

# El Papel Crucial de los Sistemas de Almacenamiento en la Transición Energética de Chile



**cigre**

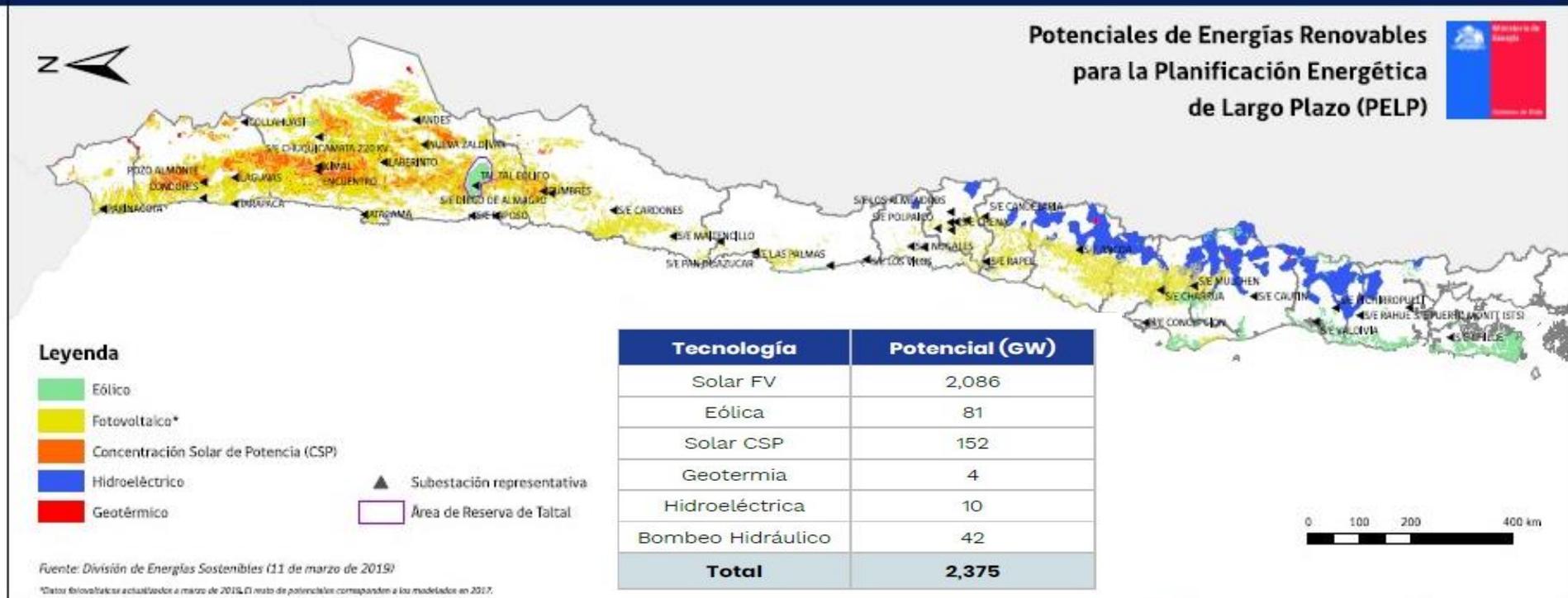
For power system expertise

Pedro Miquel Durán  
Director de Systepl Ingeniería y Diseños SpA  
Líder WG 6: CIGRE Chile

Marzo 2024

- Potencial Renovable
- Transición Energética
- Aplicaciones de Sistemas de Almacenamiento de Energía
- Cómo funcionan los sistemas eléctricos
- Sistemas de Almacenamiento en Distribución

## Potencial renovable en las regiones del Sistema Eléctrico Nacional

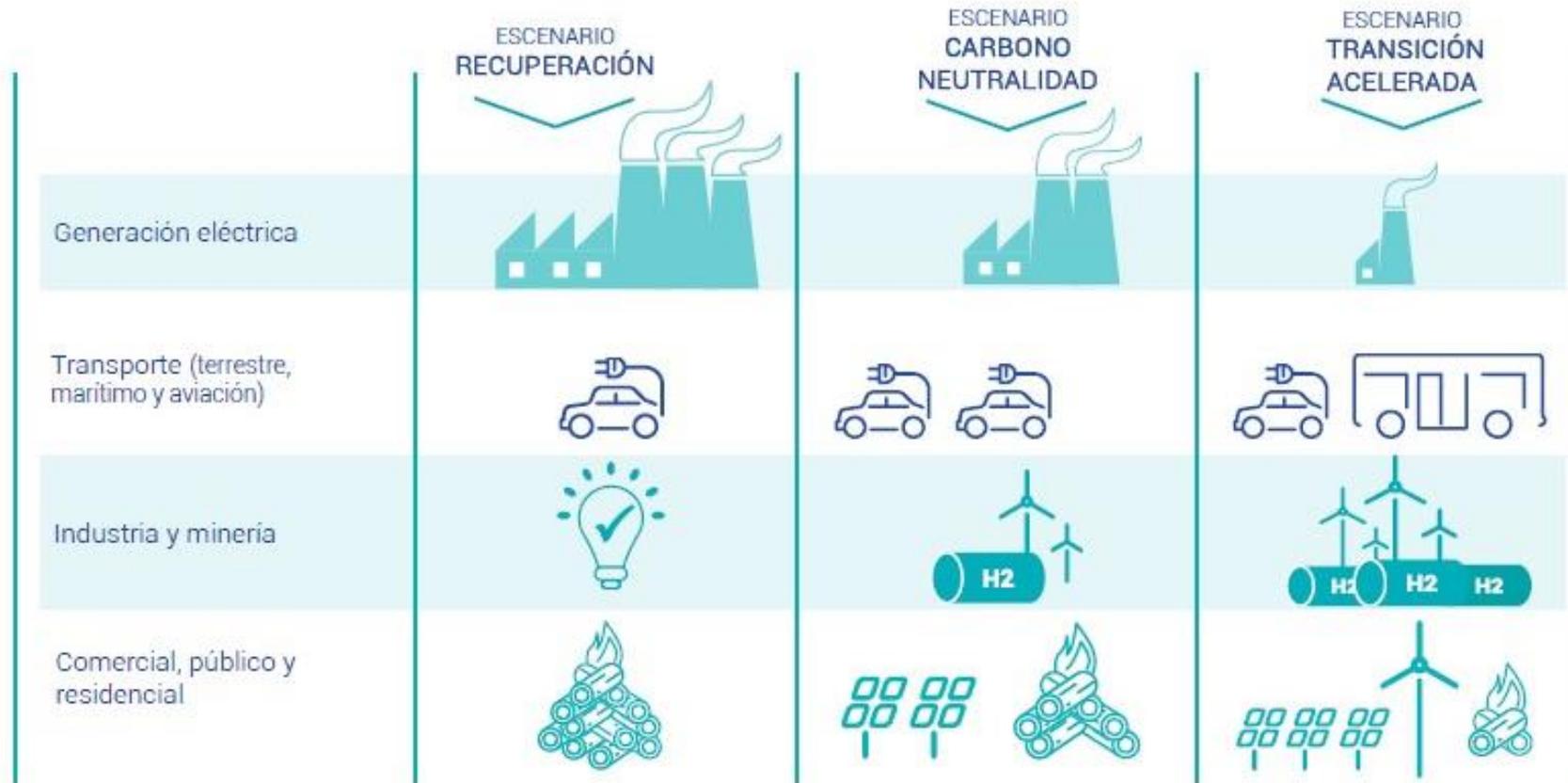


Chile posee un enorme potencial de energías renovables en su territorio, con una capacidad total que alcanza al menos **70 veces** la capacidad eléctrica actual del Sistema Eléctrico Nacional. Estos potenciales internalizan aspectos ambientales y territoriales a tener en cuenta, y la planificación energética orienta un desarrollo eficiente de proyectos renovables y la transmisión requerida para ello.

# Transición Energética

PELP 2023 -2027

## Objetivo: Carbono Neutralidad antes de 2050



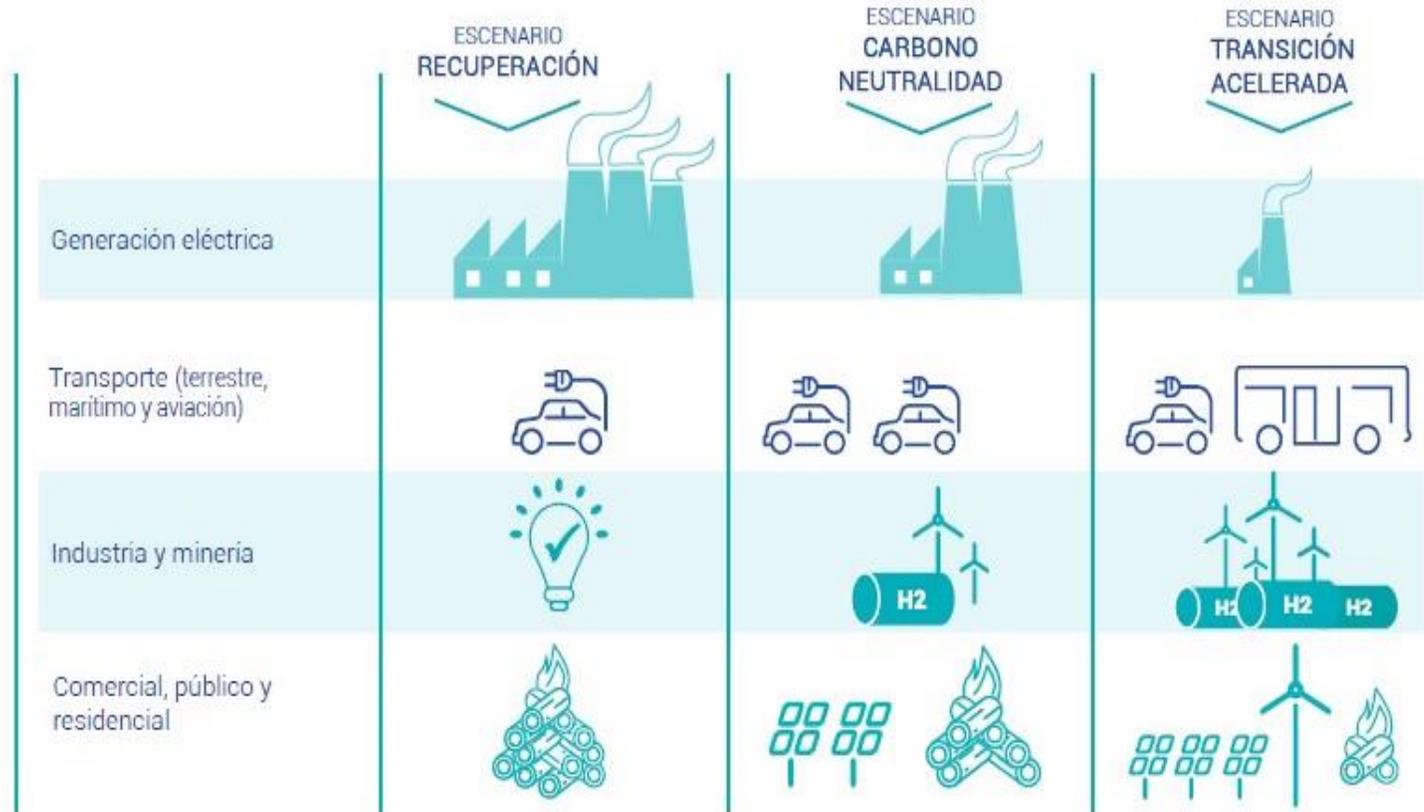
Fuentes de energías limpias reemplazan a los combustibles fósiles.

**El agua  
el sol  
y el viento**

PELP 2023 -2027

## La Energía Eléctrica es Actor Principal más no el único

Retiro de  
Combustibles  
Fósiles

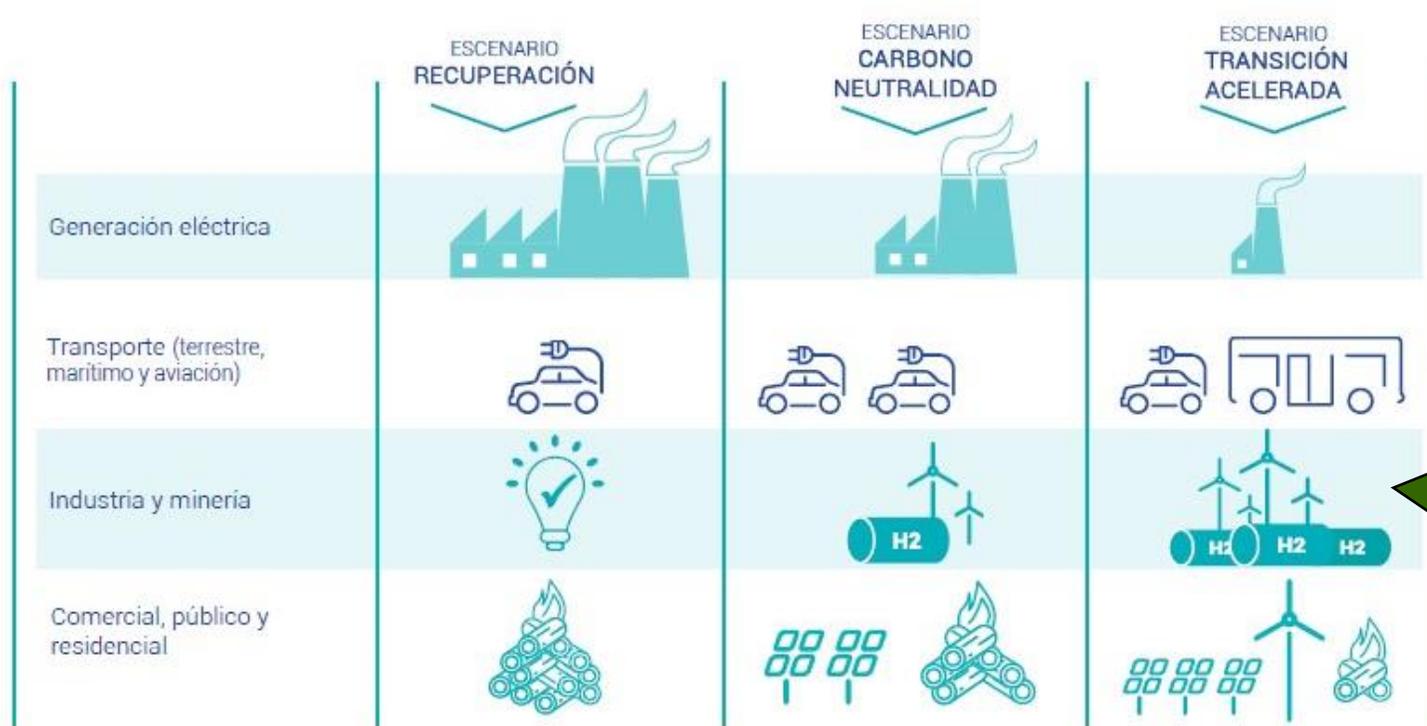


La  
electricidad  
como  
proveedor de  
energía para  
movimiento,  
frío, calor,  
iluminación y  
más

# Transición Energética

## Descarbonización en generación

Reemplazo de generación térmica de fuente primaria fósil por generación limpia y sostenible **Antes de 2040**

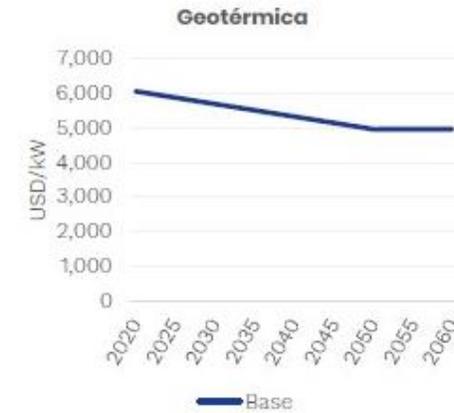
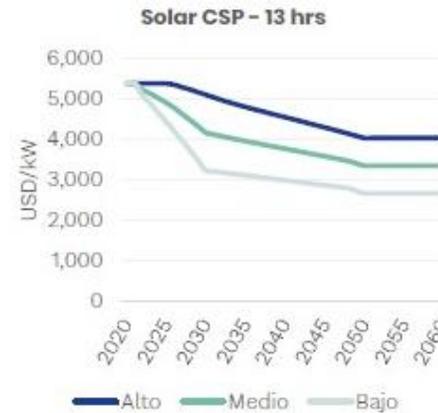
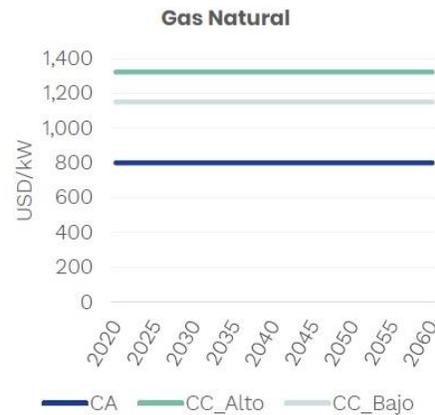
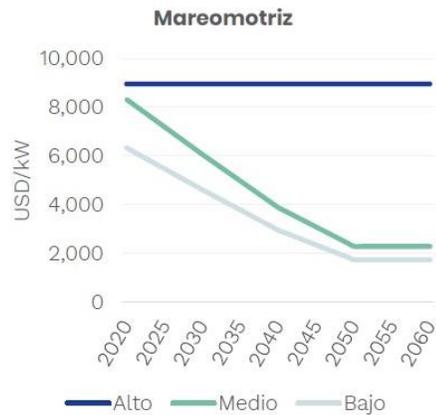
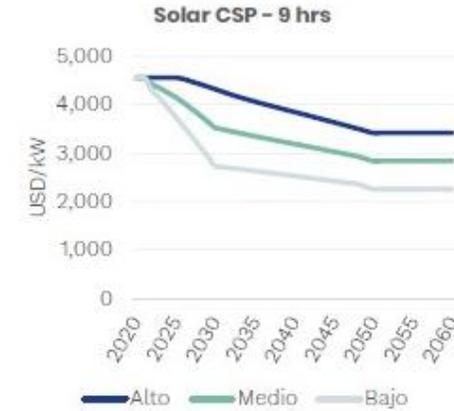
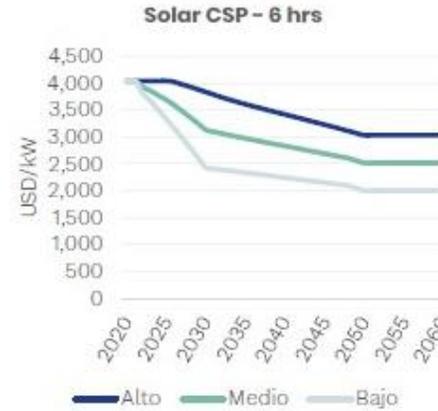
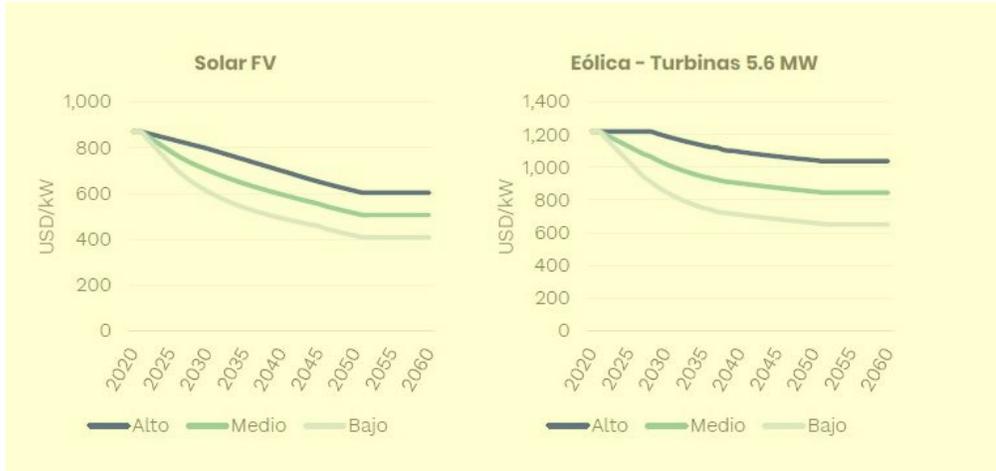


Incremento sustantivo de plantas generadoras limpias impulsadas por Sol, viento y agua:

**Antes de 2050**

- Electromovilidad
- Minería e Industria
- Hidrógeno Verde
- Comercial público y residencial

# Tecnologías de Generación

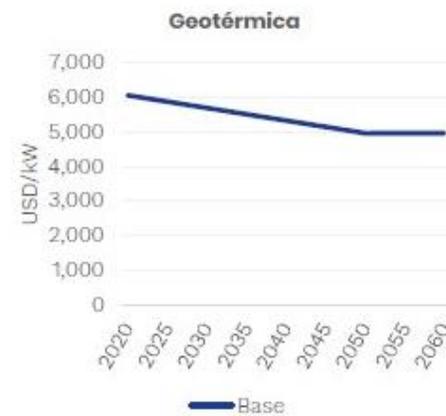
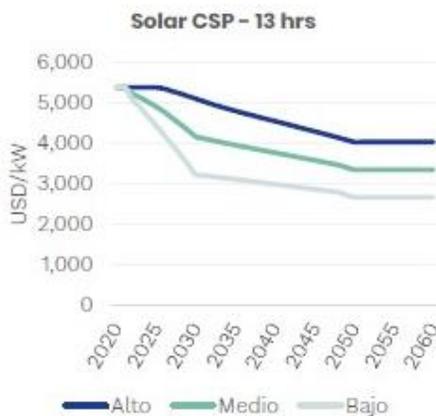
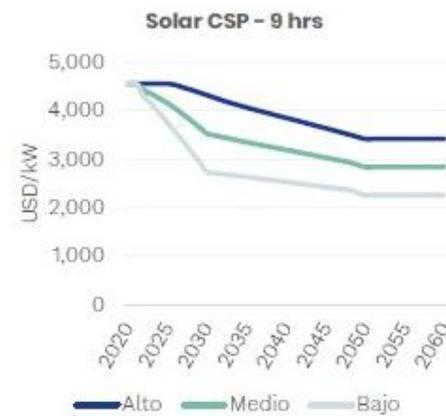
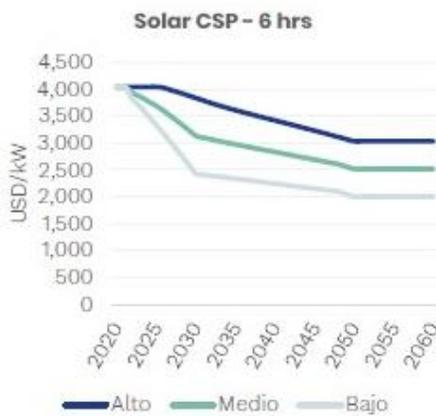
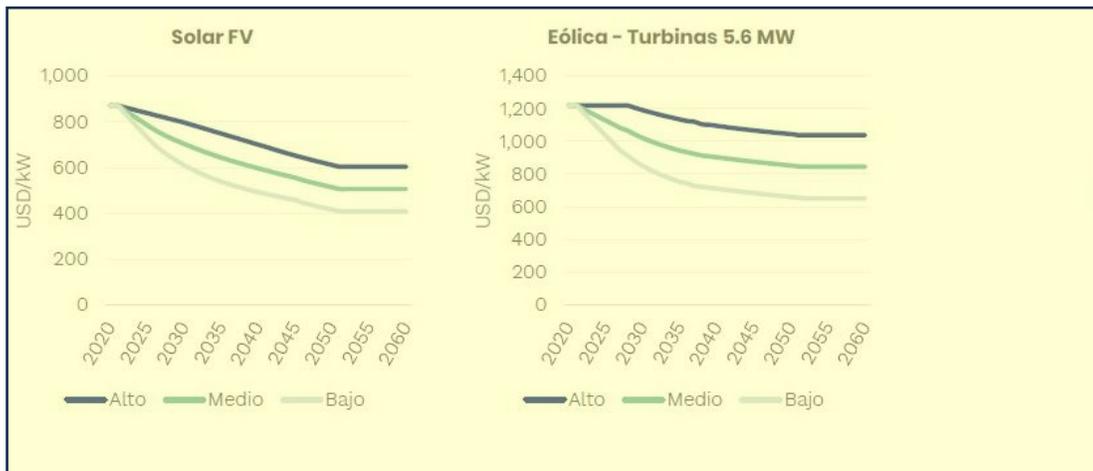


Fuente: PELP 2023-2027 : NREL  
IEA

# Tecnologías de Almacenamiento



Fuente PELP 2023-2027 : NREL  
IEA



**1,5 x900 + 1500  
=2850 (fp 1/3)  
US\$/KW**



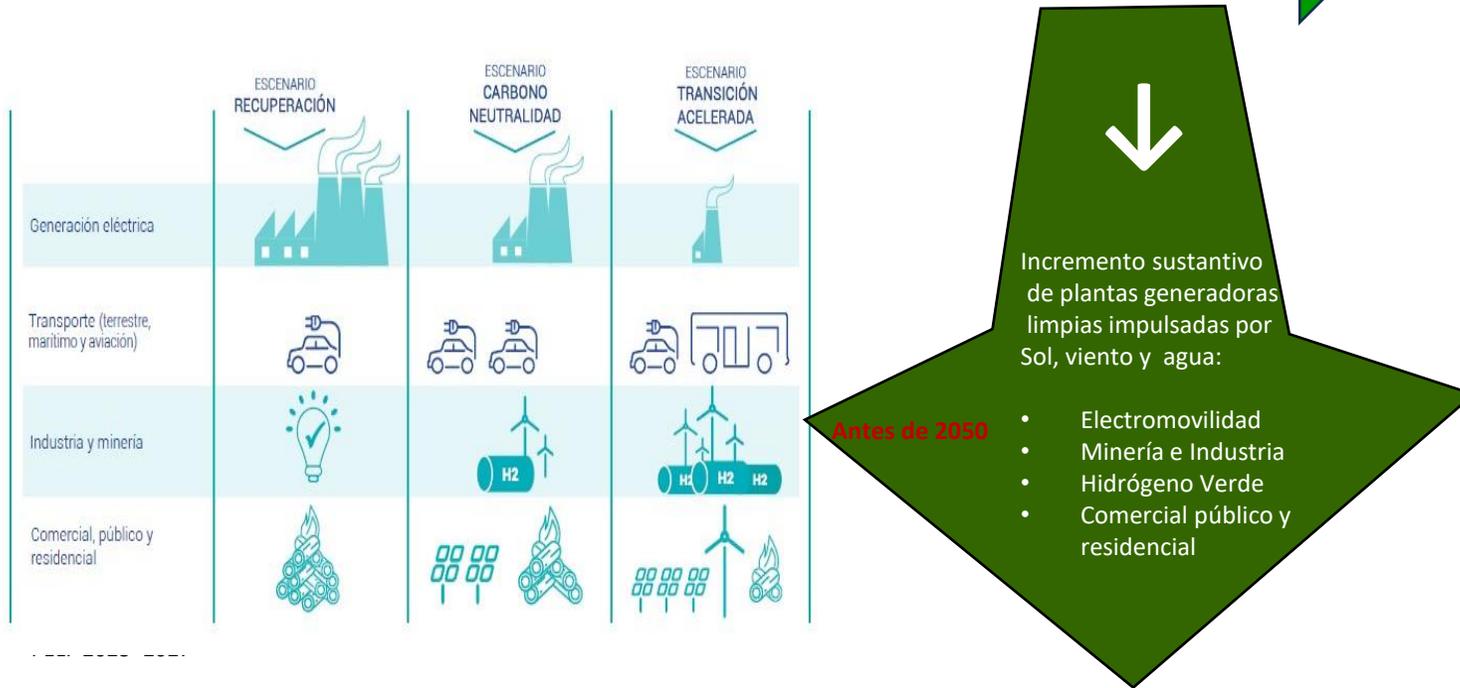
**1,5 x1200 + 1500  
=3900 (fp 1/3)  
US\$/KW**

**1,25x1200 + 900  
= 2400 (fp 40%)  
US\$/KW**

## Transición en generación

Reemplazo de generación térmica de fuente primaria fósil por generación limpia y sostenible

**Antes de 2040**



Condición necesaria pero no suficiente, porque la generación y la demanda no son temporalmente coincidentes.

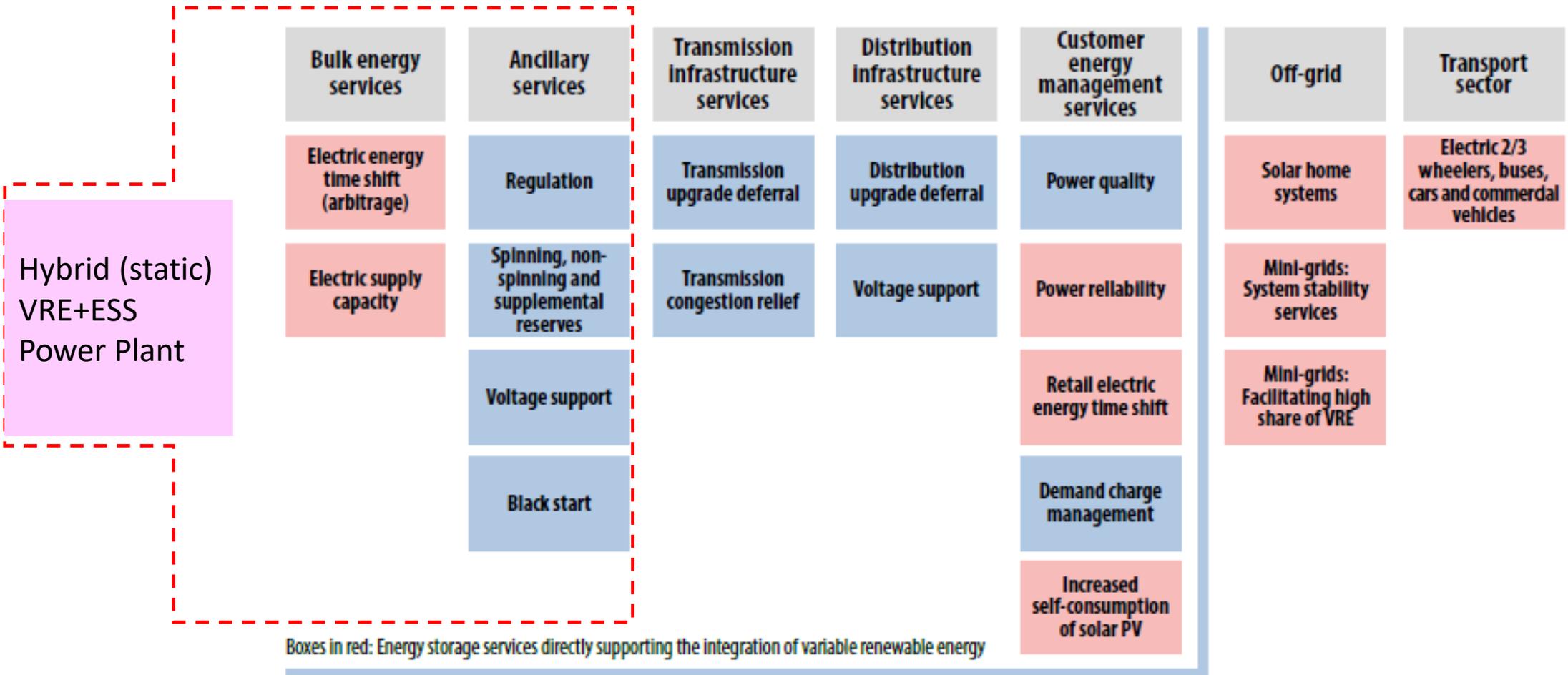
¿qué hacemos de noche?

La respuesta:

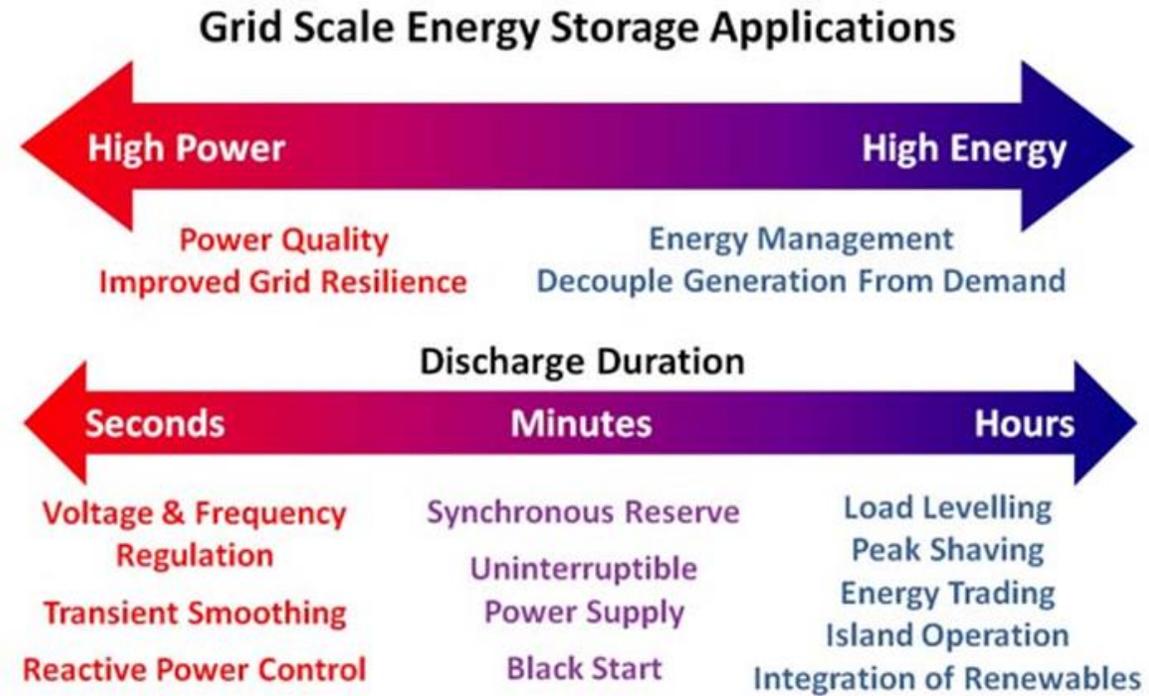
**Sistemas de almacenamiento de energía**



# ESS en Sistemas Eléctricos de Potencia



# Aplicaciones de SAE (ESS)



Fuente <https://mpoweruk.com>



# Cómo funcionan los sistemas eléctricos

El principio general es Oferta = Demanda

Generación y demanda en distintos puntos geográficos : Necesidad de Sistemas de Transmisión

- Aporte de potencia activa:
  - Generadores síncronos, asíncronos y estáticos
  - BESS
- Aporte/absorción de potencia reactiva
  - Generadores síncronos
  - Bancos de condensadores y estáticos
  - Reactores
  - Compensadores estáticos SVC Statcom
  - Líneas de transmisión y Transformadores
  - BESS
- Potencia de arranque (Black start)
  - BESS

- Desequilibrios de generación/carga
  - Reserva en giro
  - Desprendimiento de carga
  - Reducción de generación
  - BESS
- Ocurren fallas de alta corriente (cortocircuitos)
  - Protecciones/interruptores
- Desempeño dinámico complejo:
  - Estabilidad transitoria
  - Control de tensión
    - BESS

# Cambios causados por la transición

**T<sub>0</sub>**

Reemplazo de unidades térmicas por ERV

**T<sub>f</sub>**

**Tecnología dominante**  
Máquinas rotatorias

**Conversión:**

**Térmica**

- Carbón
- Gas
- Petróleo

**Hidráulica**

Mecánica

Eléctrica AC

Adaptación de  
condiciones de  
suficiencia y seguridad

**Tecnología presente**  
Máquinas rotatorias  
**Conversión:**

**Térmica**

- Concentración de potencia solar
- Calor acumulado en baterías de Carnot

**Hidráulica**

**Eólica**

Hidrógeno verde

Mecánica

Eléctrica AC

**Tecnología presente**  
Máquinas estáticas

**Conversión:**

**PV: Radiación solar**

Celda de Combustible: eH<sub>2</sub>

Electrónica de potencia

Eléctrica AC

# Cómo funcionan los sistemas eléctricos

## ...(Servicios que permiten los generadores)

- Potencia
- Energía
- Inercia
- Corriente de Cortocircuito

SSCC	Categoría de SSCC
Control de Frecuencia	Control Rápido de Frecuencia (CRF)
	Control Primario de Frecuencia (CPF)
	Control Secundario de Frecuencia (CSF)
	Control Terciario de Frecuencia (CTF)
	Cargas Interrumpibles (CI)

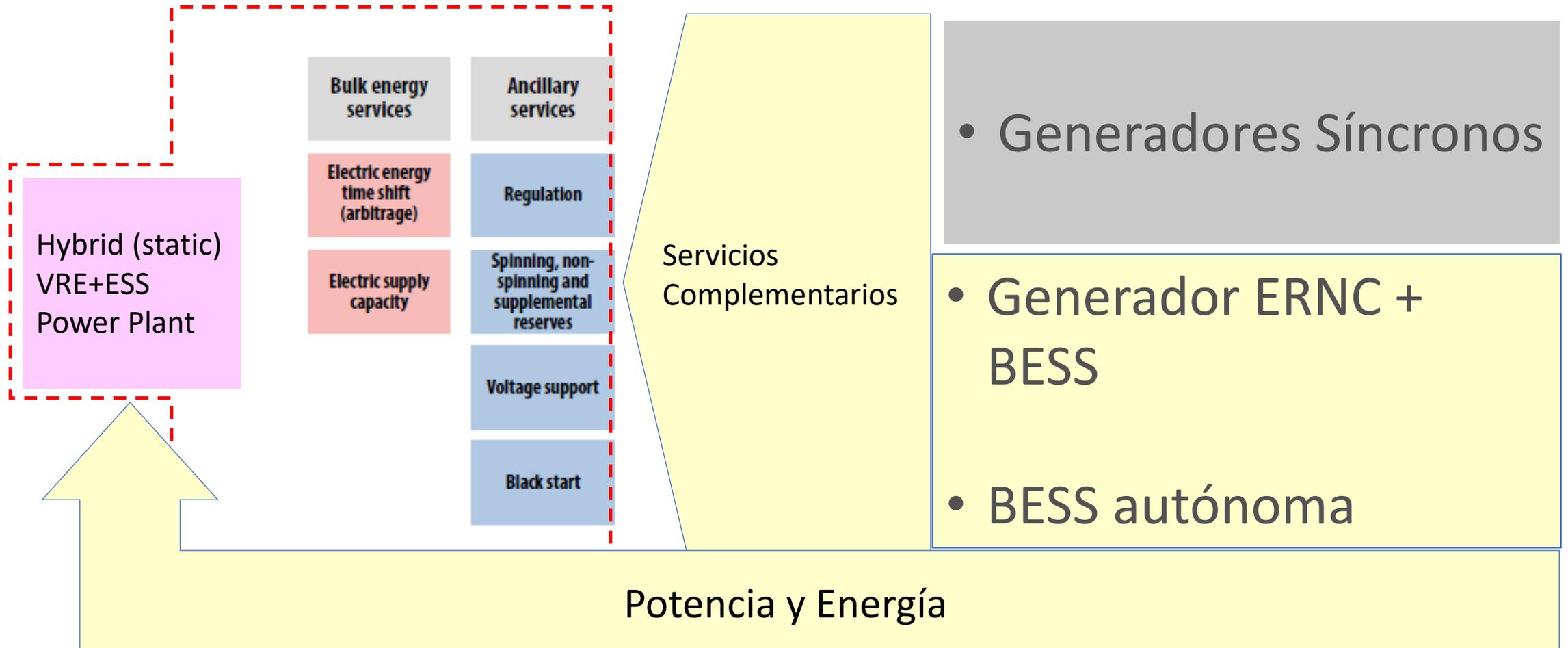
SSCC	Categoría de SSCC
Control de Tensión	Control de Tensión (CT)
Control de Contingencias	Desconexión de Carga
	Desconexión de Generación
	Plan de Defensa contra Contingencias (PDC)
Plan de Recuperación de Servicio	Partida Autónoma (PA)
	Aislamiento Rápido (AR)
	Equipos de Vinculación (EV)

Generador Convencional

Generador ERNC

# Cómo funcionan los sistemas eléctricos

...(Servicios que permiten los generadores y los BESS)



# Cómo funcionan los sistemas eléctricos (...rampas)

Efecto de rampas al ocaso en presencia de Generación PV relevante:

$$Gx(\text{rotatoria, convencional}) + Gx(\text{CSP}) = \text{Demanda} + \text{Pérdidas} - Gx(\text{eólica}) - Gx(\text{PV}) \mp \text{DEMANDA NETA}$$

Cuando existe GEV:

Gx(programada, convencional)

+ Reserva de Gx(convencional)

+ Generación temporal

+ Almacenamiento

=

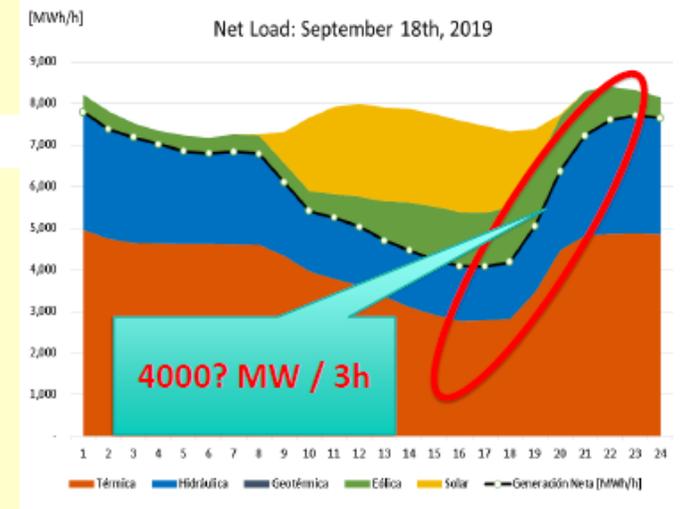
Hidro, Gas, Otras

= Demanda(bruta, programada)

+ Variable aleatoria(demanda)

- Gx(fuente variable)

-- Variable aleatoria(fuente variable)



Las unidades carboneras son máquinas rotatorias de alta inercia.

Si éstas se retiran de servicio disminuye la inercia del sistema

La repuesta dinámica de frecuencia y la estabilidad dinámica se deterioran

**Corto Plazo: Condensadores Síncronos proveen la inercia que se retira junto con las centrales carboneras**

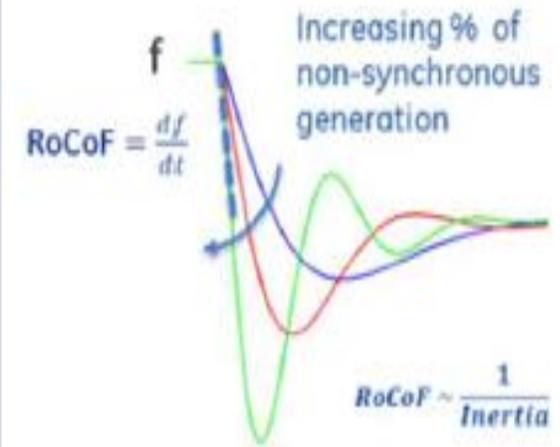
$$2 E_{cin} \frac{df/fo}{dt} = P_{mot} - P_{elec}$$

Control

$$2 H \frac{df/fo}{dt} = \frac{P_{mot} - P_{elec}}{S_{base}}$$

**Ecuación De movimiento de un generador eléctrico**

J :Momento de Inercia  
 f : frecuencia eléctrica  
 E<sub>cin</sub> : Energía cinética  
 P<sub>mot</sub>: potencia motriz  
 P<sub>elec</sub>: potencia eléctrica  
 H: Constante de Inercia





# Cómo funcionan los sistemas eléctricos AC (cortocircuitos)

En la red ocurren fallas (cortocircuitos) que representan riesgo para las personas y los equipos eléctricos.

Los sistemas se protegen mediante elementos que funcionan detectando altas magnitudes de corriente.

Cuando ocurre un cortocircuito circulan corrientes elevadas en la red:

**¿Quiénes las aportan?**

Las máquinas rotatorias:

- A permanencia las síncronas.
- Transitoriamente las de inducción.

Las máquinas estáticas no lo hacen porque la electrónica de potencia no admite sobre corrientes significativas.

Condensador Síncrono

**¿Quiénes las detectan?**

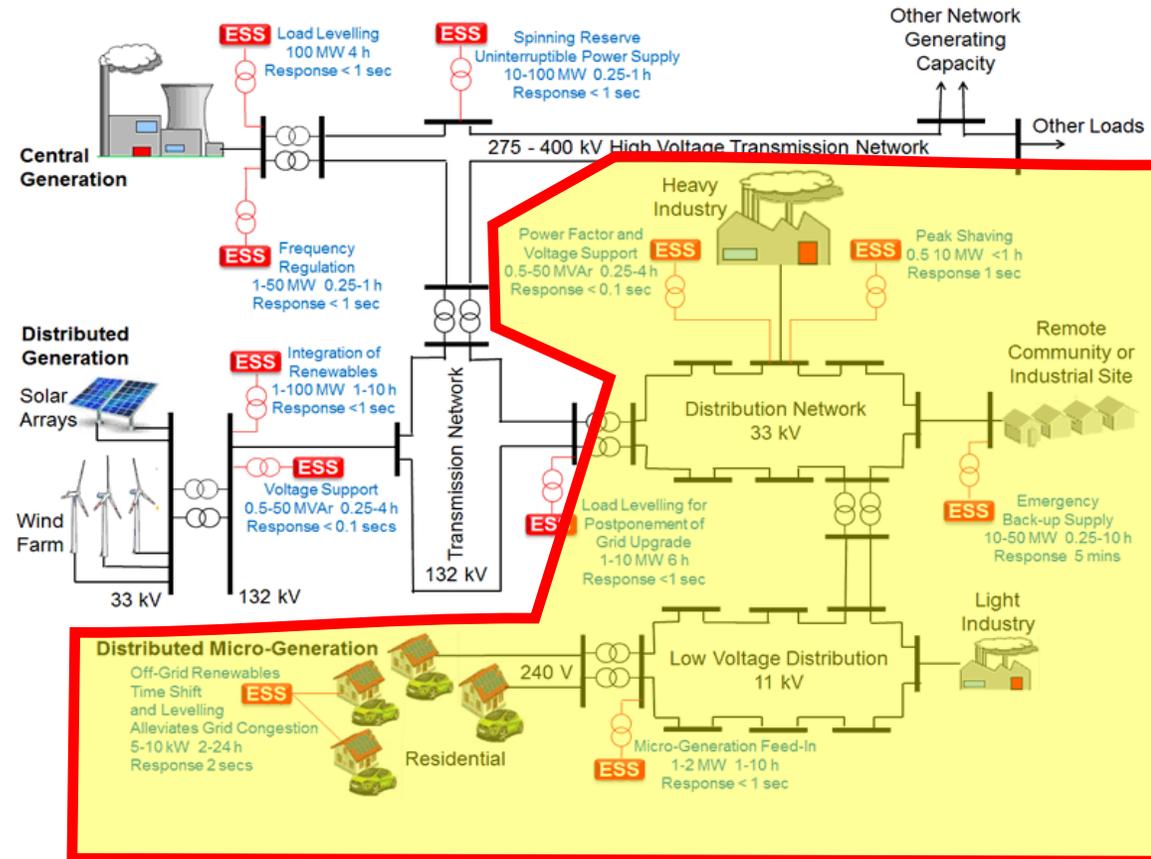
Las protecciones de:

- Sobrecorriente de fase y residual direccional y adireccional.
- De distancia con o sin esquemas de teleprotección
- Otras

**Si se retiran las máquinas síncronas, disminuye el nivel de cortocircuito y las protecciones tienen problemas para operar**

# Sistemas de Almacenamiento en Distribución

## Grid Energy Storage Systems (ESS) and Applications

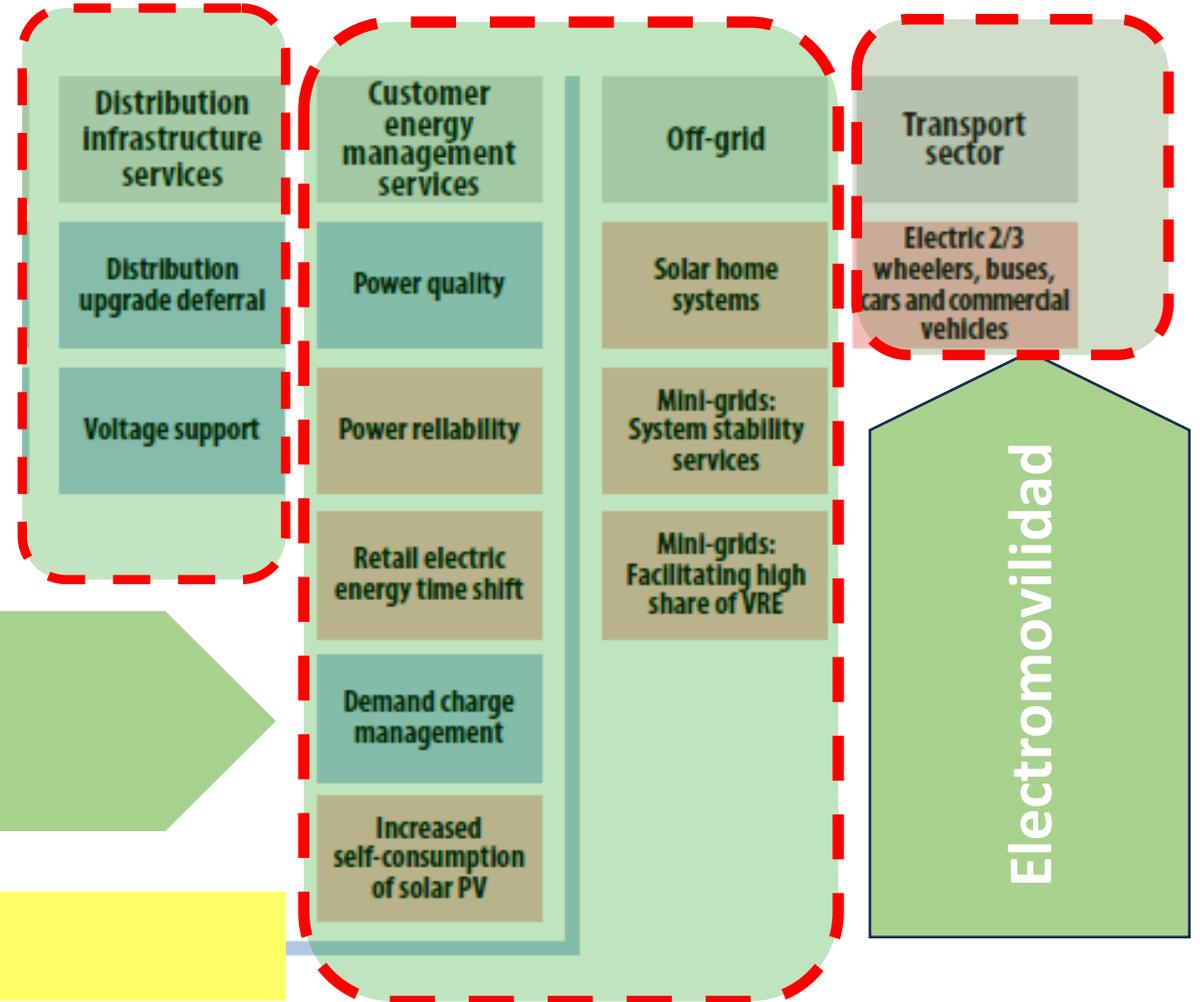


# BESS en Distribución

Redes  
Generación  
Calidad de Servicio

Comercialización

Distribución: WG 6 2023-2024



# Comité Chileno



**cigre**

For power system expertise





**Pedro Miquel Durán**

Ingeniero Civil Electricista de la Universidad de Chile, con 46 años de experiencia profesional

Actualmente es Director de Systep Ingeniería y Diseños SpA. En los últimos 18 años ha liderado más de 400 proyectos en:

- Planificación de Sistemas de transmisión
- Estudios eléctricos
- Estudios tarifarios de Distribución y Transmisión
- Definición de normas técnicas y reglamentos
- Arbitrajes
- Contratos de suministro

Previo a Systep sus actividades se desarrollaron en áreas técnicas de diversas empresas, tales como Endesa, Chilectra, Comisión Nacional de Energía y diversas empresas consultoras.

Profesor de la Cátedra de Planificación de Sistemas Eléctricos de Potencia  
Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Chile