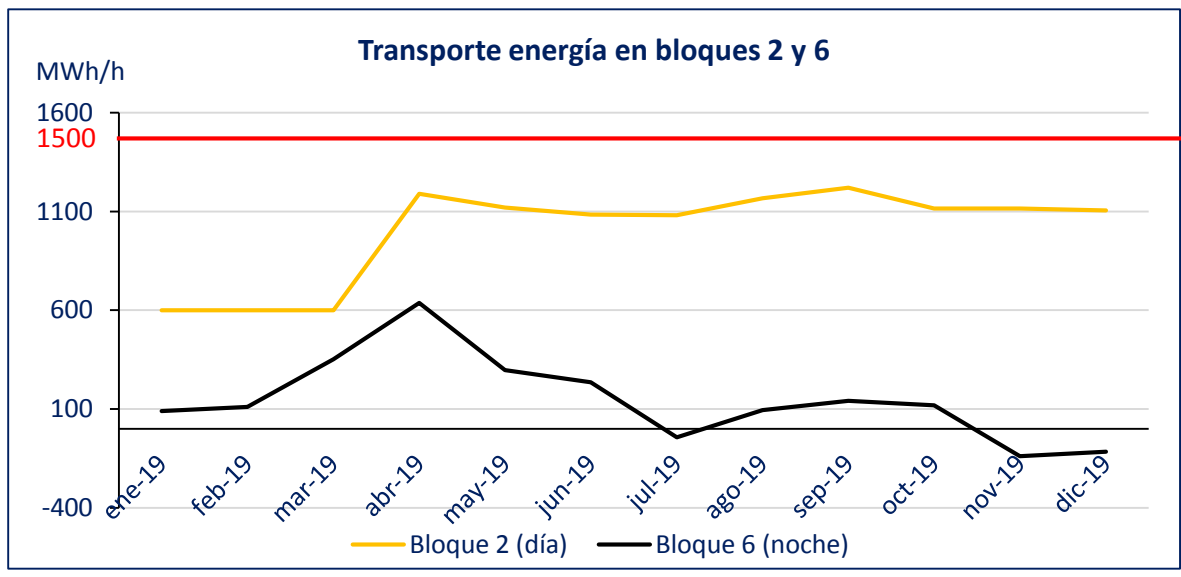
- ✓ Prácticamente se logra evacuar toda la energía para los años 2019-2021.
- ✓ Los porcentajes en verde del gráfico indican la cantidad de energía ERNC que se **evita verter gracias a la línea Cardones – Polpaico** sobre la generación total anual ERNC en la zona al norte de Nogales.



Generación ERNC

Vertimientos

Línea Cardones-Polpaico **habilita el transporte** y el ingreso de **energías limpias**



Máxima Capacidad de Transmisión

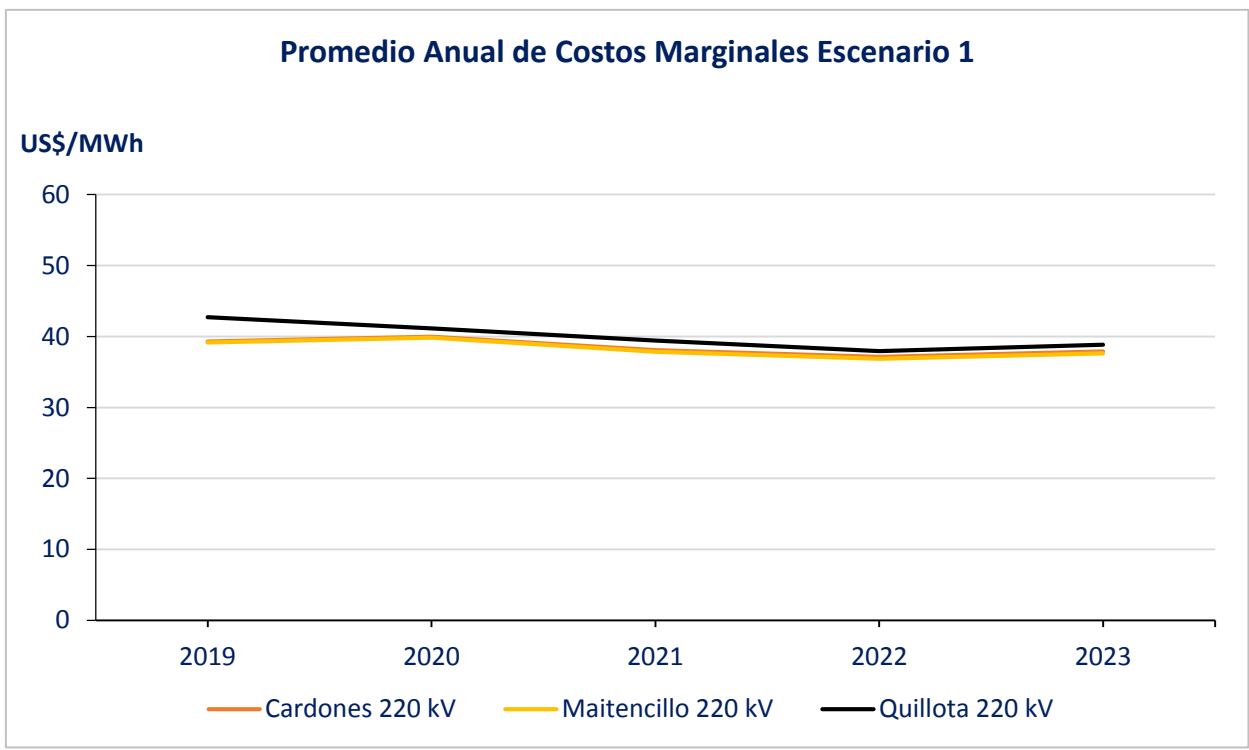
- ✓ Flujo promedio esperado de la línea Pan de Azúcar – Polpaico 500 kV del **escenario 1**.
- ✓ Bloque 2 representa el *peak* de generación fotovoltaica.
- ✓ Bloque 6 representa las horas de demanda nocturna.
- ✓ Aún existe espacio para la inclusión de 280 MW adicionales de centrales ERNC en el año 2019.

Costos Marginales

Hidrología Media

Línea Cardones-Polpaico **reduce los desacoples de centrales ERNC ubicadas al norte del país**

Promedio Anual de Costos Marginales Escenario 1



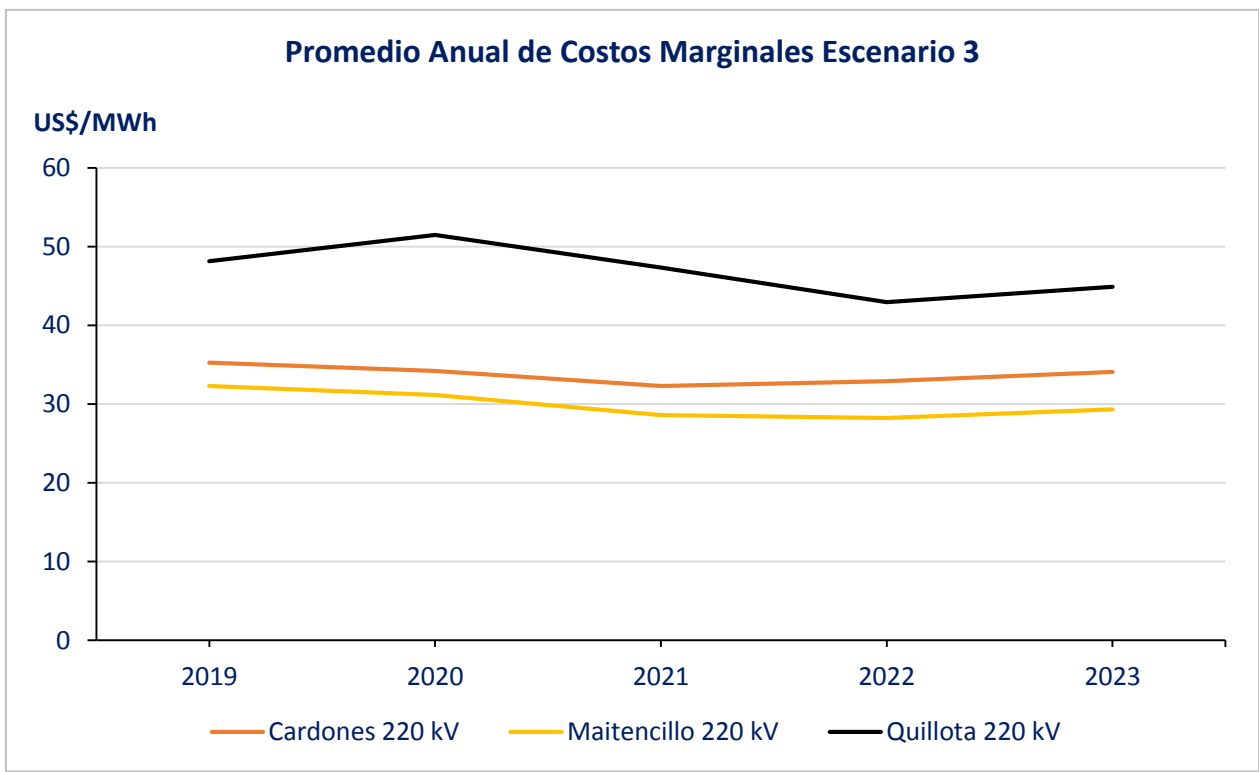
- Costos marginales en el **Escenario 1**.
- No se observan desacoples considerables de costos marginales entre las barras analizadas.
- A nivel mensual, el máximo desacople hasta el año 2023 es de **12,8 US\$/MWh** para las barras de Quillota 220kV y Maitencillo 220kV. El desacople promedio es de **1,8 US\$/MWh**.

Costos Marginales

Hidrología Media

Línea Cardones-Polpaico **reduce los desacoples de centrales ERNC ubicadas al norte del país**

Promedio Anual de Costos Marginales Escenario 3

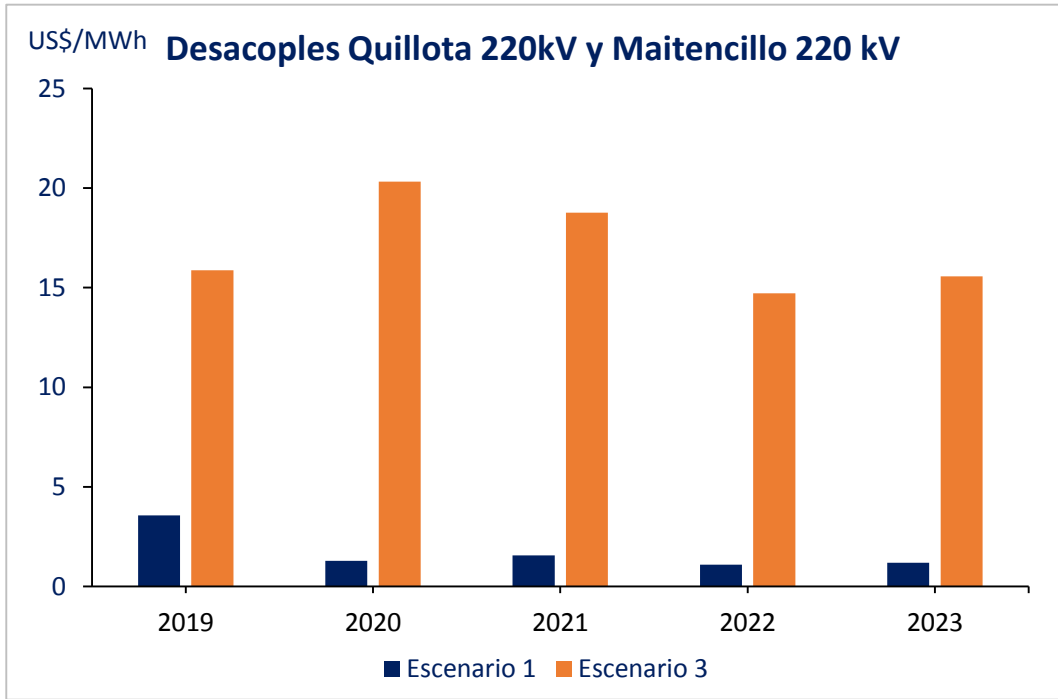


- Costos marginales en el **Escenario 3.**
- Importantes desacoples de costos marginales entre las barras analizadas.
- A nivel mensual, el máximo desacople hasta el año 2023 es de **34,4 US\$/MWh** para las barras de Quillota 220kV y Maitencillo 220kV. El desacople promedio es de **17,1 US\$/MWh.**

Costos Marginales

Hidrología Media

Línea Cardones-Polpaico **reduce los desacoples de centrales ERNC ubicadas al norte del país**

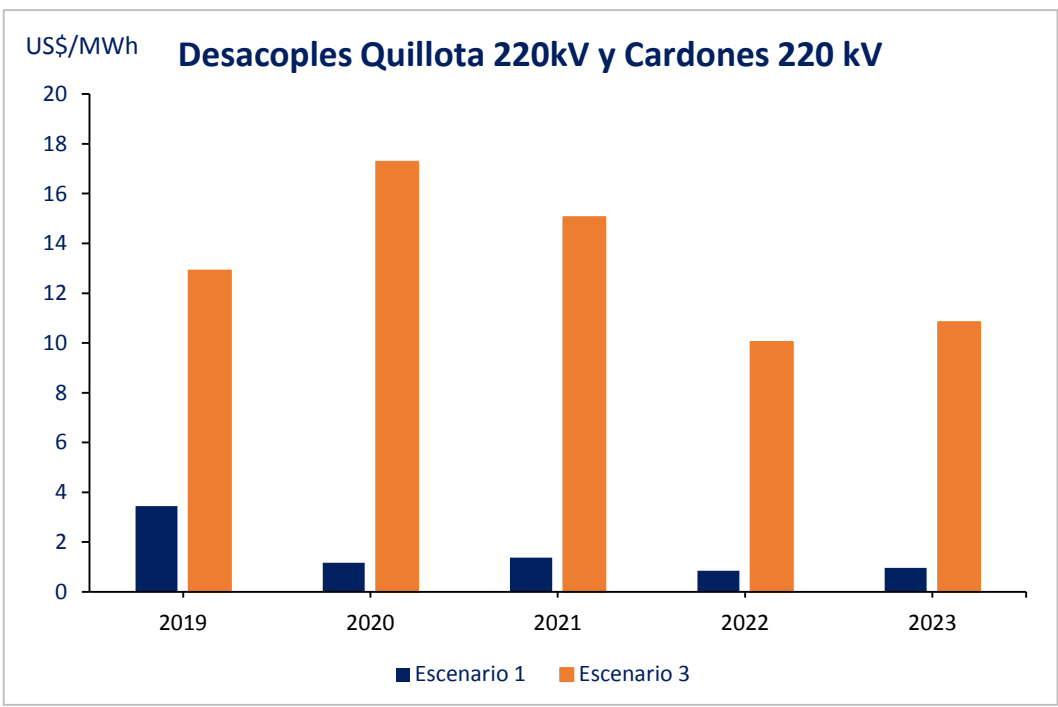


- Desacople anual esperado entre las barras de **Quillota 220 kV y Maitencillo 220 kV**.
- El desacople en el escenario 3 llega a ser cerca de **15 veces mayor** que en el escenario 1 para el año 2020.

Costos Marginales

Hidrología Media

Línea Cardones-Polpaico **reduce los desacoples de centrales ERNC ubicadas al norte del país**

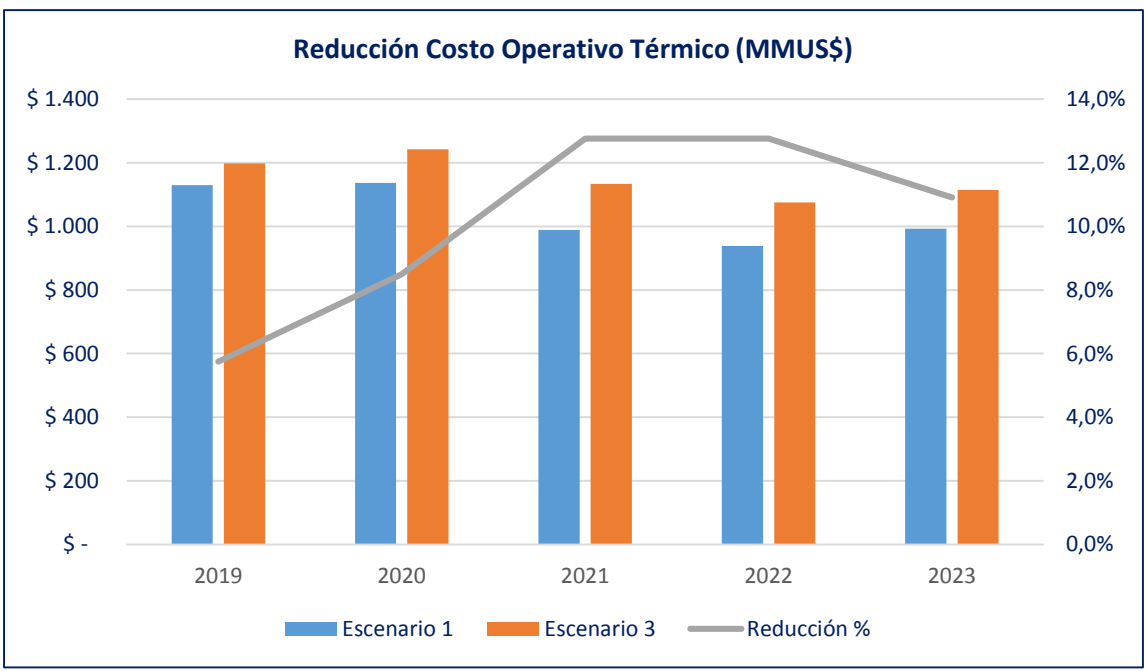


- Desacople anual esperado entre las barras de **Quillota 220 kV y Cardones 220 kV**.
- El desacople en el escenario 3 llega a ser cerca de **14 veces mayor** que en el escenario 1 para el año 2020.

Costo Operativo Térmico

Hidrología Media

La línea Cardones-Polpaico **reduce los costos operativos térmicos** gracias a una **mayor generación de centrales ERNC**

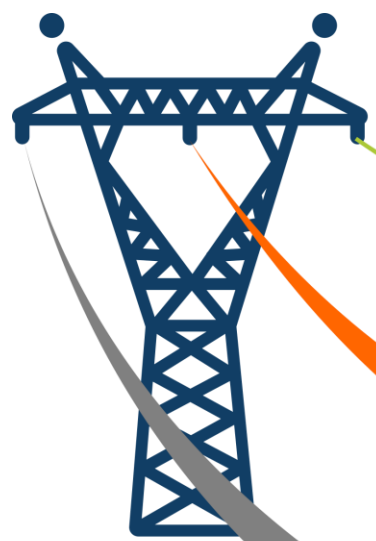


- El costo operativo térmico se reduce entre un 6% y 13% en el período 2019-2023 en el escenario 1 vs el escenario 3.
- La línea permite una mayor generación ERNC que disminuye el despacho de centrales térmicas.

Generación ERNC

Viviendas suministradas con ERNC

La nueva línea permite llevar **energía renovable** a las **viviendas chilenas**



ERNC



La línea Cardones-Polpaico permitirá alimentar **5,7 millones de hogares con fuentes ERNC... es decir aproximadamente todas las viviendas de Santiago!**

Convencional



... además de **500 mil viviendas con fuentes convencionales...**

Holgura

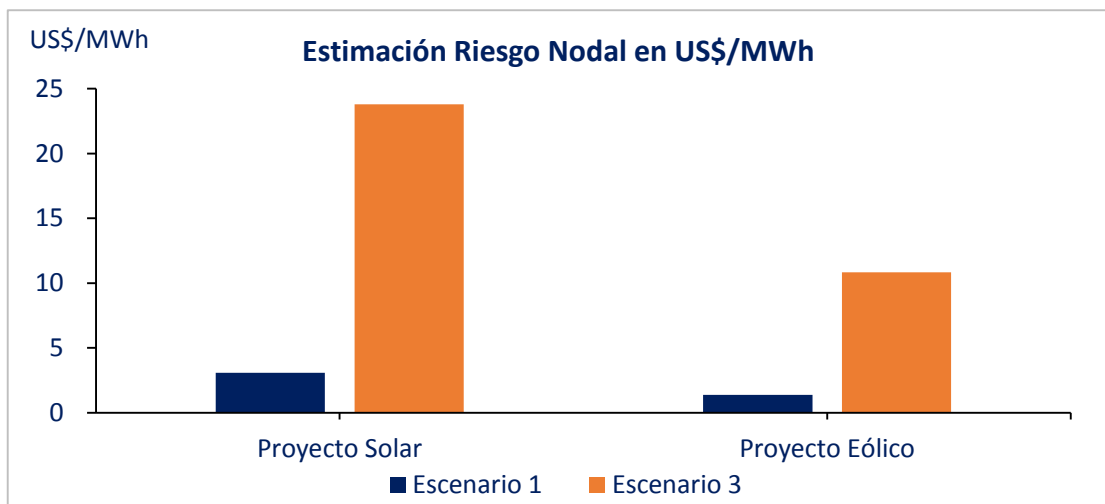


... y aún se tienen **280 MVA** de holgura al año 2019.

Precios de energía

Competitividad licitaciones de suministro regulado

La línea Cardones – Polpaico permite ofertas de suministro energético a un menor precio



Riesgo nodal

Proyecto solar fotovoltaico:

Escenario 1: 3,1 US\$/MWh

Escenario 3: 23,8 US\$/MWh

Proyecto eólico:

Escenario 1: 1,4 US\$/MWh

Escenario 3: 10,8 US\$/MWh

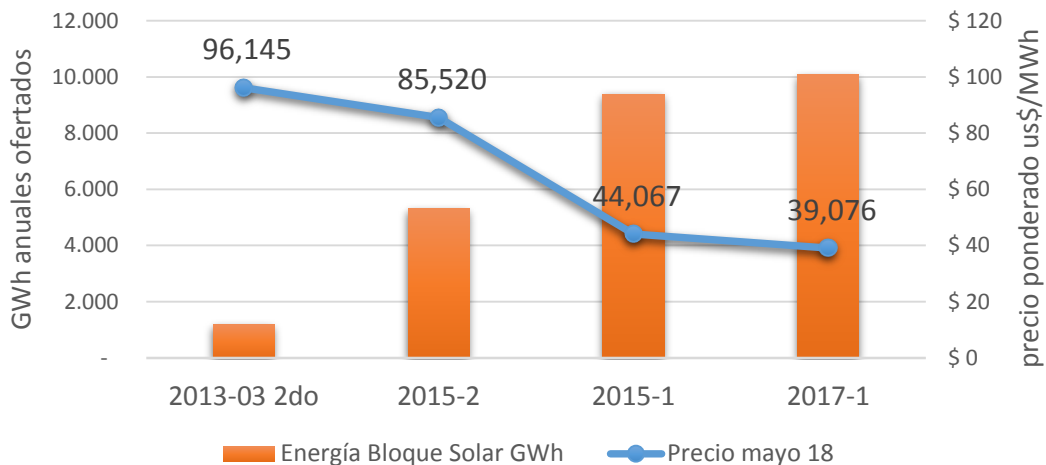
- El riesgo nodal se relaciona con el gran desacople que se produce en el sistema en los costos marginales y que deben asumir las generadoras al ofertar en licitaciones de suministro eléctrico.

Precios de energía

Competitividad licitaciones de suministro regulado

La línea Cardones – Polpaico permite ofertas de suministro energético a un menor precio

Precio Ponderado Ofertas Bloque Solar Licitaciones Reguladas



- ✓ El gráfico indica los precios ponderados en US\$/MWh de todas las ofertas en bloques solares de las licitaciones reguladas.
- ✓ Desde el proceso 2013-03 2do llamado a la licitación 2017-01 el precio ponderado, indexado a mayo 2018, **ha caído en un 60%**, o sea en **57 US\$ por MWh**.
- ✓ Efectos que han hecho bajar el precio:
 - I. Mayor competitividad
 - II. Disminución costos tecnología
 - III. **Disminución Riesgo Nodal por Cardones Polpaico**

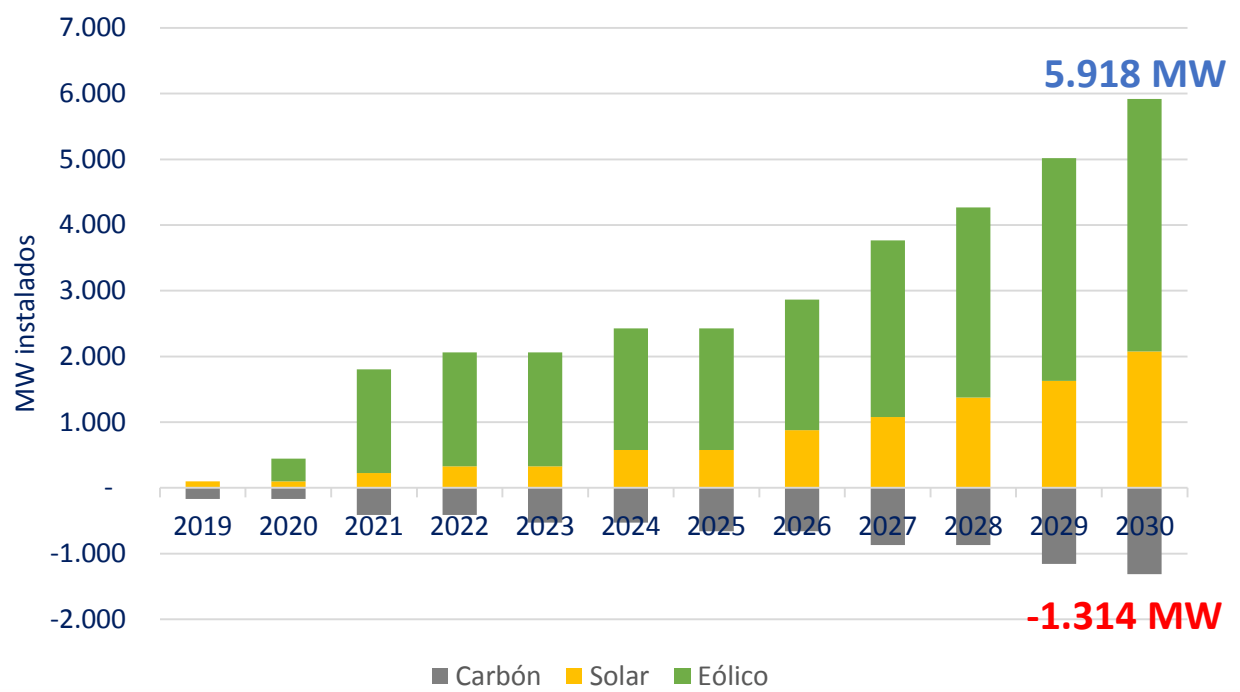
Tomando en cuenta el costo por riesgo nodal estimado para la oferta ERNC, se tiene que la disminución de dicho riesgo gracias al proyecto Cardones-Polpaico permite una **reducción en el cargo de energía** de la boleta del cliente final en la Región Metropolitana **de cerca de un 7% al año 2025**

Generación ERNC

Independencia Carbón

Línea Cardones-Polpaico **habilita un plan de cierre** de centrales
térmicas en base a **carbón**

Expansión Parque Generador Escenario 2

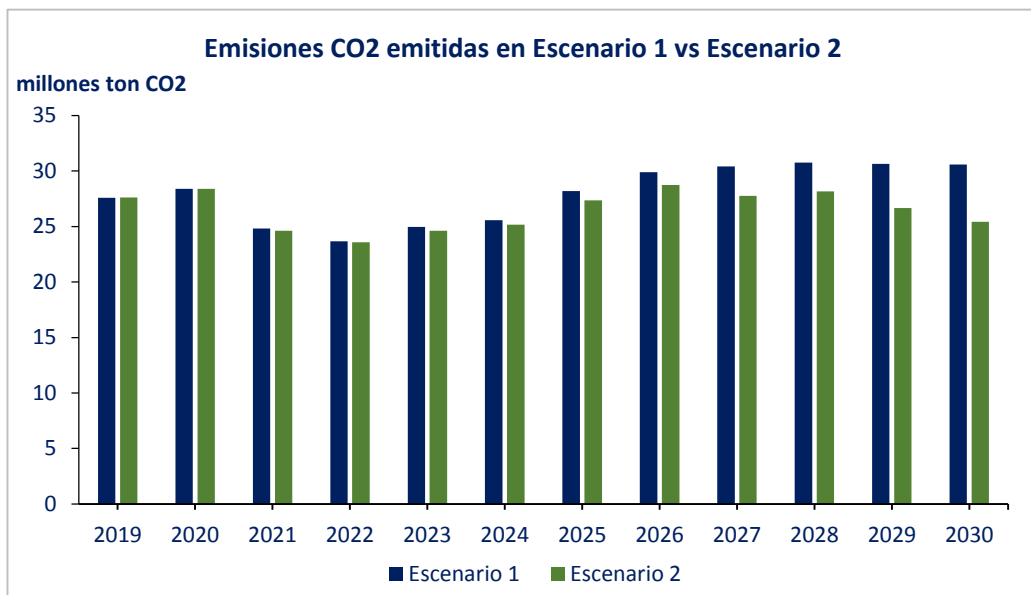


- Capacidades del plan de generación del Escenario 2.
- De los 5.918 MW, la cantidad de **1.150 MW** se contemplan para suplir la salida de centrales a carbón.
- De la instalación adicional, un **83%** corresponde a centrales al norte de Cardones.

Externalidades positivas

Reducción de emisiones gases invernaderos

Línea Cardones-Polpaico **contribuye al cumplimiento** de los compromisos del Acuerdo de París al reducir emisiones CO2



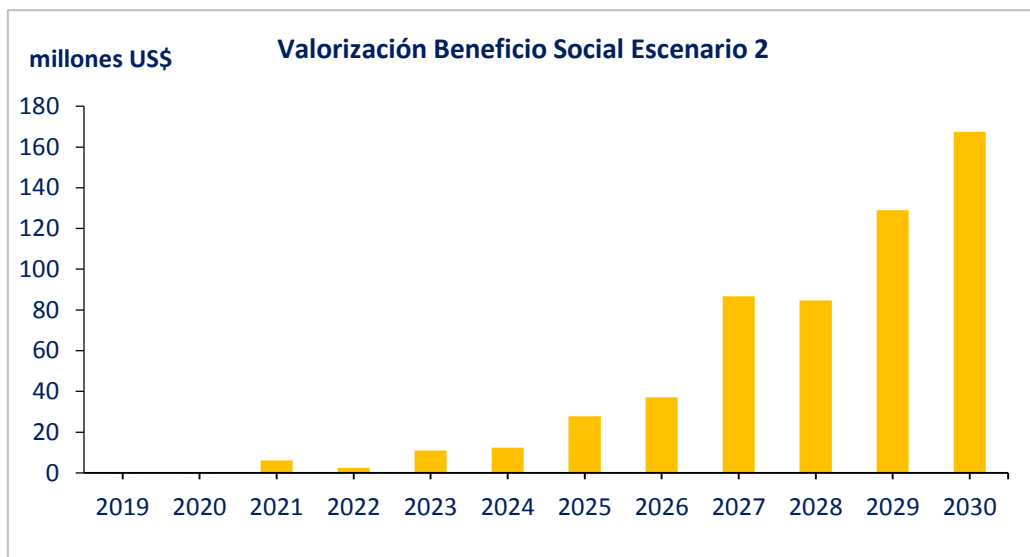
Reducción de emisiones

- Reducción al año 2030 de aproximadamente 5 millones de toneladas anuales de CO2.
- Las emisiones son calculadas en base a los factores de emisión declarados a la Superintendencia de Medio Ambiente por parte de las unidades a carbón.

Externalidades positivas

Beneficios sociales

Línea Cardones-Polpaico **otorga beneficios sociales** al país
al **reducir las emisiones de CO2**



Beneficio social del CO2

- Beneficio considerado: 32,5 (US\$/ton CO2).
- Estudio “Estimación del Precio Social del CO2”.
- Se estima para el año 2030 un beneficio social de aproximadamente 167 millones de dólares.

Fuente: 1) Gráfico elaborado por Valgesta Energía.

2) “Estimación del precio social del CO2”, Ministerio de Desarrollo Social, febrero 2017

Seguridad y Resiliencia

Escenarios y Contingencias

Se consideraron los siguientes escenarios:

Escenario	Topología considerada	Dirección del Flujo
1	Con Tramo Cardones - Polpaico	Desde el Norte a Sur (día laboral alta a las 4 pm)
2	Sin Tramo Cardones - Polpaico	

Se consideraron las siguientes contingencias:

- Desconexión intempestiva de la unidad de con mayor despacho de la zona donde se encuentra el tramo Cardones – Polpaico (El Romero).
- Falla bifásica a tierra en uno de los circuitos de la línea Cardones – Maitencillo 2x220 kV.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos.

Seguridad y Resiliencia

Resultados

Estabilidad Frecuencia y Tensiones

Escenario	Contingencia	Frecuencia máxima [Hz]	Frecuencia Mínima [Hz]	Respuesta Dinámica	Cumplimiento Art. 5-40
1	Salida intempestiva Central El Romero	50.019	49.684	Amortiguada	✓
	Falla bifásica a tierra al 50% del C2 Cardones - Maitencillo 2x220 kV	50.132	49.899	Amortiguada	✓
2	Salida intempestiva Central El Romero	50.882	49.689	Amortiguada	✓
	Falla bifásica a tierra al 50% del C2 Cardones - Maitencillo 2x220 kV	55.077	48.22	Amortiguada	⊘ frecuencia cae de 48.3 [Hz]

Escenario	Contingencia	Tensión Mínima en inst. de 500 [kV] [pu]	Tensión Mínima en inst. de 220 [kV] [pu]	Respuesta Dinámica	Cumplimiento Art. 5-39
1	Salida intempestiva Central El Romero	0.991	1.024	Amortiguada	✓
	Falla bifásica a tierra al 50% del C2 Cardones - Maitencillo 2x220 kV	0.992	1.026	Amortiguada	✓
2	Salida intempestiva Central El Romero	1.003	1.004	Amortiguada	✓
	Falla bifásica a tierra al 50% del C2 Cardones - Maitencillo 2x220 kV	1.000	0.995	Amortiguada	✓

Seguridad y Resiliencia

Resultados

Factor de amortiguamiento y ángulo rotor

Escenario	Contingencia	Incurción Angular máxima [° eléctricos]	Respuesta Dinámica	Cumplimiento Art. 5-43
1	Salida intempestiva Central El Romero	57.04	Amortiguada	✓
	Falla bifásica a tierra al 50% del C2 Cardones - Maitencillo 2x220 kV	57.70	Amortiguada	✓
2	Salida intempestiva Central El Romero	68.87	Amortiguada	✓
	Falla bifásica a tierra al 50% del C2 Cardones - Maitencillo 2x220 kV	69.39	Amortiguada	✓

Escenario	Contingencia	Amortiguamiento ζ [%]	Respuesta Dinámica	Cumplimiento Art. 5-48
1	Salida intempestiva Central El Romero	8.48	Amortiguada	✓
	Falla bifásica a tierra al 50% del C2 Cardones - Maitencillo 2x220 kV	8.96	Amortiguada	✓
2	Salida intempestiva Central El Romero	11.61	Amortiguada	✓
	Falla bifásica a tierra al 50% del C2 Cardones - Maitencillo 2x220 kV	8.78	Amortiguada	✓



Conclusiones

Conclusiones

Principales Beneficios

Según los resultados es posible afirmar que el proyecto Cardones Polpaico:

1. **SOLUCIONA** el problema de vertimiento ERNC en la zona centro norte.
2. **PERMITE** las transferencias de energía ERNC y por ende el desarrollo de este tipo de tecnologías.
3. **DISMINUYE** significativamente los desacoples presentes en el sistema, evitando así los riesgos nodales que se traducen en mayores precios para los clientes finales.
4. **POSIBILITA** que un número significativo de viviendas puedan ser suministradas por energías 100% limpias.
5. **VIABILIZA** un plan de cierre de centrales a carbón altamente emisoras en gases invernaderos, y así aportar significativamente al cumplimiento del Acuerdo de París.
6. **ASEGURA** la resiliencia y confiabilidad del sistema eléctrico nacional ante contingencias.

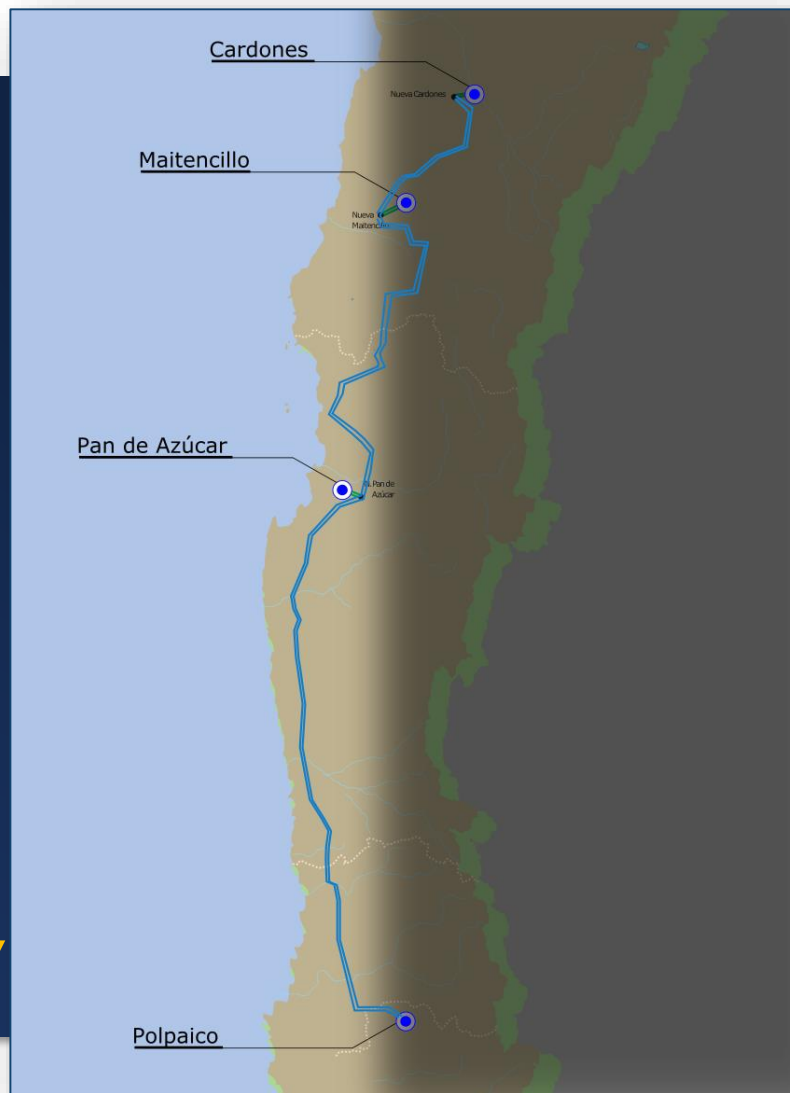
Conclusiones

Mapa



Durante el día

- ✓ Cerca de 1.300 MW de ERNC se transfieren de norte a sur.
- ✓ La línea alimenta la demanda de alrededor de 5.7 millones de viviendas con energías verdes.
- ✓ Se dejan de emitir cerca de 1.430 toneladas de CO2 por hora solar.
- ✓ Se evitan los desacoples de costos marginales producto de restricciones en la transmisión.



Durante la noche

- ✓ El flujo se invierte en las noches, permitiendo transmitir energía embalsada en agua al norte.
- ✓ No se producen restricciones en la transmisión.
- ✓ Podría habilitar el desarrollo de parques generadores con participación de almacenamiento en la inyección nocturna.



Análisis Beneficios Proyecto Cardones - Polpaico

Resultados Resumen Ejecutivo

Diciembre de 2018