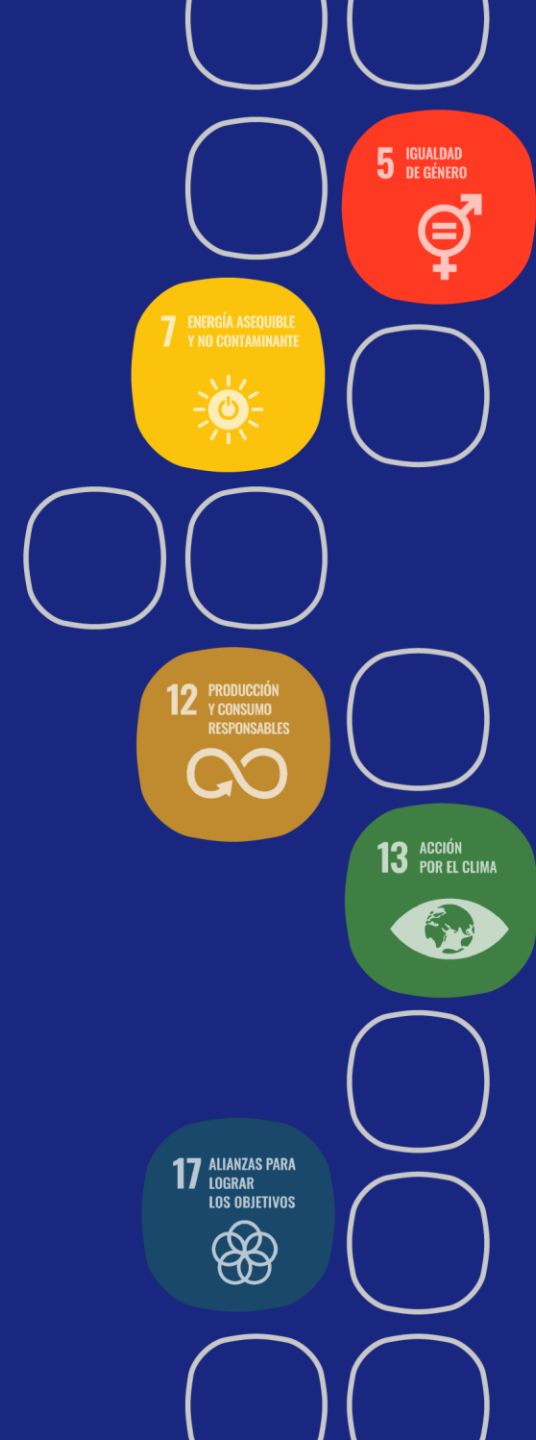


## 3er WEBINAR GIZ

**Visión y estudios del Coordinador para el fortalecimiento de la Red: El rol de las máquinas sincrónicas y la tecnología *Grid Forming***





# TEMARIO

- ❖ Contexto – Transición Energética Acelerada
- ❖ Estudio y Definición de Requerimientos para el Fortalecimiento de la Red en el SEN
- ❖ El Rol del *Grid Forming* en el futuro cercano del SEN

## ***Profunda transformación del SEN a una escala y ritmo sin precedentes***

- ❖ Alta penetración de generación basada en inversores (ERV-IBR)
- ❖ Cada vez menos máquinas sincrónicas y alejadas de los núcleos ERV-IBR
- ❖ Nueva y más rápida dinámica de los fenómenos de estabilidad
- ❖ Redes débiles desde el punto de vista de la estabilidad de tensión y operación estable las ERV-IBR

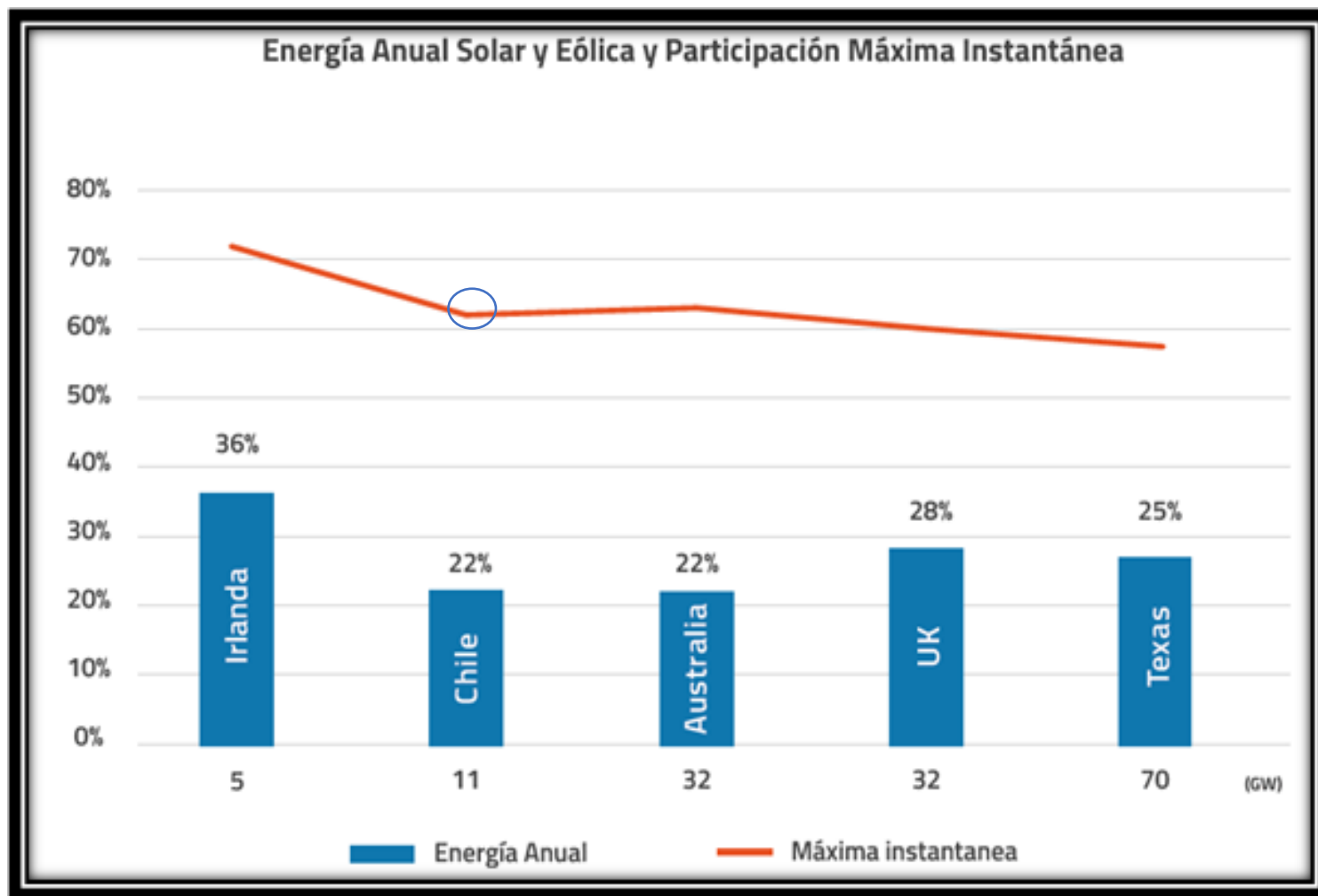


## **Riesgos para la estabilidad del SEN**



# CONTEXTO – TRANSICIÓN ENERGÉTICA ACELERADA

*¿Cómo se está dando esta transformación en Chile y el mundo?*

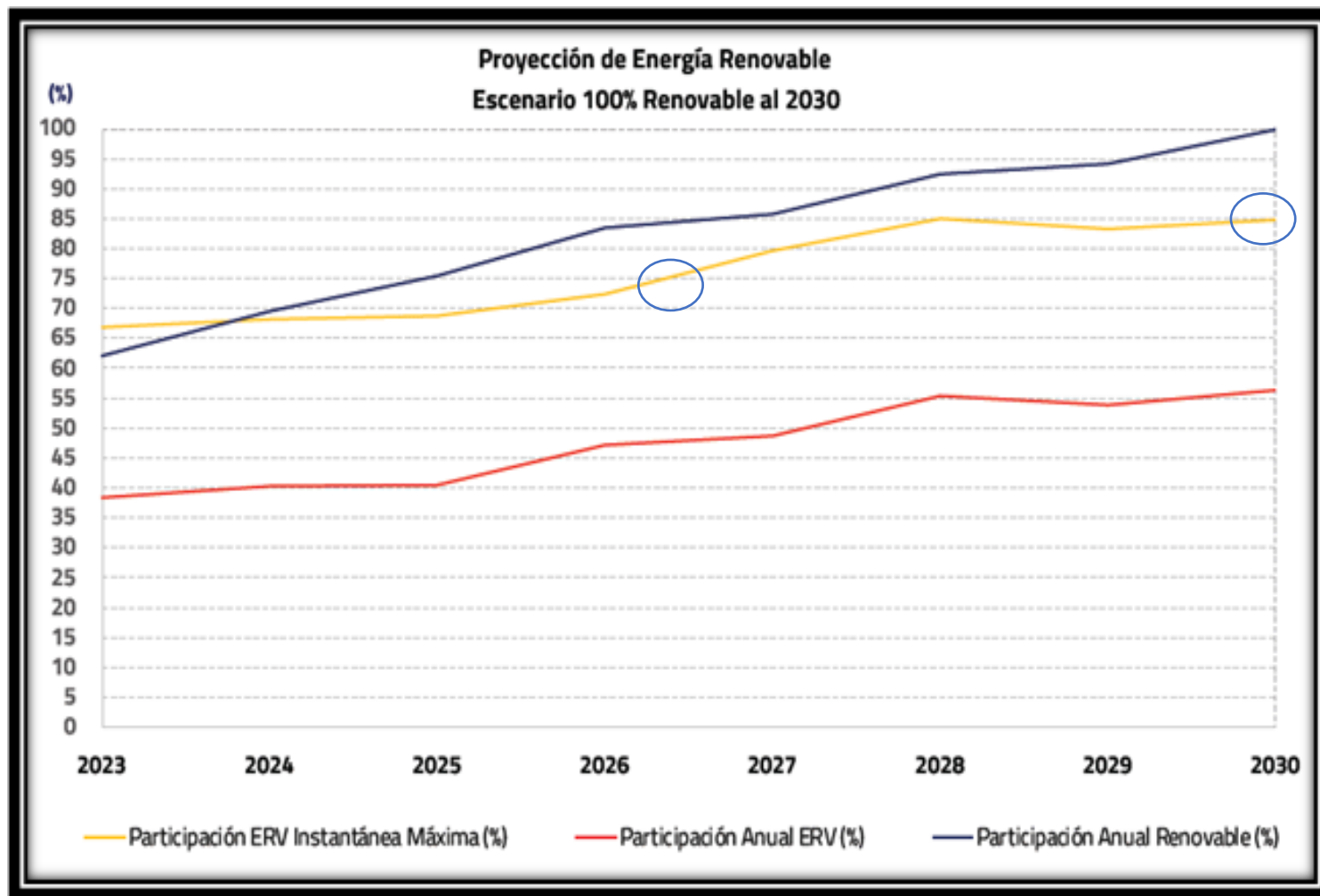


Fuente: Hoja de Ruta para una Transición Energética Acelerada. Visión del Coordinador Eléctrico Nacional. Junio 2022



# CONTEXTO – TRANSICIÓN ENERGÉTICA ACELERADA

*¿Cómo se está dando esta transformación en Chile y el mundo?*

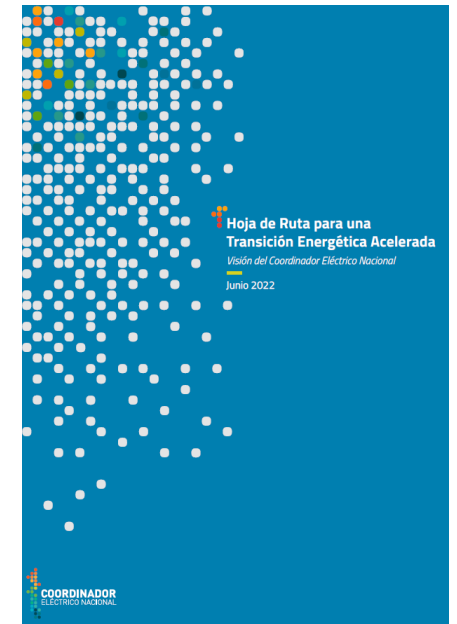
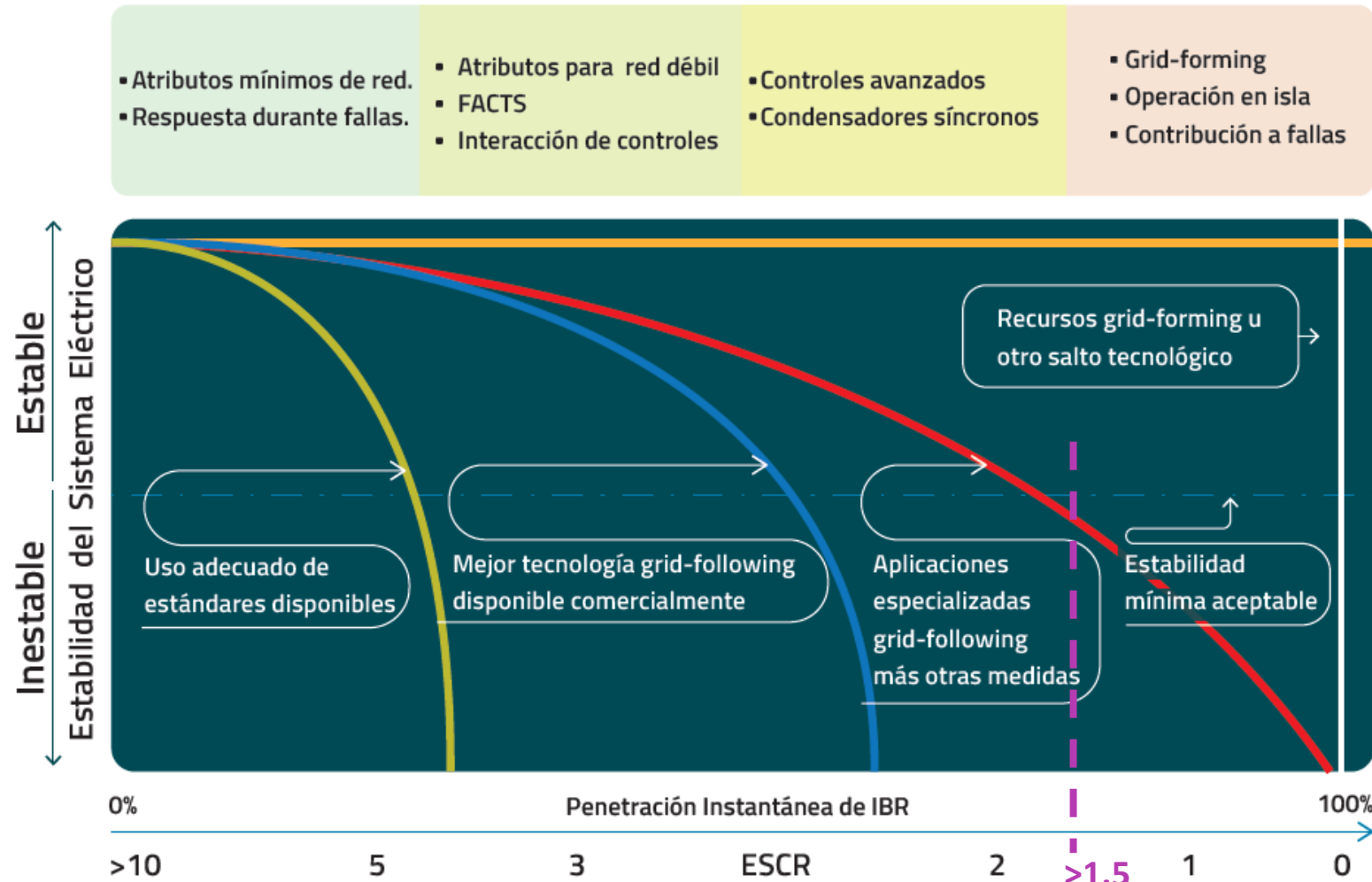


Fuente: Hoja de Ruta para una Transición Energética Acelerada. Visión del Coordinador Eléctrico Nacional. Junio 2022



# CONTEXTO – TRANSICIÓN ENERGÉTICA ACELERADA

*¿Cómo hacer frente a los desafíos? → Diseñar y aprovechar la evolución tecnológica*



Fuente: Hoja de Ruta para una Transición Energética Acelerada. Visión del Coordinador Eléctrico Nacional. Junio 2022. Ref.ESIG2022

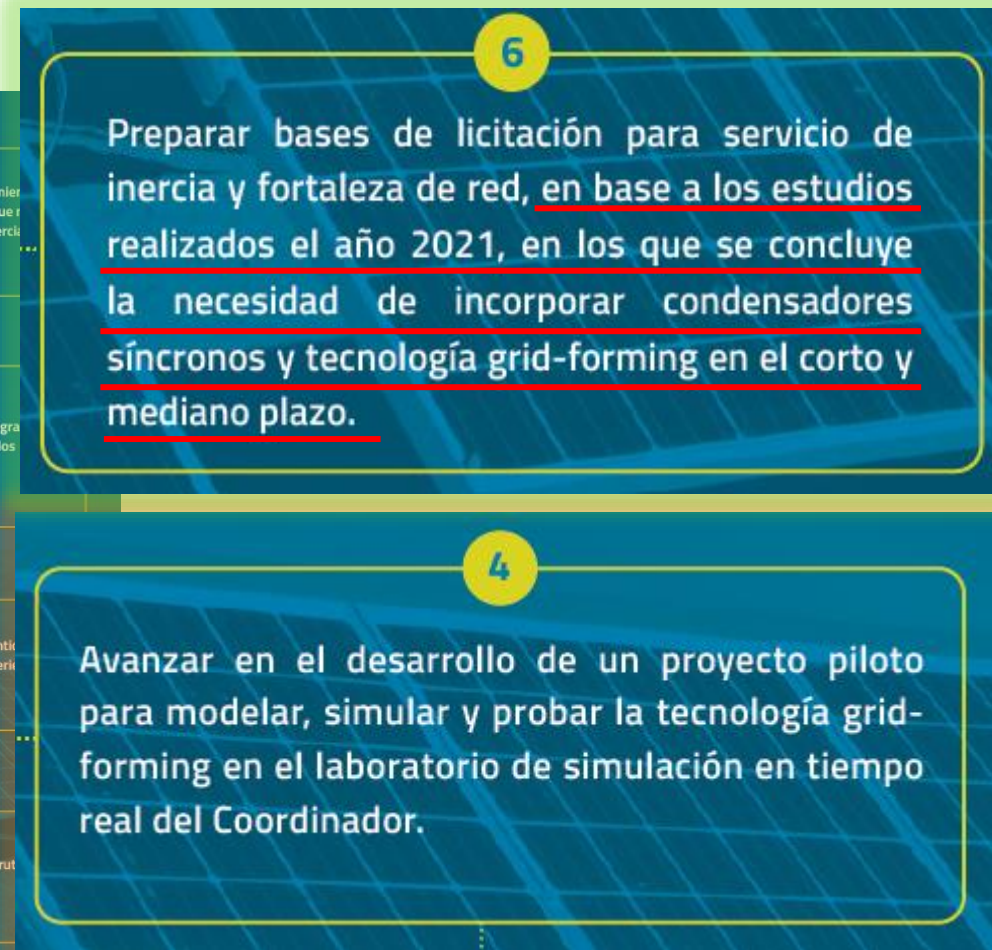
# CONTEXTO – TRANSICIÓN ENERGÉTICA ACELERADA

## Hoja de Ruta para una Transición Energética Acelerada – Visión del Coordinador Eléctrico Nacional

### Próximos pasos

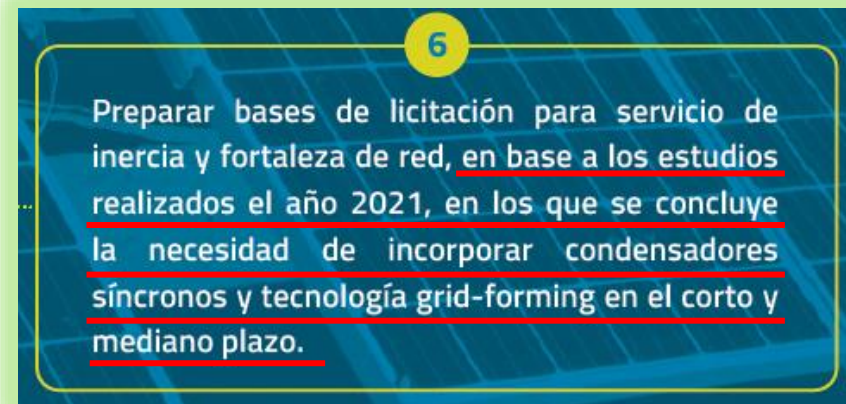
#### Próximos Pasos

El Coordinador iniciará y reforzará un conjunto de actividades dentro de los ámbitos de su responsabilidad, con el fin de abordar los desafíos futuros para viabilizar una transición energética segura y confiable al año 2030, que permita alcanzar una participación de un 100% de energías renovables a ese año. Entre dichas iniciativas se encuentran:



## *Estudios más recientes del Coordinador (con apoyo del consultor internacional DlgSILENT GmbH)*

- ❖ Año 2021 - Estudio de requerimientos mínimos de seguridad y calidad para el SEN para los años 2025 y 2030
- ❖ Año 2022 - Definición de requerimientos para el fortalecimiento de la red al 2025



## **PRINCIPAL CONCLUSIÓN**

**En el Horizonte 2025 – 2030 el SEN requiere:**

**Aumentar la fortaleza de la red → Aumento Potencia de Cortocircuito Sincrónico**

- ❖ Fase 1 (Preparación) – Año 2025: instalación de Condensadores **Sincrónicos** / Reconversión de Generadores **Sincrónicos** existentes
- ❖ Fase 2 (Adaptación) – Años 2026 al 2030: potencial de instalación de proyectos **Grid Forming** que emulen el comportamiento de una máquina síncrona → Máquina Sincrónica Virtual (VSM o VMM)

## Condensadores Sincrónicos en el mundo ahora

### South Australia's constrained renewables to be unleashed as four new syncons spin into action

South Australia is a global hero for its demonstration of a rapid transition to renewable generation. But as renewables supplied more than 60% of the state's electricity, and pushed out coal and even gas-fired generation, cracks appeared in the system strength and inertia required to keep the grid reliably running. ElectraNet has deployed old, clean-running technology — synchronous condensers — to smooth the gaps.

AUGUST 9, 2021 NATALIE FILATOFF

### Finley solar farm reveals AEMO contract for big spinning machine

Giles Parkinson 28 April 2022



### Quinbrook Commissions First New Synchronous Condenser for the UK Power Market

*Demonstrating the New Investment Opportunities Offered by the Energy Transition*

*Project Rassau in Wales designed to play a key role in National Grid's innovative approach to managing the stability of the electricity system in response to the rapid growth of renewables*

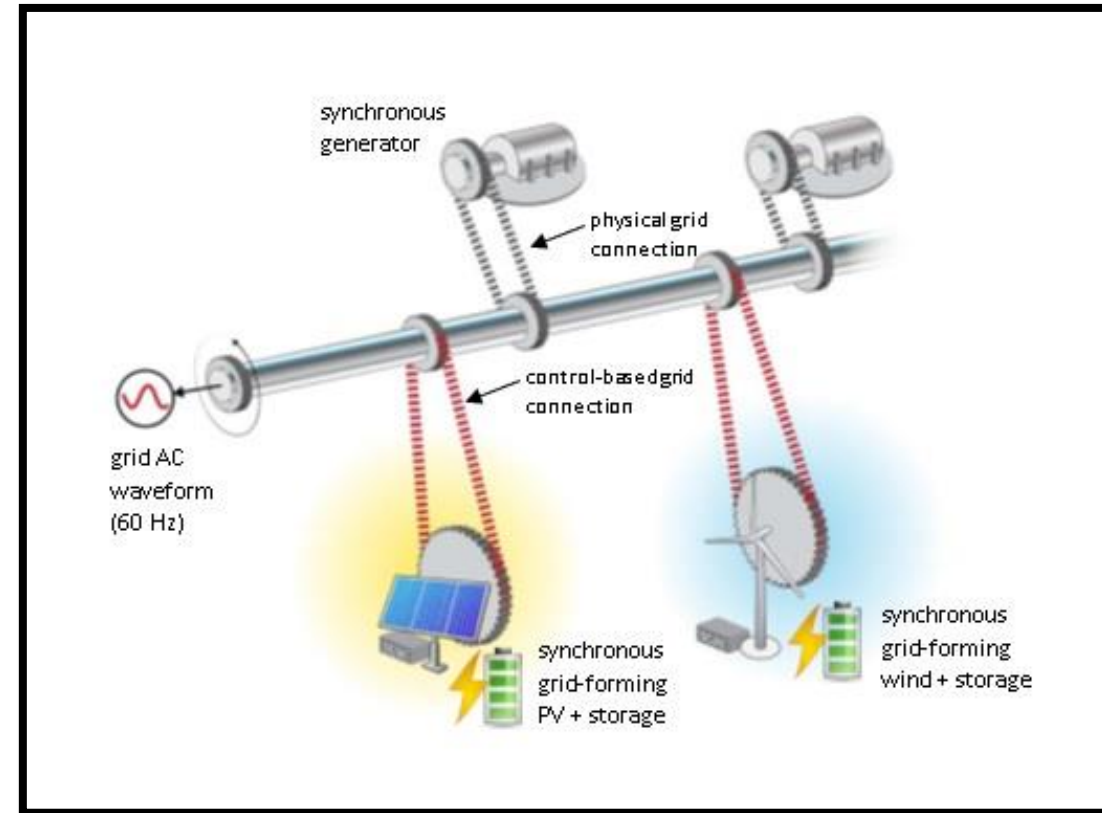
### New Synchronous Condenser: is expected to be the largest segment synchronous condenser market, by type

The type segment is categorized as New Synchronous Condenser and refurbished synchronous condenser. A new synchronous condenser is constructed with 2 or 4 poles (2-pole pair), which can be cooled with hydrogen, air, and water. With the globally expanding HVDC network, countries such as Canada, Brazil, and Italy have deployed new synchronous condensers for stabilizing and improving transmission systems' stability and strength. Besides, they are also being deployed to control voltage fluctuations and provide reactive power support.

The hydrogen cooled synchronous condenser segment is expected to emerge as the fastest segment, by Cooling technology

## *Fortaleza de la Red*

- ❖ Habilidad de un sistema eléctrico de mantener y controlar la forma de onda de la tensión (en amplitud y fase) en sus barras.
- ❖ Aportada de manera intrínseca por las máquinas sincrónicas: fase de la tensión está acoplada a la posición mecánica del rotor → Posición del rotor no puede cambiar abruptamente → La fase de la tensión tampoco → Aporta estabilidad
- ❖ Las ERV-IBR Grid Following están acopladas mediante inversores controlados por corriente → Necesitan que la red imponga la tensión para poder funcionar → **Necesitan red con fortaleza mínima**



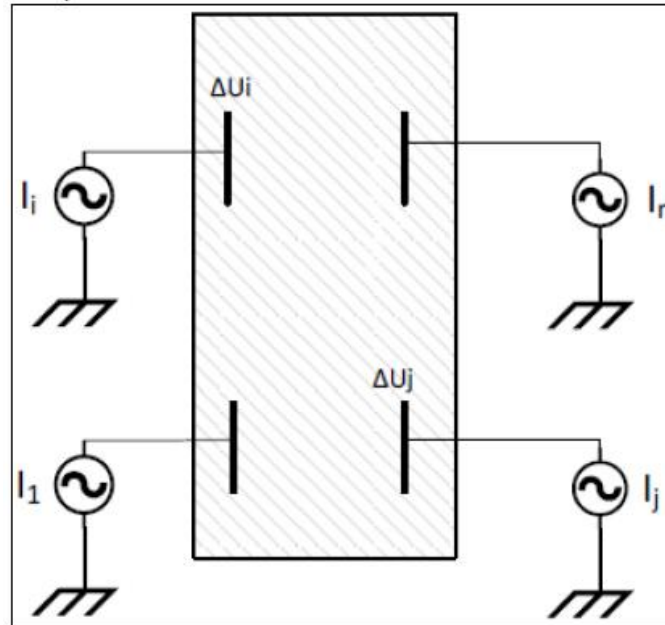
Fuente: NRel

## Métricas para estimar la fortaleza de la red

❖ SCR: indicador para un proyecto aislado conectado en la barra  $i \rightarrow SCR_i = \frac{Skssi}{P_i}$

❖ ESCR: indicador que toma en cuenta la interacción de otros inversores eléctricamente cercanos a la barra  $i$ :  $\rightarrow ESCR_i = \frac{Skssi}{[P_i + \sum_j (IF_{ji} \times P_j)]}$

*Skssi = Pcc entregada por las máquinas sincrónicas, con exclusión del aporte de las ERV-IBR-GFL, FACTS o cualquier inversor no formador de red que no emule una máquina sincrónica*



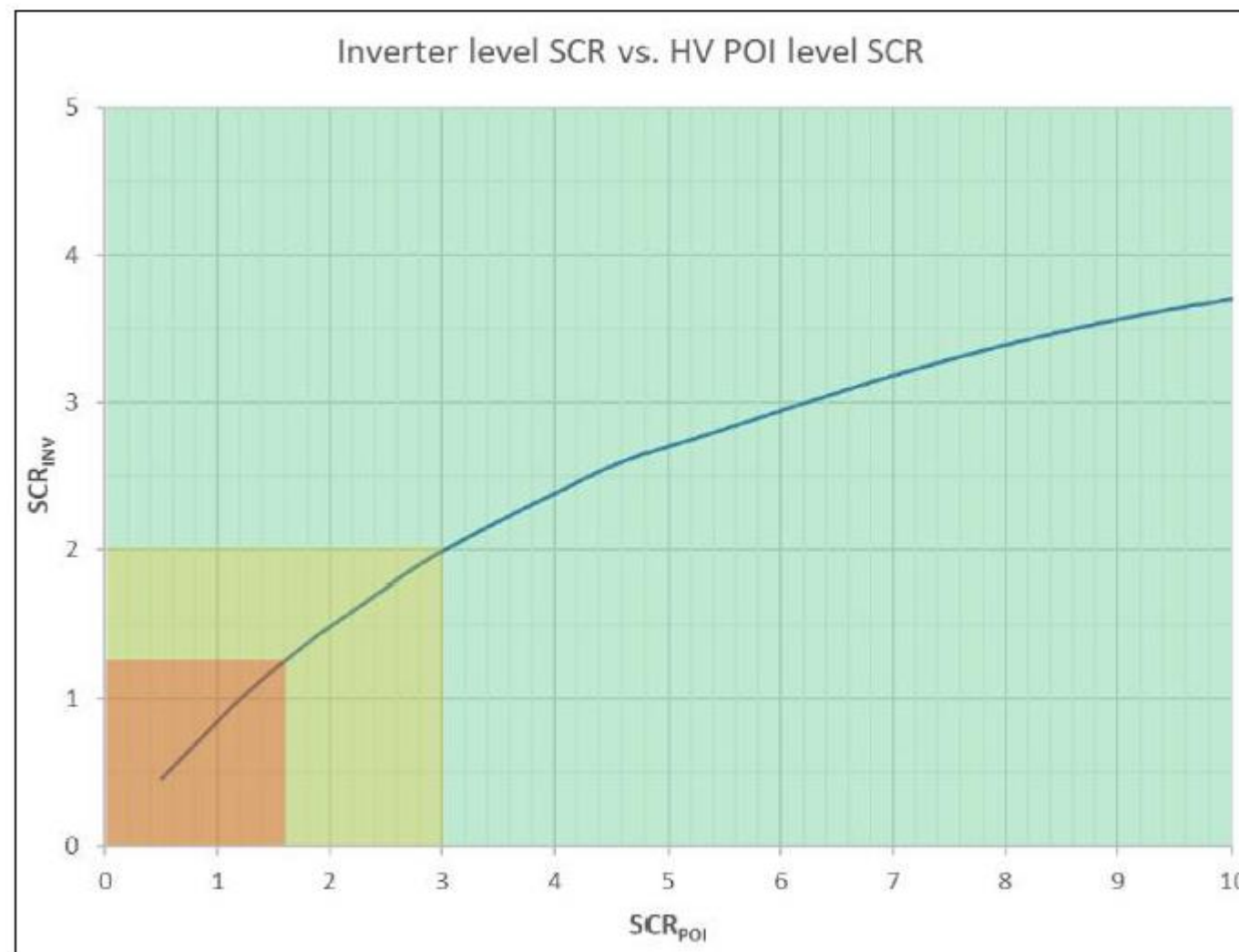
$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_i \\ U_j \\ \vdots \\ U_n \end{bmatrix} = Z \begin{bmatrix} I_1 \\ I_i \\ I_j \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix}$$

$$IF_{ji} = \frac{\Delta U_j}{\Delta U_i} = \frac{Z_{ji} \times \Delta I_i}{Z_{ii} \times \Delta I_i} = \frac{Z_{ji}}{Z_{ii}}$$

$$(\Delta U = \Delta U_{ref} - \Delta U_{shc})$$

## Valores de referencia para el SCR o ESCR

- ❖ Zona verde ( $ESCR_{POI} > 3$ ): respuesta estable del inversor con parámetros de control estándares. No hay interacción con otros inversores → ajuste del control del inversor puede hacerse de manera individual.
- ❖ Zona amarilla ( $1.5 \leq ESCR_{POI} \leq 3$ ): riesgo de interacción con otros inversores en el sistema → ajuste de los parámetros control inversor deberá ser coordinado con inversores eléctricamente cercanos.
- ❖ Zona naranja ( $ESCR_{POI} < 1.5$ ): el ajuste específico parámetros control inversor puede ser insuficiente para respuesta dinámica estable → se requiere equipo adicional → Condensadores Sincrónicos o equipos *Grid Forming*.



## ***Determinar el Tamaño y Ubicación de los Condensadores Sincrónicos al 2025***

- ❖ Minimizar la potencia total de cortocircuito a adicionar a N barras candidatas tal que en M nodos monitoreados el ESCR sea  $> 1.5$
- ❖ Se priorizan ubicaciones cercanas a centrales ERV y tensiones sobre 200 kV
- ❖ Se busca minimizar la siguiente función objetivo (penalizando las combinaciones con ESCR  $< 1.5$ ):

$$f(SCC_1, \dots, SCC_N) = ESCR_{penalty} + \sum_{i=1}^N SCC_i$$

$$ESCR_{penalty} = \begin{cases} 10^6 \times |ESCR_{min} - \min\{ESCR_j\}| & \text{si } \min\{ESCR_j\} < ESCR_{min} \\ 0 & \text{en cualquier otro caso,} \end{cases}$$

$$ESCR_j = \frac{SCC_j}{\sum_{k=1}^{N_{IBR}} (IF_{jk} \times P_k)}$$

- ❖ Cálculo de ESCR es no-lineal  $\rightarrow$  No se pueden usar métodos de optimización lineal  $\rightarrow$  Usar método Simplex.
- ❖ Método Simplex no tiene soluciones únicas  $\rightarrow$  Ejecutar optimizaciones adicionales para distintos puntos de partida  $\rightarrow$  Posibles soluciones alternativas
- ❖ Escenario de referencia: día  $\rightarrow$  el más exigente en términos de ESCR

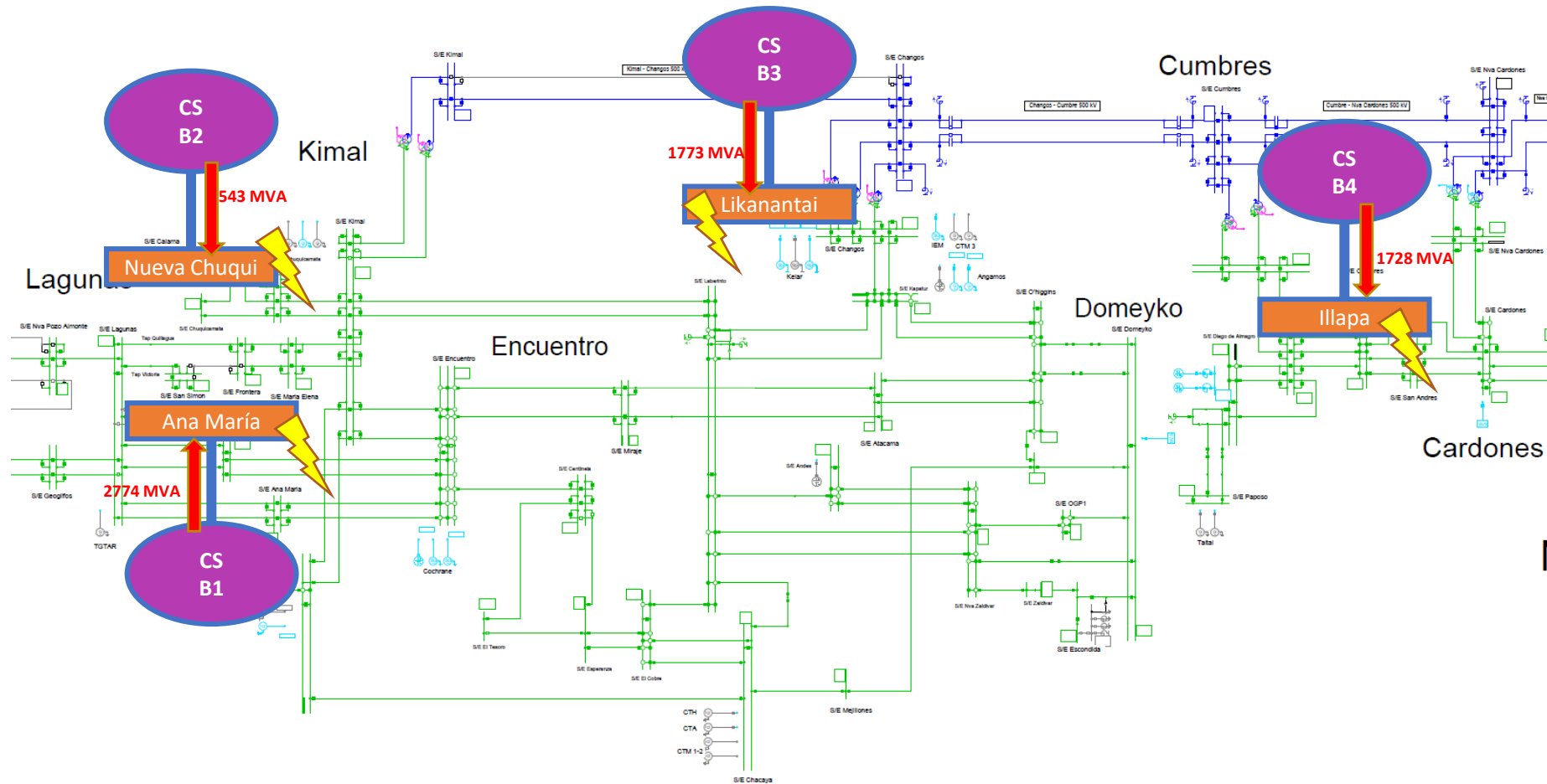


**COORDINADOR**  
ELÉCTRICO NACIONAL

# REQUERIMIENTOS PARA EL FORTALECIMIENTO DE LA RED

## *Determinación de Aportes*

- ❖ Determinación de aportes óptimos conectados a las barras óptimas



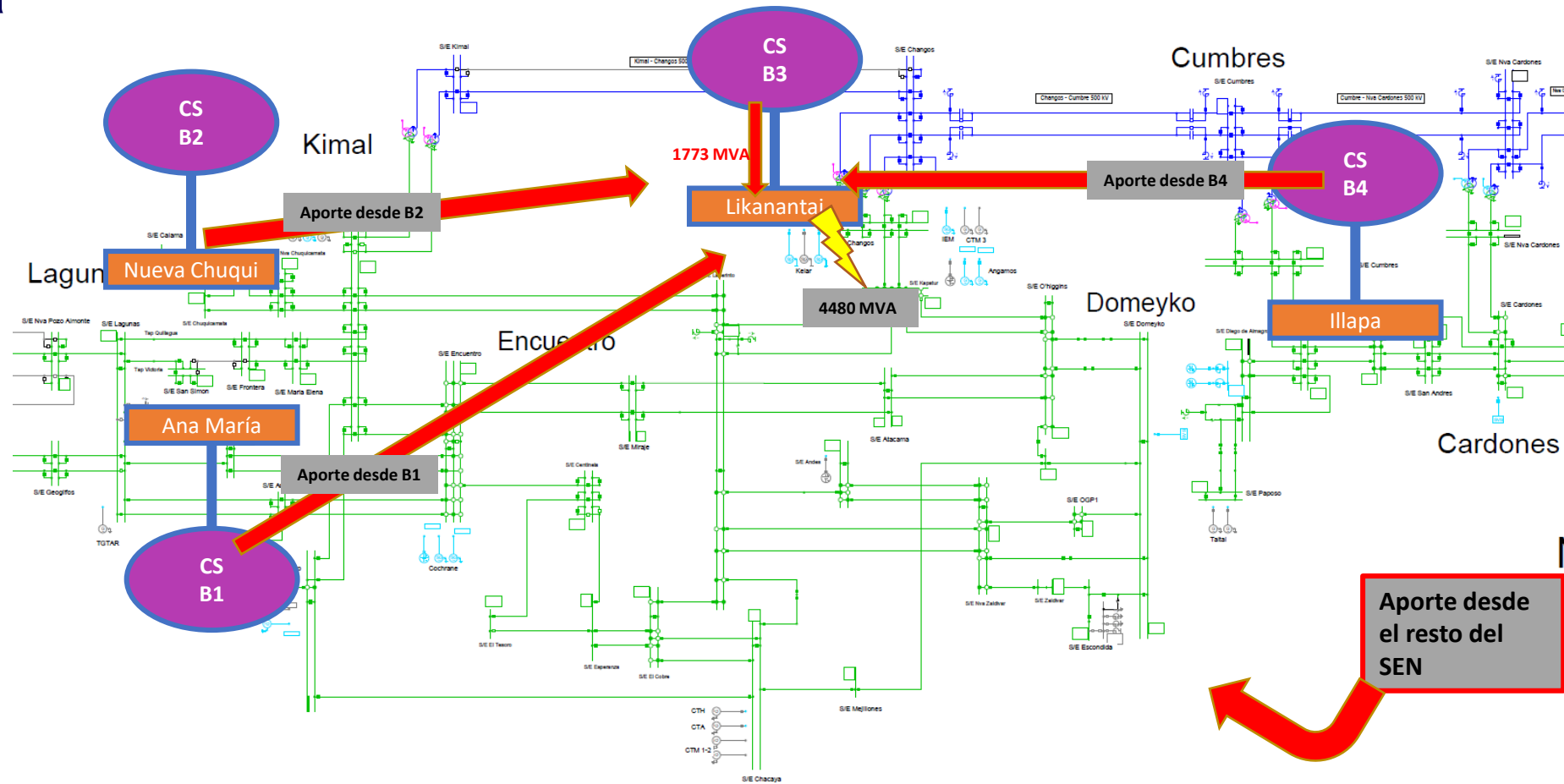
[illegible]



# REQUERIMIENTOS PARA EL FORTALECIMIENTO DE LA RED

## Requerimiento adicional total en cada barra

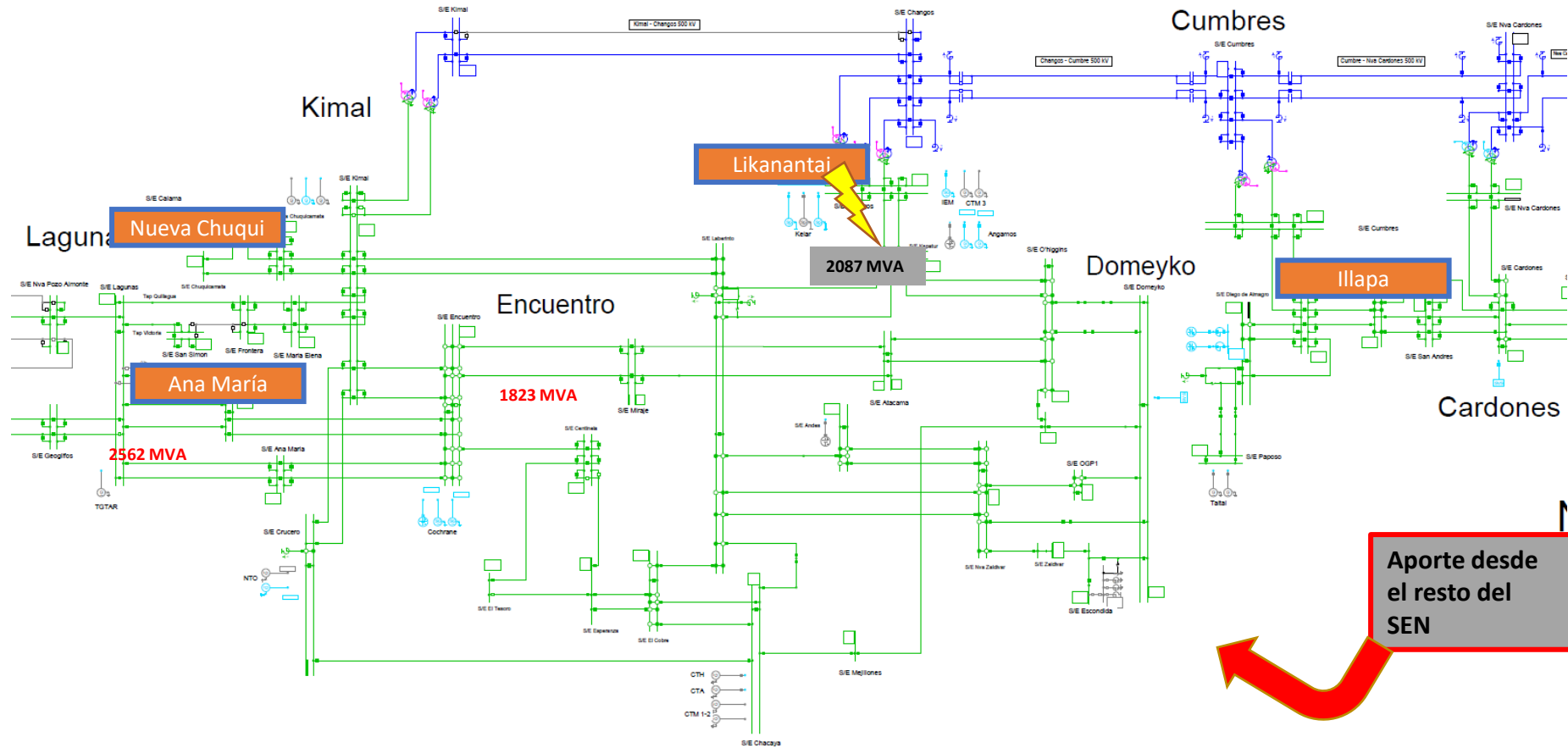
- ❖ ¿Cómo calcularlo de manera fácil? → Hacer la resta entre el CC con los proyectos y el CC sin los proyectos



# REQUERIMIENTOS PARA EL FORTALECIMIENTO DE LA RED

## Requerimiento adicional total en cada barra

- ❖ ¿Cómo calcularlo de manera fácil? → Hacer la resta entre el CC con los proyectos y el CC sin los proyectos



# REQUERIMIENTOS PARA EL FORTALECIMIENTO DE LA RED

## Requerimientos de potencia de cortocircuito para la prestación del SC de Control de Tensión

| Barra                     | Potencia de cortocircuito <sup>19</sup><br>[MVA] | CCSS equivalente <sup>20</sup><br>[MVar] |
|---------------------------|--------------------------------------------------|------------------------------------------|
| Ana María 220 kV          | 2774                                             | 416                                      |
| Nueva Chuquicamata 220 kV | 543                                              | 82                                       |
| Likanantai 220 kV         | 1773                                             | 266                                      |
| Illapa 220 kV             | 1728                                             | 259                                      |

## Requerimientos Totales de Potencia de CC por Barra (considerando aportes cruzados)

| Barra Candidata           | Potencia de CC Total<br>Escenario con CCSS<br>[MVA]<br>(1) | Potencia de CC Total<br>Escenario sin CCSS<br>[MVA]<br>(2) | Requerimiento Adicional<br>de Potencia de CC Total<br>[MVA]<br>(1)-(2) |
|---------------------------|------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| Ana María 220 kV          | 6313                                                       | 2623                                                       | 3690                                                                   |
| Nueva Chuquicamata 220 kV | 2950                                                       | 1748                                                       | 1202                                                                   |
| Likanantai 220 kV         | 4480                                                       | 2087                                                       | 2393                                                                   |
| Illapa 220 kV             | 4922                                                       | 2822                                                       | 2100                                                                   |

<sup>19</sup> Corresponde a la potencia de cortocircuito aportada en la barra por un equipo estándar (condensador sincrónico).

<sup>20</sup> Corresponde a la potencia nominal referencial de un condensador sincrónico que aporte la potencia de cortocircuito señalada en la columna 2 de la tabla. Para su cálculo se consideró una impedancia de vinculación de 0.15 p.u. la que incluye la reactancia subtransiente del condensador más la reactancia del transformador elevador. El monto total alcanza aproximadamente los 1023 MVar (si se suman los equipos conectados en las cuatro barras).

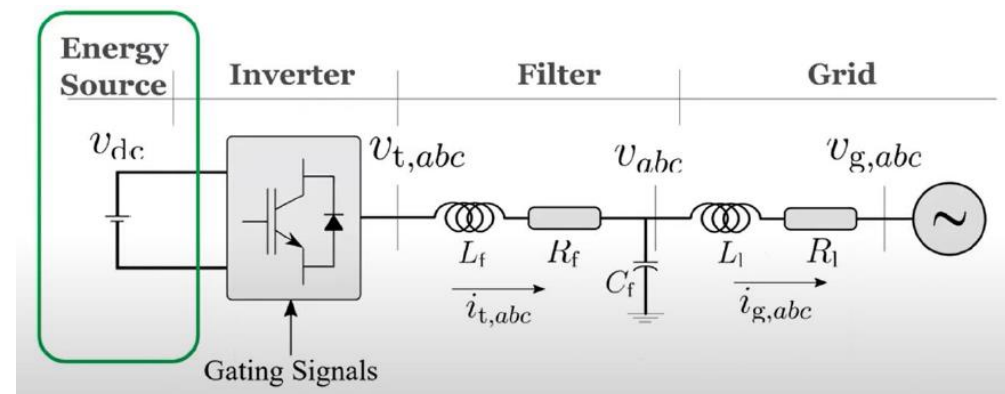
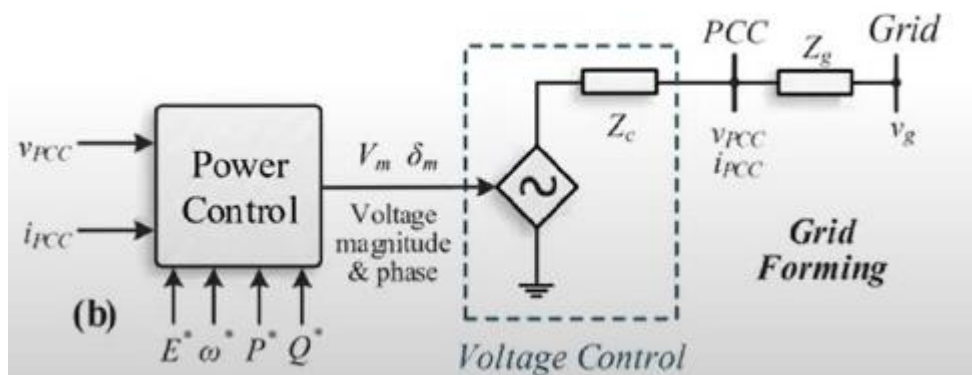
# EL ROL DEL GRID FORMING

Estudio de requerimientos señaló que para el período 2026-2030 una alternativa para proveer fortaleza es la tecnología GFM

- ❖ GFM fija internamente su referencia de voltaje
- ❖ Fuente de tensión con control de voltaje y frecuencia
- ❖ Mejor desempeño en el caso de BESS
- ❖ Se puede con Eólicas y Solares pero tienen sus complicaciones (variabilidad del recurso)

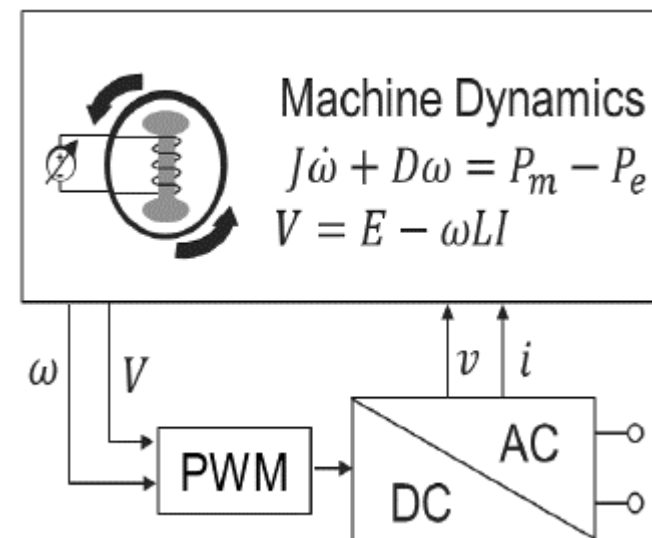
4

Avanzar en el desarrollo de un proyecto piloto para modelar, simular y probar la tecnología grid-forming en el laboratorio de simulación en tiempo real del Coordinador.



## Máquina Sincrónica Virtual

- ❖ GFM con un sistema de control que emula algunas cualidades de un generador síncrono
- ❖ Implementa las ecuaciones de oscilación dinámica de la máquina síncrona (Swing equations)
- ❖ Proporciona respuesta inercial (la constante de inercia  $H$  puede variarse como un parámetro de control más) → Proporciona una respuesta más prolongada y amortiguada ante fallas
- ❖ Proporciona estabilidad de tensión
- ❖ Limitada por las capacidades de sobrecarga de los inversores
- ❖ Puede estar sujetos a los mismos límites de estabilidad de una máquina síncrona

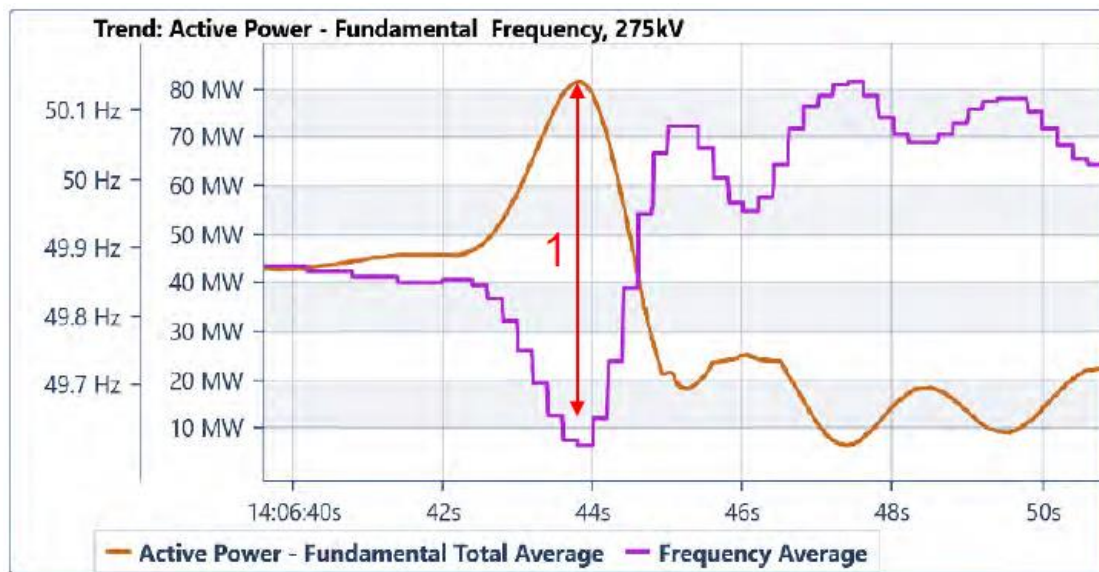


Fuente: EPRI Tutorial. Grid Forming Inverters. October 2020

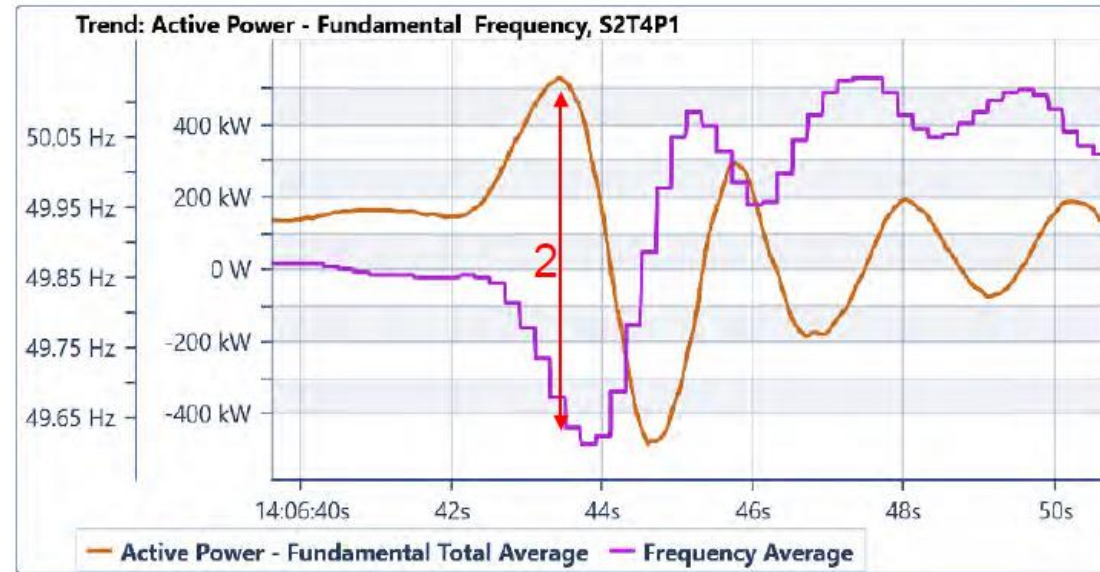
## Máquina Sincrónica Virtual – Inercia Sintética o Respuesta Sintética Inercial

- ❖ La respuesta inercial de un generador sincrónico entrega torque **en proporción directa al RoCoF que experimenta**
- ❖ **Respuesta Sintética Inercial:** respuesta controlada de un GFM que emula el intercambio de energía rotacional de una máquina síncrona con el sistema de potencia

Respuesta de potencia activa es máxima a la máxima desviación de frecuencia  
(respuesta de la planta completa en modo GFL)

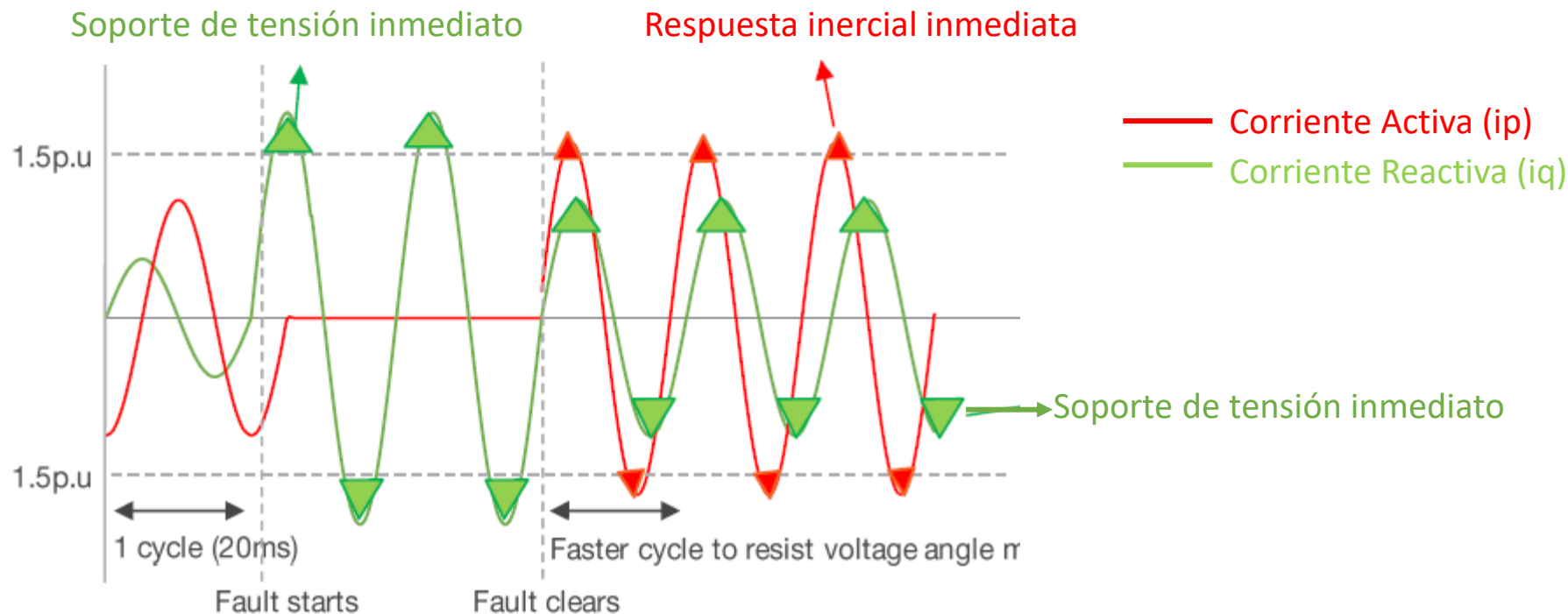


Respuesta de potencia activa es máxima al máximo RoCoF (2 de loa 296 inversores en modo GFM VMM o VSM)



## Máquina Síncrona Virtual – Estabilidad de Tensión

- ❖ VSM durante la falla puede entregar corriente respondiendo a la tasa de cambio del ángulo de fase (frecuencia) o la magnitud del cambio de tensión en el punto de conexión → Resiste a los cambios del sistema



No hay inyección de corriente activa durante la falla (se retiene al ángulo de fase)

Fuente: nationalgridESO. The potential operability benefits of Virtual Synchronous Machines and related technologies. April 2020

A vertical light streak with a bright white and blue glow at its center, extending from the top to the bottom of the text area, separating the CEN logo from the slogan.

SERVIMOS  
A **CHILE** CON  
**ENERGÍA**