

# Seminario Nacional CIGRE Colombia

Máquinas Eléctricas Rotativas 2022

**Generación Sostenible, Sistemas de Almacenamiento y Electrónica de Potencia para la Transición Energética**

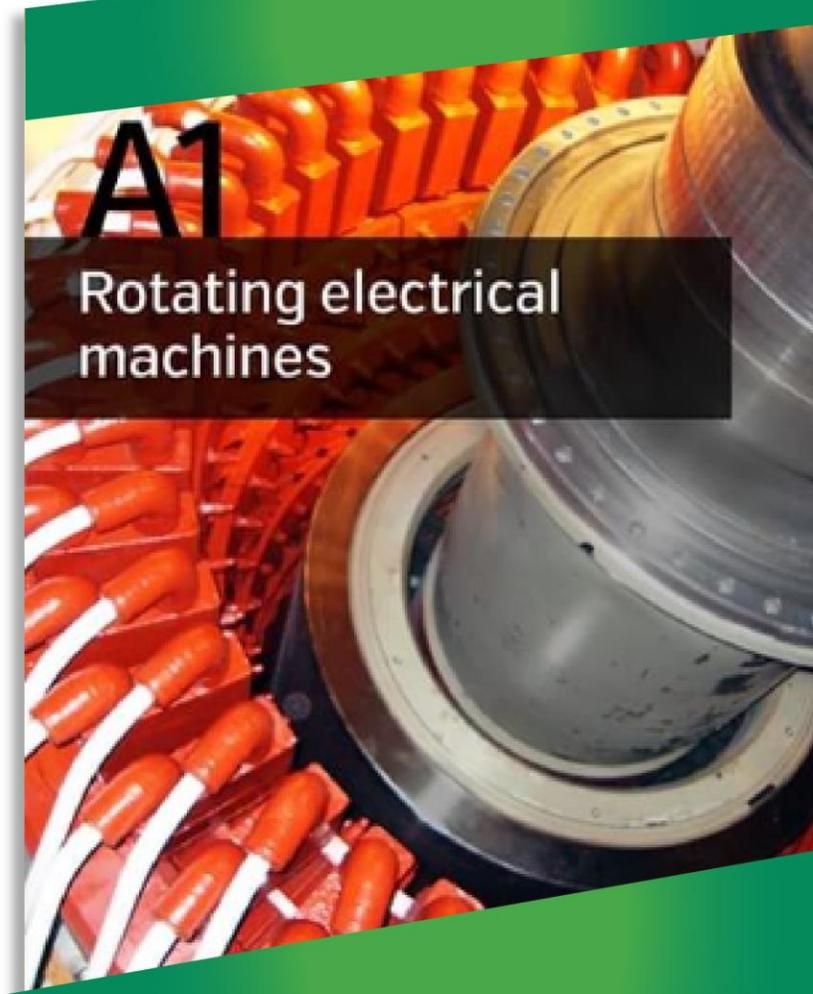
Pedro Miquel D.  
Systep Ingeniería y Diseños S.A.  
WG 6.2 Sistemas de Almacenamiento – Cigré Chile

10 de Noviembre de 2022

Organizan:



Apoya:



# Información personal

- Pedro Miquel D.
- pmiquel@systep.cl
- +562 22320501
- Systep Ingeniería y Diseños S.A.

Organizan:



Apoya:



# Temario



- 1 Contexto
- 2 Cómo funcionan los sistemas eléctricos
- 3 Sistemas de Almacenamiento de Energía
- 4 Estado del Arte

# Almacenamiento de Energía en SEP



## 1. CONTEXTO

# El Panorama de Chile (... los recursos)

**>1.800  
GW**

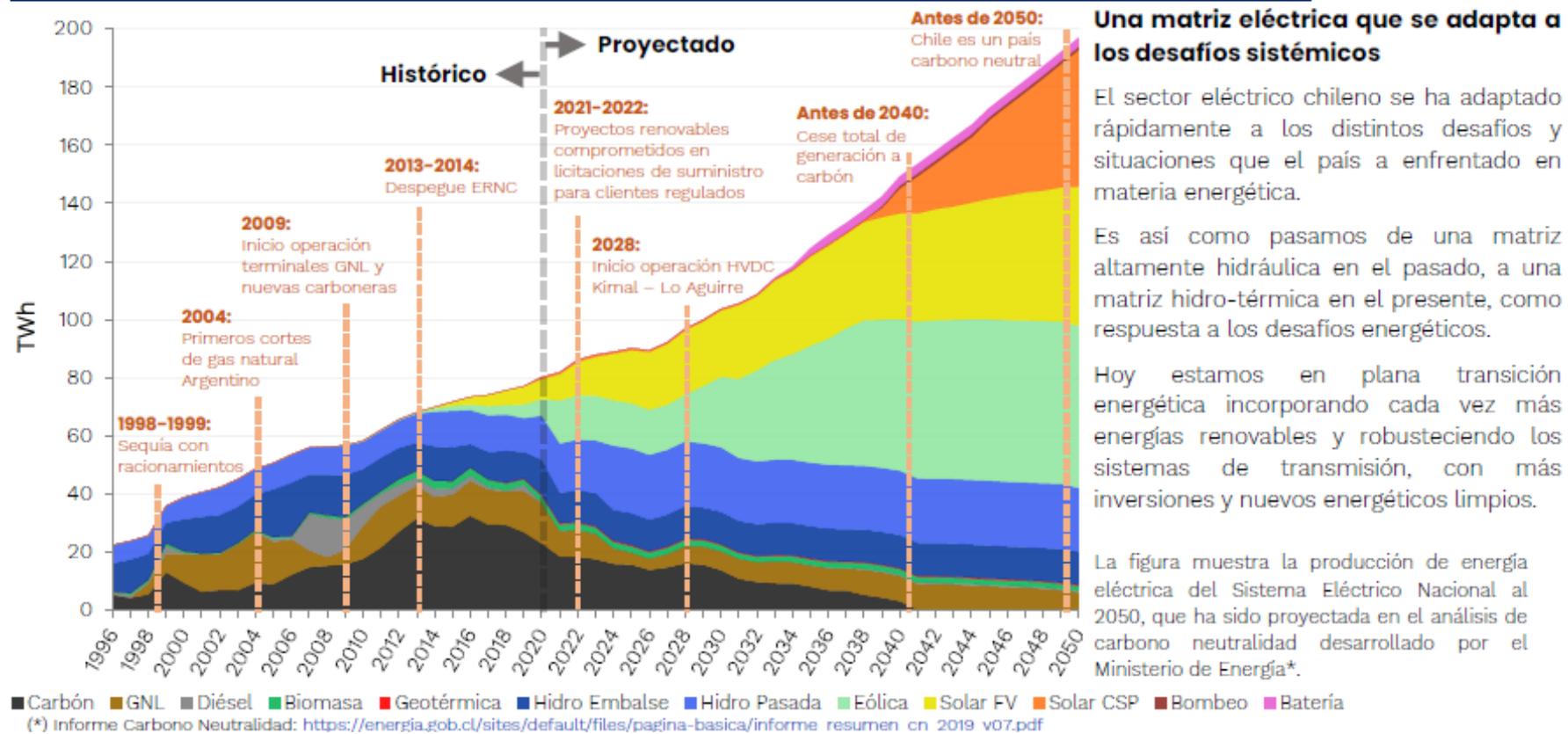
Sin cuantificar los recursos del océano que también podemos Aprovechar

**¡¡ Recursos renovables para abastecer la demanda por más de un siglo!!**



# El Panorama de Chile (...en el futuro)

## Registro y proyección de la generación eléctrica en Chile



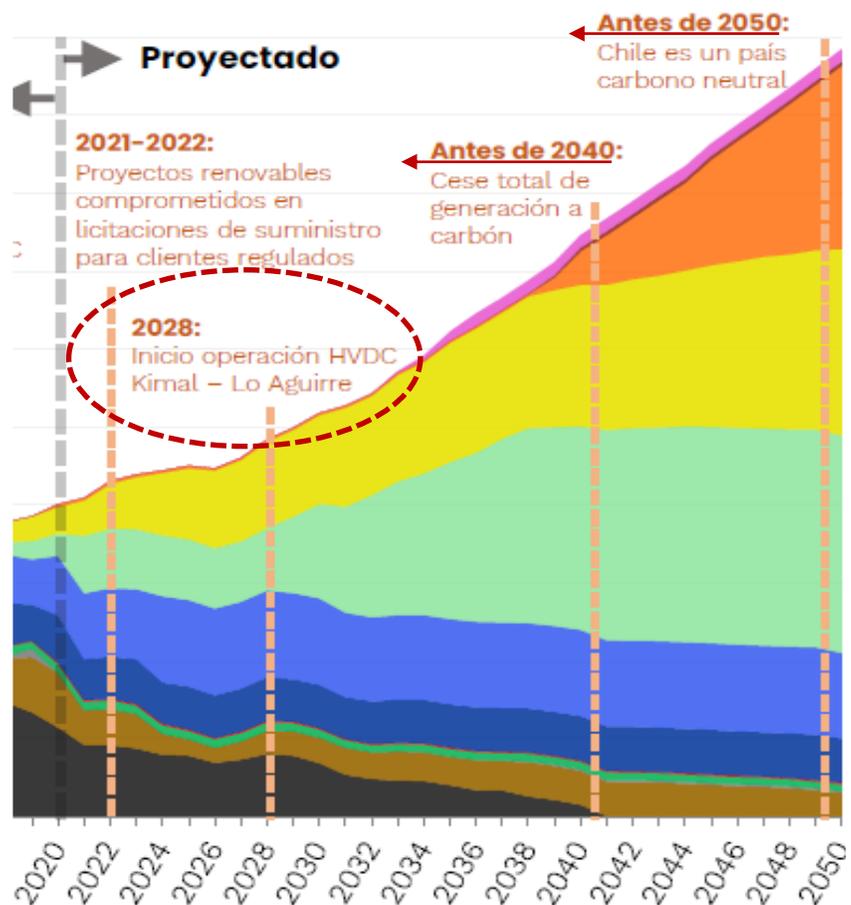
# El Panorama de Chile (...descarbonización)



Unidad	tipo	Inercia [MVA*s]	Unidad	tipo	Inercia [MVA*s]	Unidad	tipo	Inercia [MVA*s]	P_Máx Dinámica [MW]
Antuco U2	hidro	752.0	Angostura U1	hidro	609.5	Ralco U1	hidro	1193.9	381.6
ANG1	carbón	1584.0	Angostura U2	hidro	609.5	Ralco U2	hidro	1193.9	381.4
El Toro U1	hidro	302.6	Ralco U1	hidro	1193.9	Antuco U2	hidro	752.0	152.0
El Toro U2	hidro	302.6	Ralco U2	hidro	1193.9	Pehuenche U1	hidro	1159.0	275.0
Rapel U1	hidro	304.0	El Toro U1	hidro	302.6	Pehuenche U2	hidro	1159.0	275.1
Rapel U2	hidro	304.0	El Toro U2	hidro	302.6	Guacolda U1	carbón	762.5	150.0
Guacolda U3	carbón	885.2	El Toro U3	hidro	302.6	Guacolda U2	carbón	762.5	150.0
Guacolda U4	carbón	885.2	El Toro U4	hidro	302.6	CTA	carbón	1134.7	186.7
Guacolda U5	carbón	762.5	Pangue U1	hidro	924.0	CTH	carbón	1135.7	186.7
CCH1	carbón	1273.8	Pangue U2	hidro	924.0	U16	gas	3065.0	421.8
CCH2	carbón	1273.8	CCH1	carbón	1273.8				
			CCH2	carbón	1273.8				
			ANG1	carbón	1584.0				
			ANG2	carbón	1584.0				

- Sacar de servicio a las unidades carboneras implica:
  - Disminuir gases de efecto invernadero.
  - Retirar unidades de bajo costo de operación y alto factor de planta.
  - Retirar unidades de alta inercia

# El desafío es la transición

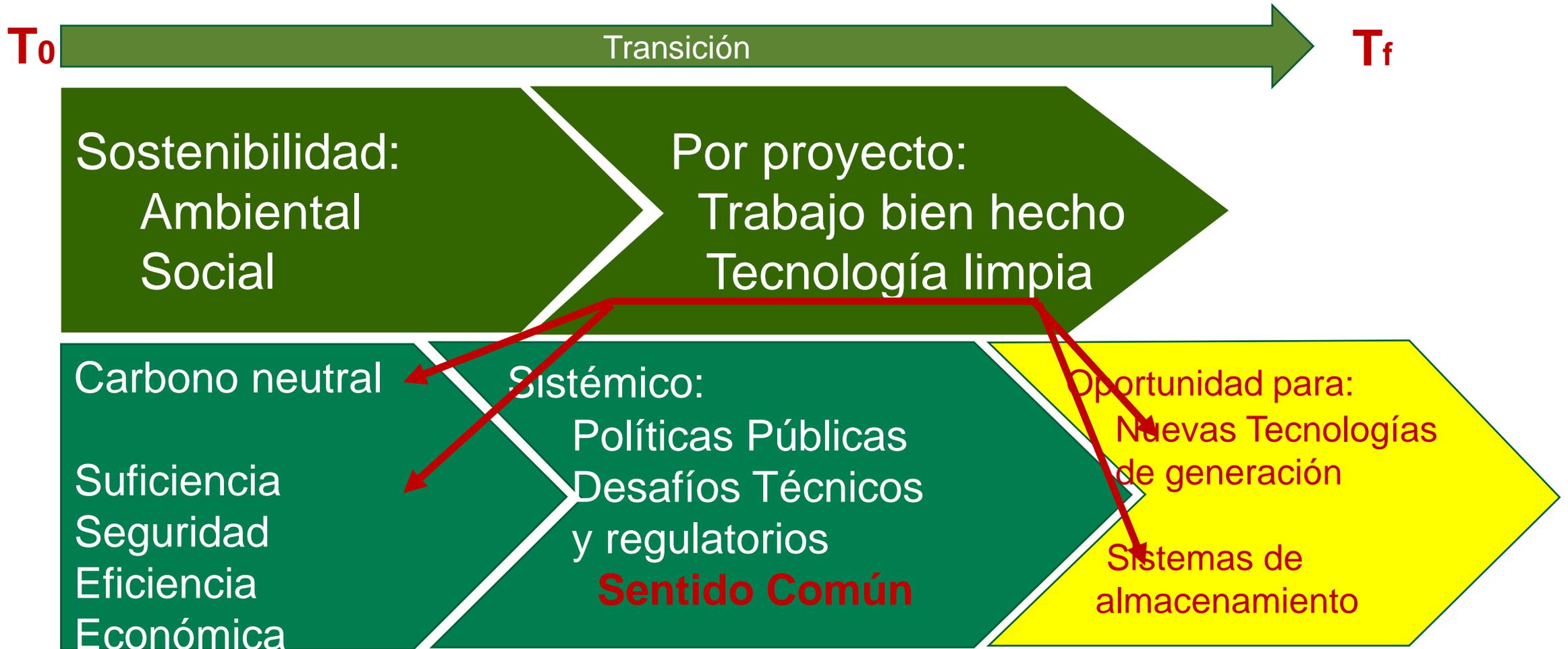


El futuro al que aspiramos es conocido y compartido

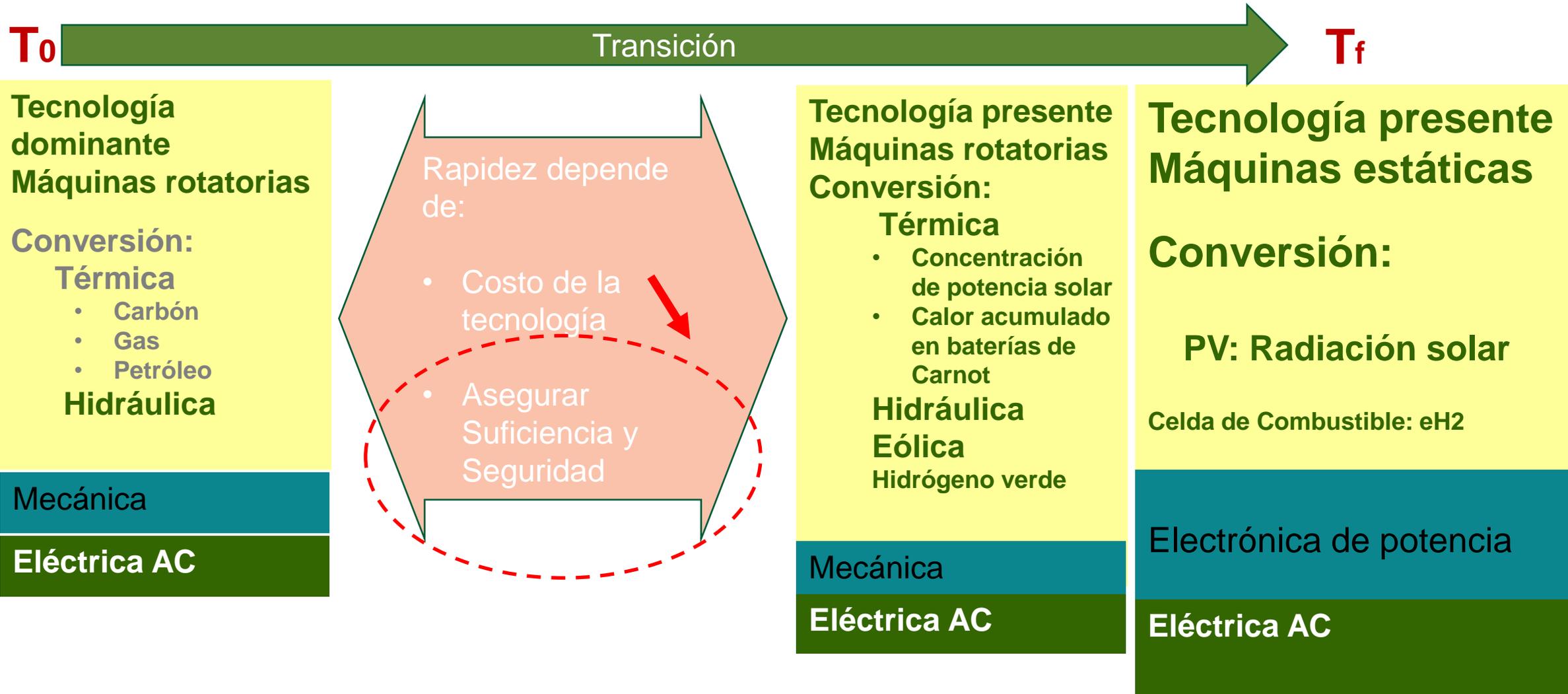
El desafío es la transición desde la situación actual al futuro que se quiere alcanzar, responsablemente:

- Qué porcentaje de Energías Renovables
- Retirar de servicio las centrales térmicas
  - Carbón
  - Gas
  - Diesel
- Qué porcentaje de REV
- Nuevas tecnologías
- Cuando (cuanto antes mejor?)

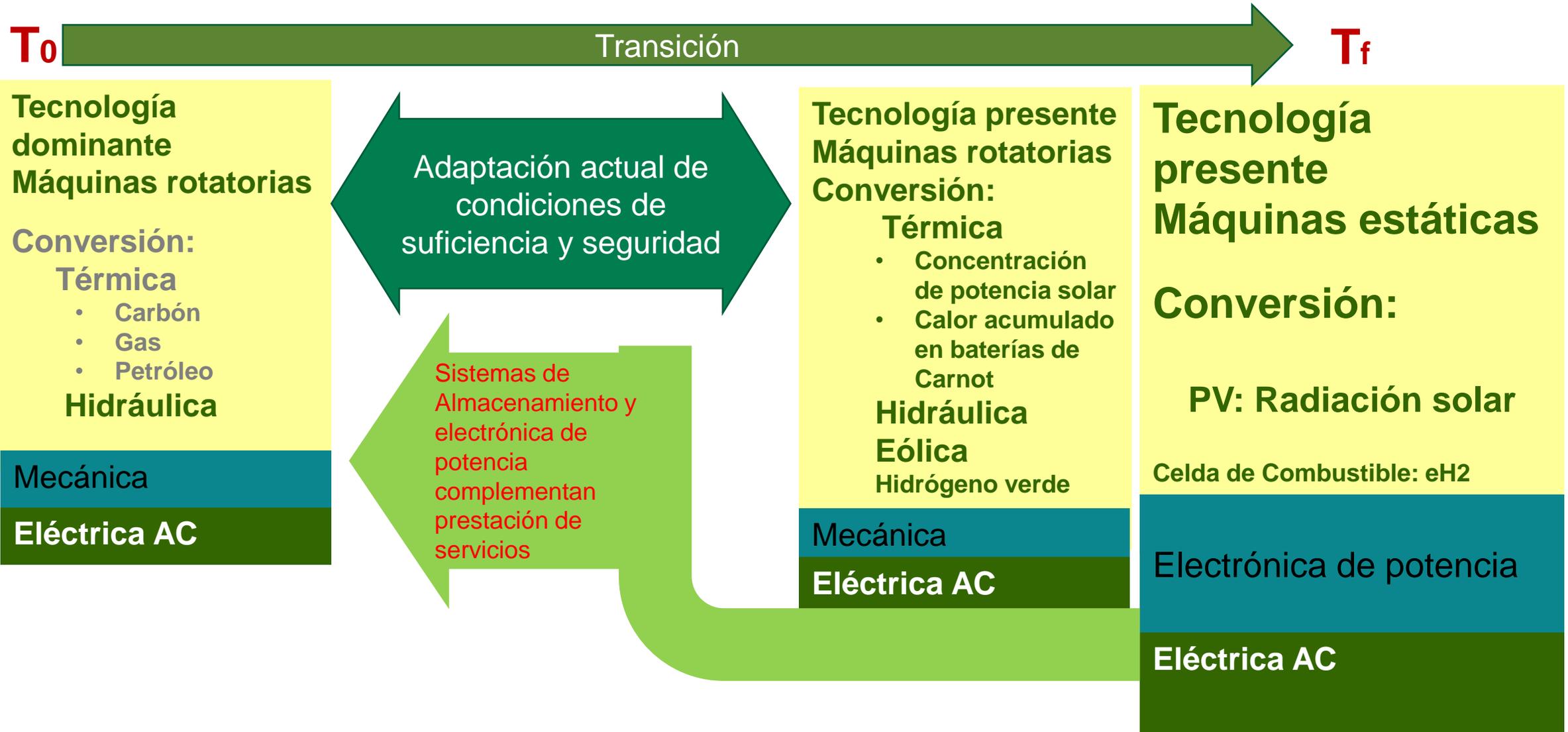
# Principales Desafíos (...de la transición)



# Principales Desafíos (...de la transición)



# Principales Desafíos (...adaptación a la realidad)



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

Transición

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

**Tecnología dominante**  
**Máquinas rotatorias**

**Conversión:**

**Térmica**

- Carbón
- Gas
- Petróleo

**Hidráulica**

Mecánica

Eléctrica AC

Adaptación actual de condiciones de suficiencia y seguridad

Sistemas de Almacenamiento y electrónica de potencia complementan prestación de servicios

**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

# Almacenamiento de Energía en SEP



## 2. EQUILIBRIO GENERACIÓN DEMANDA

# Cómo funcionan los sistemas eléctricos AC (reservas)



El principio general es oferta = demanda (conservación de energía, no economía)  
 $Gx(\text{rotatoria}) + Gx(\text{estática}) \pm \text{Almacenamiento} = \text{Demanda} + \text{Pérdidas}$

Reescribiendo la ecuación y temporalmente retirando el almacenamiento:

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

En el escenario convencional:

$$Gx(\text{real}) = \text{Demanda}(\text{bruta, programada}) + \text{Variable aleatoria}(\text{demanda})$$

$$Gx(\text{programada}) + \text{Reserva de } Gx = \text{Demanda}(\text{bruta, programada}) + \text{Variable aleatoria}(\text{demanda})$$

Cuando existe GEV:

$$Gx(\text{programada, convencional}) + \text{Reserva de } Gx(\text{convencional}) \pm \text{Almacenamiento} = \text{Demanda}(\text{bruta, programada}) + \text{Variable aleatoria}(\text{demanda}) - Gx(\text{fuente variable}) - \text{Variable aleatoria}(\text{fuente variable})$$

# Cómo funcionan los sistemas eléctricos AC (rampas)



El principio general es oferta = demanda (conservación de energía, no economía)  
 $Gx(\text{rotatoria}) + Gx(\text{estática}) \pm \text{Almacenamiento} = \text{Demanda} + \text{Pérdidas}$

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

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

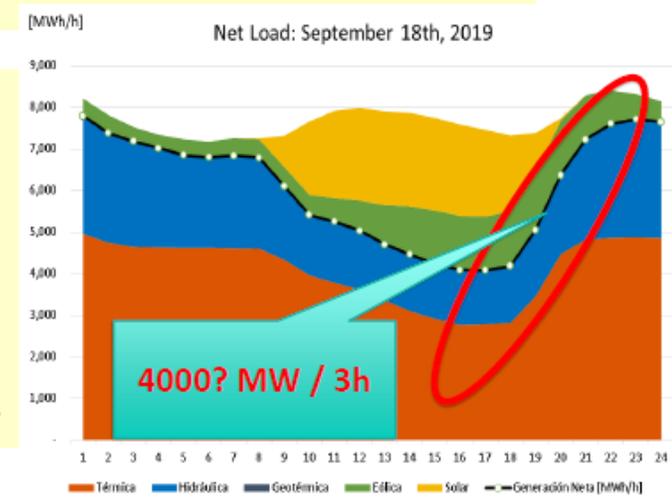
Quando existe GEV:

$Gx(\text{programada, convencional})$   
 + Reserva de  $Gx(\text{convencional})$   
 + **Generación temporal**  
 + Almacenamiento

=

Hidro, Gas, Otras

= Demanda(bruta, programada)  
 + Variable aleatoria(demanda)  
 -  $Gx(\text{fuente variable})$   
 -- Variable aleatoria(fuente variable)



# Cómo funcionan los sistemas eléctricos AC (...frecuencia y estabilidad)



El principio general es oferta = demanda (conservación de energía, no economía)

Si la potencia motriz es igual a la potencia eléctrica la velocidad(frecuencia eléctrica) es constante

¿ Y si son distintas?

$$J \frac{dw}{dt} = Tm - Tr \quad \text{Ec. En el eje mecánico de una máquina rotatoria} \quad T: \text{torque} \quad m=\text{motriz}, r \text{ resistente}$$

$$J w \frac{dw}{dt} = Pm - Pr \quad \text{Ec. En el eje mecánico de una máquina rotatoria} \quad P: \text{potencia} \quad m=\text{motriz}, r \text{ resistente}$$

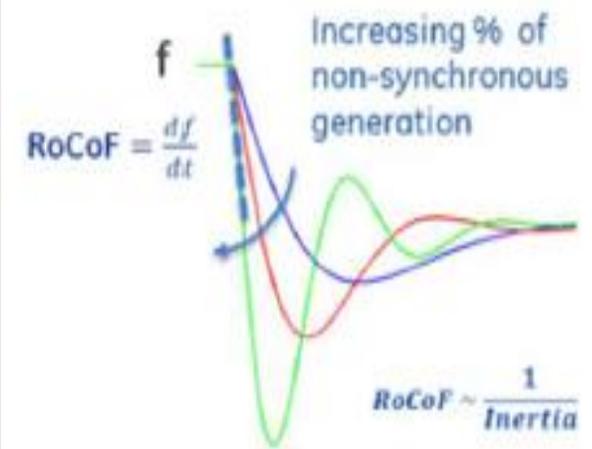
$$2 E_{cin} \frac{df/fo}{dt} = P_{mot} - P_{elec}$$

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  
 Ecin : Energía cinética  
 Pmot: potencia motriz  
 Pelec: 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 admiten sobre corrientes significativas.**

**¿Quiénes las detectan?**

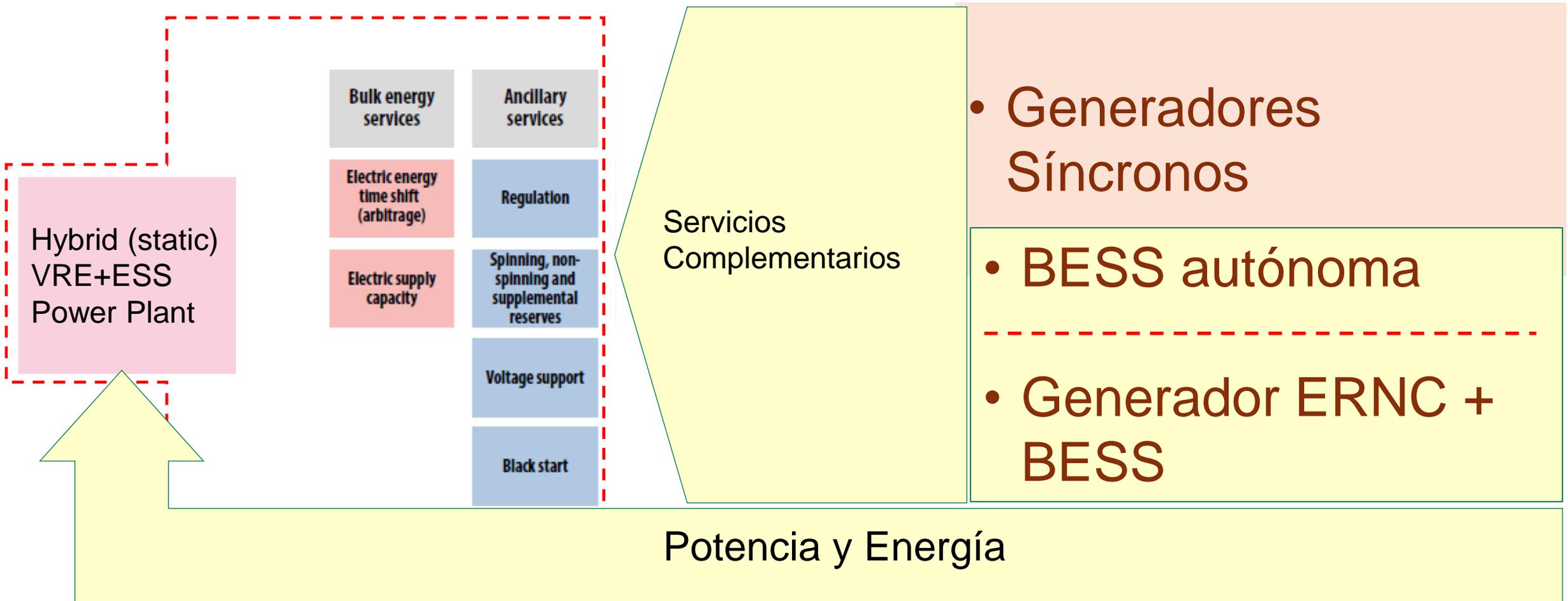
Las protecciones de:

- 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

## 3. SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA EN BATERIAS

# Respuesta a principales desafíos en Gx



# Almacenamiento de Energía en SEP



## 4. EI ESTADO DEL ARTE

# Proyectos en SEA (... una realidad de corto plazo)



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

Transición

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

**Evaluación de Proyectos reales en Chile (SEIA):**

**PMGD Don Guido Solar 9 MW  
Transformador 12/BT 4,8 MVA  
Kit de Almacenamiento en baterías**

**Parque Fotovoltaico Celda Solar Colbún S.A.  
Potencia nominal 369, 2 MW  
Almacenamiento 240 MW por 5 horas**

**Tecnología presente  
Máquinas estáticas**

**Conversión:**

**PV: Radiación solar**

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

**Electrónica de potencia**

**Eléctrica AC**

## Expansión de largo plazo del sistema eléctrico de Chile

### Base OSE Modelación de Central Híbrida

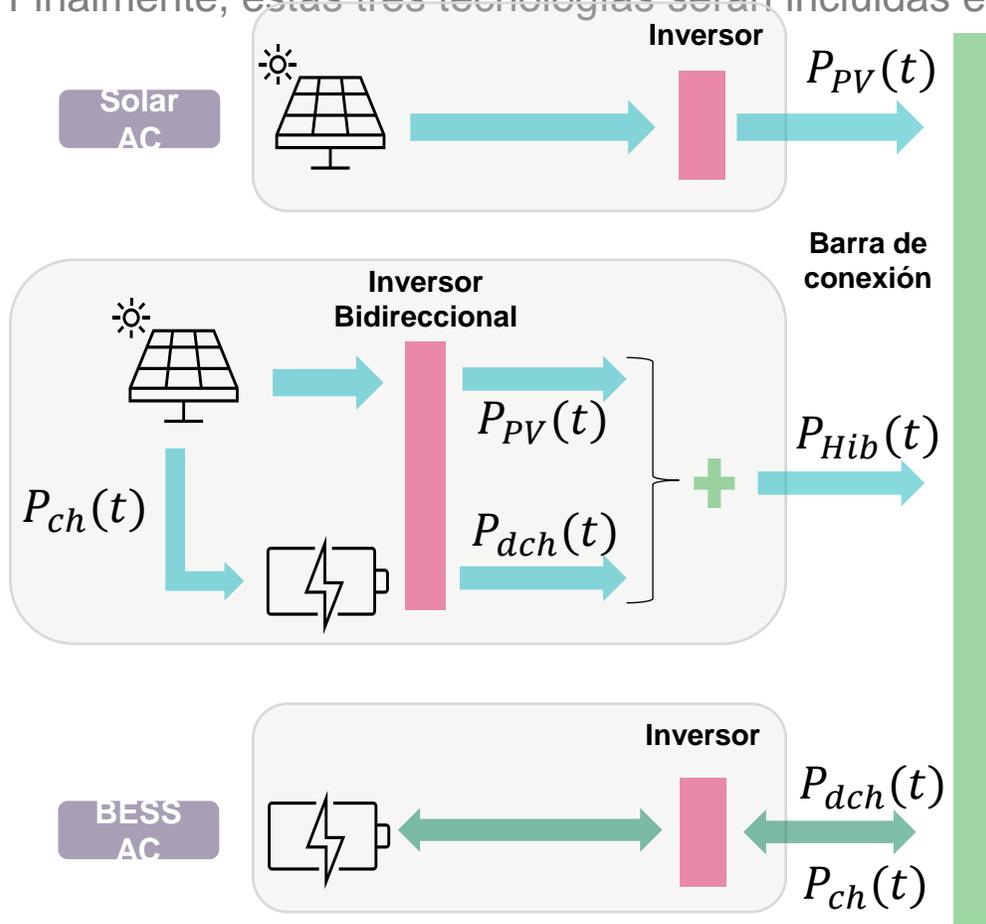


Alejandro Navarro Espinosa tiene más de 16 años de experiencia como investigador y consultor en el sector eléctrico, es Doctor en Energía y Magíster en Sistemas de Potencia de la Universidad de Manchester (Inglaterra) e Ingeniero Civil de Industrias y Magíster en Ciencias de la Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica de Chile. Actualmente se desempeña como **Director** de las áreas de Mercados y Regulación y de **Investigación y Desarrollo en System Ingeniería y Diseños** ([www.system.cl](http://www.system.cl)),

Octubre 2022

# ¿Qué se desea incluir?

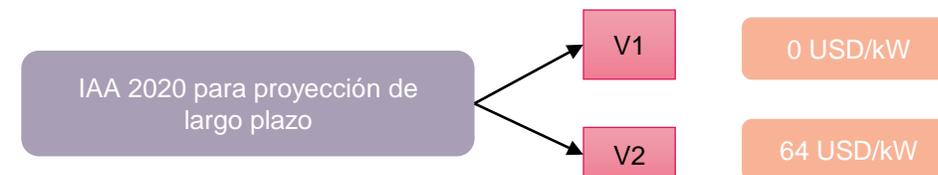
- Finalmente, estas tres tecnologías serán incluidas en la modelación.



- Para la central solar dentro de la central híbrida se utilizó como referencia el costo solar AC utilizado en el modelo. En la versión 1 se considera un sobrecosto por inversor híbrido del 10% y en la versión 2 se resta el valor del inversor de 40 USD/kW.



- Para el caso del BESS, en ambas versiones se utiliza el mismo costo por unidad de almacenamiento, sin embargo, el costo por potencia dependerá de la versión.



- La eficiencia utilizada en el BESS normal es de 95% round-trip (Wartsila). Dentro de la central híbrida se consideran eficiencias distintas de carga (99%) y descarga (97.5%).

# Casos de Estudio

- Todos los casos de estudio analizados consideran proyección en los costos de inversión y OPEX, tres hidrologías, cinco años de holgura y restricción de reserva.

## Base

No existe la central híbrida como tecnología candidata

## Híbrida V1

Tecnología como candidata a la expansión.

Se considera un inversor híbrido en el costo de inversión solar AC.

## Híbrida V2

Tecnología como candidata a la expansión.

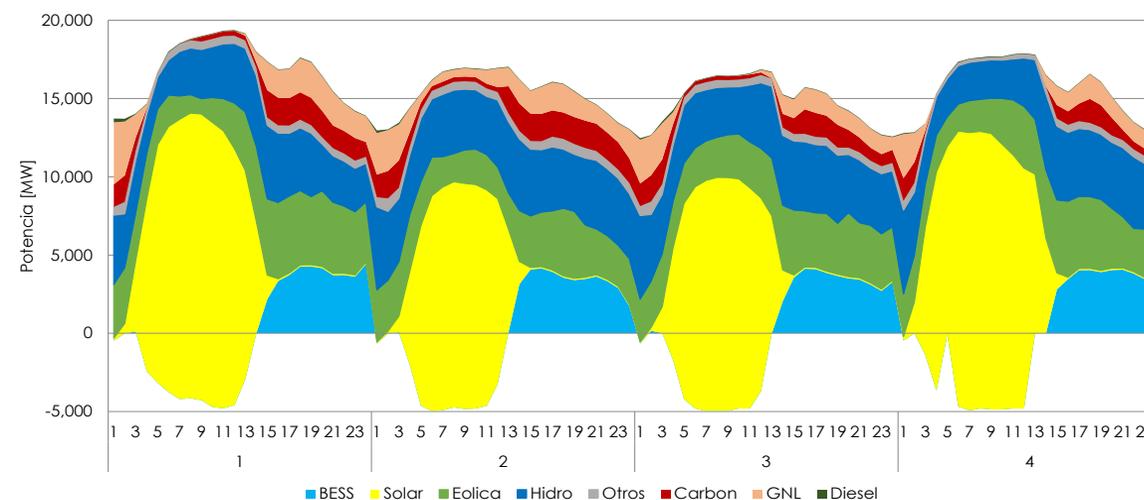
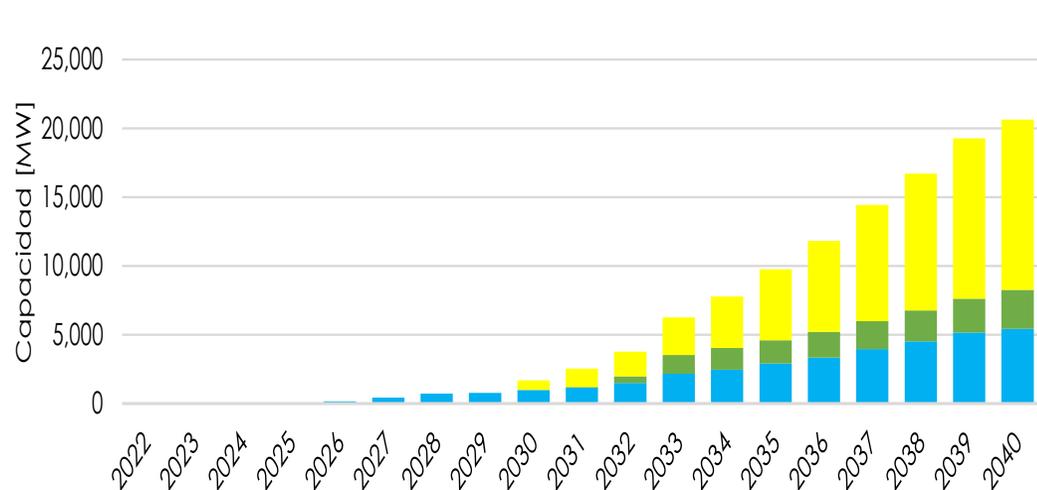
Costos asociados a inversor bidireccional, solar DC y almacenamiento.

# Resultados – Base

	Función Objetivo	Inversión Cand.	Operación
Multinodal	1.2667E+10	3.0918E+09	9.0274E+09
Uninodal	1.2763E+10	4.1253E+09	7.7043E+09

- Caída en adopción renovable de 334 MW respecto a la expansión uninodal. Sin embargo, el cambio relevante está en la caída en capacidad eólica producto del sistema de transmisión, lo que trae un aumento de adopción solar.

	BESS	Duración	GNL	Eólica	Solar	Solar Híbrida
Multinodal	5,422	8.85	0	2,846	12,358	0
Uninodal	5,018	6.48	0	4,373	10,498	0



- La evolución del costo marginal a lo largo del periodo de estudio se presenta en la siguiente figura. **En el 2040, el costo marginal alcanzado es de 43.01 USD/MWh.**
- La reserva es prestada mayoritariamente por el sistema de almacenamiento.

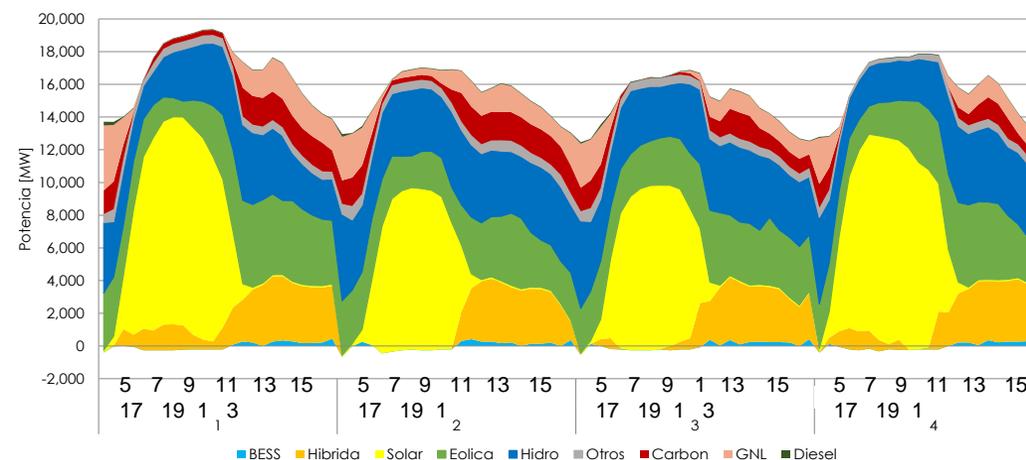
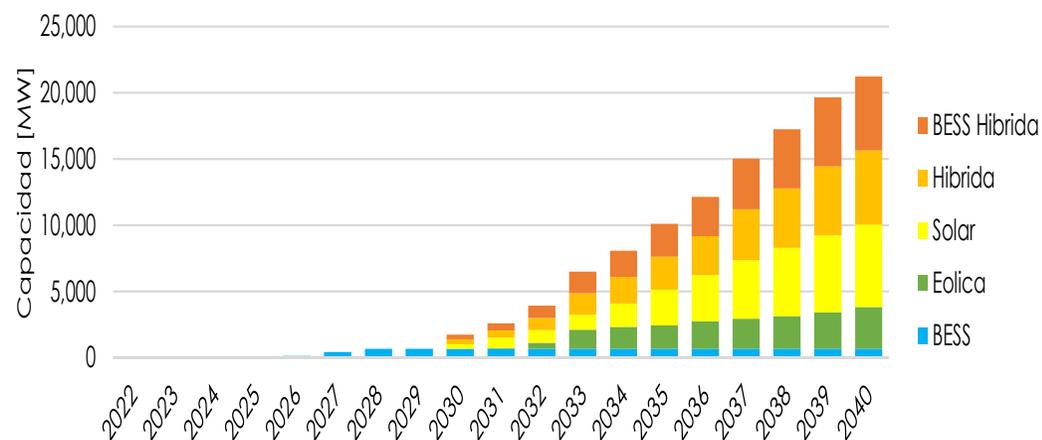
# Resultados – Híbrido V1

	Función Objetivo	Inversión Cand.	Operación
Base	1.2667E+10	3.0918E+09	9.0274E+09
Híbrido V1	1.2626E+10	3.0783E+09	8.9725E+09

- Nuevamente el sistema de transmisión reduce la adopción eólica en casi 1,000 MW respecto al uninodal. En esa línea, hay un gran desarrollo de centrales híbridas con almacenamiento de 43,597 MWh.

	BESS	Duración	GNL	Eólica	Solar	Solar Híbrida
Base	5,422	8.85	0	2,846	12,358	0
Híbrido V1	665	4.76	0	3,141	6,239	5,592

	BESS Híbrida	Duración	SoC	Descarga Prom	BESS Eq.	Duración	SoC
Base	-	-	-	-	5,422	8.85	47,996
Híbrido V1	5,592	7.80	43,597	3,213	6,257	7.47	46,759



- El costo marginal de largo plazo es de 42.79 USD/MWh, solo 0.22 USD/MWh por debajo del caso base.**

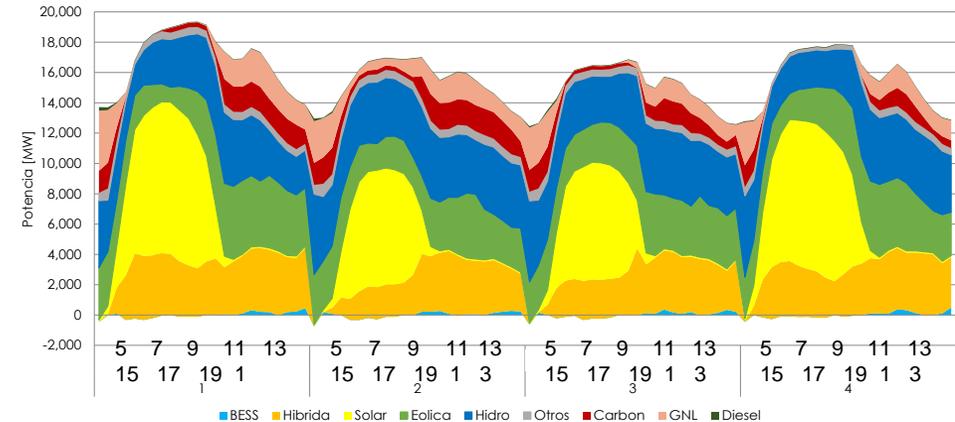
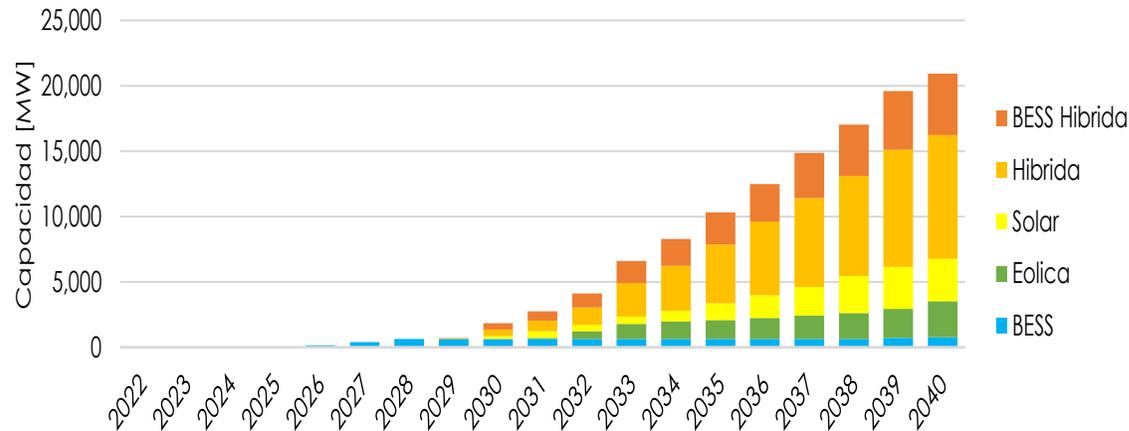
# Resultados – Híbrido V2

	Función Objetivo	Inversión Cand.	Operación
Base	1.2667E+10	3.0918E+09	9.0274E+09
Híbrido V 1	1.2626E+10	3.0783E+09	8.9725E+09
Híbrido V 2	1.2584E+10	3.1425E+09	8.9140E+09

- Como en esta versión la central híbrida resulta ser más barata que en el caso base, aumenta su instalación respecto a la primera versión del modelo.

	BESS	Duración	GNL	Eólica	Solar	Solar Híbrida
Base	5,422	8.85	0	2,846	12,358	0
Híbrido V 1	665	4.76	0	3,141	6,239	5,592
Híbrido V 2	766	2.90	0	2,751	3,249	9,207

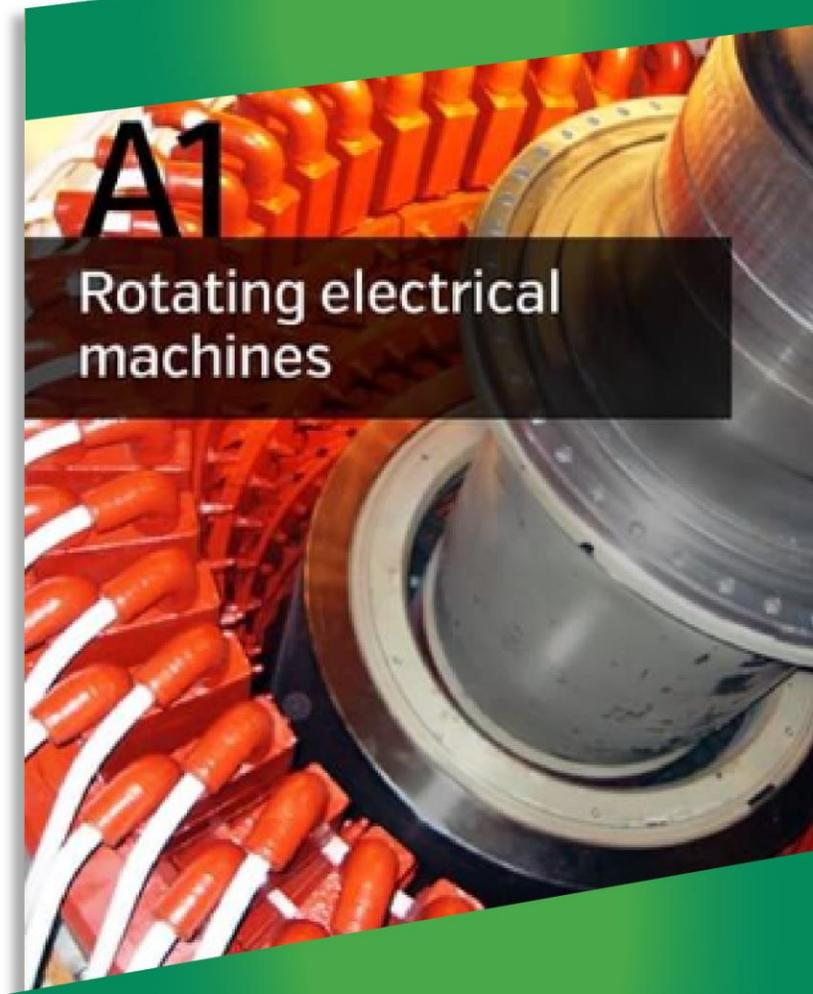
	BESS Híbrida	Duración	SoC	Descarga Prom	BESS Eq.	Duración	SoC
Base	-	-	-	-	5,422	8.85	47,996
Híbrido V 1	5,592	7.80	43,597	3,213	6,257	7.47	46,759
Híbrido V 2	4,723	10.11	47,767	3,521	5,489	9.11	49,992



- El costo marginal en 2040 es de 42.62 USD/MWh. Es el caso que presenta el menor costo marginal en el largo plazo respecto a los dos casos previos.**

# Muchas gracias

10 de Noviembre de 2022



# Acerca del Expositor



Ingeniero Civil Electricista de la Universidad de Chile, con 44 años de experiencia profesional

Socio Director de Systepe Ingeniería y Diseños. En los últimos 17 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

- E-mail: [pmiquel@systepe.cl](mailto:pmiquel@systepe.cl)
- Fono: +562 22320501
- Systepe Ingeniería y Diseños S.A.
- Don Carlos 2939, piso 10 , of 1007. Las Condes, Santiago de Chile

