



transmisoras

Asociación de Transmisoras de Energía

Resiliencia

El eslabón débil del marco regulatorio eléctrico

Javier Tapia C.

Director Ejecutivo

“Adaptar para resistir. ¿Está la regulación eléctrica a la altura?”

Instituto Libertad & Desarrollo

02.08.25



transmisoras

Asociación de Transmisoras de Energía

Llevamos **energía**,
estamos comprometidos con un

futuro más verde

Atlantica
Sustainable Infrastructure

conexión
Línea Kimol - Lo Aguirre

**grupo
saesa**

transemel

ENGIE

isa
ENERGÍA

ferrovial

redinter

ten

transelec

elotrans
Juntos Somos Energía

celeo





(1)

*¿De qué hablamos
cuando hablamos de
resiliencia?*



¿Qué **no es** resiliencia?

- No es lo mismo que **seguridad, robustez y confiabilidad**
 - Sistemas son tradicionalmente diseñados y operados con estas tres características en vista



Concepto	Definición	¿Por qué no es lo mismo?
Confiabilidad	Rendimiento bajo condiciones normales (alta probabilidad — bajo impacto) Eventos son numerosos, afectan a pocas personas y por un tiempo corto	No contempla respuesta ante eventos disruptivos
Robustez	Busca mantener el sistema estable y con buen rendimiento frente a perturbaciones intrínsecas del sistema (independiente del escenario)	Solo busca resistir, no adaptarse ni recuperarse
Seguridad	Estabilidad ante eventos de corto plazo. Utiliza criterio <i>N-k</i>	No considera eventos prolongados ni recuperación sistémica





¿Qué **sí es** resiliencia?

- Es la capacidad del sistema para anticipar, absorber, adaptarse y recuperarse (y aprender) de trastornos extraordinarios
 - Eventos de **alto impacto, pero baja probabilidad de ocurrencia** (HILP)
 - Afectan a mucha gente y son de larga duración
- Generalmente asociada a eventos naturales (e.g., eventos climáticos extremos) o del hombre (e.g., ciberataques)
 - Foco aquí es en cambio climático
- Requiere de una **mirada no tradicional**
 - Decisiones de inversión van más allá de reglas como *N-1* o *N-2*
 - Procesos no son activados en la operación diaria
 - La mirada geográfica es mucho más importante (cada área es diferente)
 - Impactos (y respuestas) de la comunidad se vuelven relevantes





Eventos climáticos extremos: una amenaza creciente

- 2015: Aluvión de Chañaral
- 2022: Tormentas de arena en Diego de Almagro
- 2023: Crecida y desborde del río Tinguiririca
- 2023: Incendios forestales en Región de Valparaíso
- 2024: Lluvias extremas en junio (Ñuble y Biobío) y agosto (Santiago, Ñuble y Maule)

+ vientos, calor extremo...



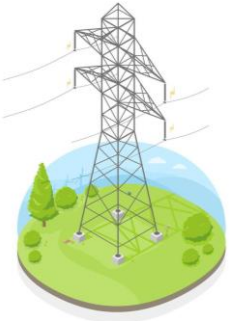
(2)



*La ausencia de un
marco regulatorio
adecuado y sus
consecuencias*



El problema: el marco regulatorio “no da”



No hay espacio institucional para proyectos con beneficios “resilientes”

Nuestra regulación no promueve explícitamente obras por resiliencia: solo realiza su análisis sobre obras ya evaluadas económicamente. No es posible valorar estos beneficios (ni siquiera es posible considerarlos como servicios complementarios)

Los modelos actuales ignoran la probabilidad creciente de eventos extremos

La regulación y metodologías de planificación de la transmisión no están adaptados -ni preparados- para promover obras por resiliencia. Necesitamos una metodología para promover obras por resiliencia, contar con **métricas, métodos de evaluación y de justificación técnico-económicas** para obras resilientes.





Qué dice el **marco regulatorio** actual

Ley General de Servicios Eléctricos

No hay mención a la resiliencia. El art. 87° solo refiere a la minimización de riesgos de abastecimiento, considerando “desastres naturales”.

Reglamentos

Solo el DS N°37/2019 refiere al análisis de resiliencia **en función de la** “*seguridad al abastecimiento de la demanda de los clientes finales frente a eventualidades de baja probabilidad de ocurrencia y alto impacto*”, pero es un análisis posterior al económico, es decir, sobre las obras ya propuestas en etapas previas.

Estudios Técnicos

Los estudios técnicos del Coordinador **priorizan EnS** (Energía No Suministrada) **y costos** esperados, por lo que no contemplan escenarios de falla múltiple ni catástrofes naturales de alto impacto. Cuando lo han hecho -como obras resilientes a eventos volcánicos-, se encuentran con la dificultad de evaluarlas económicamente para promoverlas.





Un ejemplo: la saga de Chañaral

2015: Aluvión. Chañaral permanece **128 horas** sin luz

2019: Transelec propone un segundo circuito desde El Salado, el que es **rechazado por la CNE**.

2020: Transelec propone una nueva solución. En el Panel de Expertos, expone cuatro alternativas para asegurar el suministro de Chañaral ante eventos extremos, siendo la línea Chañaral - Javiera en 110 kV la más conveniente. La **CNE rechaza** nuevamente por ser un evento de muy baja probabilidad, aunque reconoce la situación vulnerable de Chañaral. El Panel recomienda alguna alternativa de generación vía *Servicios Complementarios (SS.CC.)*.

2021: Se insistió con la obra, siendo nuevamente **rechazada por la CNE**. Coordinador también rechaza la alternativa mediante SS.CC.

2025: Se promueve un BESS de 5 MW en S/E Chañaral, en el marco del procedimiento de “obras necesarias y urgentes mandatadas” (art. 91° bis). Dicha obra también fue **rechazada por la CNE** por no encontrarse beneficios económicos en el análisis de seguridad (EnS valorizada a costo de falla de corta duración). La CNE reconoce que el problema de Chañaral “*radica en eventos de alto impacto y de baja probabilidad de ocurrencia*”, por lo que estima, **la mejor solución, es una línea de transmisión**.





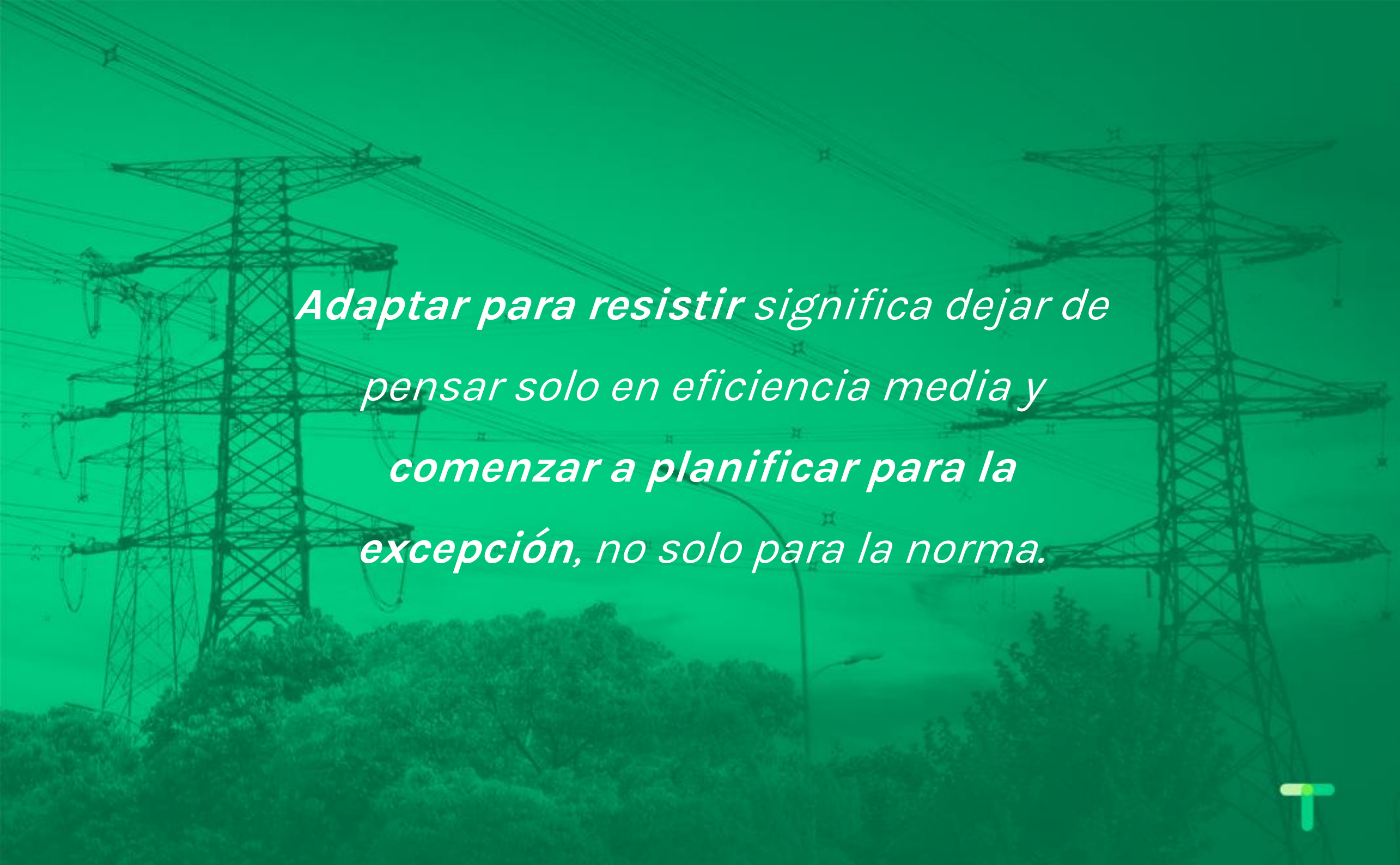
La proactividad no basta

Las propuestas sobre resiliencia no son consideradas, porque no hay metodología

En los procesos de expansión de la transmisión 2021, 2024 y 2025 hubo propuestas tendientes a promover obras por resiliencia. Todas han sido rechazadas (exceptuando la de 2025 que continúa en evaluación hasta septiembre).

Año	Nombre del proyecto	Nombre proponente	Zona del proyecto	Costo total [USD]
2021	Nueva línea 110 kV Nueva Chañaral - Javiera y S/E Nueva Chañaral	Transelec S.A.	Zonal B	22.360.374
2021	Segundo circuito LT 220 kV Charrúa-Lagunillas con seccionamiento en S/E Hualqui	Transelec S.A.	Nacional	16.908.452
2024	Nueva Subestación Seccionadora Patagual	Celeo Redes	Zonal E	19.776.091
2025	Nueva S/E Patagual y Refuerzo de la línea 2x220kV Patagual – Lagunillas	Colbún	Zonal E	35.161.583





*Adaptar para resistir significa dejar de
pensar solo en eficiencia media y
comenzar a planificar para la
excepción, no solo para la norma.*



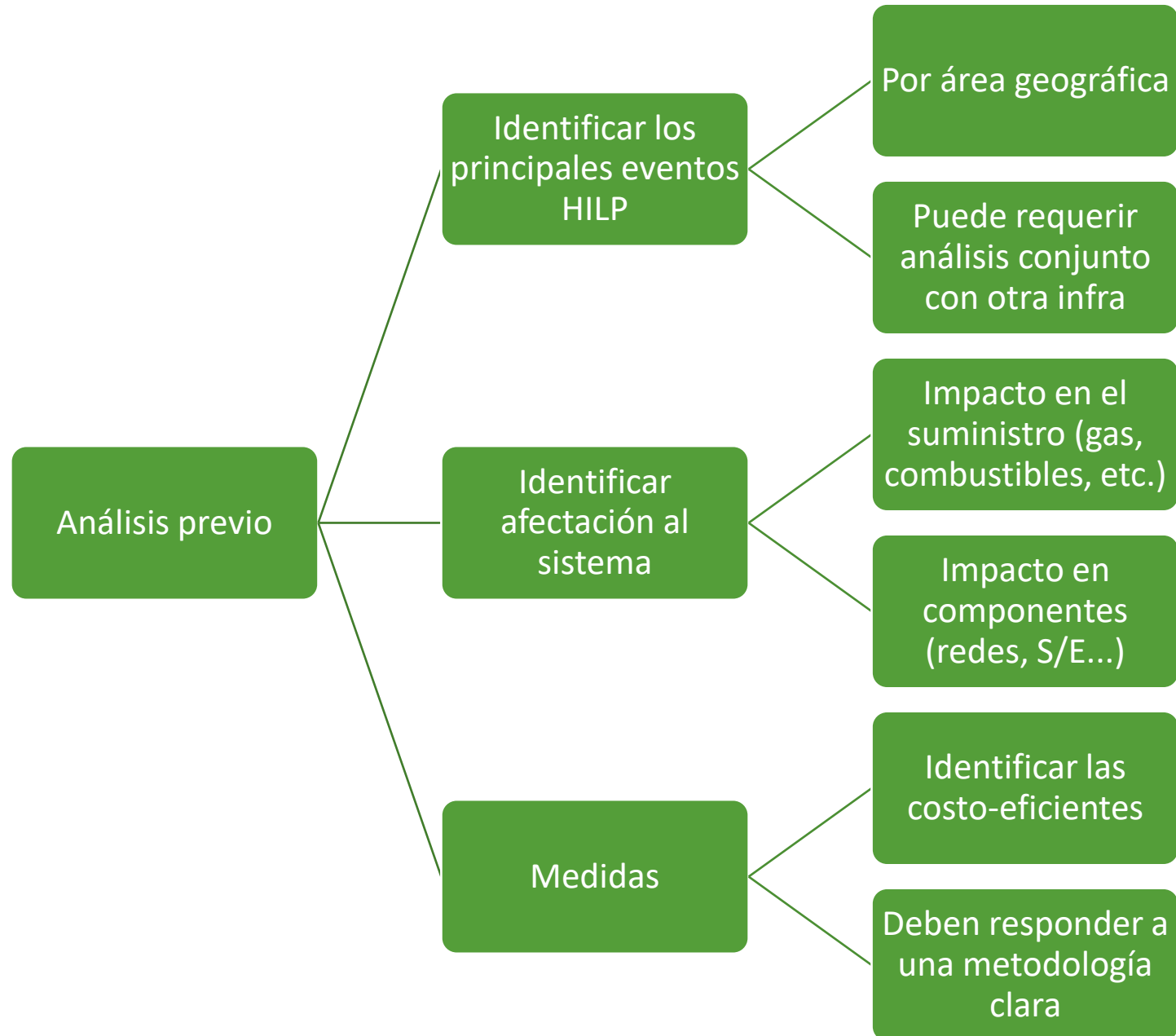
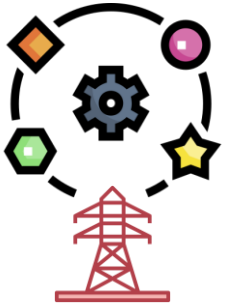
(3)

*Algunos aspectos
prácticos*





Una primera aproximación al análisis





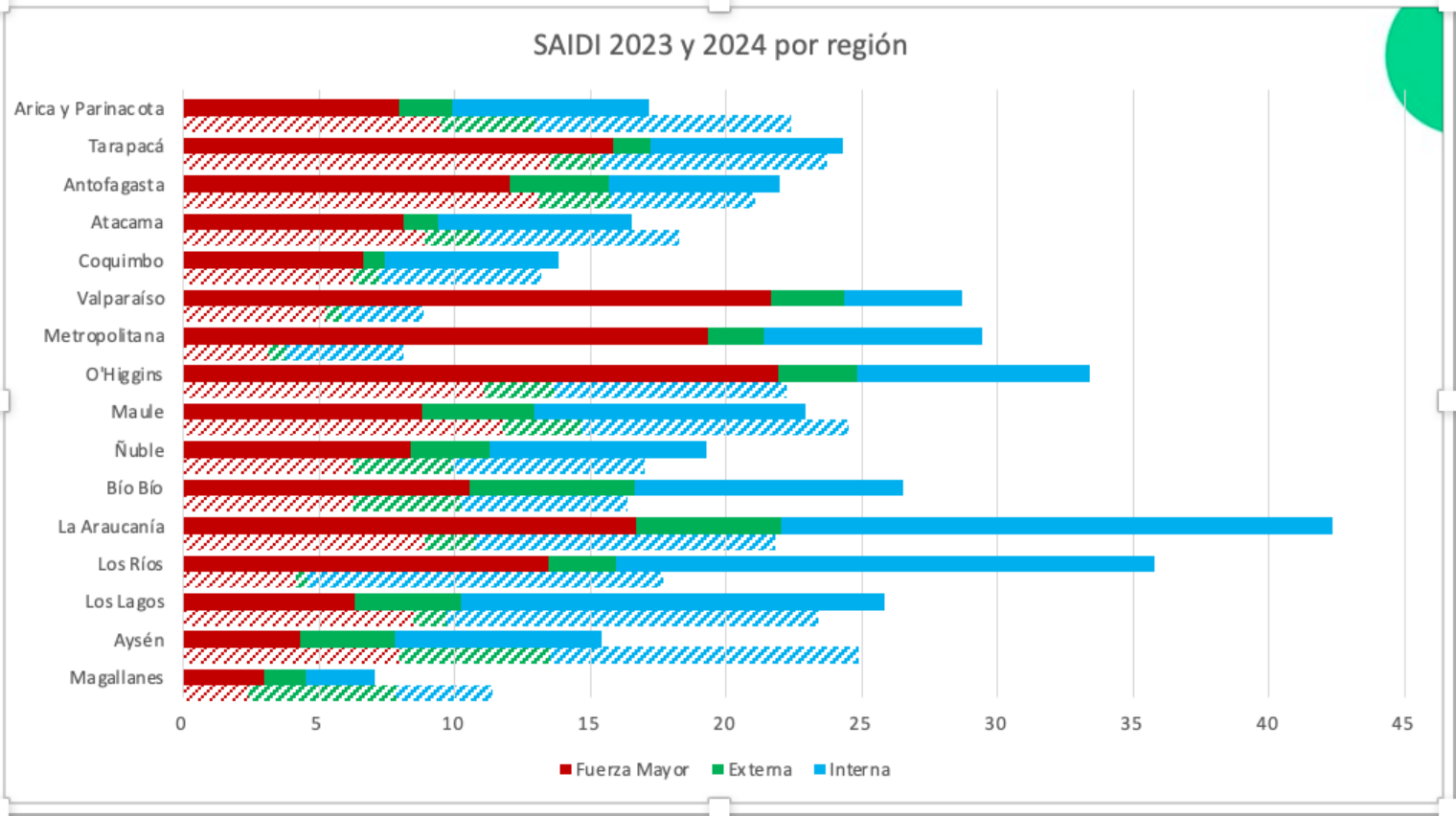
El problema de la métrica

- Normalmente en Chile utilizamos indicadores de confiabilidad
 - Típicamente el SAIDI. En la literatura, tb. SAIFI o CAIDI
- Dos problemas:
 - Tienen foco en distribución (usuario finales)
 - En Tx existen otros (LOLE o EUE), no usados
 - No capturan adecuadamente pérdida de resiliencia, ni reflejan interdependencias operacionales entre zonas
 - Capturan eventos regulares, no excepcionales. Estos últimos, de hecho, son excluidos
 - ¿Métricas propias de cada sistema?



Hay, por cierto, alguna conexión entre las métricas y deben ser coordinadas

E.g.,
confiabilidad
y resiliencia



- El cambio climático ha afectado directamente la indisponibilidad de suministro (sobre todo en la zona centro-sur del país)
- En 2024, en la **Región Metropolitana** el SAIDI aumentó **un 280%** respecto de 2023, mientras que en la **Región de Valparaíso** lo hizo en un **239%**.



Necesitamos nuevos indicadores para Tx

Métricas con un enfoque moderno y preventivo son clave para justificar **inversiones resilientes** en un contexto de **cambio climático** y mayor penetración de **energías renovables variables**.

Concepto	Definición	Ventajas principales
Área bajo la curva de resiliencia	Representa la magnitud total de la degradación del sistema en el tiempo	Captura el impacto acumulado del evento y la calidad de la recuperación
Tiempo de recuperación	Tiempo que tarda el sistema en volver a niveles normales tras el evento	Evalúa la capacidad y velocidad de respuesta del sistema
Energía no Suministrada (EnS) bajo contingencia	Total de carga que no puede ser abastecida durante y después del evento	Relaciona impacto físico con efecto económico o social
Profundidad del deterioro	Caída máxima del desempeño del sistema	Mide la vulnerabilidad estructural ante eventos severos
Capacidad de reconfiguración operativa	Habilidad del sistema para redistribuir flujos o topología tras fallas	Refleja adaptabilidad operativa en tiempo real, relevante para sistemas flexibles
Resiliencia ante eventos climáticos extremos ($N - k$)	Evaluación del sistema ante múltiples fallas o condiciones adversas	Permite simulación de eventos reales, incluyendo cambio climático, incendios, etc.
Índice compuesto de resiliencia	Combinación ponderada de varios de los anteriores	Permite ajuste a realidades locales, objetivos regulatorios o tipos de infraestructura



Algunas **medidas** que pueden ser adoptadas

Planificación	O&M	Innovación
Reforzar torres y líneas	Reforzamientos Identificar activos en pronto desuso (fin de vida útil)	Desarrollar tecnología para identificar componentes en riesgo o riesgosos <ul style="list-style-type: none">• Smart grids / Medidores inteligentes (en Dx)• SCADAS
Soterrar <ul style="list-style-type: none">• Es caro• Indentificar zonas de factibilidad	Realizar podas	Tecnologías de monitoreo y control remoto en tiempo real
Considerar resiliencia en obras nuevas	Robustecer entrenamientos de operadores	Análisis de Big Data (histórico)
		Creación de DSO, microrredes, etc.

Importante es la **cooperación**
(entre compañías y con el operador)





- Una nota sobre los entrenamientos de operadores
 - Simulacros son cruciales para desafíos tradicionales; lo mismo para eventos de resiliencia
 - Se requiere desarrollar destrezas tácticas y operacionales que hoy no tenemos en el sistema
 - Hay eventos reiterados que permitirían hacer ejercicios basados en escenarios reales
 - Simuladores tradicionales (OTS/DTS) deben ser adaptados para representar escenarios más reales

An illustration of a stormy landscape. In the foreground, there are several green trees of varying heights and shapes. A blue river or stream flows through the bottom of the scene. In the background, there are more trees and a grey sky with white rain falling. Two yellow lightning bolts are visible in the sky. A power line with several poles and wires runs across the middle of the scene.

(4)

Algunas propuestas

(1) Incorporar una definición explícita de **resiliencia** en el marco normativo.

(2) Permitir criterios de evaluación alternativos para promover obras por resiliencia, tales como análisis de vulnerabilidad climática o “*value at risk*”, efectos de eventos catastróficos y costos de recuperación, entre otros.

(3) Crear una categoría especial de “**proyectos estratégicos resilientes**” en la Planificación Energética.

(4) Facultar al Coordinador y a la CNE para considerar “**servicios complementarios resilientes**”.

(5) Realizar el “**análisis de resiliencia**” en la etapa de **prefactibilidad** en el proceso de planificación definido en el DS N°37/2019.





Gracias



transmisoras

Asociación de Transmisoras de Energía





Literatura

Año	Título	Autores	Objetivo / Tesis	Conclusión	DOI / URL
2024	Review of Power System Resilience Concept, Assessment, and Enhancement Measures	Lin J.-H. & Wu Y.-K.	Revisar conceptos, métricas y medidas para mejorar la resiliencia en sistemas eléctricos.	Propone un nuevo marco multitáctico para evaluar resiliencia y destaca la necesidad de indicadores robustos.	https://www.mdpi.com/2076-3417/14/4/1428
2024	Towards a Framework for Measurements of Power Systems Resiliency	Varios	Proponer un marco armonizado con indicadores clave vinculando fases de resiliencia y metodologías evaluativas.	Avanza en estandarización de métricas y orienta su aplicación práctica.	https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210670724003433
2023	Power Systems' Resilience: A Comprehensive Literature Review	Chivunga J.N., Lin Z. & Blanchard R.	Revisar exhaustivamente definiciones, métricas y marcos de resiliencia en sistemas de potencia.	No hay métrica universal; requiere enfoques adaptados por contexto.	https://www.mdpi.com/1996-1073/16/21/7256
2023	Advancements in Enhancing Resilience of Electrical Distribution Systems	Dwivedi D., Mitikiri S.B., etc.	Revisar sistemas de referencia y métricas modernas, así como IA, microrredes y trading P2P para mejorar resiliencia en distribución.	Nuevas tecnologías y precios dinámicos pueden mejorar resiliencia distributiva.	https://arxiv.org/abs/2311.07050
2022	A Systematic Review on Power System Resilience from the Perspective of Generation, Network, a Load	Wang C., Ju P., Wu F., Pan X. & Wang Z.	Analizar resiliencia desde perspectivas de generación, red y demanda; proponer métricas y recomendaciones.	Necesaria coordinación integral entre generación, red y consumidores.	https://wzy.ece.iastate.edu/CV/c205.pdf
2020	A Review of the Measures to Enhance Power Systems Resilience	Mahzarnia M., Moghaddam M.P., Baboli P.T. & Siano P.	Analizar medidas técnicas y políticas para incrementar la resiliencia en sistemas de energía.	Planificación integrada, tecnología y regulación son esenciales.	https://ieeexplore.ieee.org/document/8989307
2020	Modeling of Natural Disasters and Extreme Events in Power System Resilience Enhancement and Evaluation Methods	Bhusal N., Gautam M., Abdelmalak M. & Benidris M.	Evaluar modelos para eventos extremos como huracanes, terremotos y su impacto en sistemas eléctricos.	Identifica lagunas en técnicas existentes y propone modelos más exactos y eficientes.	https://arxiv.org/abs/2008.07560
2019	Microgrid Resilience: A holistic approach for assessing threats, identifying vulnerabilities, and designing corresponding mitigation strategies	Mishra S. et al.	Analizar microrredes como mecanismo resiliente evaluando vulnerabilidades y estrategias de mitigación.	Microrredes fortalecen resiliencia ante contingencias locales y globales.	https://arxiv.org/abs/1910.01234
2018	Definition and Quantification of Resilience (IEEE PES Task Force)	IEEE PES Industry Technical Support Task Force	Estandarizar definición, atributos y métricas de resiliencia para sistemas eléctricos.	Establece marco base para evaluación en organismos técnicos.	https://grouper.ieee.org/groups/transformers/subcommittees/distr/C57.167/F18-Definition&QuantificationOfResilience.pdf
2017	A Quantitative Method for Assessing Resilience of Interdependent Infrastructures	Nan C. & Sansavini G.	Presentar un método cuantitativo híbrido para medir resiliencia estructural en infraestructuras interdependientes.	El método es eficaz para diseño e ingeniería resiliente en sistemas eléctricos.	https://doi.org/10.1016/j.res.2016.08.013