



↘

Análisis Fortaleza de Red 2032 y Medidas de Mitigación

PRELIMINAR

Abril 2025

→ DAVID ESTEBAN PERRONE

→ JORGE HERRERA

ESTUDIOSELECTRICOS 

Agenda



Contextualización

Análisis sistémicos (Avance)

- Proyección de la red
- Análisis de fortaleza

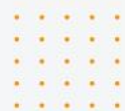
Reflexiones y pasos a seguir



Contextualización

Generalidades

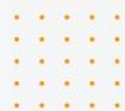
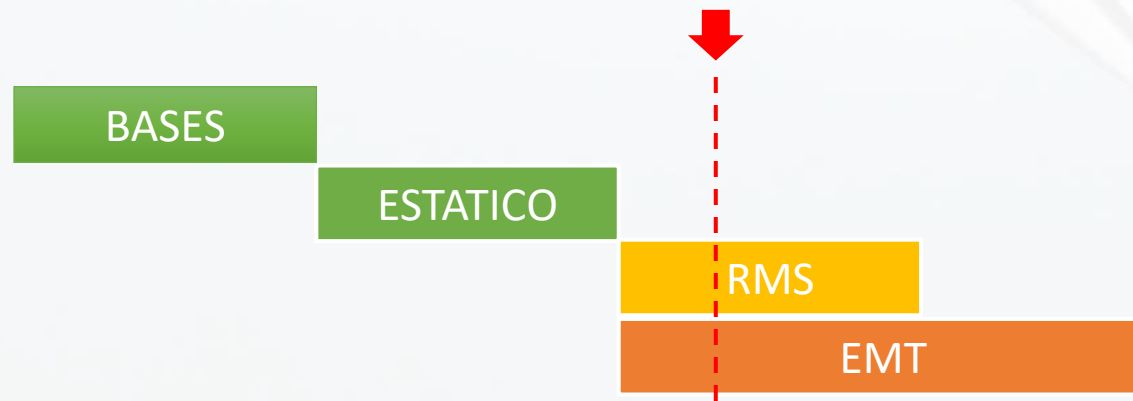
- Chile se encuentra actualmente en una **posición avanzada**, situándose a la vanguardia mundial en cuanto a los desafíos operacionales asociados a una baja participación de generación síncrona tradicional.
- En instancias anteriores, las mejoras en regulación chilena se apoyaron en la experiencia internacional. Hoy, el país se enfrenta a desafíos para los cuales aún no hay respuestas estandarizadas y **probadas** a nivel global y, por lo tanto, es clave **construir criterios propios** basados en análisis locales.
- Desde la concepción de los sistemas eléctricos de potencia, las fuentes de fortaleza —como la inercia y la potencia de cortocircuito— eran provistas de manera intrínseca por unidades síncronas convencionales. El reemplazo progresivo de estas por centrales basadas en tecnología con inversores (IBR) ha generado condiciones de **escasez** de dichas propiedades.
- En este contexto, se están llevando a cabo estudios sistémicos sobre la **operación futura** del SEN, combinando análisis generales con un enfoque particular en la tecnología **GFM** (Grid Forming).



Contextualización

Contexto del estudio en desarrollo

- Proyección en base a corridas económicas sin restricciones técnicas duras
- Análisis estáticos
- Análisis dinámicos RMS
- Análisis dinámicos EMT
- Se plantean cuatro hipótesis de trabajo:
 - Despacho de térmico forzado
 - Compensadores sincrónicos adicionales
 - Implementación de tecnología Grid-Forming



Agenda



Contextualización

Análisis sistémicos (Avance)

- Proyección de la red
- Análisis de fortaleza

Reflexiones y pasos a seguir








Análisis sistémicos

Proyección de la red – Escenario 2032

- Obras declaradas en construcción por la CNE
- Planes de Expansión de la Transmisión
- Obras de generación comprometidas en el Informe Técnico Definitivo del Precio de Nudo de Corto Plazo
- Obras particulares en Acceso Abierto
- Enlace HVDC
- Compensación sincrónica licitada

Punto de partida:

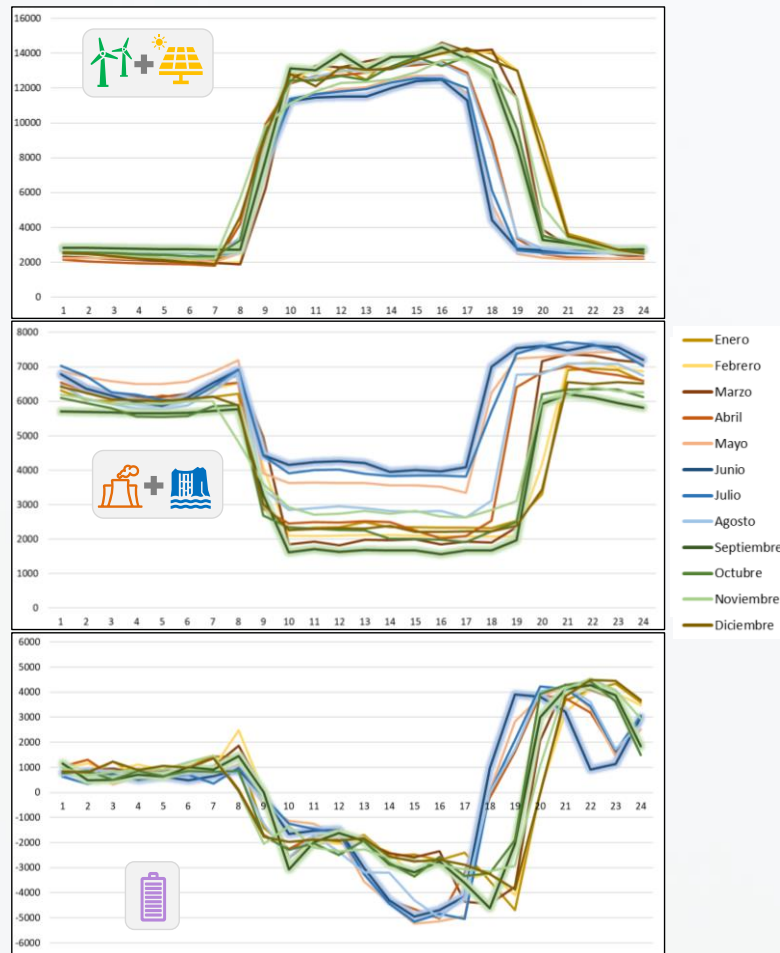
Corridas económicas sin restricciones técnicas específicas

Tecnología	Actual	Total futura
Eólica 	5461	6571
Solar Fotovoltaica 	7756	12106
BESS 	795	6212
Hidráulica 	7208	7344
Térmica ⁽¹⁾ 	14709	14959
Total	35929	47192

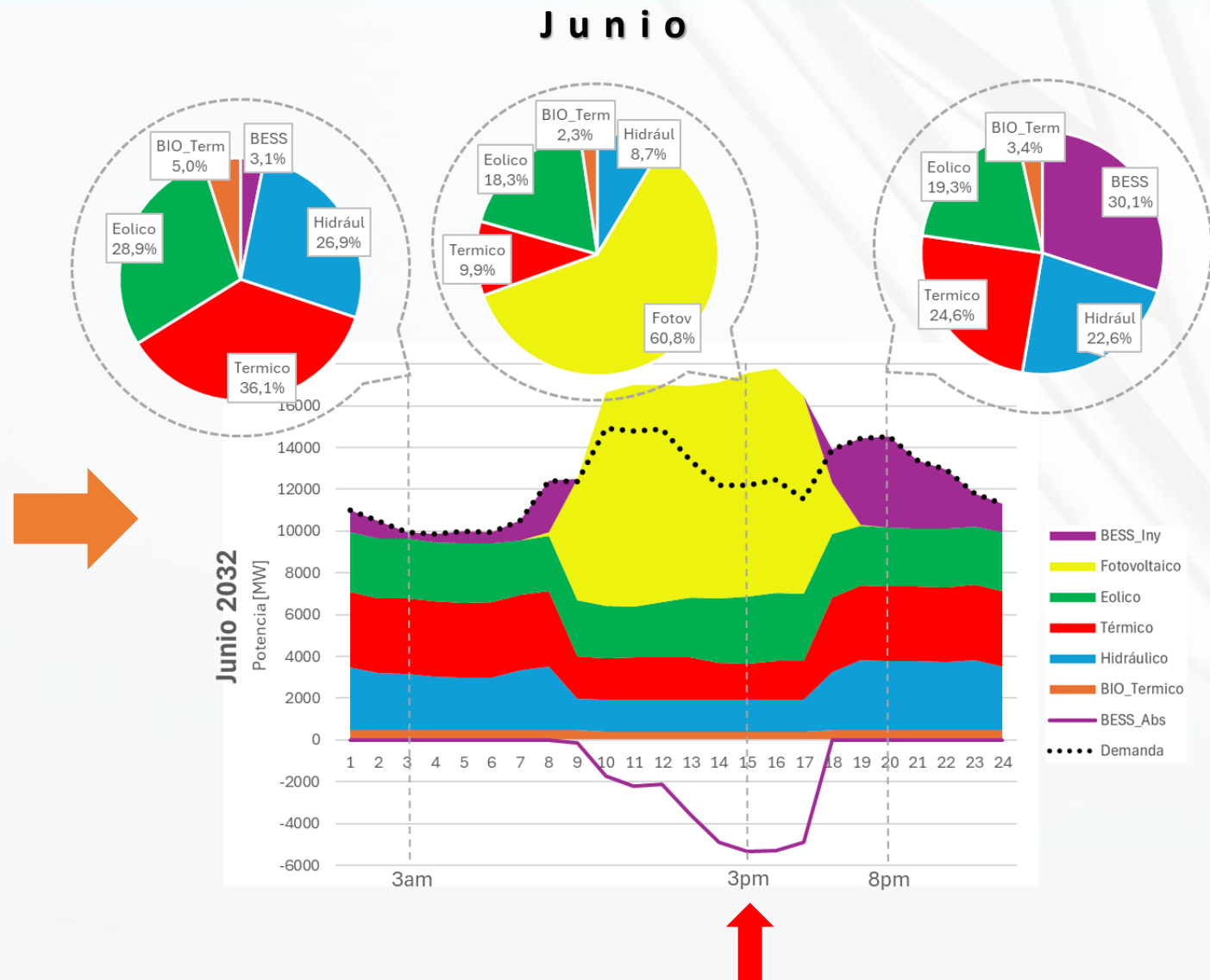
⁽¹⁾ Incluye no convencionales (biogas, biomasa, geotérmica, etc.).

Análisis sistémicos

Escenarios económicos

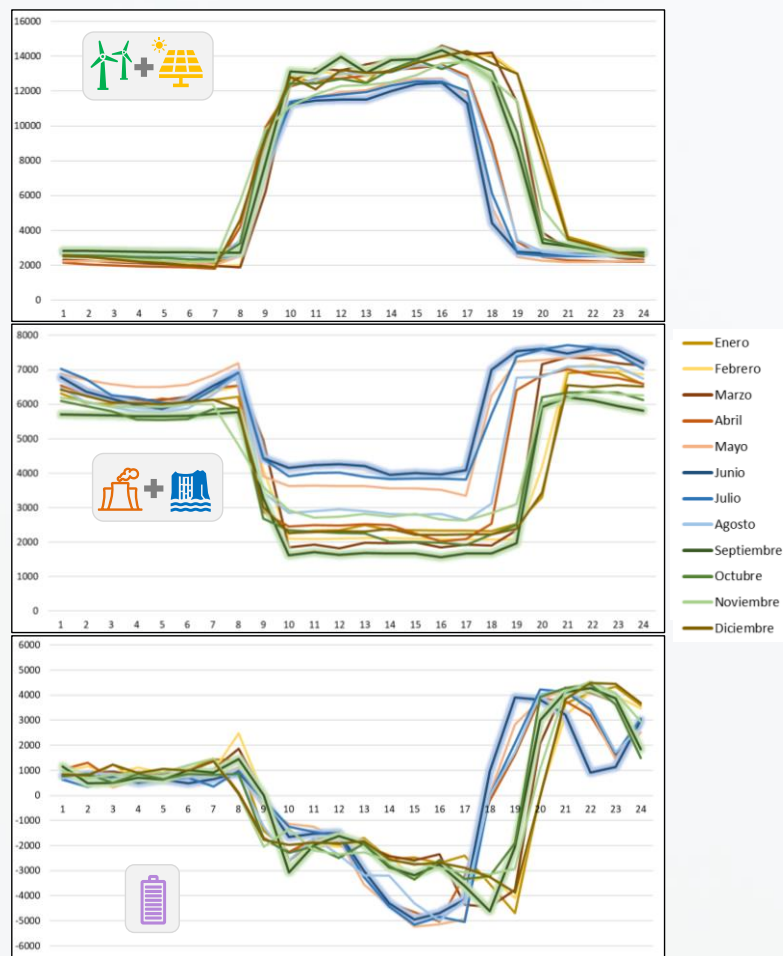


*Datos promedios horarios mensuales



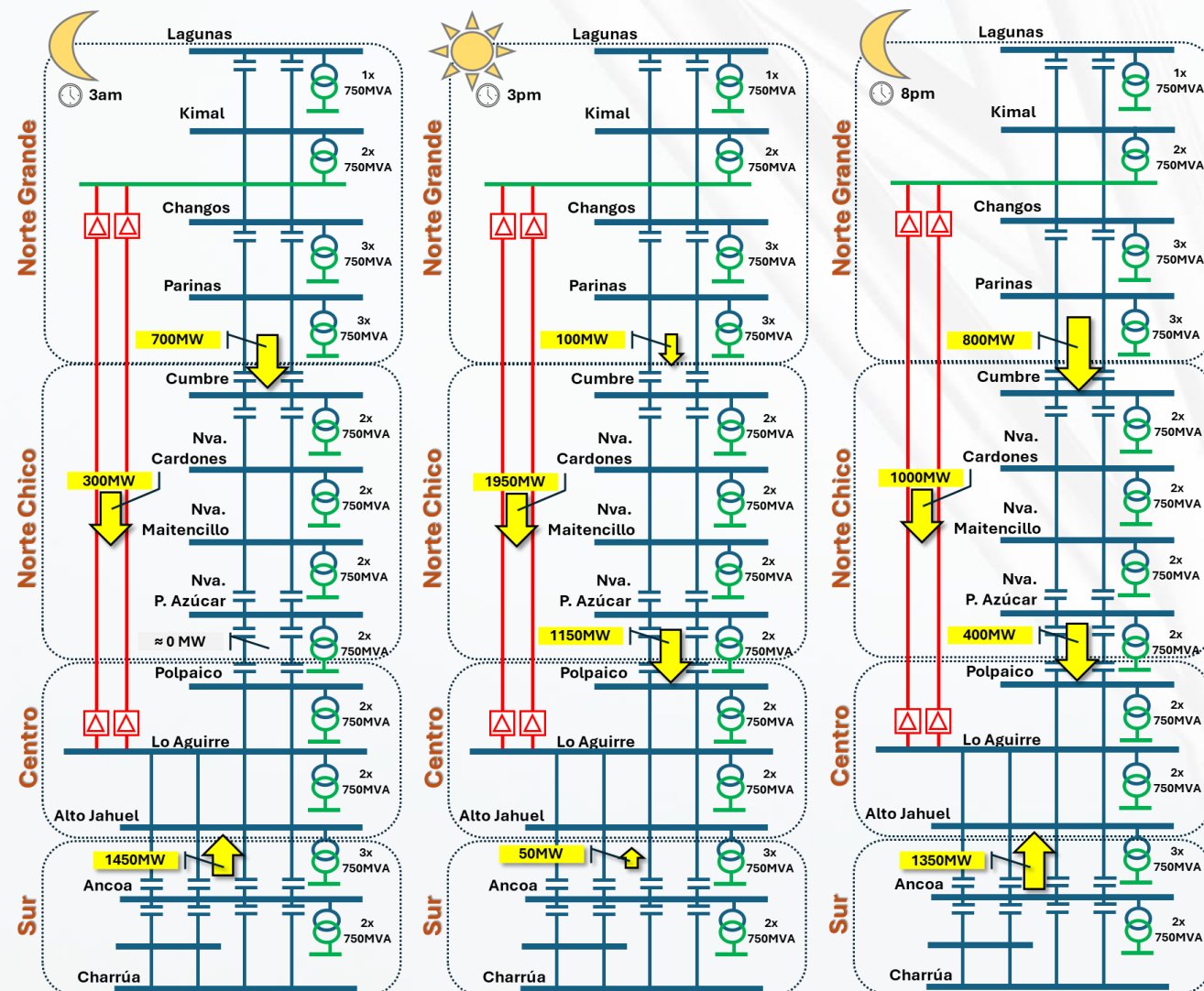
Análisis sistémicos

Escenarios económicos



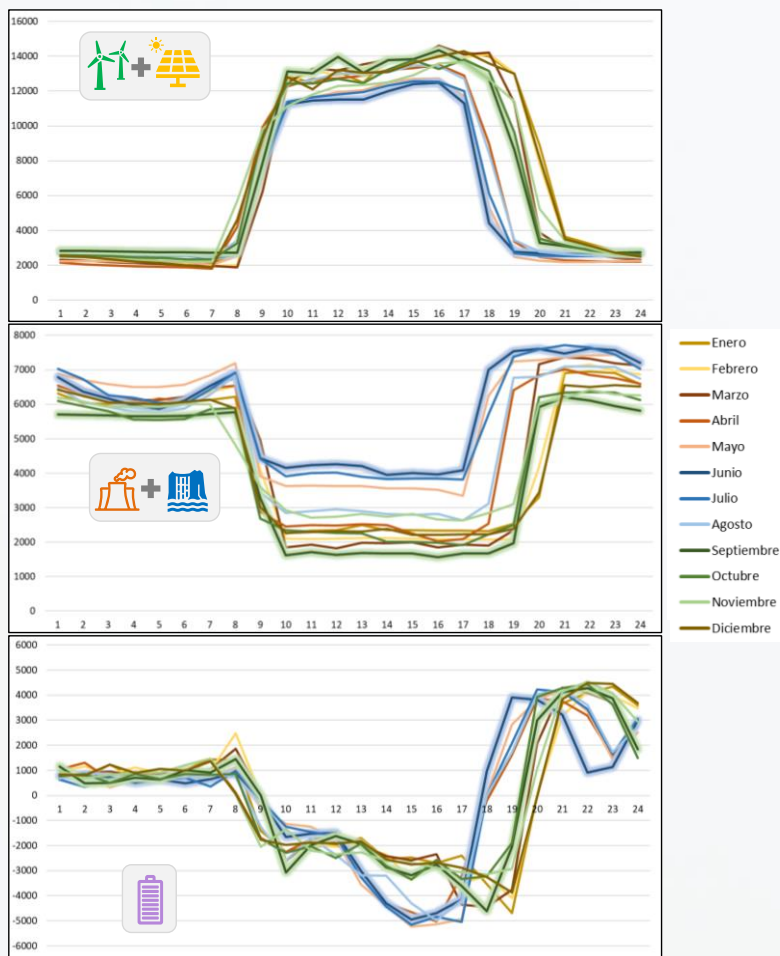
*Datos promedios horarios mensuales

Junio

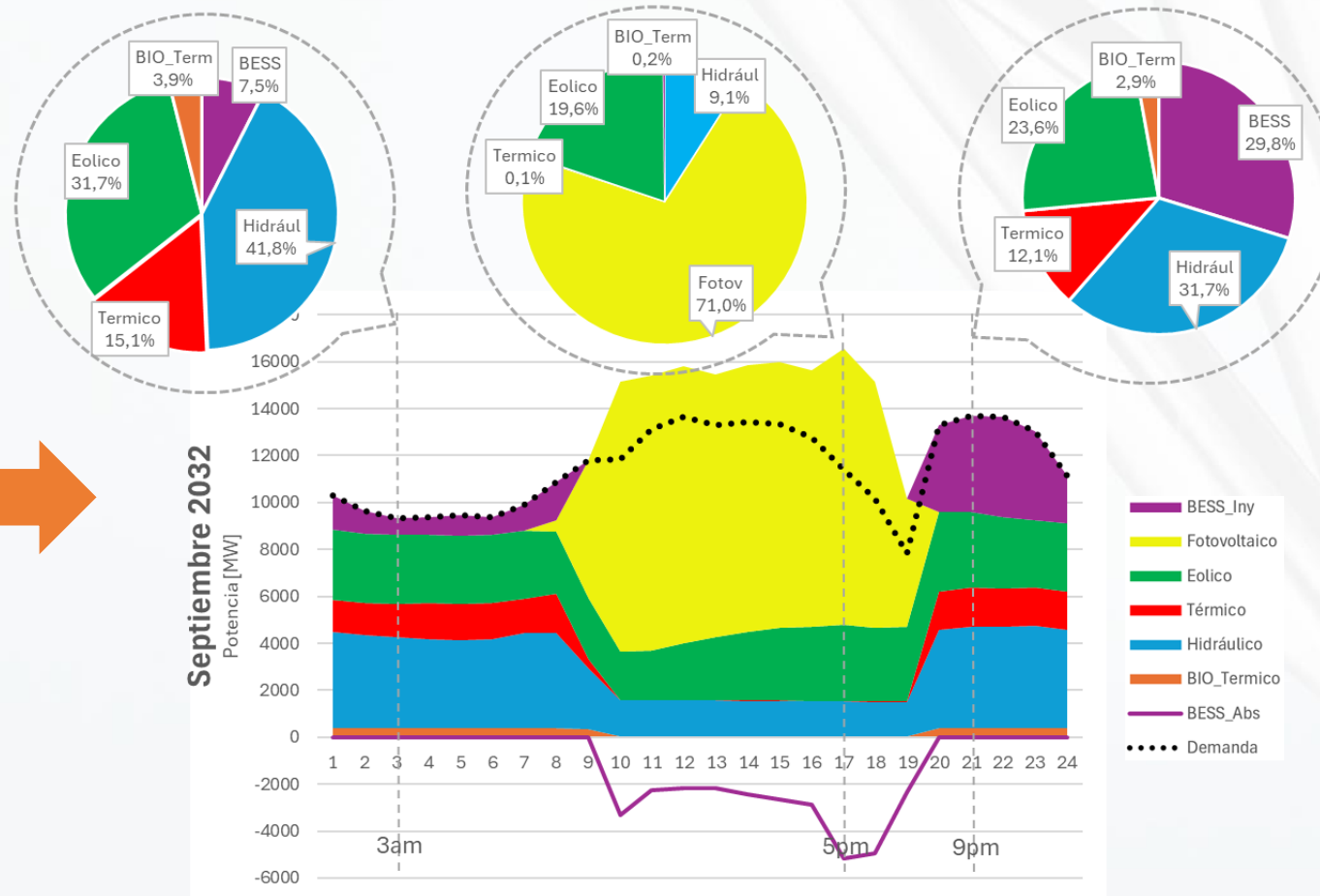


Análisis sistémicos

Escenarios económicos



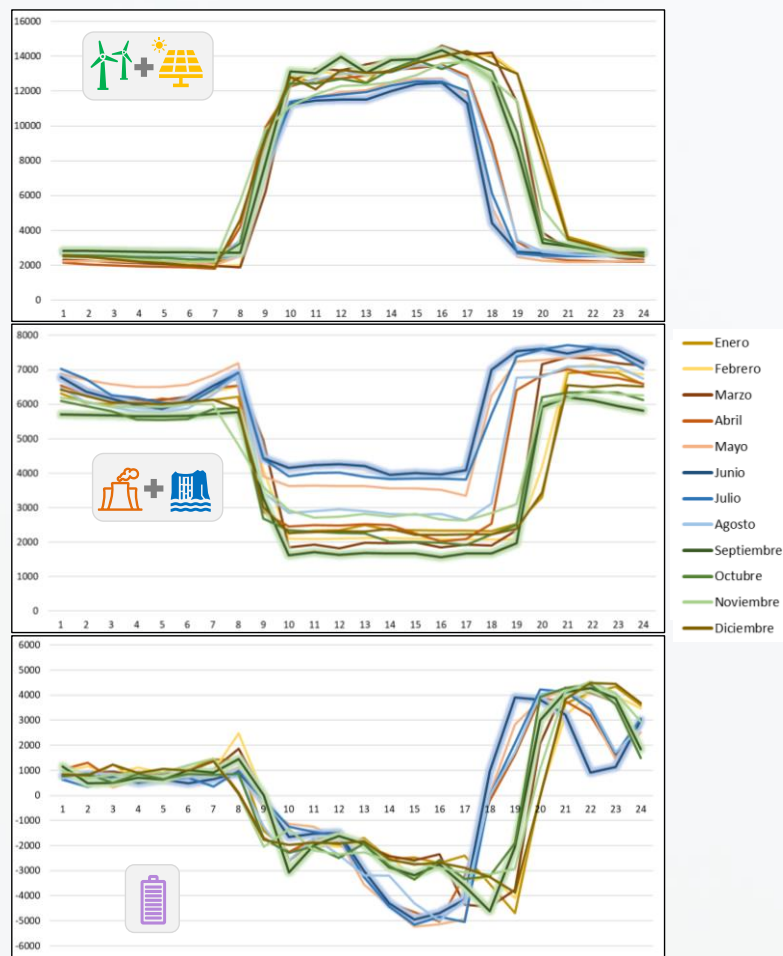
Septiembre



*Datos promedios horarios mensuales

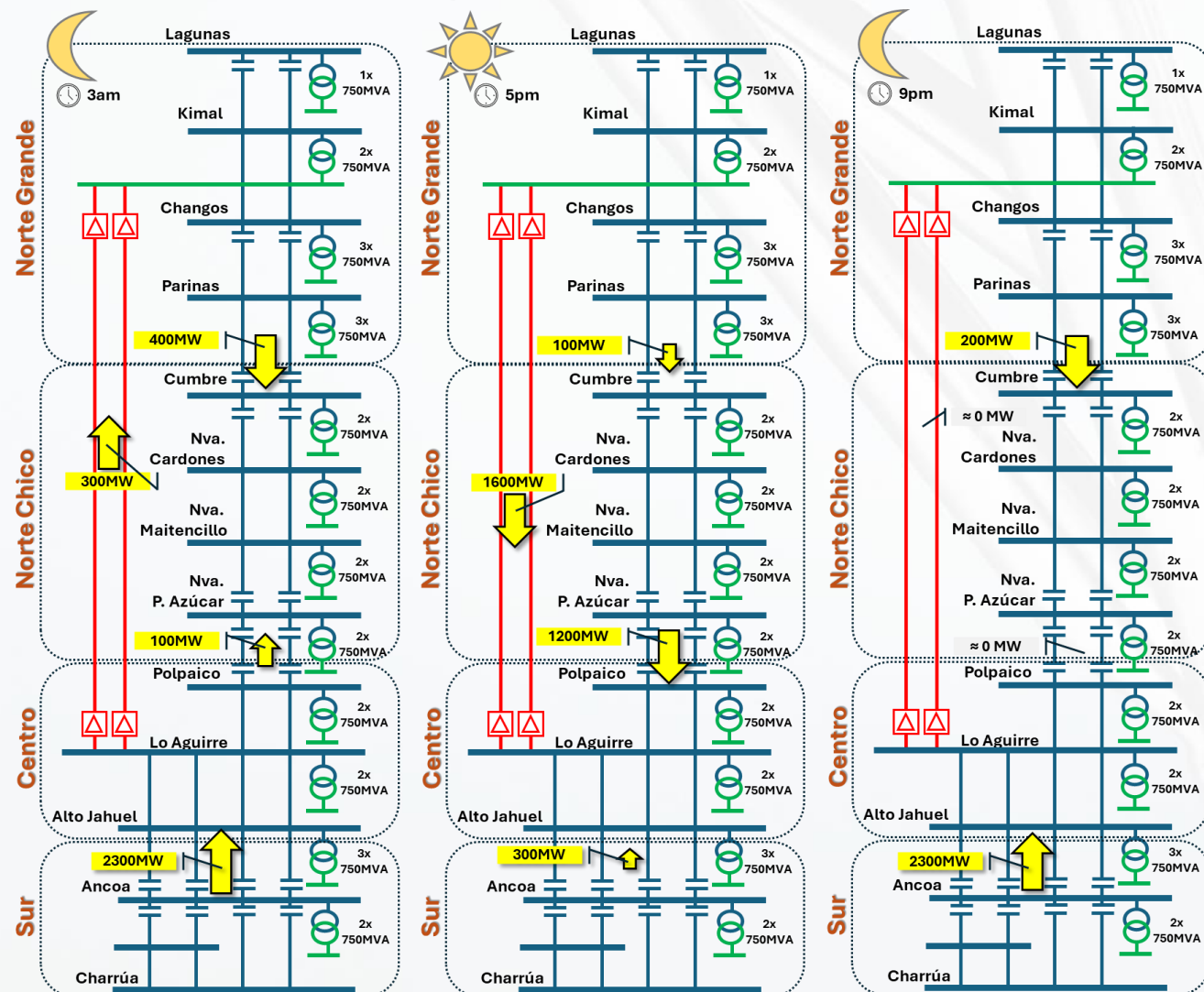
Análisis sistémicos

Escenarios económicos








*Datos promedios horarios mensuales

Septiembre



Análisis sistémicos

Escenarios de estudio

		2032					
		Junio			Septiembre		
		Madrugada	Dia	Noche	Madrugada	Dia	Noche
Generación	Eólica 	28,2	17,8	19,7	33,8	19,5	25,4
	Fotovoltaica 	0,0	62,2	0,0	0,0	70,5	0,0
	Térmica 	44,7	11,7	30,7	19,1	0,3	16,1
	Hidráulica 	23,2	8,4	24,0	39,5	9,8	31,2
	BESS 	3,9	0,0	25,7	7,6	0,0	27,3
	Bruta	9499	17342	13415	9122	16424	13071
Demanda Neta (sin BESS)		9499	12016	13415	9122	12029	13071
Transferencias	HVDC KIM - LoA	↓ 300	↓ 2000	↓ 1000	↑ -300	↓ 1600	↓ 400
	PAR - CUM 500kV	↓ 660	↑ -450	↓ 1000	↓ 300	↑ -300	↓ 550
	N.P.AZU - POL 500kV	↓ 150	↓ 1100	↓ 500	↑ -180	↓ 1350	0
	A.JAH - ANC 500kV	↑ -1150	↓ 100	↑ -1350	↑ -2450	↑ -300	↑ -2500
Inercia SEN		51,5	31,2	57,0	36,3	15,6	41,3
ROCOF (ΔP: 400MW)		0,19	0,32	0,18	0,28	0,64	0,24

Análisis de fortaleza

Metodología

Razón Efectiva de Cortocircuito (ESCR o RECC)

$$ESCR = \frac{S_i}{P_i + \sum_j^n (IF_{ji} \cdot P_j)} \quad , \text{ donde } IF_{ji} = \frac{\Delta V_i}{\Delta V_j}$$

Definido y utilizado por el CEN – No establecido a nivel NTSyCS

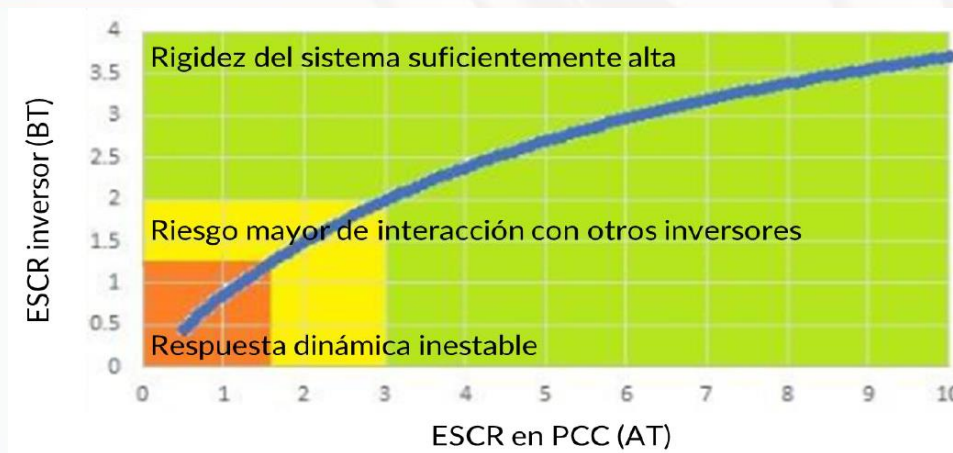
A los efectos de la planificación de la red, se considera la necesidad de alcanzar una relación de cortocircuito ≥ 1.5 en barras de alta tensión.

HVDC – Estaciones conversoras

$$RECC = \frac{\text{Capacidad de cortocircuito AC [MVA]} - \text{Capacidad Reactiva enlace HVDC [MVA]}}{\text{Potencia transmitida [MW]}}$$

Definido en la NTSyCS

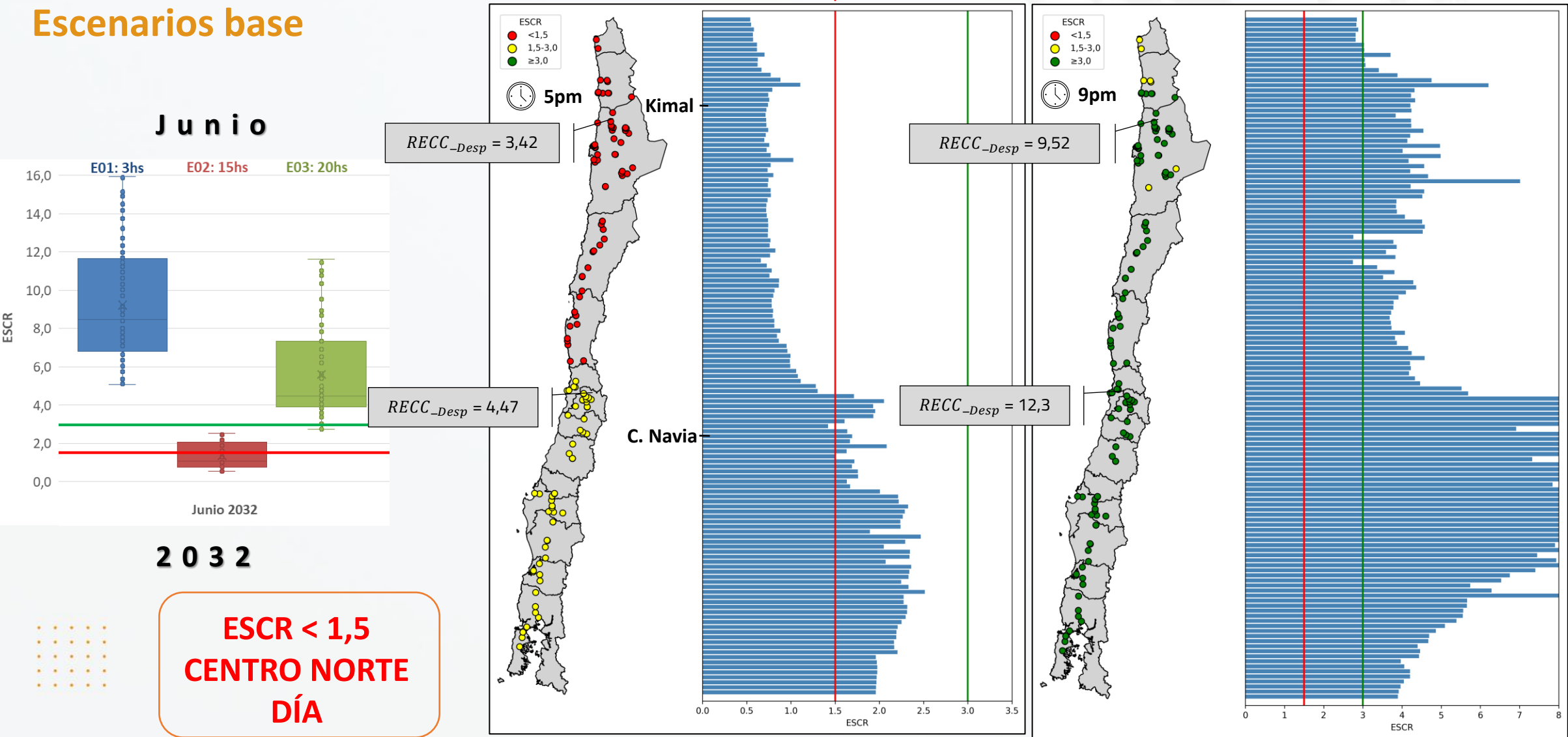
Según las bases de licitación, se debe prever con una razón efectiva de cortocircuito en cada subestación de conexión superior a 2,5



Estos son solo INDICADORES, que permiten analizar la fortaleza de manera simplificada y proponer PRELIMINARMENTE medidas de mitigación.

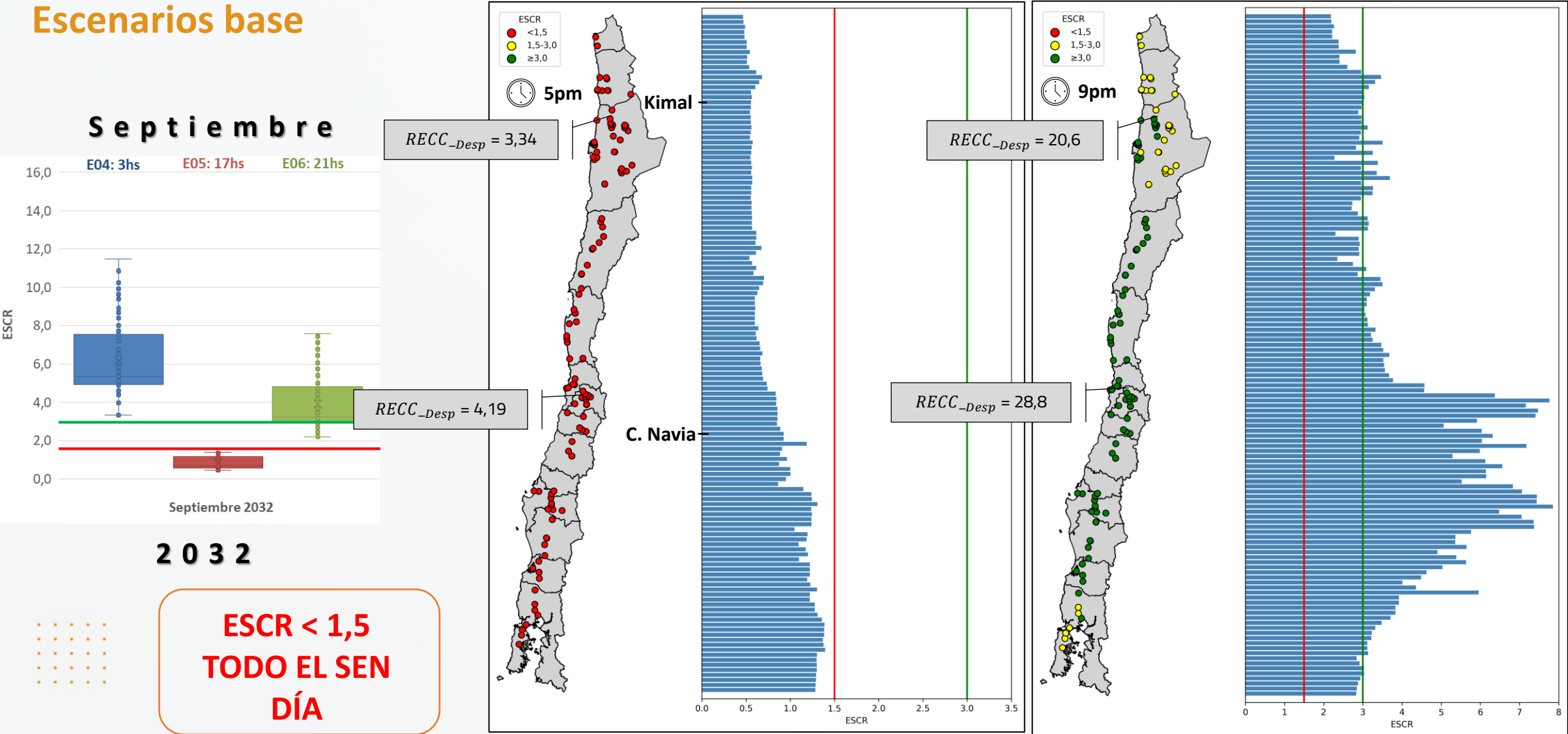
Análisis de fortaleza

Escenarios base



Análisis de fortaleza

Escenarios base








Análisis de fortaleza

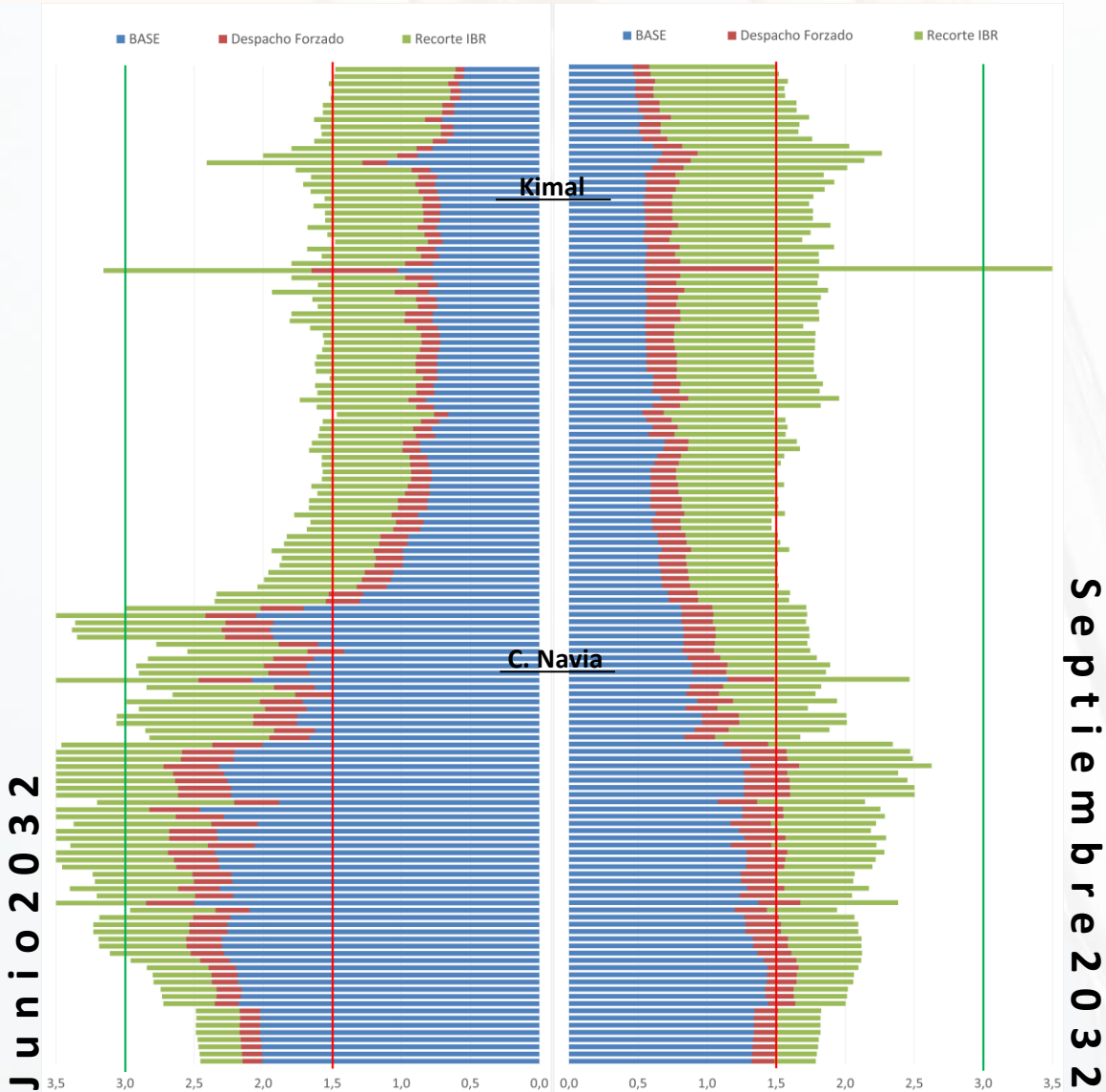
Medidas de mitigación

PRELIMINARES, para salir de la zona de máximo riesgo, pero no garantiza una operación estable.

1 - Despacho térmico forzado y gestión ERV

			Junio			Septiembre		
			Forzado		Delta	Forzado		Delta
			[MW]	[%]	[MW]	[MW]	[%]	[MW]
Generación	Eólica		2958	22,0	-121	3056	25,3	-150
	Fotovoltaica		6728	49,9	-4055	6308	52,2	-5264
	Térmica		2336	17,3	308	1110	9,2	1068
	Hidráulica		1448	10,7	0	1620	13,4	0
	BESS		-1501	0,0	3825	-147	0,0	4248
Bruta			13470			12094		

- Escasa disponibilidad de recursos en la zona norte
- Ubicados en nodos adyacentes, alejados de focos de concentración IBR
- Requiere complementarse con importante gestión a la carga BESS a partir de fuentes ERV.



Análisis de fortaleza

Medidas de mitigación

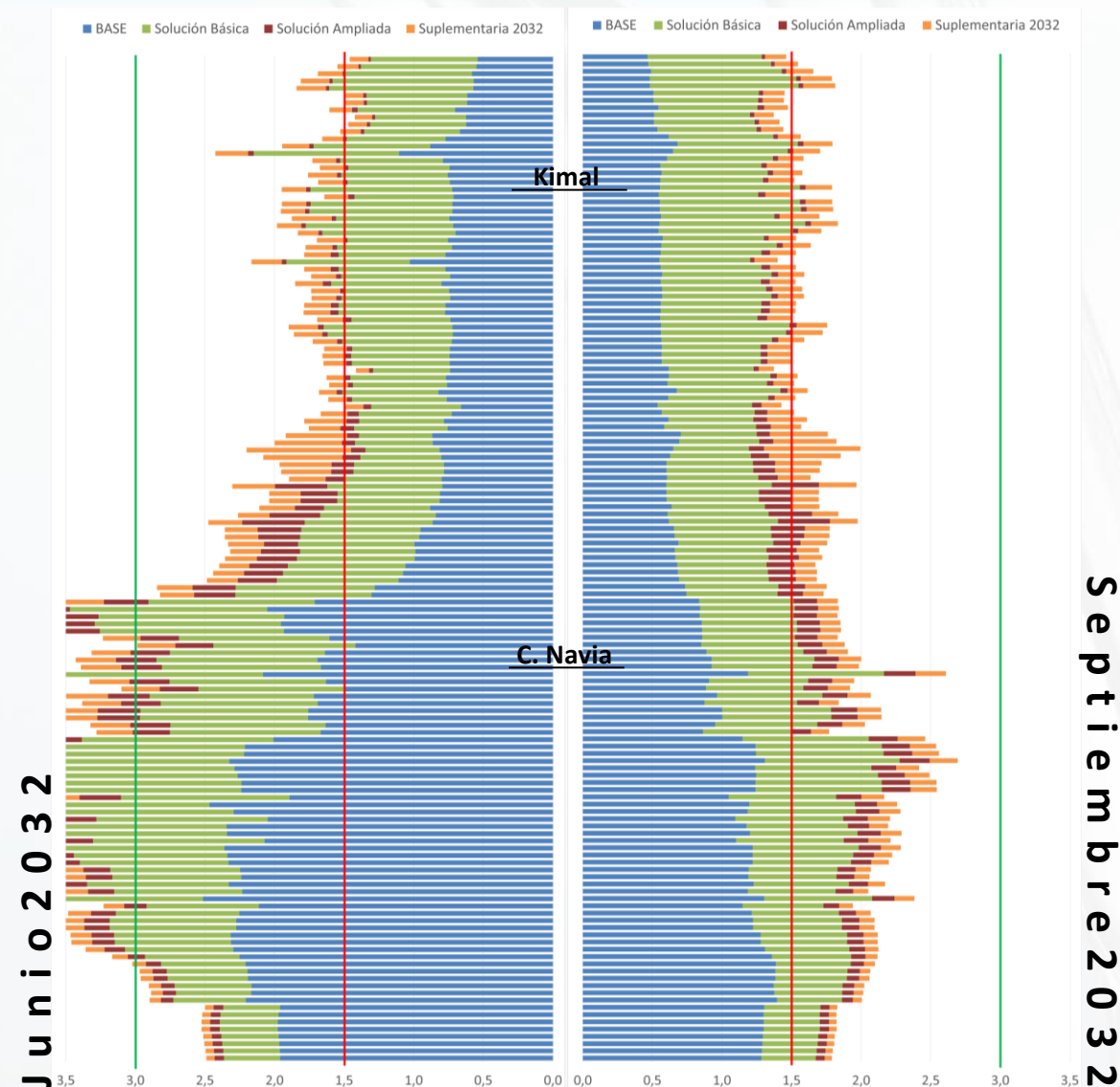
2 – Incorporación de condensadores sincrónicos

- Distribuidos y ubicados estratégicamente

Zona	Requerimientos SynCon
Norte Grande [MVA]	1750
Norte Chico [MVA]	1050
Total [MVA]	2800

Ucc equivalente 0,15p.u.

! Más de 3 veces lo actualmente licitado (960MVA).



Análisis de fortaleza

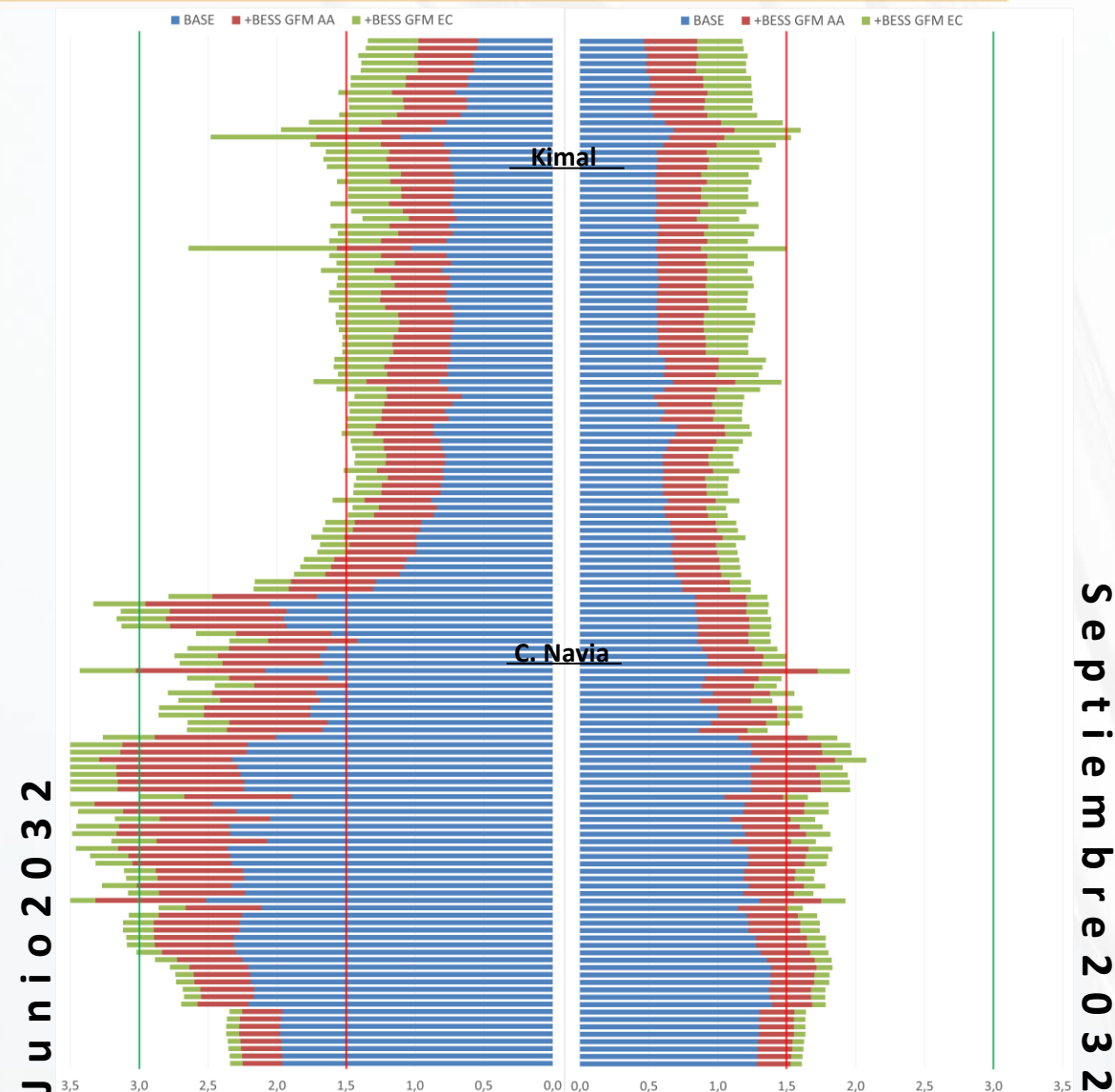
Medidas de mitigación

3 – Uso de tecnología Grid-Forming

Se considera la implementación de tecnología GFM en **proyectos BESS, sin sobredimensionamiento**. Se plantean los siguientes casos:

- AA: exclusivamente los proyectos en Acceso Abierto (3730 MVA)
- EC + AA: añadiendo los proyectos En Construcción (+2400 MVA)
- Hibridación en AC

! En las condiciones más críticas, podría no resultar suficiente.

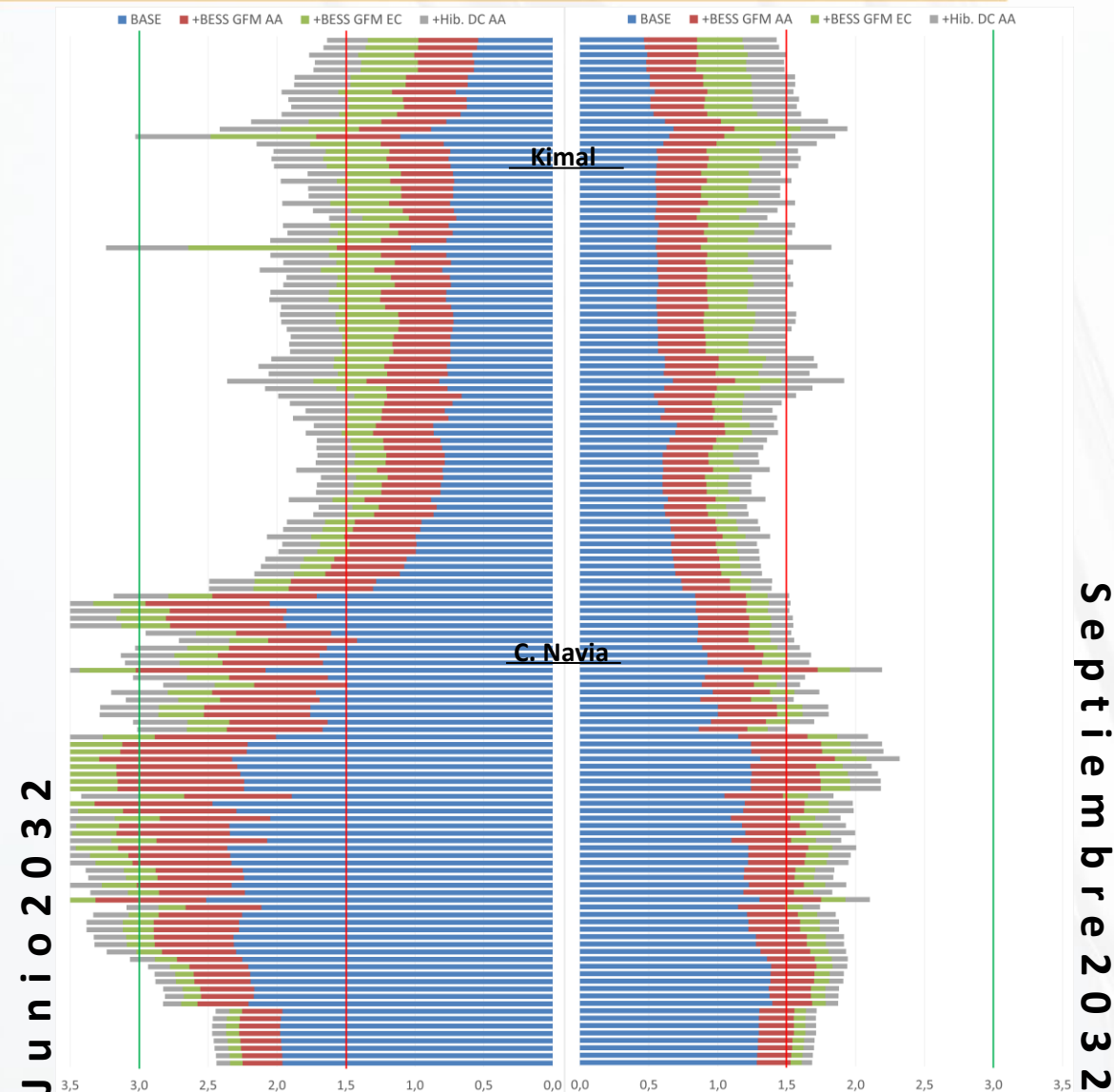
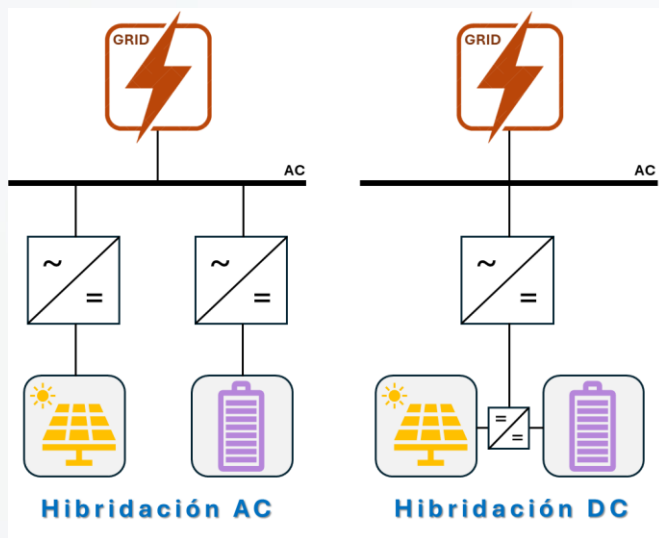


Análisis de fortaleza

Medidas de mitigación

3 – Uso de tecnología Grid-Forming + Hibridación DC

Corolario: Se observan beneficios sistémicos en la hibridación directamente en DC de centrales con almacenamiento. La NTSyCS debiera reconocer explícitamente ambos tipos de Hibridación.



Agenda



Contextualización

Análisis sistémicos (Avance)

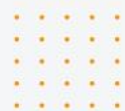
- Proyección de la red
- Análisis de fortaleza

Reflexiones y pasos a seguir



Métricas – Aspectos Sistémicos

- El cálculo de **ESCR -Effective Short Circuit Ratio-** se adopta en base a estudios propios del Coordinador Eléctrico Nacional y las referencias internacionales, no existiendo regulación específica a nivel de Norma Técnica. → **Oportunidad**
- La definición del **RECC (para sistemas HVDC)** no resulta suficiente ya que no captura los mismos conceptos ni responde a los mismos fenómenos que pretenden ser capturados mediante el indicador ESCR.
- Una métrica es un valor simplificado basado en una hipótesis de simplificación, que pretende con un **indicador resumir un amplio conjunto de fenómenos**, en este caso a lo que hace a la estabilidad de operación de un IBR contra la red.
- El presente análisis sólo mitiga riesgos de fortaleza de red de rango ESCR 1,5 - 3,0. Se podría propender a un SCR más seguro. El umbral de ESCR establecido debe ser comprendido como un **valor orientativo** más que como una frontera rígida.
- La definición, evaluación y uso de una métrica **no reemplaza a la necesidad de desarrollar estudios detallados** RMS y EMT para evaluar específicamente el funcionamiento completo del sistema y todos sus componentes.
- Chile, al encontrarse a la vanguardia en la integración masiva de energías renovables, enfrenta desafíos que pueden no resolverse con criterios estáticos tomados de otras jurisdicciones. **La adopción de umbrales de fortaleza de red debe ir acompañada de estudios** detallados que reflejen la complejidad topológica, la heterogeneidad de tecnologías y las interacciones dinámicas reales del sistema de forma previa a avanzar en definiciones normativas.
- Existen otros indicadores, de igual relevancia (v.g. **Inercia mínima**, ROCOF) que también deberían ser parte del conjunto de métricas mínimas a sumar para validar la suficiente robustez del SEN.



→ **Mediante la definición de nuevos indicadores se puede evitar que el sistema reduzca significativamente su fortaleza**

Desempeño individual - Grid Forming

- El documento “Requisitos técnicos mínimos para recursos basados en inversores Grid-Forming” del CEN, al igual que otros documentos en el marco regulatorio mundial, son una buena guía referencial para iniciar la discusión y apuntan a capacidades básicas “core capabilities”.
- La guía abarca ampliamente los aspectos cualitativos de interés para la especificación de equipos del tipo GFM, dejando indefiniciones relevantes para determinar las capacidades técnicas que serán requeridas. Algunos ejemplos:

Dimensionamiento relativo a la operación en condiciones de red débil:

*“...Los IBRs GFM en redes débiles, por su parte, **deberán operar de manera estable dentro de los límites y capacidades de sus equipos...**”*

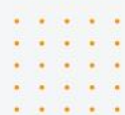
Se requerirá definir específicamente estos límites o cómo determinarlos

Instancias de interacciones con el CEN:

*“...El ángulo de fase máximo que se espera que un IBR GFM pueda soportar depende de la red y **debe ser definido por el operador del sistema en discusión con el fabricante del equipo (OEM) y el propietario de la planta (por ejemplo: hasta 60 grados)...**”* **Se requerirá especificar estos parámetros o en qué instancia del proceso serán definidos.**

Límites para el desempeño ante fallas:

*“...Durante fallas simétricas, se espera que un IBR GFM mantenga una tensión interna balanceada **en la medida de lo posible dentro de sus límites físicos.** Además, el IBR GFM debe inyectar corriente para contrarrestar el cambio de tensión **hasta su corriente nominal de cortocircuito máxima (ISRC)...**”* **Se requerirá definir específicamente estos límites o cómo determinarlos**

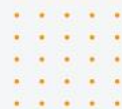


→ El desafío ahora es plantear una discusión normativa de aspectos cuantitativos concretos que terminarán definiendo el hardware, así como los eventuales mecanismos de compensación (v.g. en caso de sobredimensionamiento para brindar tareas de soporte a la red)



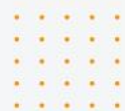
Requerimientos GFM – Aplicación gradual

- La transición debe mantener y/o mejorar los **estándares de calidad** de operación del sistema.
- Alguno de los estándares para asegurar la operación del sistema puede que incluso todavía no estén correctamente identificados en la NTSyCS porque hasta el momento no representaban condiciones de escases.
- No existe ningún sistema eléctrico del tamaño del SEN que haya implementado masivamente GFM.
- El Sistema Eléctrico es una infraestructura compleja, interconectada y altamente sincronizada. La aplicación de una nueva tecnología, cualquiera sea, **debe hacerse de forma paulatina**, apoyándose sobre las soluciones y condiciones probadas.
- El desarrollo de estudios cada vez más especializados (v.g. EMT), va a permitir acelerar ese proceso, pero no debe descuidarse que los mismos se basan en modelos, supuestos y condiciones específicas. **El sistema real siempre es más amplio y complejo.**



Estado del estudio - pasos a seguir

- Análisis sistémicos de **transitorios electromecánicos** tradicionales (RMS) con modelos de fabricante montados sobre el Sistema Eléctrico Nacional completo en su Base de Datos PF DigSILENT: orientados a validar cálculos iniciales, determinar montos de inercia y reservas para el control de frecuencia, aplicación de GFM sobre el sistema completo.
- Análisis de **transitorios electromagnéticos** (EMT) sobre redes simplificadas representativas del SEN y aplicando modelos específicos de fabricante en formato PSCAD: orientados a validar resultados en el marco temporal de acción y control de esta tecnología.
- A partir de este **estudio técnico** se pretende, transitar hacia el desarrollo y cuantificación de soluciones, a fin de identificar en cada paso, aspectos regulatorios o indefiniciones actuales, para proponer supuestos y sobre estos obtener unos primeros resultados específicamente obtenidos **sobre simulaciones en el Sistema Eléctrico Nacional de Chile**.
- Posteriormente deberán realizarse análisis de **impacto regulatorio** que evalúe adecuadamente cuáles son los mecanismos-o medidas de mitigación- más costo- eficiente para lograr la fortaleza de red objetivo que defina la normativa.





Análisis Fortaleza de Red 2032 y Mitigaciones

PRELIMINAR