

MEDIDAS Y TECNOLOGÍAS PARA PRESERVAR LA ESTABILIDAD DEL SISTEMA ELÉCTRICO NACIONAL EN EL CONTEXTO DE LA DESCARBONIZACIÓN

Síntesis para tomadores de decisión





Medidas y tecnologías para preservar la estabilidad del Sistema Eléctrico Nacional en el contexto de la descarbonización

- **Autores:**

Rodrigo Moreno, Claudia Rahmann, Matías Olivares,
Gabriel Covarrubias, Cristóbal Mujica

- **Agradecimientos:**

Agradecemos las valiosas discusiones y aportes de los revisores de este informe, incluyendo a Iván Saavedra (Consultora IESD), Aldo Arriagada y Samuel Jerardino (KAS Ingeniería), Sara Larraín y Gonzalo Melej (Fundación Chile Sustentable), así como a otros revisores anónimos.

- **Revisión de textos:**

Cristian Jara

- **Diagramación y Diseño de Portada:**

Emiliano Méndez

MEDIDAS Y TECNOLOGÍAS PARA PRESERVAR LA ESTABILIDAD DEL SISTEMA ELÉCTRICO NACIONAL EN EL CONTEXTO DE LA DESCARBONIZACIÓN

Síntesis para tomadores de decisión

14 de noviembre 2024

Autores:

Rodrigo Moreno • Claudia Rahmann • Matías Olivares
Gabriel Covarrubias • Cristóbal Mujica

Estudio preparado por:
ISCI para Chile Sustentable

Fotografía: Aerogeneradores / Fuente: Chile Sustentable.

ISCI INSTITUTO
SISTEMAS COMPLEJOS
DE INGENIERÍA

F U N D A C I Ó N
CHILE SUSTENTABLE
Propuesta ciudadana para el cambio

Contenido

1. Introducción	5
2. Resumen del estudio	6
2.1 Problemas de robustez y soluciones tecnológicas	6
2.2 Experiencia internacional.....	7
2.3 Estudios de requerimientos técnicos para la estabilidad y seguridad del SEN.....	7
2.4 Normas técnicas a nivel nacional e internacional.....	8
2.5 Proceso de licitación para proveer servicios complementarios de control de tensión.....	9
2.6 Portafolio óptimo de inversiones.....	10
3. Conclusiones y recomendaciones	12
3.1 Conclusiones	12
3.2 Recomendaciones	14
4. Referencias	17

1. INTRODUCCIÓN

La transición energética hacia sistemas eléctricos sustentables y resilientes es un imperativo global para enfrentar el cambio climático. En ese contexto, sumado a la búsqueda por alcanzar las metas climáticas de Chile incluidas en su NDC y el mandato establecido por la Ley Marco de Cambio Climático, el Ministerio de Energía de Chile ha establecido como metas la carbono-neutralidad en la generación eléctrica para el año 2050 y alcanzar un 80% de participación de energías renovables al 2030 [1]. Estas metas implican acelerar el proceso de descarbonización de la matriz eléctrica mediante el reemplazo masivo de generación convencional por energías renovables variables (ERV), lo que plantea desafíos importantes, especialmente en términos de la operación segura y confiable del Sistema Eléctrico Nacional (SEN). Estos desafíos se derivan principalmente de los bajos niveles de inercia y de corrientes de cortocircuito que puede presentar un Sistema Eléctrico de Potencia (SEP) con alta penetración de ERV, resultando que la red pueda ser más vulnerable frente a contingencias.

En este escenario, la transición hacia un sistema eléctrico sustentable, resiliente y sin combustibles fósiles exige la adopción de nuevos paradigmas tecnológicos y de operación. Es imperativo explorar y desarrollar estrategias innovadoras para robustecer la red, con el objetivo de asegurar una operación segura y estable del SEN, bajo escenarios de alta penetración de ERV. La integración de tecnologías emergentes desempeña un rol clave en este proceso, al proporcionar soluciones que mejoran la robustez y estabilidad del sistema frente a contingencias que podrían comprometer la seguridad del suministro eléctrico. En esa línea, el Coordinador Eléctrico Nacional (CEN) ha encargado diferentes estudios técnicos para enfrentar los desafíos asociados a la transición energética [2], [3], [4], [5], [6]. A partir de ellos, se han identificado medidas necesarias para asegurar la seguridad y calidad de servicio eléctrico en el SEN. Para materializar estas medidas, entre los años 2023 y 2024, el CEN llevó a cabo una licitación pública para incrementar los niveles de cortocircuito en cuatro barras de la zona norte del país, cuya puesta en servicio está planificada para fines del 2026.

En el marco de los desafíos planteados por la transición energética y con la intención de contribuir al debate público para acelerar la acción climática e inserción de energías renovables; la Fundación Chile Sustentable encargó al Instituto Sistemas Complejos de Ingeniería (ISCI) elaborar el estudio **“Medidas y tecnologías para preservar la estabilidad del Sistema Eléctrico Nacional en el contexto de la descarbonización”**. Este estudio analiza tanto la experiencia nacional como internacional, revisando estudios, normativas y tecnologías que pueden habilitar un proceso de transición energética adecuado. Además, se realiza un análisis del proceso de licitación del SEN antes mencionado. A partir de estas consideraciones, el objetivo de este resumen es presentar las principales conclusiones y recomendaciones derivadas del estudio, con el fin de proporcionar insumos útiles a las instituciones responsables de la planificación, operación y regulación del SEN. Para ello, en este documento síntesis se incluye la información de aquellos capítulos del estudio que aportan al alcance y las conclusiones del mismo; y se estructura de la siguiente manera: el capítulo 1 presenta el contexto y objetivos del estudio; el capítulo 2 ofrece un resumen del estudio, y el capítulo 3 recoge las principales conclusiones y recomendaciones para garantizar una operación segura y estable durante la transición energética.

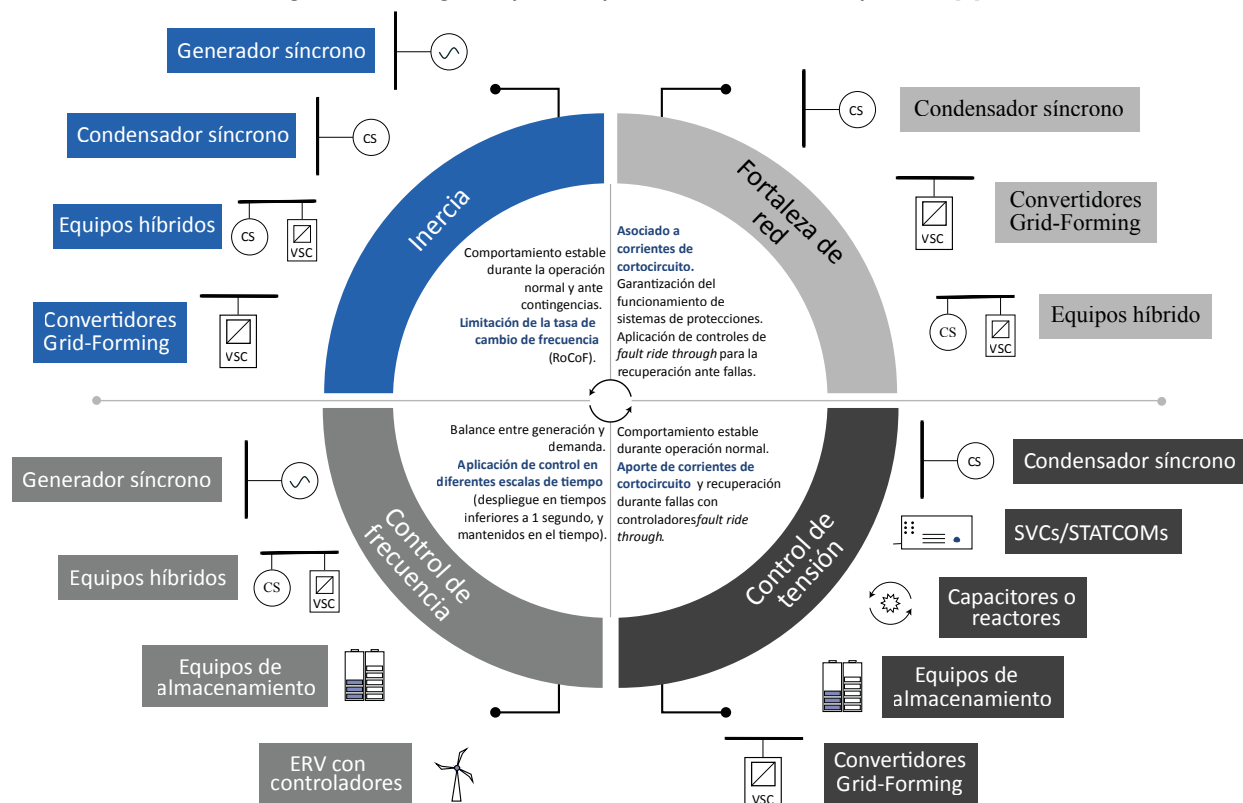
2. RESUMEN DEL ESTUDIO

2.1. Problemas de robustez y soluciones tecnológicas

La alta penetración de ERV introduce desafíos importantes debido a su naturaleza intermitente y no sincrónica, tales como la reducción de robustez, producto de disminuciones de inercia sistémica y de niveles de cortocircuito. Estas características aumentan la vulnerabilidad del sistema a fluctuaciones y contingencias, potencialmente comprometiendo la seguridad y la estabilidad del suministro eléctrico. Por tanto, es crucial desarrollar e implementar estrategias y tecnologías que permitan mantener una operación segura y estable del sistema eléctrico en el nuevo paradigma de carbono neutralidad.

El estudio elaborado por el ISCI evalúa una gama de tecnologías destinadas a reforzar la robustez de la red eléctrica. Entre estas tecnologías se destacan los condensadores sincrónicos (CS), los sistemas de almacenamiento de energía, equipos FACTS (*Flexible Alternating Current Transmission Systems*), convertidores electrónicos innovadores (denominados *grid forming* o formadores de red), entre otros. Estas soluciones tecnológicas ofrecen capacidades cruciales para enfrentar los desafíos asociados a la integración de ERV, permitiendo garantizar la estabilidad y seguridad del sistema eléctrico. En la Figura 1 se muestran las tecnologías revisadas.

Figura 1: Tecnologías disponibles para fortalecer la red, adaptado de [7].



2.2. Experiencia internacional

Se revisó la experiencia internacional en la implementación de tecnologías para fortalecer sistemas eléctricos con alta penetración de ERV. Países como Estados Unidos, Alemania, y Australia presentan casos de estudio donde se han adoptado soluciones innovadoras para aumentar la robustez de sus redes eléctricas, demostrando la viabilidad y la efectividad de diversas tecnologías (tanto tradicionales como innovadoras) en entornos operativos reales. A partir de esa revisión, se observó que la tecnología más utilizada es la de los CS, ampliamente probada e implementada a nivel comercial. No obstante, también se destacan soluciones basadas en equipos FACTS, como *static VAR compensator* (SVC) o *static synchronous compensator* (STATCOM), que han demostrado su efectividad para mejorar la robustez de la red.

Adicionalmente, en los últimos años, se han implementado y se están implementando convertidores en modo de control *grid forming* (GFM) en algunos países:

- i. **Australia:** El National Electricity Market (NEM) cuenta con 380 MW / 576,5 MWh de BESS GFM en operación, y 150 MW / 300 MWh en construcción. Además, se espera la inversión en ocho nuevas BESS GFM (2,0 GW / 4,2 GWh), cuya entrada en operación está prevista entre 2024 y 2026 [8].
- ii. **Estados Unidos:** El Departamento de Energía (DOE) está promoviendo la construcción de dos proyectos piloto de GFM [9]. Adicionalmente, se han implementado convertidores GFM en los sistemas aislados de Hawái [10].
- iii. **Escocia:** La empresa Amp Energy está desarrollando un proyecto que contempla la construcción de dos BESS GFM de 400 MW (800 MWh) [11].

2.3. Estudios de requerimientos técnicos para la estabilidad y seguridad del SEN

Durante los años 2021 y 2022, el CEN encargó a DlgSILENT GmbH dos estudios orientados a la definición de requerimientos para garantizar la operación segura y estable del SEN a mediano y largo plazo [2], [3], [4], [5], [6]. Cada estudio se subdivide en actividades que abordan diferentes temas, los cuales se reportan en informes parciales. A continuación, se enlistan las conclusiones más importantes de estos informes:

- En los escenarios estudiados, la frecuencia del SEN presenta un comportamiento adecuado frente a contingencias. Por lo tanto, no se requieren restricciones de inercia por área, ni un mayor despliegue de reservas para control primario de frecuencia.
- Considerando la infraestructura prevista para el SEN en el horizonte de estudio, no será posible aprovechar al máximo las ERV, a menos que se tomen medidas para mejorar la robustez de la red.
- Se requiere actualizar la Norma Técnica, para cuantificar de mejor manera la fortaleza de red en escenarios de alta penetración de ERV. En los estudios se recomienda el indicador ESCR (*Effective Short-Circuit Ratio*).
- En escenarios de demanda alta de día, es posible aumentar la fortaleza de la red mediante la incorporación de CS.

- En escenarios de demanda baja de noche, se propone utilizar medidas operacionales para complementar a los CS en la tarea de aumentar la fortaleza de la red. El objetivo de esto es evitar el sobredimensionamiento de CS, que pudieran elevar demasiado los costos de inversión asociados.
- Los convertidores GFM representan una alternativa factible al uso de CS. Sin embargo, se pone en duda la factibilidad de implementarlo en el horizonte 2025. Esto, debido a que su desarrollo comercial es aún incipiente y a que se requeriría una capacidad instalada mayor a la requerida para los CS.
- La reconversión de centrales existentes para operar como CS es una opción complementaria, pero insuficiente por sí sola para garantizar un nivel de fortaleza adecuado. La razón principal de esto es que sus lugares de emplazamiento suelen ser lejanos a las ubicaciones óptimas, según los estudios.
- Un aumento en el número de generadores sincrónicos (GS) despachados reduce significativamente los requisitos de compensación. Además, modificar el valor mínimo de ESCR permitido de 1,5 a 1,3 también disminuye los requisitos de compensación.

El resumen anterior proporciona una visión integrada de las medidas necesarias para asegurar la estabilidad y seguridad en el suministro eléctrico en Chile, destacando la importancia de actualizar normativas y adoptar tecnologías adecuadas conforme a las demandas actuales y futuras del sistema eléctrico nacional.

2.4. Normas técnicas a nivel nacional e internacional

Se analizan las normas técnicas nacionales e internacionales que regulan los procesos de planificación de la expansión y operación de la red, particularmente con respecto a los requisitos necesarios para garantizar su seguridad y estabilidad. De un análisis comparativo, se destaca que todas las normativas requieren que se mantenga la estabilidad de sus sistemas eléctricos, tanto en condiciones normales como frente a un conjunto de contingencias relacionadas con eventos creíbles. Esto se puede garantizar mediante una serie de mecanismos que incluyen la definición de servicios complementarios, definición de estándares sobre indicadores o métricas, y acciones mandatadas de planificación. También se observa que, en el contexto actual de descarbonización, las regulaciones buscan un nivel de especificidad cada vez mayor en la definición de servicios, criterios y métricas de seguridad, en la medida que los actuales no sean suficientes para garantizar la estabilidad del sistema.

Si bien todas las normas buscan garantizar la estabilidad del sistema mediante un portafolio eficiente de tecnologías, incentivadas en parte por la existencia de mercados de servicios complementarios, se reconoce que, dependiendo del diseño de los servicios e indicadores de robustez, como la inercia y el nivel de cortocircuito, esto podría presentar un sesgo a favor de ciertas tecnologías que contribuyen más directamente a dichos servicios y/o métricas. Por ejemplo, operadores como el australiano, que trabajan con métricas estáticas de robustez, están considerando mejorar el reconocimiento de las tecnologías que pueden aportar a la estabilidad del sistema, particularmente tecnologías avanzadas de control en convertidores GFM, cuyo aporte a métricas estáticas no está claramente definido, aunque pueden contribuir a la estabilidad del sistema.

Un aprendizaje clave de esta sección es que, cuando la regulación es excesivamente específica en los requerimientos de servicios y métricas –habitualmente alineados con el paradigma clásico de sistemas dominados por máquinas sincrónicas–, puede discriminar de forma injustificada contra tecnologías alternativas que, aunque empleen soluciones distintas a las convencionales, podrían resultar más eficientes para estabilizar la red. Este aprendizaje es clave para la elaboración de una futura regulación en esta materia.

2.5. Proceso de licitación para proveer servicios complementarios de control de tensión

Tal como se mencionó en la introducción, entre los años 2023 y 2024 el CEN llevó a cabo un proceso de licitación para implementar CS en el SEN, con el objetivo de mejorar su robustez en escenarios con alta penetración de ERV. En relación con este proceso, el estudio del ISCI realizó un análisis exhaustivo de dicha licitación, formulando recomendaciones y críticas constructivas con el objeto de aportar mejoras para futuros procesos de decisión sobre el requerimiento de estos servicios complementarios. El análisis aborda los siguientes aspectos:

- **Tecnología seleccionada:** la licitación sólo permite la instalación de CS como solución a los problemas de robustez. Sin embargo, existen otras tecnologías que podrían contribuir para el mismo objetivo. Por lo tanto, se discute la falta de apertura de la licitación para ofrecer soluciones distintas a las impuestas y/o la falta de mecanismos complementarios que permitan ir introduciendo soluciones alternativas.
- **Factores de efectividad:** el aporte en potencia de cortocircuito de cada oferta se calcula mediante los “factores de efectividad”. Estos factores corresponden a una simplificación, cuya precisión puede verse comprometida cuando los proyectos ofertados se encuentran cercanos unos de otros.
- **Mecanismo de adjudicación parcial:** se discute este mecanismo, ya que, puede ser una práctica que genera arbitrariedades en la selección de ofertas y que detone costos mayores para la red en el largo plazo. Además, se plantea que las adjudicaciones parciales son un indicador claro de falta de competencia.
- **Costos de energía:** se discute el hecho de que la proyección de costos realizada (y, por lo tanto, las diferencias de costos marginales entre las barras dentro de una zona determinada) presenta un alto nivel de incertidumbre, por lo que podría no ser la mejor forma para discriminar ciertos proyectos sobre otros.
- **Restricciones de tamaño, costos unitarios y combinaciones de proyectos:** la restricción de potencia mínima para los proyectos reduce el nivel de competencia, ya que establece barreras de entrada para empresas de menor tamaño que podrían participar con proyectos más pequeños. Esto debiera estar adecuadamente justificado. Además, la aplicación de límites sobre los costos unitarios de las ofertas puede eliminar la formación de portafolios eficientes que contienen equipos de menor tamaño, los que tienden, unitariamente, a ser menos económicos.

2.6. Portafolio óptimo de inversiones

Se presentan diversas alternativas de portafolios para garantizar la estabilidad del Sistema Eléctrico Nacional (SEN) al año 2025, las cuales se basan en distintas tecnologías. Sin embargo, la comparación en profundidad de este estudio se centra en dos portafolios: la solución estándar propuesta por DigSILENT GmbH y una solución híbrida (es decir, compuesta por más de una tecnología) desarrollada por ISCI. El primero contempla la instalación de CS, mientras que el segundo, combina convertidores GFM con CS reconvertidos. Es importante señalar que esta comparación incluye tanto aspectos técnicos como económicos. En las Tabla 1 y Tabla 2 se muestra la composición de cada portafolio.

Tabla 1: Portafolio estándar

SUBESTACIÓN	TECNOLOGÍA	TENSIÓN [KV]	CAPACIDAD [MVA]	INERCIA [GVAS]
Lagunas	CS	220	1x300	0,6
Kimal	CS	220	2x300	1,2
Maitencillo	CS	220	1x300	0,6
Zaldivar	CS	220	1x100	0,2
Domeyko	CS	220	1x100	0,2
Total			1400	2,8

Tabla 2: Portafolio híbrido

SUBESTACIÓN	TECNOLOGÍA	TENSIÓN [KV]	CAPACIDAD [MVA]	INERCIA [GVAS]
Encuentro	GFM	220	300	1,3
Lagunas	GFM	220	700	3,1
Los Changos	GFM	220	600	2,6
Parinas	GFM	220	260	1,1
TEN GIS	CS	220	442	2,0
TEN GIS	CS	220	185	0,9
Total			2.487	11,1

En primer lugar, se realiza el análisis dinámico de ambos portafolios, del cual se observa que ambos son efectivos para asegurar la estabilidad del SEN. No obstante, cada portafolio presenta un comportamiento particular, asociado al tipo de tecnología involucrada en cada caso. Las diferencias en el desempeño dinámico de cada portafolio, se presenta en la Figura 2 y Figura 3. Al comparar ambas figuras, se observa que la solución que incluye convertidores GFM (Figura 3) tiende a mostrar caídas de tensión menos pronunciadas y sobrepasos levemente mayores. Sin embargo, la mayor diferencia se encuentra en las oscilaciones post contingencia: mientras que en la Figura 2 (que incluye solo CS) las tensiones en las barras cercanas a la falla tardan varios segundos en llegar a régimen permanente, en la Figura 3 (que incluye GFM y CS) todas las tensiones lo hacen rápidamente una vez despejada la falla. Este comportamiento se debe a que la dinámica de los convertidores GFM es considerablemente más rápida que la de los CS, lo cual muestra una ventaja de los convertidores GFM por sobre los CS, ya que, gracias a su respuesta rápida, pueden contribuir de mejor manera a mantener la estabilidad de tensión en condiciones operativas desafiantes.

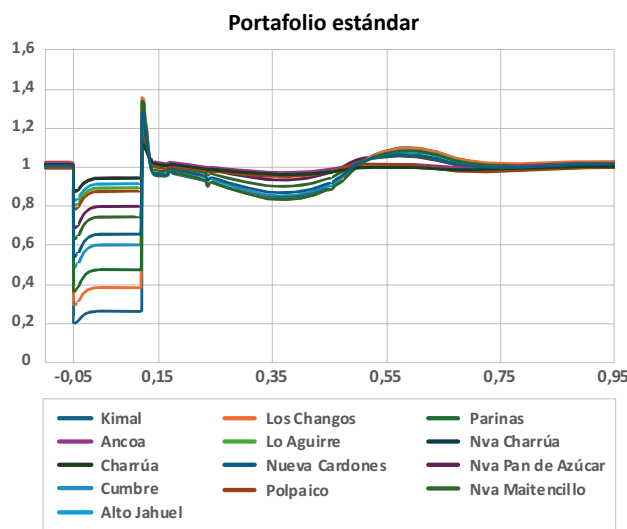


Figura 2: Respuesta de las tensiones del SEN, frente a una falla simple en el doble circuito Kimal – Encuentro 220 kV, operando con el portafolio basado en CS propuesto por DigSILENT.

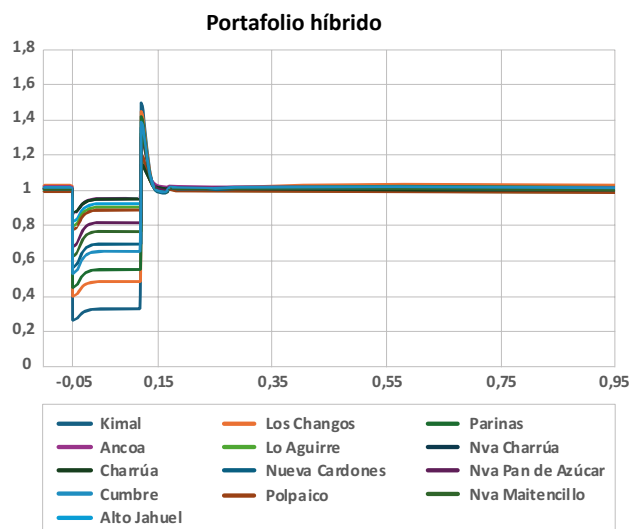


Figura 3: Respuesta de las tensiones del SEN, frente a una falla simple en el doble circuito Kimal – Encuentro 220 kV, operando con el portafolio híbrido propuesto por ISCI.

Una vez realizado el análisis dinámico, se realiza un análisis económico sobre los costos de inversión asociados a cada uno. En la Tabla 3 se presenta un resumen de la comparación económica realizada en el estudio.

Tabla 3: Comparación económica de los portafolios principales.

TECNOLOGÍA	COSTO DE INVERSIÓN UNITARIO [MUSD/MVA]	PORTAFOLIO ESTÁNDAR		PORTAFOLIO HÍBRIDO	
		Δ CAPACIDAD INSTALADA [MVA]	COSTO DE INVERSIÓN [MUSD]	CAPACIDAD INSTALADA RECONVERTIDA [MVA]	COSTO DE INVERSIÓN [MUSD]
ERV-GFM	159	0	0	1.860	295.740
CS-nuevos	400	1.400	560.000	0	0
CS-reconvertidos	50	0	0	627	31.350
Total		1.400	560.000	2.487	327.090

De la Tabla 3 se observa que el portafolio estándar tiene un costo de inversión estimado de 560 [MMUSD], mientras que el portafolio híbrido tiene un costo de inversión estimado de 327,09 [MMUSD], lo que representa un ahorro estimado del 42%. En resumen, ambos portafolios garantizan la estabilidad del SEN bajo el escenario estudiado. No obstante, el portafolio híbrido ofrece menores costos de inversión, por lo que resulta ser la opción más eficiente para garantizar la estabilidad del SEN en el contexto de la descarbonización. Este análisis también destaca la importancia de aprovechar la infraestructura existente con un enfoque multipropósito, lo que permite obtener el máximo valor de los activos ya instalados, reducir la necesidad de inversión en nuevos activos y, en consecuencia, disminuir la tarifa al consumidor final.

3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En esta sección se presentan las conclusiones y recomendaciones generales para la política pública y la regulación del sector, orientadas a avanzar hacia la descarbonización del sector energético chileno. En primer lugar, se presenta un listado con las principales conclusiones de este documento:

3.1. Conclusiones

Problemas de robustez, soluciones tecnológicas y experiencia internacional

La penetración masiva de ERV genera desafíos importantes sobre la seguridad y estabilidad de los Sistemas Eléctricos de Potencia (SEP). Esto se debe a las diferencias técnicas entre las ERV y la generación convencional. Sin embargo, se observó que existe una amplia variedad de alternativas para enfrentar estos problemas, tales como: medidas operacionales, redespacho, incorporación de equipos especializados, entre otras. De hecho, se revisó la experiencia internacional, observando que varios operadores han tomado medidas eficaces al respecto. En conclusión, es posible adoptar medidas para habilitar la penetración masiva de ERV a los SEP, sin comprometer la estabilidad y seguridad de suministro.

Estudios de requerimientos técnicos para la estabilidad y seguridad del SEN

De los estudios realizados previamente sobre el SEN, se concluye que, considerando la infraestructura actual, no es posible operar de manera estable y segura aprovechando los máximos niveles de ERV previstos para el mediano y largo plazo en el SEN. Sin embargo, existen algunas alternativas que podrían contribuir a mejorar la robustez del SEN, de forma de permitir un mayor nivel de generación de ERV. Entre estas medidas se encuentra la implementación de condensadores sincrónicos, convertidores GFM y/o la adopción de medidas operacionales.

Normas técnicas a nivel nacional e internacional

De la revisión normativa, se observa que varios sistemas han tomado iniciativas para enfrentar los desafíos que propone la penetración de ERV. De los cuales, se concluye que es necesario adoptar mecanismos que permitan el robustecimiento de la red mediante un portafolio eficiente de tecnologías, más allá del uso de máquinas sincrónicas, y que no discrimine tecnologías que podrían ser más eficientes en la estabilización de la red, pero que utilizan soluciones diferentes a las convencionales.

Proceso de licitación para proveer servicios complementarios de control de tensión

Del análisis sobre el proceso de licitación, se observa que existen algunos aspectos de mejora que este estudio plantea en la sección respectiva. Los tópicos desarrollados son los siguientes: tecnología seleccionada, factores de efectividad, mecanismo de adjudicación parcial, costos de energía, restricciones de tamaño, costos unitarios y combinaciones de proyectos. En cuanto a la conclusión general, es posible mencionar que al mejorar el diseño de la licitación se podría obtener una adjudicación más eficiente, que finalmente decantaría en una disminución de costos para el cliente final.

Optimización del portafolio de inversiones

Al comparar el portafolio estándar basado en CS, con el portafolio híbrido basado en GFM y CS reconvertidos, se destacan las siguientes conclusiones:

Desempeño dinámico: Aunque ambos portafolios garantizan la estabilidad del SEN para el punto de operación y contingencias analizadas, los convertidores GFM ofrecen una respuesta más rápida que los CS. Esta velocidad de respuesta brinda a los convertidores GFM una ventaja sobre los CS, ya que permite contribuir de manera más efectiva a la estabilidad de tensión en condiciones operativas desafiantes.

Costos de inversión: La principal diferencia entre los portafolios radica en los costos de inversión. La solución estándar propuesta por DigSILENT, basada en CS, requiere una inversión de 560 [MMUSD] para alcanzar una capacidad instalada de 1.400 MVA. En contraste, el portafolio híbrido propuesto por ISCI implica un costo total de inversión de 327 [MMUSD] para una capacidad instalada de 2.487 MVA. Por lo tanto, el portafolio híbrido representa un ahorro del 42% en comparación con el portafolio estándar.

Solución óptima: Ambos portafolios son capaces de garantizar la estabilidad del SEN bajo el escenario estudiado. Sin embargo, el portafolio híbrido no solo asegura la estabilidad del SEN, sino que también ofrece una solución con menores costos de inversión. Esta eficiencia económica, junto con la capacidad demostrada de los convertidores GFM para operar de manera confiable en condiciones desafiantes, sugiere que una estrategia híbrida es la más adecuada para cumplir con los objetivos de estabilidad del SEN en el contexto de la descarbonización. Este análisis también destaca la importancia de aprovechar la infraestructura existente con un enfoque multipropósito, lo que permite obtener el máximo valor de los activos ya instalados, reducir la necesidad de inversión en nuevos activos y, en consecuencia, disminuir la tarifa al consumidor final.

Fotografía: Aerogeneradores / Fuente: Chile Sustentable.



3.2. Recomendaciones

A continuación, se proponen recomendaciones de cara a los desafíos impuestos por el proceso de transición energética que está experimentando el SEN. Estas recomendaciones se enfocan en fomentar la adopción de nuevas tecnologías que contribuyan a la seguridad y estabilidad del SEN, en un contexto de creciente penetración de ERV.

Fomento de un portafolio óptimo de tecnologías

Para lograr la estabilidad y robustez del SEN, es fundamental promover un portafolio diversificado de tecnologías que incluya tanto soluciones convencionales como innovadoras, capaces de ofrecer múltiples beneficios operativos y económicos. Además, este enfoque permitirá maximizar la eficiencia de la red, al incorporar tecnologías que potencialmente puedan cumplir con diversos servicios. Además, se requiere establecer mecanismos que faciliten la remuneración de infraestructura a través de varias fuentes de ingresos, permitiendo el *revenue stacking* y, en consecuencia, incentivando la inversión privada en tecnologías con un alto valor añadido para el sistema (como se desarrolla en el siguiente punto).

Señales de mercado para los inversionistas

La regulación debe proporcionar señales claras y consistentes a los inversionistas, que valoren la adopción de tecnologías capaces de ofrecer distintos servicios dentro del SEN. Un marco regulatorio que permita generar ingresos adicionales a través de diversos servicios (como inercia virtual, control de tensión, entre otros), contribuirá a consolidar un sistema eléctrico más estable y económico. Es recomendable que estos marcos se diseñen de manera que maximicen el retorno de inversión para las tecnologías con capacidad de ofrecer múltiples servicios, lo cual hará que las inversiones en infraestructura innovadora sean atractivas y viables a largo plazo.

Evaluación costo-beneficio de varios portafolios

En el contexto de la planificación de la red, se recomienda que los reguladores y operadores realicen una evaluación costo-beneficio de diversos portafolios de soluciones, que incluyan tanto tecnologías tradicionales como innovadoras. Este análisis debe basarse en una visión integral que cuantifique todos los beneficios potenciales de cada portafolio y contemple mecanismos de materialización de ingresos para los inversionistas. Además, se recomienda considerar un número mínimo de alternativas para evaluar, incluyendo al menos una opción con tecnologías innovadoras.

Inclusión de medidas operacionales y reconversiones

Además de las inversiones en infraestructura, es crucial que los portafolios de tecnologías incluyan medidas operacionales que permitan gestionar eficazmente la estabilidad de la red, disminuyendo o evitando la necesidad de inversión adicional. Estas medidas, que pueden activarse periódicamente o en situaciones excepcionales, ofrecen una alternativa rentable para enfrentar contingencias poco frecuentes sin requerir

grandes mejoras de infraestructura. Integrar estas prácticas en el análisis costo-beneficio permite adoptar soluciones flexibles y escalonadas, ajustadas a las necesidades operativas del SEN tanto a corto como a largo plazo. En la misma línea, se deben considerar la posibilidad de reconversiones de forma de aprovechar eficientemente la infraestructura instalada, entrante o saliente, por ejemplo, reconvirtiendo plantas térmicas a condensadores sincrónicos, o electrónica *grid following* (GFL) a GFM.

Fomento de nuevas tecnologías mediante proyectos piloto

Para incentivar la adopción de tecnologías emergentes en el SEN, se recomienda una política proactiva en investigación y desarrollo (I+D) que facilite la realización de proyectos piloto en contextos controlados. Estos proyectos ofrecen la oportunidad de probar la efectividad y aplicabilidad de nuevas tecnologías antes de su despliegue masivo, lo que permite realizar ajustes técnicos y regulatorios de manera anticipada. Además, el fomento de estos pilotos contribuye al desarrollo de conocimiento local y a la formación de capacidades nacionales para manejar y adoptar nuevas tecnologías.

Fotografía: Paneles solares / Fuente: Chile Sustentable.



Licitaciones abiertas y definición clara del producto requerido

Las bases de licitación para servicios complementarios deben ser suficientemente flexibles para permitir una mayor variedad de soluciones. Las licitaciones que definen el producto requerido en términos de desempeño, sin limitarse a tecnologías específicas ni a métricas inadecuadas, facilitarán la participación de soluciones innovadoras. Una experiencia positiva en esta línea se puede observar en Australia, donde se están modificando las reglas de servicios de inercia, para habilitar la participación de otras tecnologías, tales como respuesta rápida en frecuencia o inercia sintética [12]. Otro caso interesante es el Reino Unido, donde se ha desarrollado un “mercado de estabilidad” que permite la competencia entre distintos tipos de tecnologías [13]. Un mecanismo de licitación de este tipo permitirá que tanto tecnologías convencionales como emergentes participen en igualdad de condiciones, promoviendo un portafolio de soluciones tecnológicas adaptadas a los desafíos actuales del SEN. Además, se recomienda actualizar los indicadores de desempeño empleados en las licitaciones para reflejar adecuadamente las capacidades de las tecnologías avanzadas y no limitar su participación.

Diseño de licitaciones con enfoque en la competencia y objetivos de mínimo costo

El diseño de las licitaciones debe enfocarse en la selección del portafolio óptimo de ofertas bajo un esquema de mínimo costo, sujeto siempre a los criterios esenciales para la estabilidad de la red. Para ello, es fundamental emplear una metodología de optimización que evalúe cada oferta, no solo en términos de costo de inversión y operación, sino también en función de su capacidad para asegurar la estabilidad, posiblemente utilizando indicadores adecuados que aseguren niveles consistentes de robustez del SEN ante escenarios de alta penetración de energías renovables. Este enfoque facilitará la creación de portafolios de inversión eficientes, reduciendo los costos globales y garantizando la estabilidad del sistema a largo plazo. Finalmente, se deben estudiar en mayor profundidad las adjudicaciones parciales en ausencia de niveles razonables de competencia, a fin de evitarlas, ya que puede generar arbitrariedades en la selección de ofertas y producir costos mayores para la red en el largo plazo.

4. REFERENCIAS

- [1] MEN, “Transición Energética de Chile Política Energética Nacional Actualización 2022”, Santiago Chile, 2022. [En línea]. Disponible en: https://energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/pen_2050_-_actualizado_marzo_2022_0.pdf
- [2] DlgSILENT GmbH, “Estudio de Requerimientos Mínimos de Seguridad y Calidad para el SEN – Informe Final Actividad 1 - Análisis de Estabilidad de la Frecuencia”, 2021, [En línea]. Disponible en: https://www.coordinador.cl/wp-content/uploads/2022/01/PF_1_Informe-Estabilidad-de-Frecuencia_nov2021.pdf
- [3] DlgSILENT GmbH, “Estudio de Requerimientos Mínimos de Seguridad y Calidad para el SEN – Informe Final Actividad 2 - Análisis de Estabilidad de la Tensión”, 2021, [En línea]. Disponible en: https://www.coordinador.cl/wp-content/uploads/2022/01/PF_2_Informe-Estabilidad-de-Tension_dic2021.pdf
- [4] DlgSILENT GmbH, “Estudio de Requerimientos Mínimos de Seguridad y Calidad para el SEN – Informe Final Actividad 3 – Inversores Formadores de Red”, 2021, [En línea]. Disponible en: https://www.coordinador.cl/wp-content/uploads/2022/01/PF_3_Informe-Inversores-Formadores-de-Red_dic2021.pdf
- [5] DlgSILENT GmbH, “Definición de Requerimientos para el Fortalecimiento de la Red en el Sistema Eléctrico Nacional en 2025: Informe Final Actividades 1 y 2”, 2022, [En línea]. Disponible en: https://www.coordinador.cl/wp-content/uploads/2022/09/P2088_CEN_Estudios-Fortaleza-de-Red-Actividad-1-2_R14-V06.pdf
- [6] DlgSILENT GmbH, “Definición de Requerimientos para el Fortalecimiento de la Red en el Sistema Eléctrico Nacional en 2025: Informe Final - Análisis Adicional”, 2022, [En línea]. Disponible en: https://www.coordinador.cl/wp-content/uploads/2022/09/P2088_CEN_Estudios-Fortaleza-de-Red-Analisis-Adicional_R02-V02.pdf
- [7] Hitachi ABB Power Grids, “Grid Forming Energy Storage: Provides Virtual Inertia, Interconnects Renewables and Unlocks Revenue”, 2020, [En línea]. Disponible en: <https://www.electranet.com.au/wp-content/uploads/2021/01/Grid-Forming-Energy-Storage-Webinar-ESCRI-SA-July-2020.pdf>
- [8] ESIG, “Australian Landscape of Grid-Forming Batteries”, 2023, [En línea]. Disponible en: <https://www.esig.energy/australian-landscape-of-grid-forming-batteries/>
- [9] EERE, “Solar and Wind Grid Services and Reliability Demonstration Funding Program”, 2022, [En línea]. Disponible en: <https://www.energy.gov/eere/solar/solar-and-wind-grid-services-and-reliability-demonstration-funding-program>

- [10] North American Electric Reliability Corporation, “White Paper: Grid Forming Functional Specifications for BPS-Connected Battery Energy Storage Systems”, 2023, [En línea]. Disponible en: https://www.nerc.com/comm/RSTC_Reliability_Guidelines/White_Paper_GFM_Functional_Specification.pdf
- [11] Amp Energy, “Amp Energy announces the largest battery storage facilities in Europe with two flagship 400 MW projects located in Scotland”, 2022, [En línea]. Disponible en: <https://www.amp.energy/news/amp-energy-announces-the-largest-battery-storage-facilities-in-europe-with-two-flagship-400-mw-projects-located-in-scotland>
- [12] Australian Energy Market Commission, “Efficient Provision of Inertia – Consultation Paper”, 2023, [En línea]. Disponible en: [https://www.aemc.gov.au/sites/default/files/2023-03/ERC0339 - Consultation Paper.pdf](https://www.aemc.gov.au/sites/default/files/2023-03/ERC0339_-_Consultation_Paper.pdf)
- [13] ESO, “Stability Pathfinder Phase 2: Expressions of Interest Final Assessment Methodology (v5)”, 2021, [En línea]. Disponible en: <https://www.neso.energy/document/197046/download>

MEDIDAS Y TECNOLOGÍAS PARA PRESERVAR LA ESTABILIDAD DEL SISTEMA ELÉCTRICO NACIONAL EN EL CONTEXTO DE LA DESCARBONIZACIÓN

Síntesis para tomadores de decisión



Fotografía: Aerogeneradores / Fuente: Chile Sustentable.

Estudio preparado por:
ISCI para Chile Sustentable