



**POWER BUSINESS**

*Technology and Expertise on Demand*



# Sistemas de Almacenamiento de Energía en el SEP

Gabriel Olguin, Ph.D.

Socio Director Power Business,

[golguin@powerbusiness.cl](mailto:golguin@powerbusiness.cl)

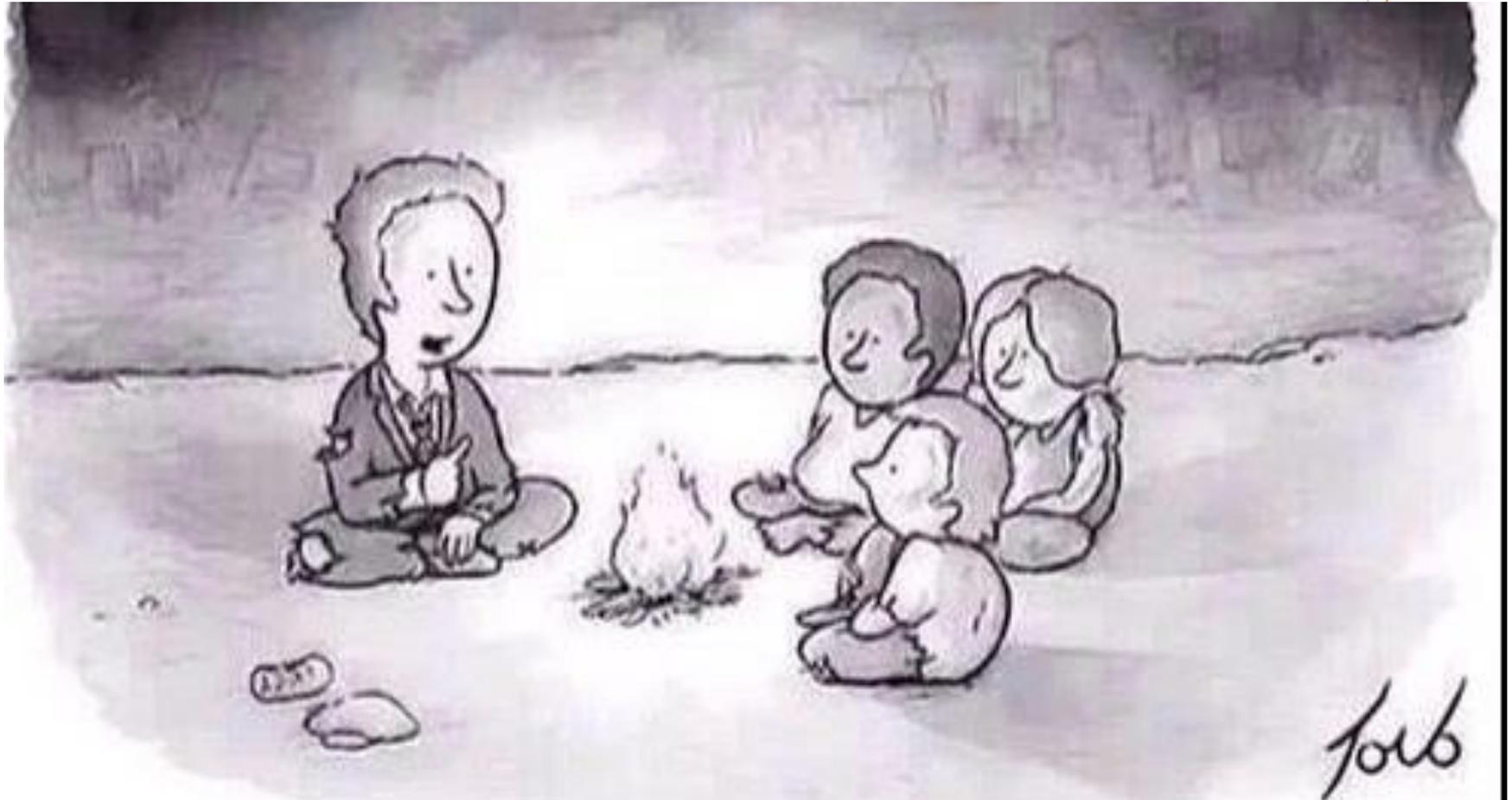
# Objetivos

- Presentar razones para la **incorporación del almacenamiento de energía (AE) en los Sistemas Eléctricos de Potencia (SEP)**
- Cambio climático y compromisos
  - Transformación energética y ERNC
- Describir principios y tecnologías de AE para aplicaciones en los sistemas eléctricos de potencia.

# Contenidos

- Cambio climático y la industria eléctrica
- Aplicaciones del almacenamiento de energía
- Tecnologías
  - Baterías BESS
  - Aire comprimido CAES
  - Volantes de Inercia FESS
  - Central hidroeléctrica de bombeo PHS

# Cambio climático



***“Sí, destruimos el planeta Tierra, pero por momentos creamos mucho valor para nuestros accionistas”***

# Cambio climático – Políticas públicas

- Existe consenso científico que la **temperatura de la tierra está aumentando** lo que podría originar **cambios climáticos con efectos desconocidos para la vida sobre la tierra.**
- Representantes de las diversas naciones se han reunido en **diversos foros** para acordar **mecanismos de trabajo conjunto que permitan reducir los gases de efecto invernadero**

# Gases de Efecto Invernadero

- Una característica importante de los combustibles petróleo, gas natural, carbón y biomasa es que la energía que se obtiene de ellos se debe a la combustión del carbono presente en ellos, por lo que su utilización consume carbono, oxígeno de la atmósfera y libera dióxido de carbono y energía.

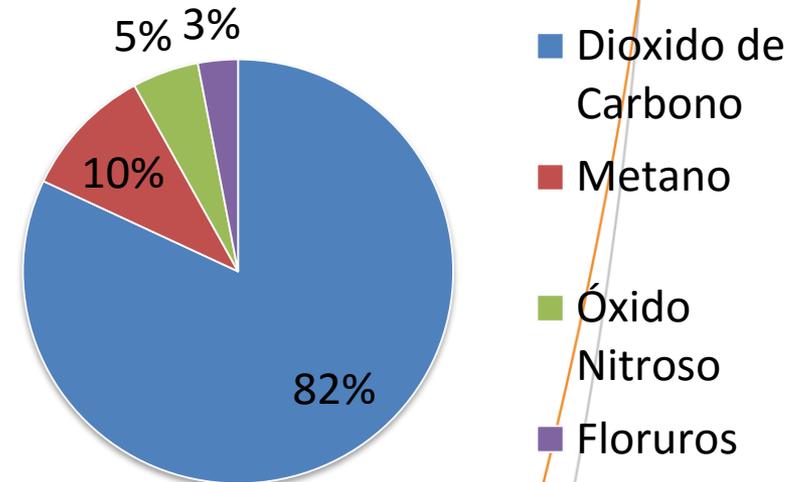
# Gases de efecto invernadero

## Gases que atrapan el calor en la atmósfera

- **Dióxido de carbono CO<sub>2</sub>**
  - Quema de combustibles fósiles
- **Metano CH<sub>4</sub>**
  - Industria de alimentos (carne) y rellenos sanitarios
- **Óxido Nitroso N<sub>2</sub>O**
  - Actividades industriales, agricultura y quema de fósiles
- **Gases fluoruros**
  - Variedad de procesos

## Emisiones totales 2013 USA

6673 Millones de toneladas CO<sub>2</sub>



# Compromiso de Colombia



- Colombia es signatario de la Convención Marco de Naciones Unidas Sobre el Cambio Climático que busca entender los diversos factores que aceleran el cambio del clima y de esta forma llegar a consensos **sobre acciones que aborden causas y consecuencias.**

# Estrategias reducción de CO<sub>2</sub>



- Eficiencia y Conservación energética
  - Hacer más con menos energía
  - Evitar el mal uso de la energía
- **Transformación energética**
  - **Cambiar de combustible o fuente primaria**
- Captura y secuestro de CO<sub>2</sub>
  - Grupo de tecnologías que evitan o reducen la emisión de CO<sub>2</sub>

# Energía libre de carbono



## Opciones

- Energía nuclear y almacenamiento de los residuos radioactivos
- Combustibles fósiles y captura del carbono
- **Energías Renovables, flexibilidad de la red y almacenamiento de energía eléctrica**

# El Potencial Eólico y Solar

- Colombia tiene zonas donde las energías renovables presentan condiciones favorables
- El aprovechamiento de ese potencial plantea desafíos, entre ellos los relacionados con la expansión de los sistemas de transmisión y con el manejo de la variabilidad de la producción renovable del sol y el viento

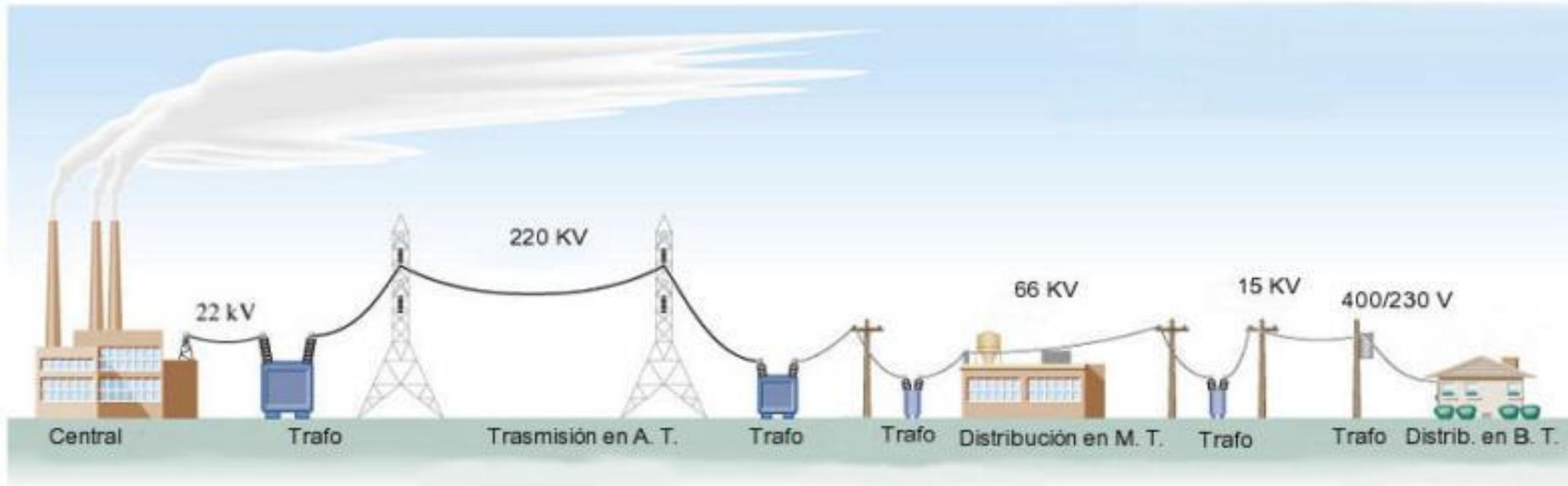
# Transmisión versus Almacenamiento

## Dónde versus Cuándo

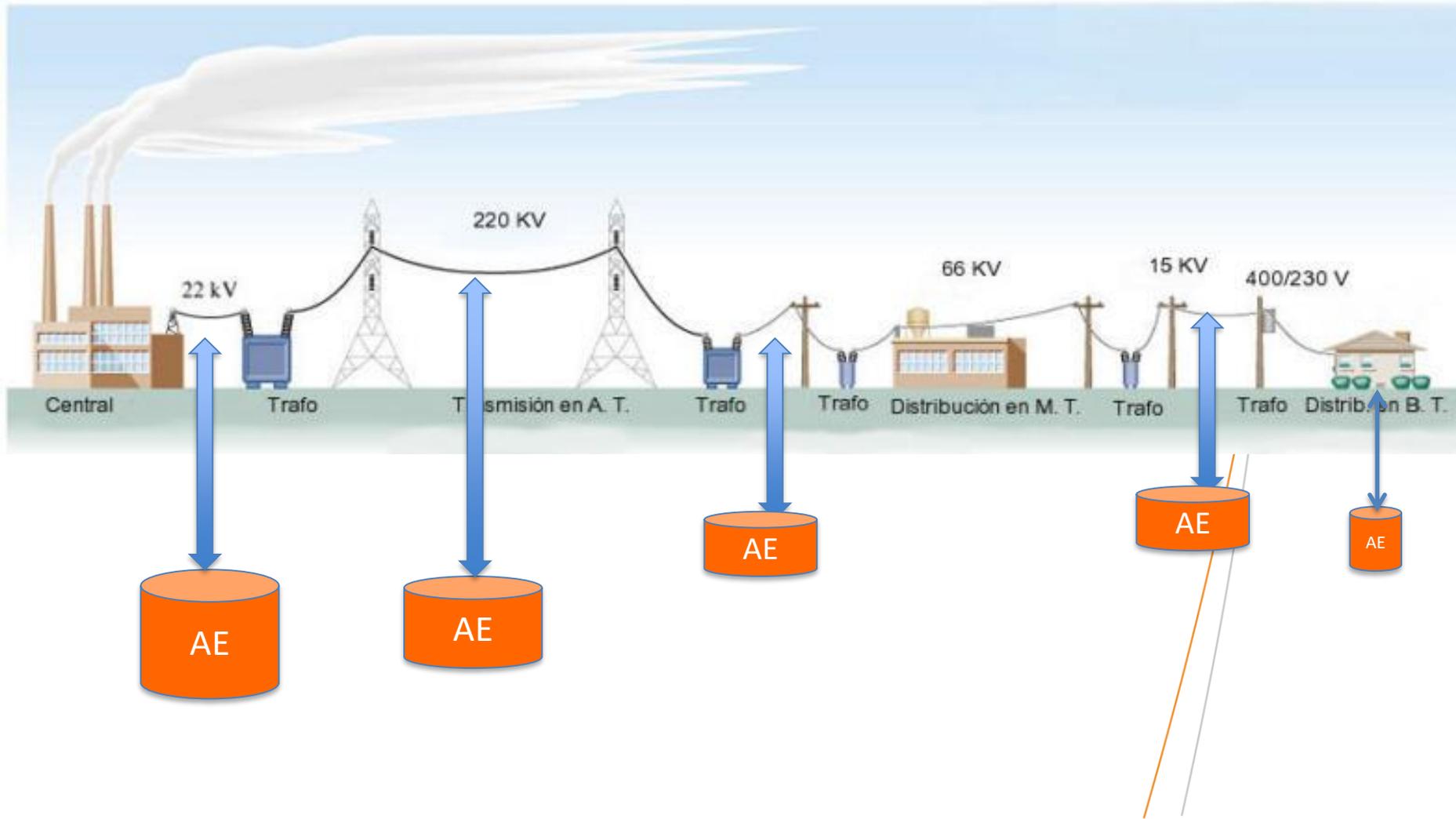


- Un **Sistema de Transmisión** provee la energía **donde se necesita**
  - Transporte de energía en el espacio físico
- Un **Sistema de Almacenamiento de Energía** provee energía **cuando se necesita**
  - Transporte en el tiempo
- **La transmisión es parte de la cadena de valor de la industria eléctrica**
- **El Almacenamiento de Energía recién comienza a ser parte de la cadena de valor**

# El Sistema Eléctrico de Potencia



# Almacenamiento de E.E. en el SEP – Grid Scale Energy storage



# 10 aplicaciones de AE



Segmento	Aplicación		Descripción
Generación y sistema	1	Servicios al mercado mayorista	Almacenamiento masivo de energía para ofertas de capacidad y SSCC: CPF, CSF, seguridad
	2	Integración de renovables	Almacenamiento masivo para desplazamiento temporal y SSCC
Transmisión y distribución	3	Almacenamiento estacionario en la red de T&D	Mejoramiento de la utilización de activos de T&D, <b>postergación de inversiones en activos de T&amp;D</b>
	4	Almacenamiento transportable para T&D	Mejoramiento de la utilización de activos de T&D, postergación de inversiones en activos de T&D en múltiples sitios según se requiera
	5	Almacenamiento distribuido (EDR)	Almacenamiento centralizado: confiabilidad, calidad de servicios, SSCC

# 10 aplicaciones de AE



Segmento	Aplicación		Descripción
Distribución	6	Sistemas agregados ESCO	Sistemas de AE distribuidos gestionados centralizadamente para beneficios en distribución
Usuarios finales	7	Calidad de la potencia y confiabilidad en industria y comercio	Sistemas para proveer calidad de potencia y confiabilidad en comercio e industria
	8	Gestión de demanda en industria y comercio	Sistemas para reducir cargos por potencia y energía en industria y comercio
	9	Gestión de demanda residencial	Sistemas para traslado de cargas a hora fuera de punta
	10	Respaldo comercial y residencial	Sistemas de respaldo para pequeños consumos de gran valor

ESCO: Energy Service Companies

# Seguimiento de la carga

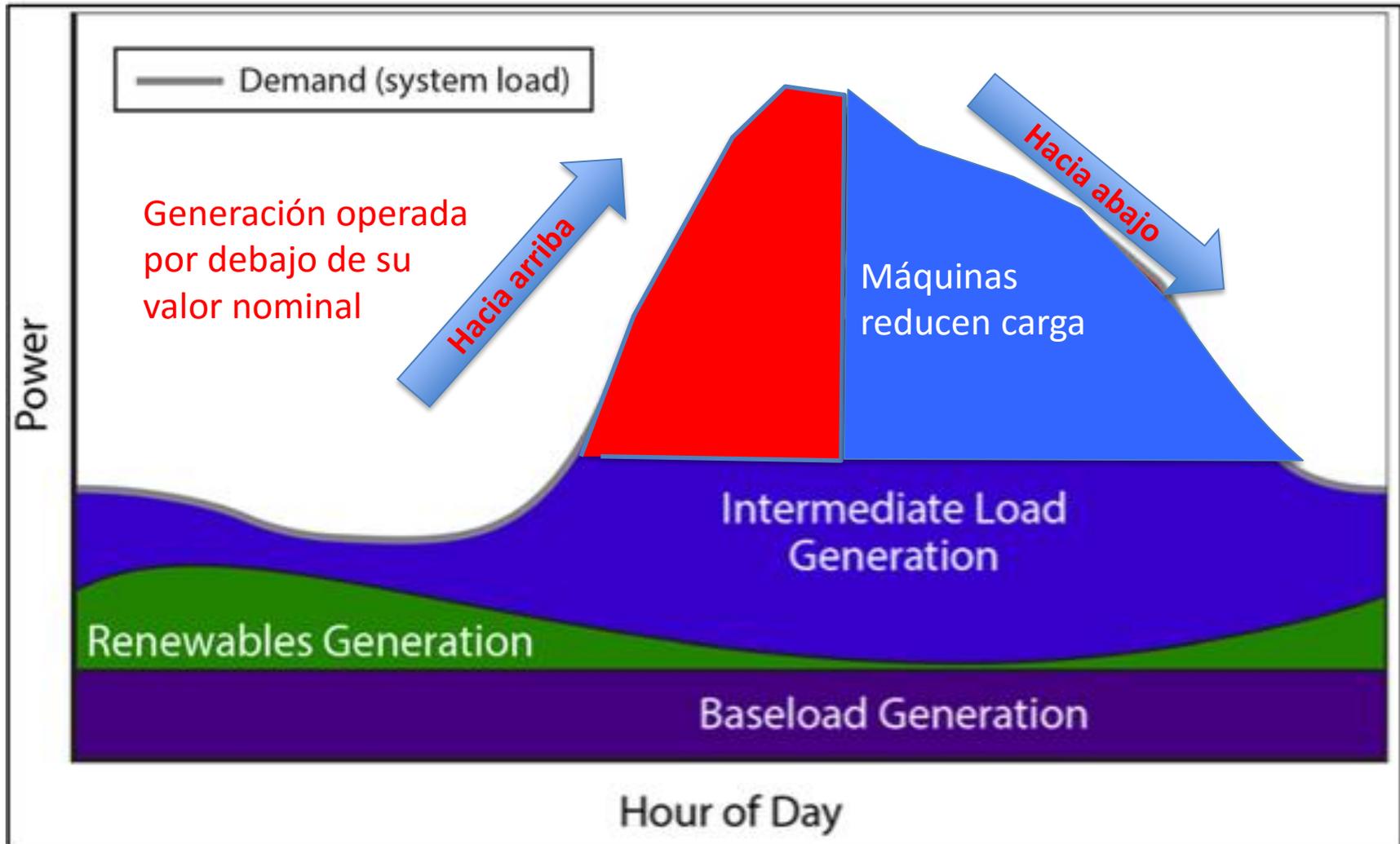


Figure 9. Electric Supply Resource Stack

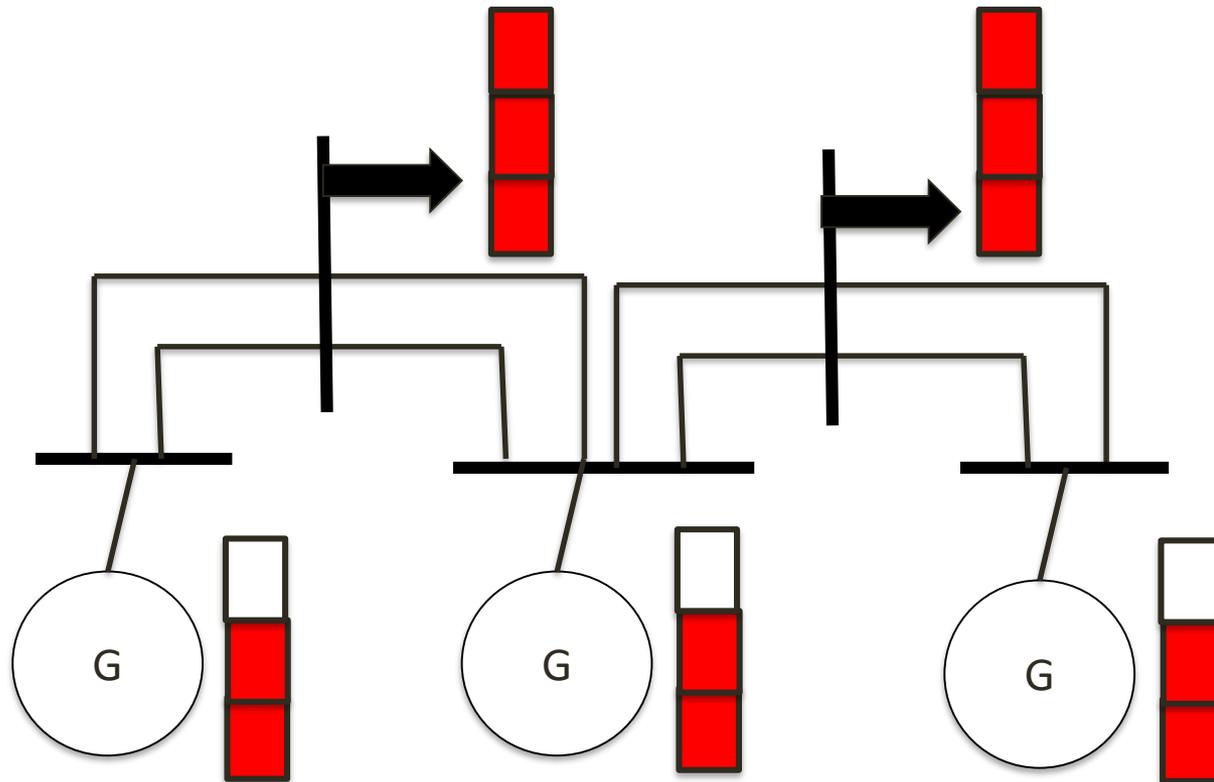
# Reserva en Giro

- **Reserva en Giro:** Margen entre la potencia de despacho y la potencia máxima que el conjunto de las unidades generadoras sincrónicas en operación pueden aportar y sostener ante un aumento brusco de la demanda o reducción brusca de la generación. La Reserva en Giro del sistema incluye el aporte que pueden hacer los Equipos de Compensación de Energía Activa.

# Nota respecto de la **reserva en giro**

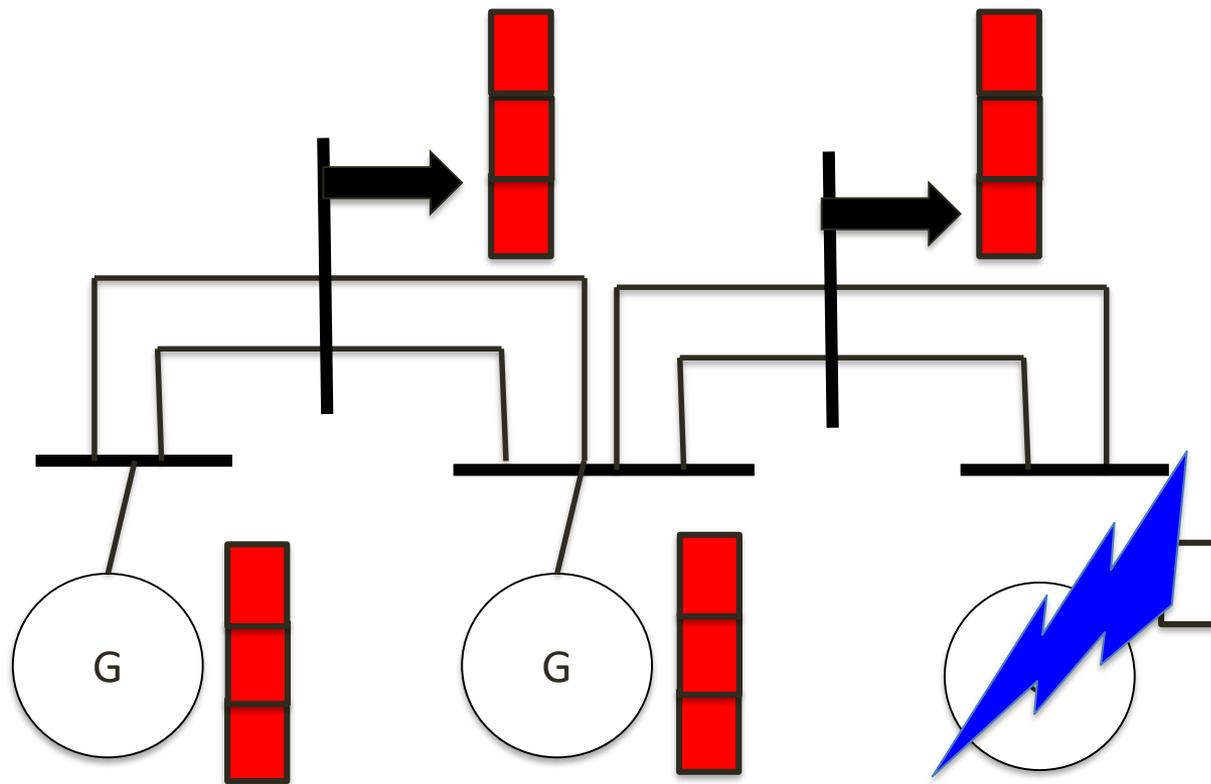
- El nombre “reserva en giro” hace referencia a **cierta capacidad de generación disponible y de rápido re-despacho en máquinas sincronizadas con el objeto lograr balance oferta demanda y controlar la frecuencia del sistema**
- Un nombre más apropiado a la **disponibilidad tecnológica actual es reserva sincronizada de respuesta rápida** pues existe tecnologías capaz de ofrecer el mismo servicio **sin estar en giro**

# Reserva sincronizada / en giro

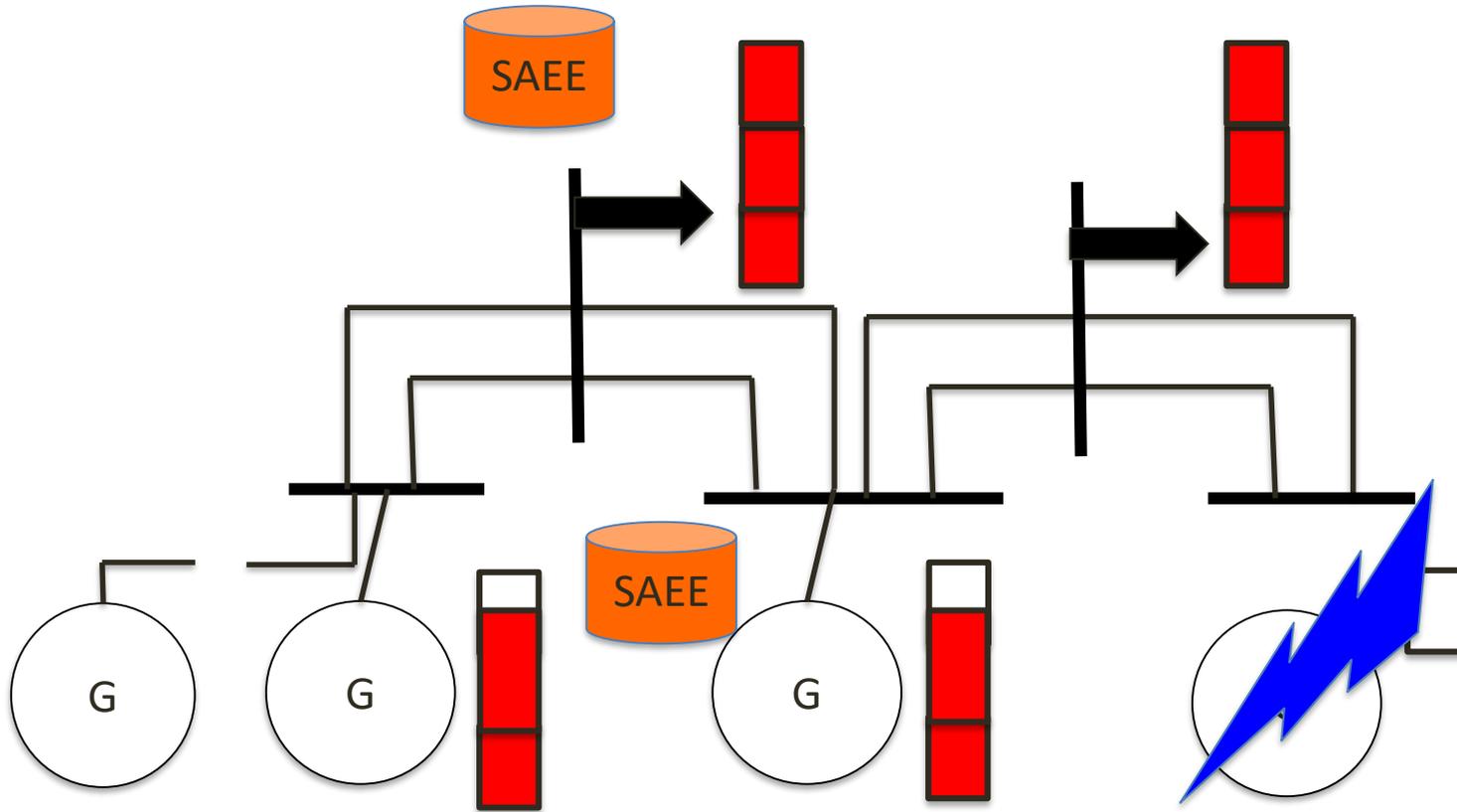


Unidades aportando reserva sincronizada o reserva en giro

# Reserva sincronizada / en giro

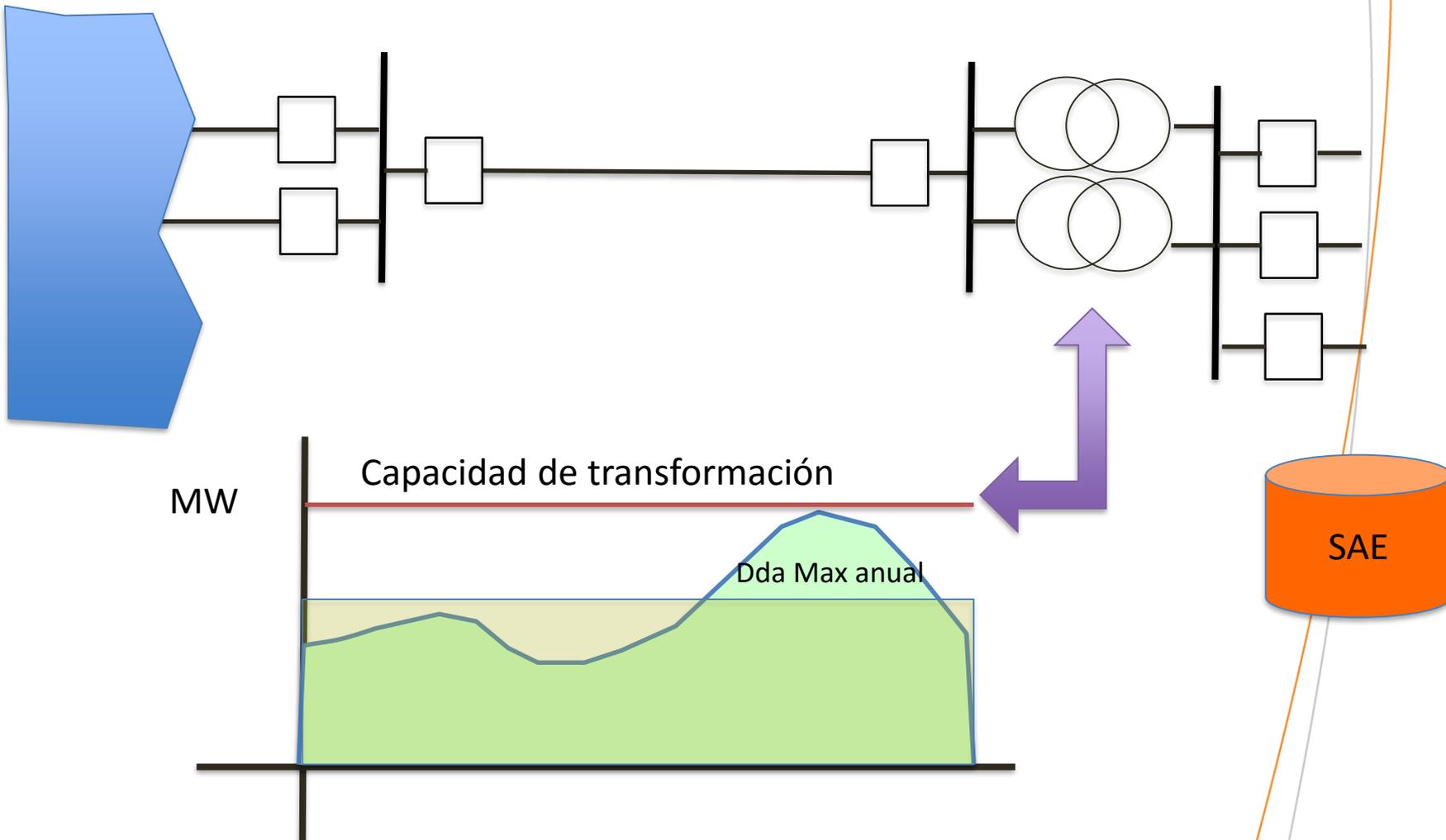


# Reserva sincronizada / en giro

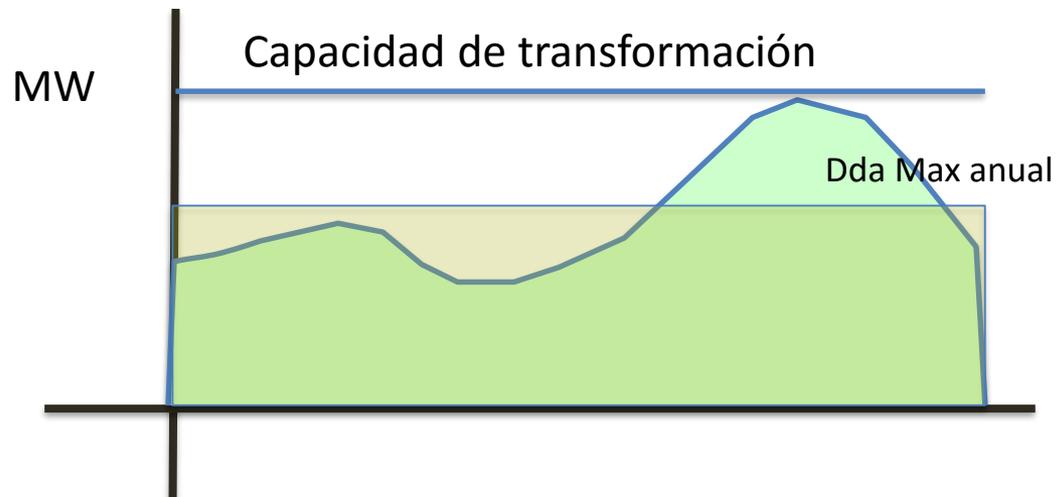
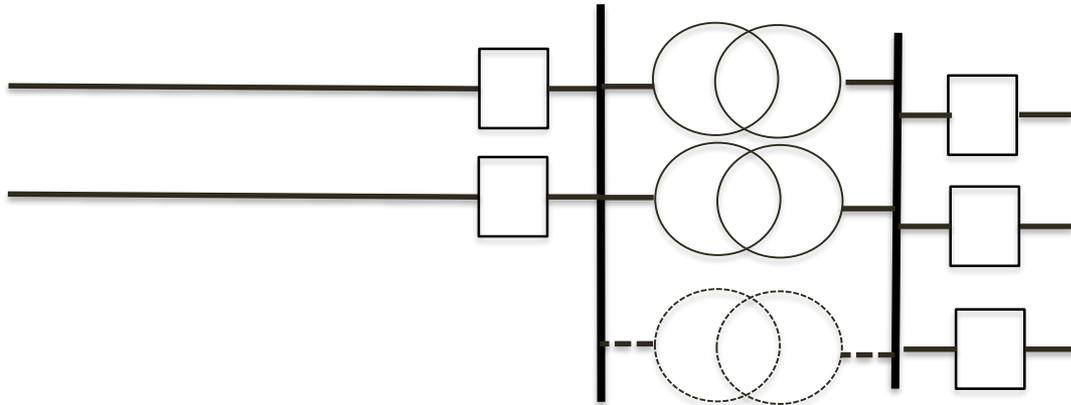


# Postergación de Inversiones en Tx

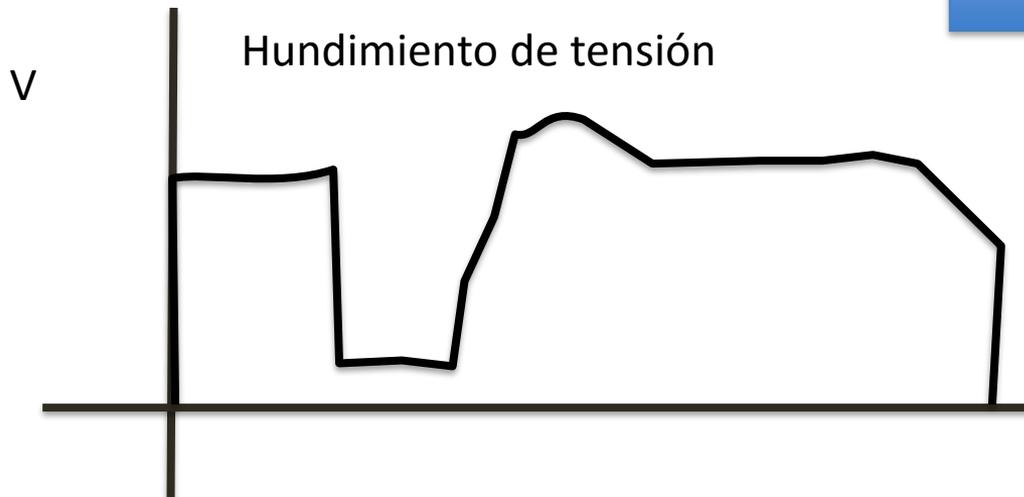
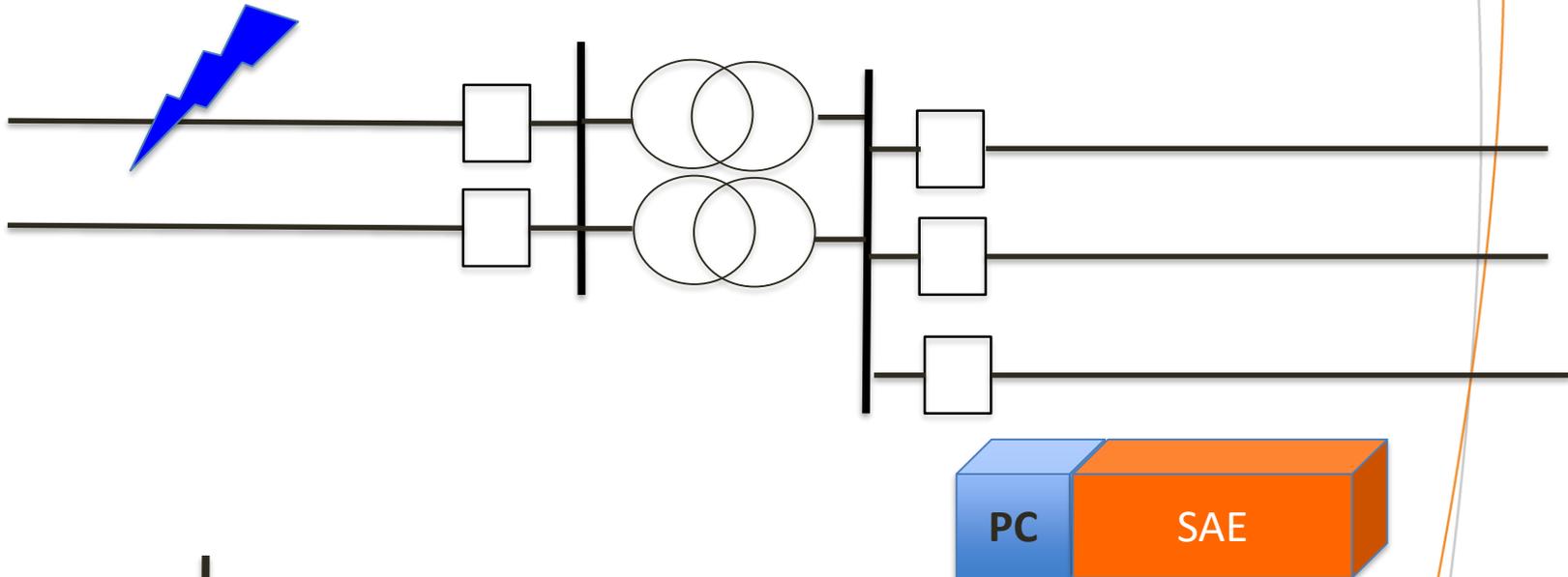
## Alivio de congestión en Tx



# Postergación de Inversiones en Dx



# Calidad de la potencia: Hundimientos de tensión



Otras prestaciones:

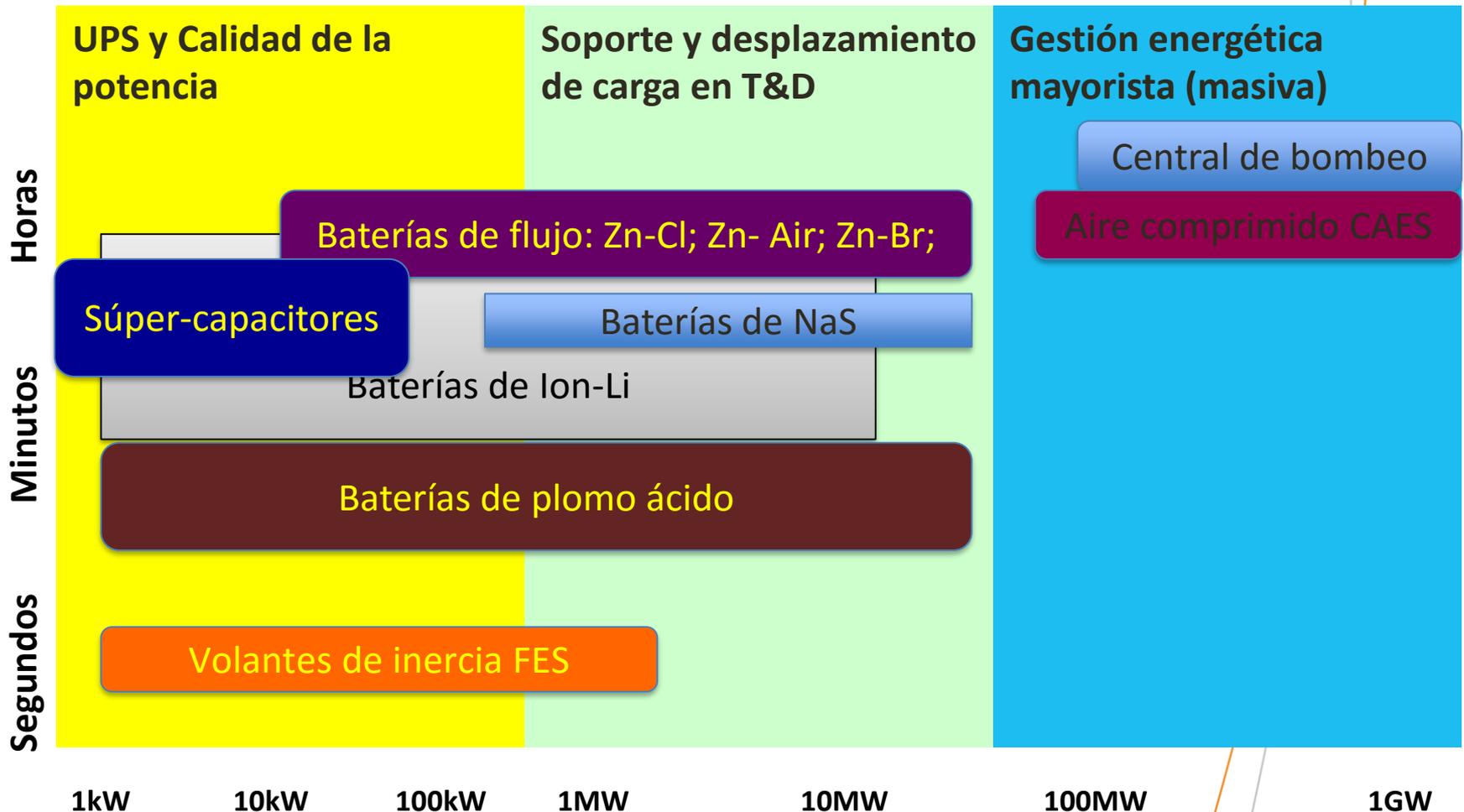
- Op. en isla
- Gestión energética
  - Recortar la punta
  - Tarifa de verano

# Desconexión Automático de Carga por baja frecuencia - NTSyCS



- En las Instalaciones de Clientes se implementará el aporte al EDAC por sub-frecuencia a través de:
- a) ...
- b) ...el Cliente podrá **utilizar o acreditar** el uso de **Equipos de Compensación de Energía Activa** que permitan aportar con un **tiempo de respuesta equivalente**, y sostener durante el tiempo que requiera la DO, **una potencia al menos equivalente a la desconexión de consumo que le asigna el Estudio de EDAC en el respectivo escalón de subfrecuencia.**

# Oferta tecnológica y aplicaciones





**POWER BUSINESS**

*Technology and Expertise on Demand*



# Almacenamiento de Energía en Baterías Battery Energy Storage System BESS

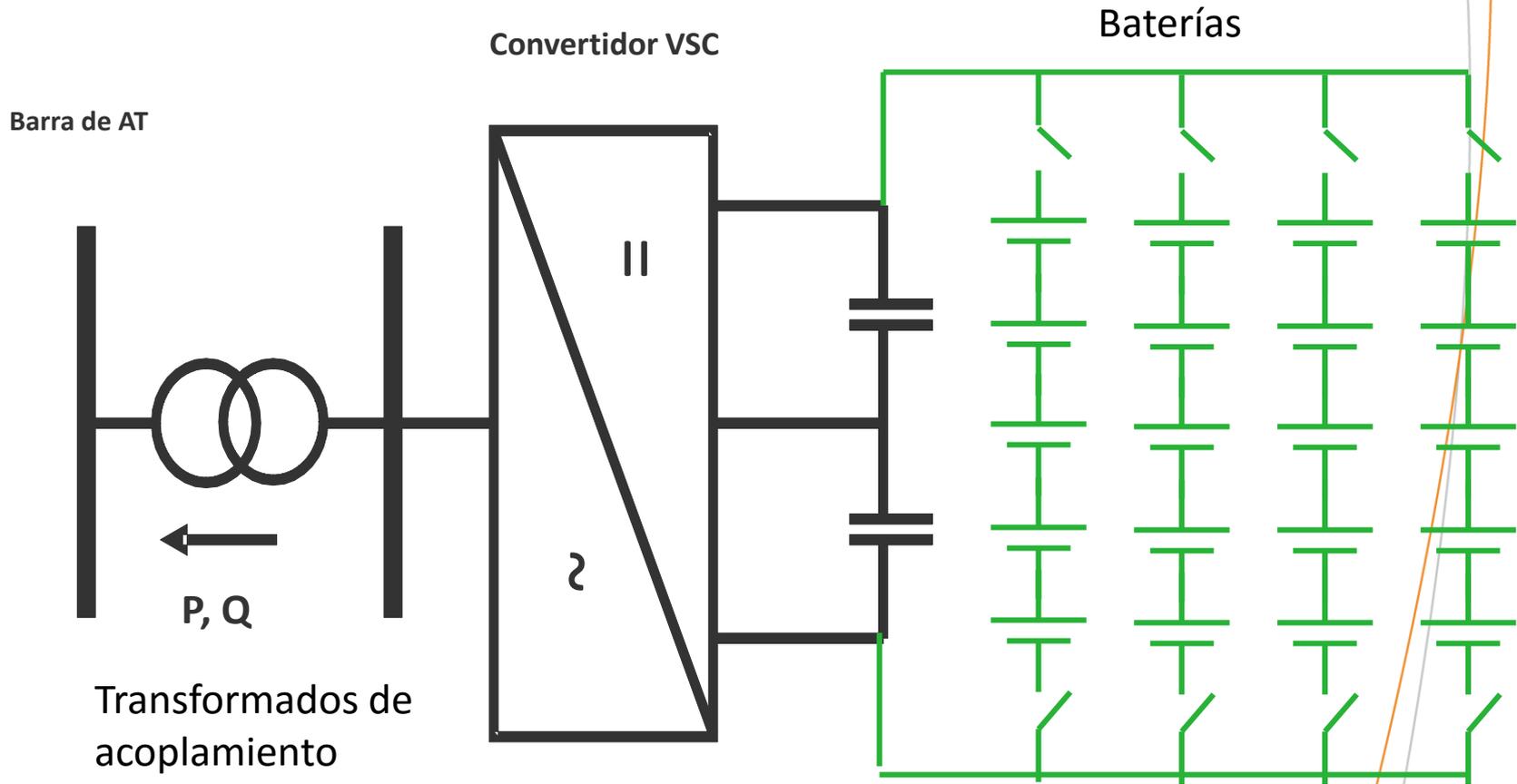
Gabriel Olguin, Ph.D.

Socio Director Power Business,  
Profesor Universidad de Santiago

# Battery Energy Storage System: BESS

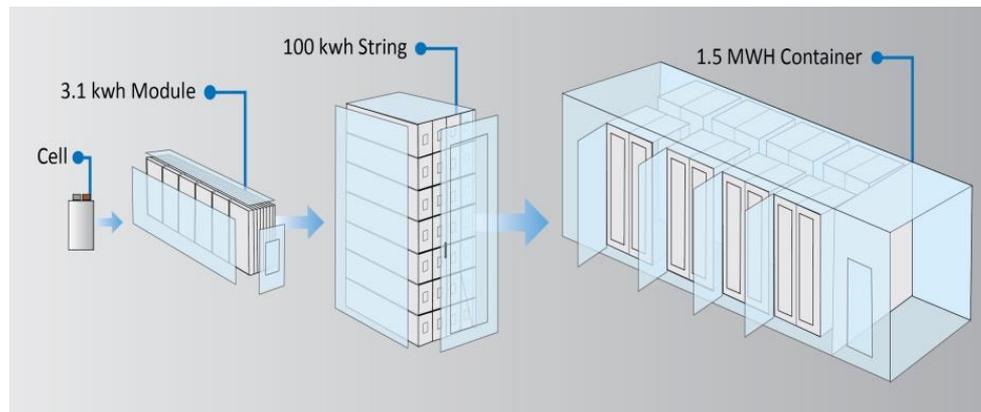
- Medio de almacenamiento: baterías electroquímicas (varios tipos):
  - Sulfuro de sodio (NAS) 89%, Plomo ácido 75-85%, Níquel Cadmio (NiCd) 60-70%, Ion Litio 95%.
- Sistema de convertidor de potencia:
  - Semiconductores, electrónica de potencia
- Balance of plant (conexión y auxiliares):
  - Transformador, paño AC, refrigeración, control, protección, monitoreo

# BESS



Battery Energy Storage System

# Baterías Ion-Litio para almacenamiento de EE



# Baterías: Vida útil

- Vida útil: La vida útil de la batería depende de los ciclos de carga/descarga y profundidad de estos. Diferentes tecnologías de baterías tienen diferentes vidas útiles.
  - En general la vida útil se especifica en ciclos de carga y descarga, por lo que la vida en años **depende de la aplicación efectiva.**
  - Las baterías de flujo ofrecen ciclos del orden de los millones

# Referencias proyectos BESS

# RES Americas

- Ohio, USA (PJM)
  - 4MW/2,6MWh
  - Op.: Marzo 2014
  - Regulación de frecuencia
- Amphora Ontario - CA
  - 4MW/2,6MWh
  - Op.: July 2014
  - Alivio de congestión



# RES Americas



## Jake & Elwood (PJM)

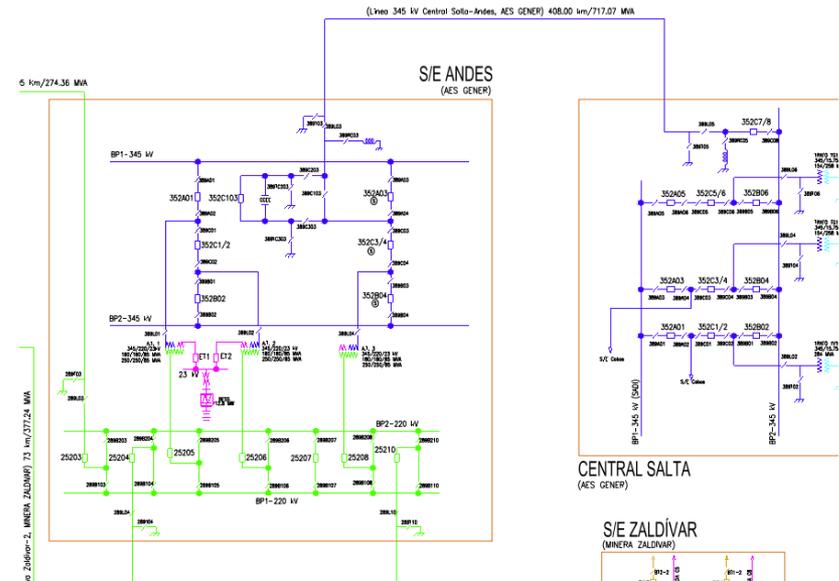
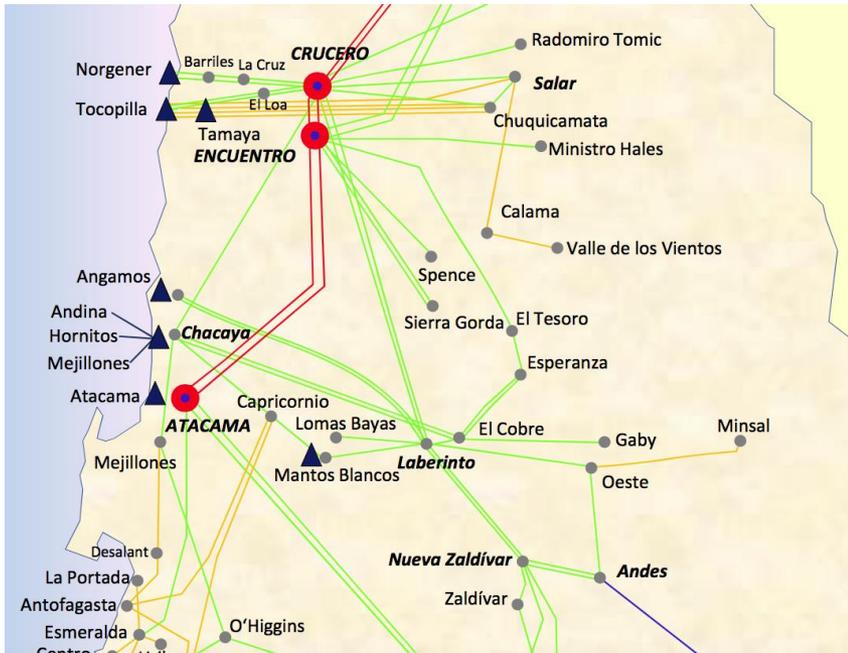
- Dos 19.8MW/7.8MWh proyectos en Chicago
- Regulación de frecuencia PJM, op. Junio 2015

# AES GENER Los Andes BESS



- Primer BESS en Chile – Reserva en giro para Norgener
- 12MW 15 minutos

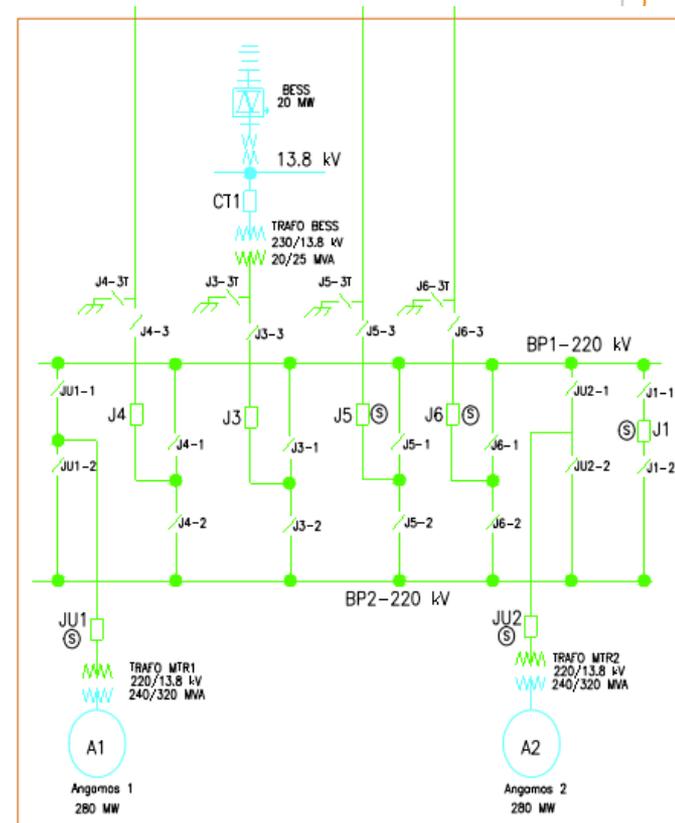
# AES GENER Los Andes BESS



- Un SAEE permite **separar la reserva en giro de la central eléctrica**
- La ubicación óptima de un BESS no es la central sino la carga

# AES Gener Angamos 20MW BESS

- Segundo proyecto de AES Gener en Chile ( 2011)
- 10x2MW contenedores de baterías Ion Litio
- 20 MW/5MWh de reserva en giro de Angamos
- 10 contenedores de baterías y 5x4MW convertidores
- Baterías A123 y convertidores ABB



CENTRAL ANGAMOS  
(ANGAMOS)

# Angamos 20MW BESS Chile



# Angamos 20MW BESS Chile



# 60 MW Sistema de Almacenamiento de Energía BESS-Guacolda

- Con el fin de participar en el mercado de Servicios Complementarios y de almacenar excedentes de energía en los momentos de baja demanda, e inyectarlos cuando el SIC lo requiera, Empresa Eléctrica Guacolda S.A ha proyectado en dos etapas la instalación de un sistema de almacenamiento de energía con baterías del tipo Ion-Litio, ubicado en la Región de atacama a 16 km aproximado al sur de Copiapó.

# 60 MW Sistema de Almacenamiento de Energía BESS-Guacolda





# ***POWER BUSINESS***

*Technology and Expertise on Demand*



## Aire Comprimido Compressed Air Energy Storage

Gabriel Olguin, Ph.D.

Socio Director Power Business,  
Profesor Universidad de Santiago

# Compressed Air Energy Storage



- CAES usa energía de bajo costo en horas valle para comprimir y almacenar aire en cavernas, estanques o tuberías. Cuando más electricidad es necesaria, el aire comprimido es expandido y dirigido a una turbina convencional para producir electricidad de forma más eficiente.
- Actualmente sólo existen dos proyectos en funcionamiento: Alabama, USA y Huntorf, Alemania

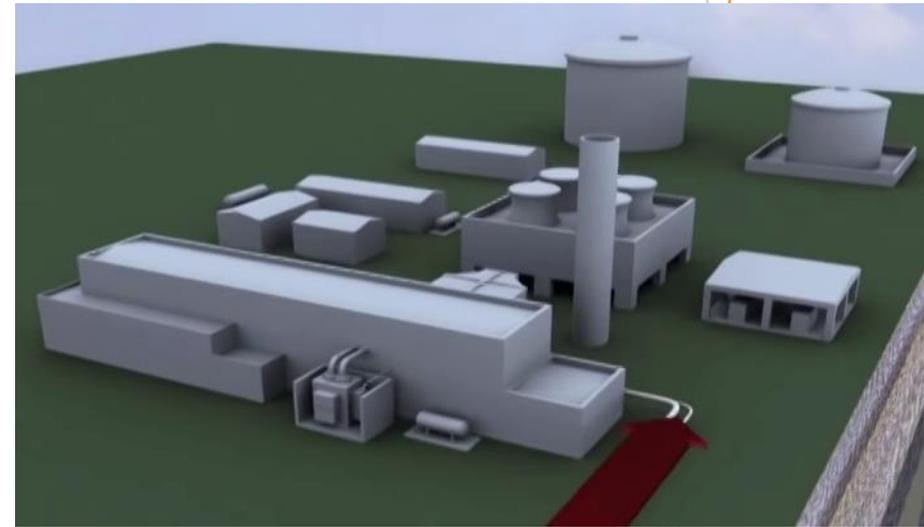
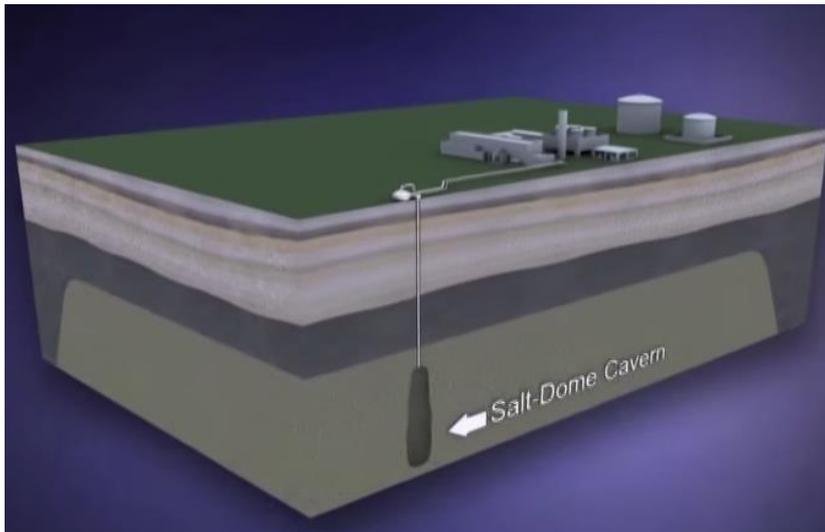
# 110MW CAES Mcintosh Alabama



- Una planta CAES de 110 MW y dos turbinas de gas, totalizando 350 MW
- La planta esta localizada sobre una caverna de sal

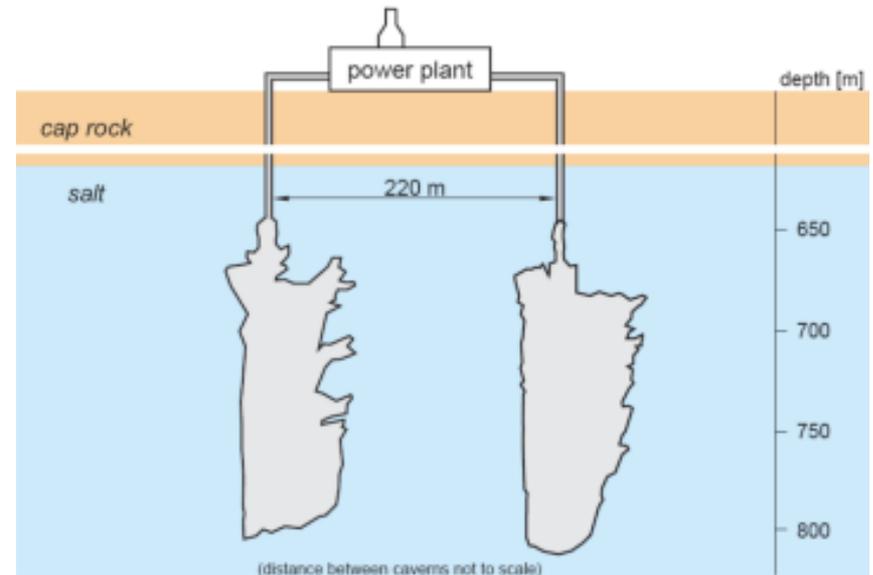
<https://www.youtube.com/watch?v=dGd7PIC09AM>

# 110MW CAES McIntosh Alabama



- Durante horas de baja demanda se comprime aire en la caverna
- El volumen de la caverna es aprox 0,5 millones de m<sup>3</sup>
- Máxima presión llega a 1100psi
- En horas de punta se libera el aire y se utiliza para mejorar la eficiencia del proceso de generación

# Huntorf CAES Plant



- Planta de 290MW que ha operado desde 1978. Usa el aire a presión en el proceso de combustión de una turbina de gas de dos etapas. Producción para 4 horas
- Partida en 10 minutos
- Provee carga cíclica, rampas y reserva en giro a la zona industrial de Noroeste de Alemania ; hoy ha intensificado su uso para apoyar energía eólica



# ***POWER BUSINESS***

*Technology and Expertise on Demand*

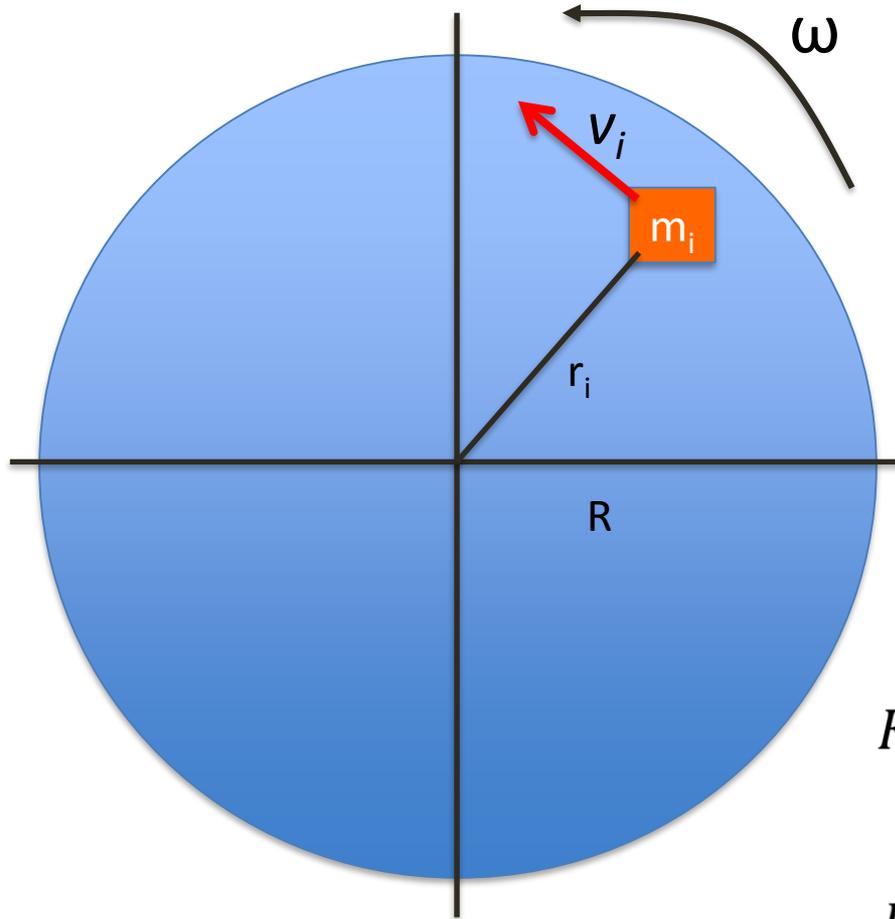


## Volantes de Inercia Flywheel Energy Storage Systems FESS

Gabriel Olguin, Ph.D.

Socio Director Power Business,  
Profesor Universidad de Santiago

# Energía cinética rotatoria



$$K_i = \frac{1}{2} m_i v_i^2 = \frac{1}{2} m_i \omega^2 r_i^2$$

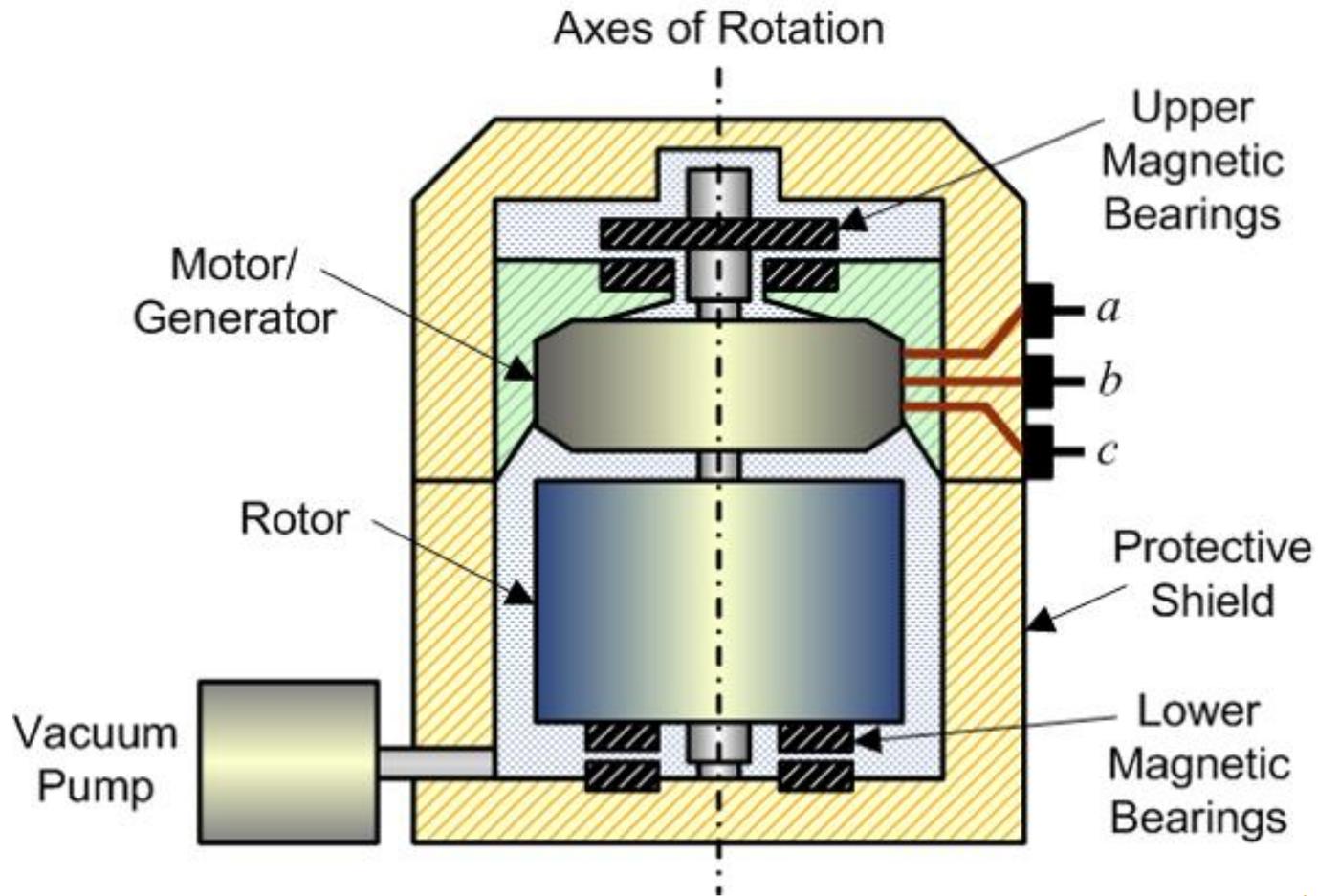
$$K_{disco} = \frac{\omega^2}{2} \sum m_i r_i^2 = \frac{\omega^2}{2} I$$

$$I = \frac{1}{2} m R^2$$

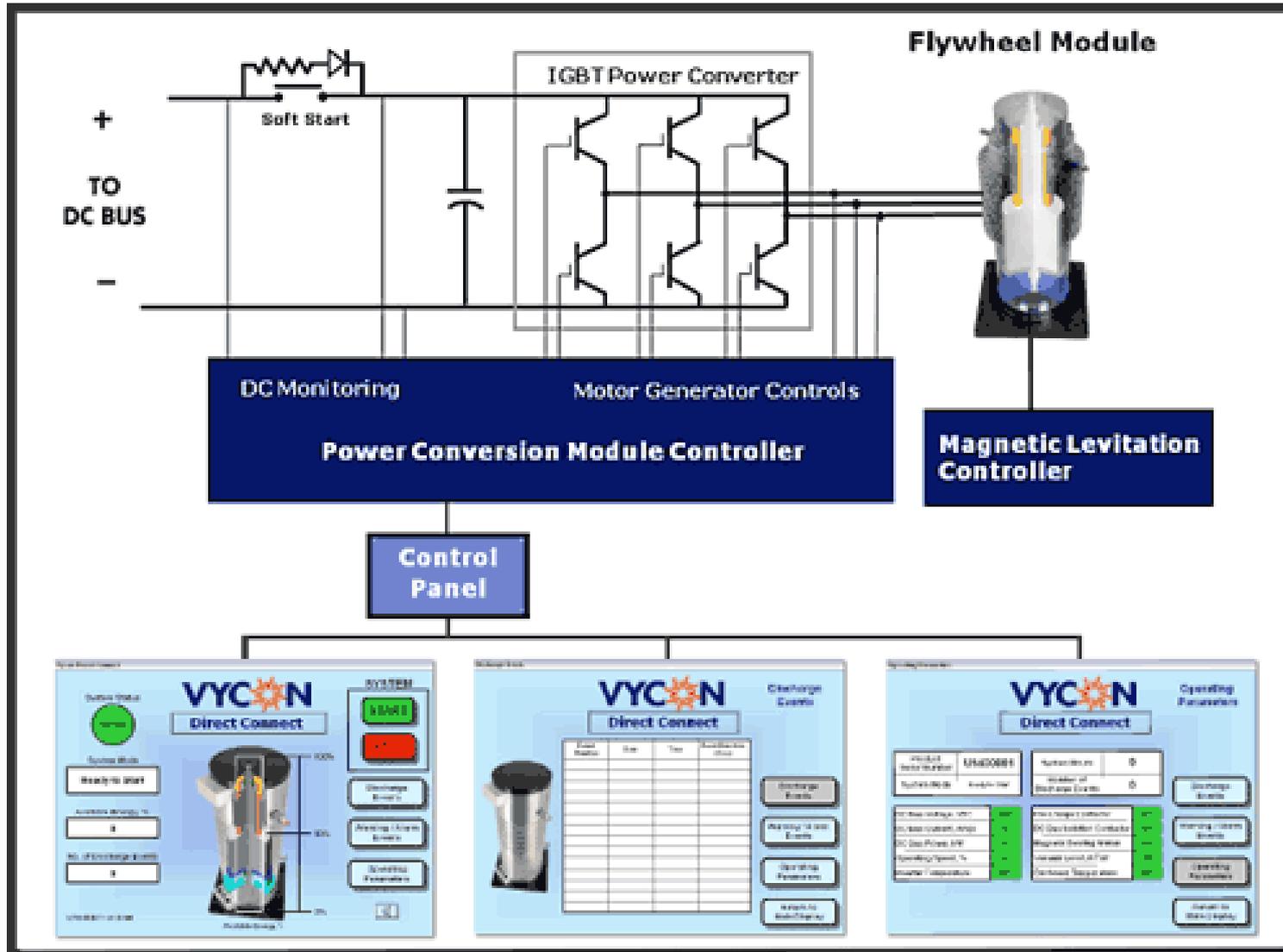
# Volantes de Inercia

- Desarrollados en la industria del transporte para freno regenerativo
- Dispositivo mecánico, cilíndrico, con momento de inercia ( $I = \frac{1}{2} m^2 r$ ) significativo
  - Gran resistencia a la variación de velocidad
  - Energía cinética rotatoria o angular almacenada es proporcional al momento de inercia  $I$  y al cuadrado de la velocidad angular  $\omega$ 
    - $E = \frac{1}{2} \cdot I \cdot \omega^2$
- El principal objetivo de diseño de un volante de inercia es eliminar pérdidas por roce del rotor
- Eficiencia puede llegar a 80%

# Volantes de Inercia



# Volantes de Inercia



# Referencias proyectos FESS

# Proveedores

- Actualmente los proveedores más populares en el sector eléctrico son:
  - Beacon Power USA <http://beaconpower.com/>
  - Temporal Power CA <http://temporalpower.com/>
  - PowerCorp AUS-Alaska (adquirida por ABB)
  - Vycon <http://www.acsystems.com/vycon/>
- Existen otros proveedores en otros sectores: transporte, puertos, datacenters, etc.

# Beacon Power: Stephentown, New York – 20 MW



- 200 unidades; en operación desde Enero 2011
- Entre 3000 y 5000 ciclos de carga y descarga anual
- Provee compensación al error de pronóstico de la zona

[https://www.youtube.com/watch?v=ay\\_NiGu7mis](https://www.youtube.com/watch?v=ay_NiGu7mis)

# Beacon Power: Hazle Township, Pennsylvania

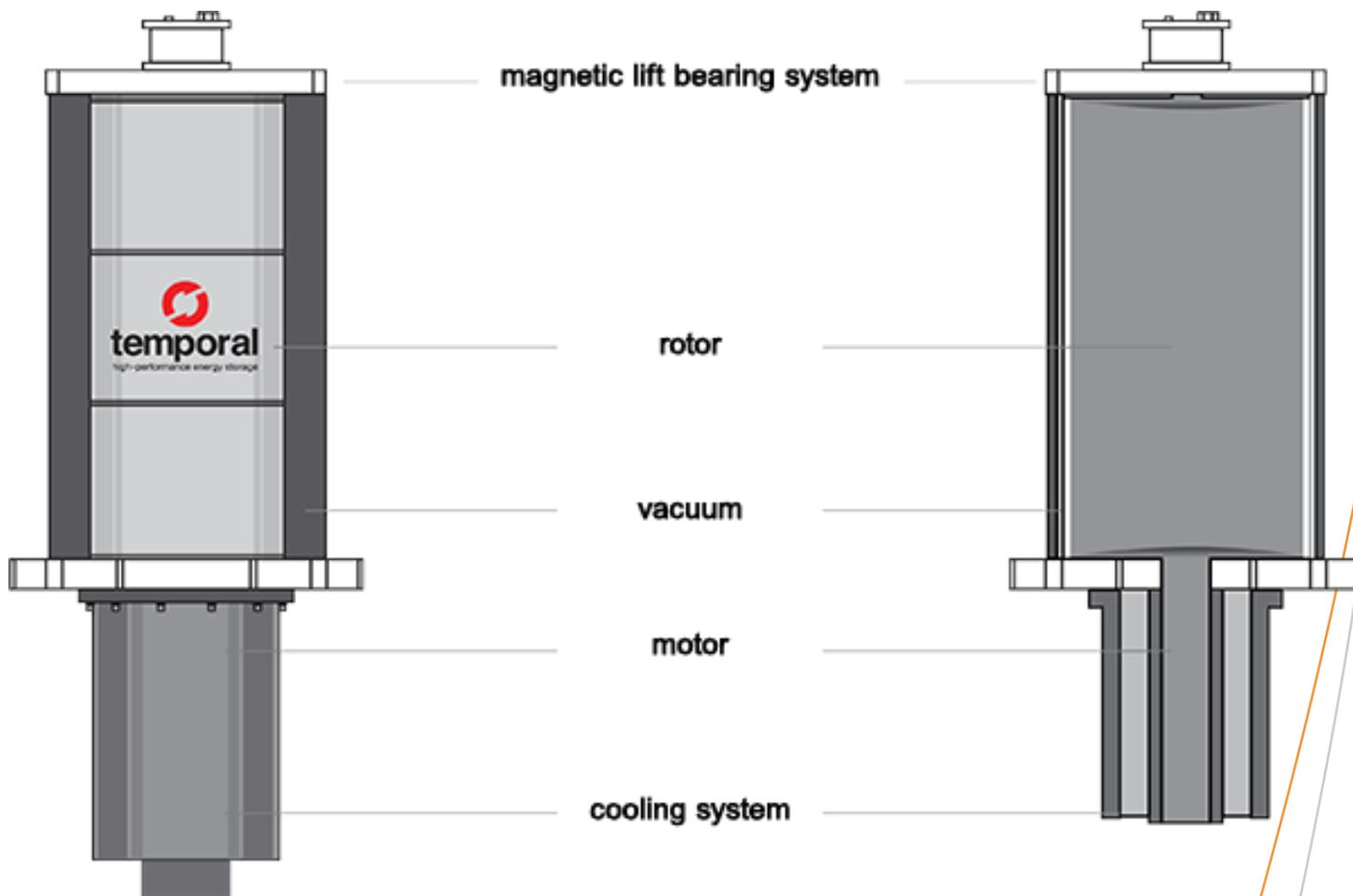


- 20 MW para regulación de frecuencia PJM
- 200 unidades en operación desde Julio de 2014
- PCC en 66kV

# Beacon Power: Hazle Township, Pennsylvania



# Temporal Power



# Temporal Power - NRStor

- 2 MW para control de frecuencia en Ontario CA
- En operación comercial desde 2014
- Primer FESS en Canadá



# Reflexiones finales

- El AE de energía es nuevo eslabón en la cadena de la industria eléctrica, Generación, Transmisión, Distribución, Almacenamiento y uso final de la energía Eléctrica
- Las aplicaciones son múltiples y se extienden a toda la cadena del negocio eléctrico
- Las tecnologías son variadas y algunas todavía en desarrollo
- La regulación se está actualizando a esta nueva oferta tecnológica



# ***POWER BUSINESS***

*Technology and Expertise on Demand*



## Centrales de Bombeo Pumped Hydro Storage PHS

Gabriel Olguin, Ph.D.

Socio Director Power Business,  
Profesor Universidad de Santiago

# Características básicas

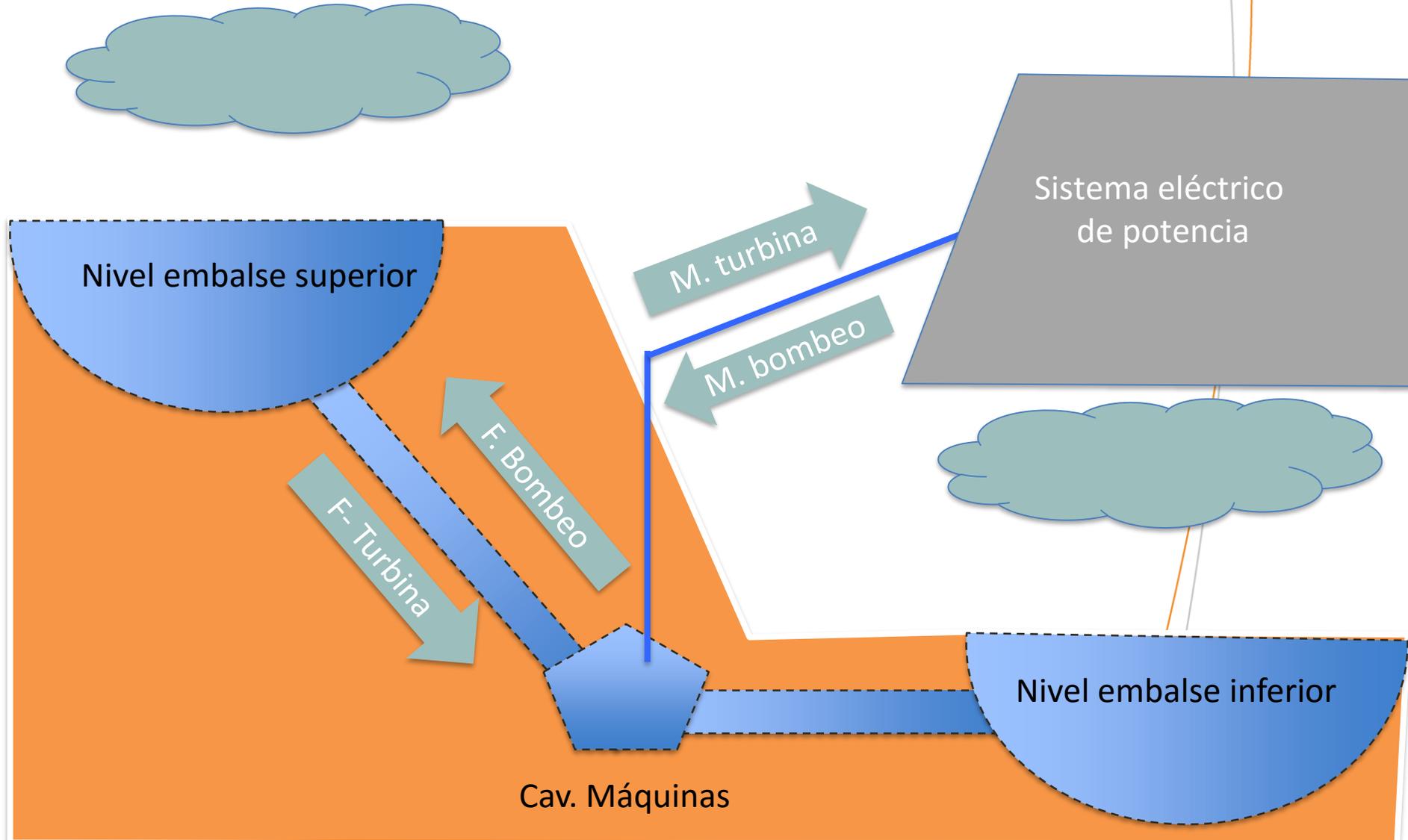
- Es la tecnología convencional y dominante de almacenamiento de energía en un SEP
- Son un **tipo especial de central hidráulica** que trabaja en dos modos:
  - Modo bombeo y Modo turbina
- Cuando no están produciendo energía eléctrica pueden ser usadas para bombear agua desde un embalse inferior a uno superior
  - Fase de generación
  - Fase de bombeo
- Permiten conservar el agua y almacenar energía

# Desarrollo Histórico



- 1882 Zurich: primera central hidroeléctrica en usar un conjunto turbina - bomba
- 1925 cerca de 25 centrales con bombeo en Europa
- 1931 Baldeneyesee Alemania: primera turbina reversible
- Tennessee Valley Authority: Turbina reversible tipo Francis 1955
- En Europa, UK, la primera gran Central de Bombeo fue Ffestiniog 360 MW

# Características básicas



# Ventajas

- Robustas, confiables, flexibles
- Capaz de tomar carga en el rango de minutos
- Permiten que la base de la curva de carga sea tomada por máquinas menos flexibles (térmica a vapor) dejando el seguimiento de la carga a la central de bombeo
- Eventualmente fuentes económicas de punta
- La relativa eficiencia ( $\approx 70-80\%$ ) se compensa al usar energía de bajo costo para el bombeo

# Tipología de Centrales de Bombeo

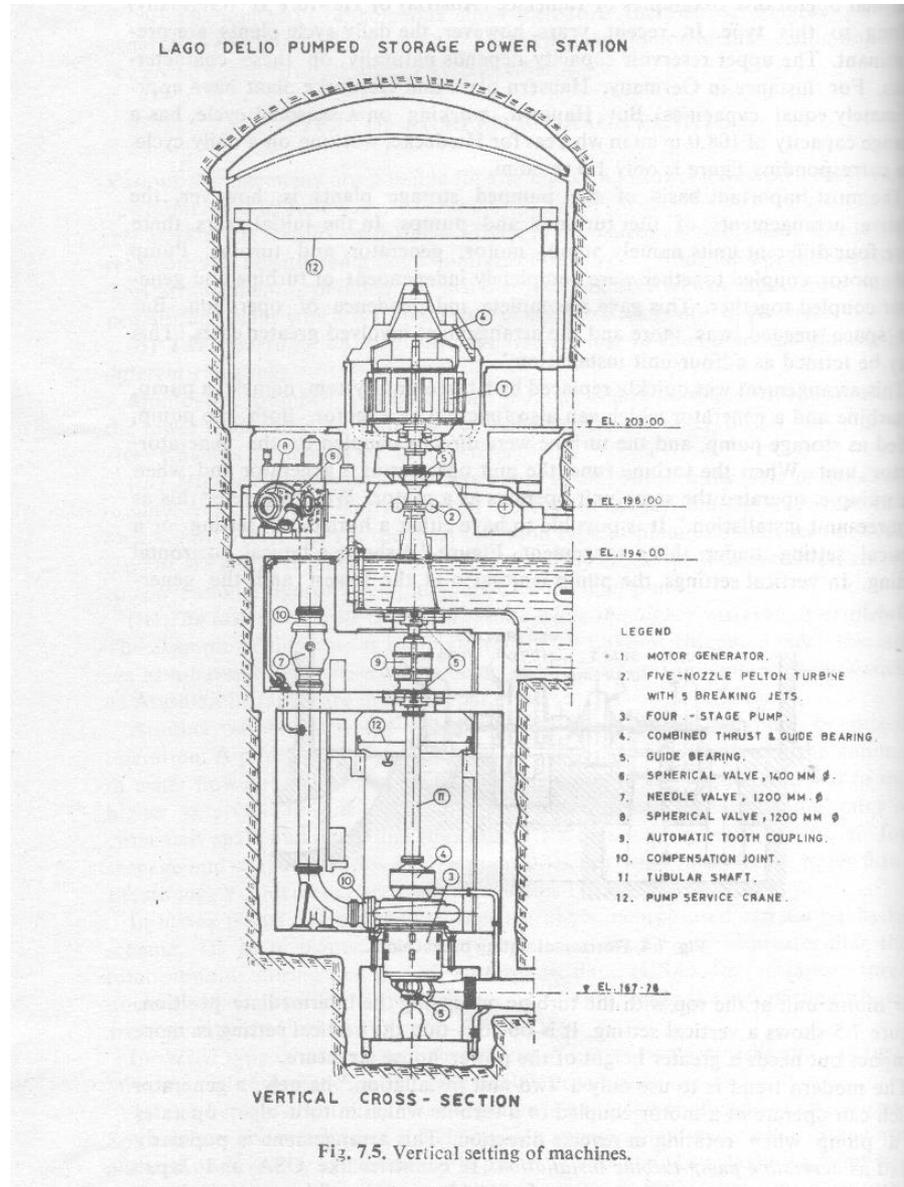
- Según los embalses
  - Ambos embalses en un mismo río
  - Embalses en ríos diferentes a diferentes alturas
  - Embalse superior artificial
  - Ambos embales naturales
  - Embalse artificial de agua de mar
- Régimen de turbina/bomba
  - Diario
  - Semanal
  - Estacional

# Arreglo de equipamiento turbina y bomba



- Primera generación, 4 equipos: turbina, generador, bomba y motor
- Segunda generación, tres equipos: turbina, generador-motor, bomba
- Sistemas reversibles, 2 equipos: motor-generador y turbina-bomba

# Conjunto Turbina Bomba



# Ventajas y Desventajas de PHS

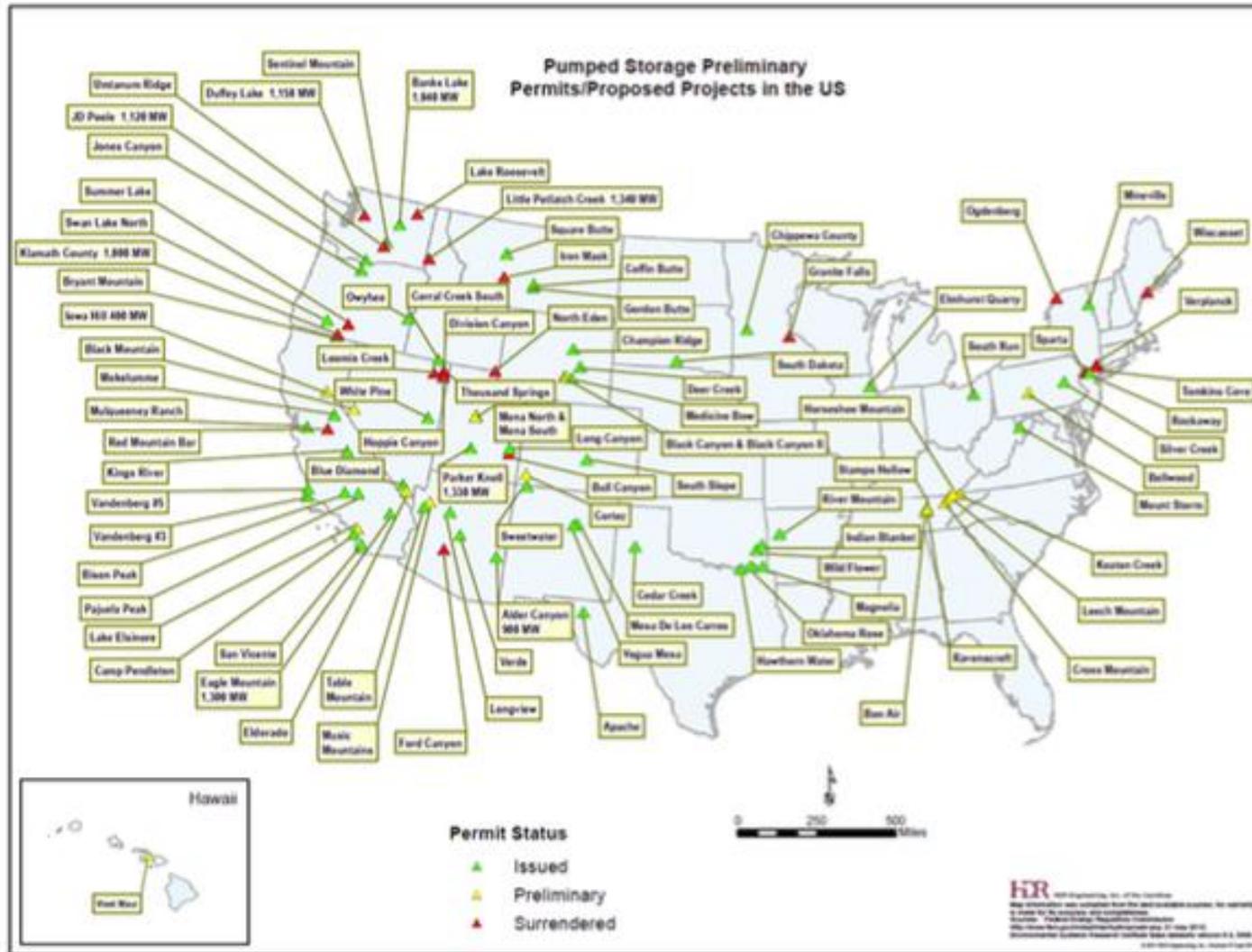
## Ventajas

- Tecnología probada
- Confiable
- Flexible y rápida
- Almacenamiento masivo de energía (100´s MWs)
- Aporta inercia y los servicios convencionales de una central hidráulica

## Desventajas / riesgos

- Ubicación sujeta a disponibilidad de sitio
- Alto costo
  - Obras civiles, embalse, cavernas, etc.
- Rendimiento de 70%
- Riesgos/aprehensiones ambientales
- Riesgo de cumplimiento programa

# Proyectos de PHS en USA

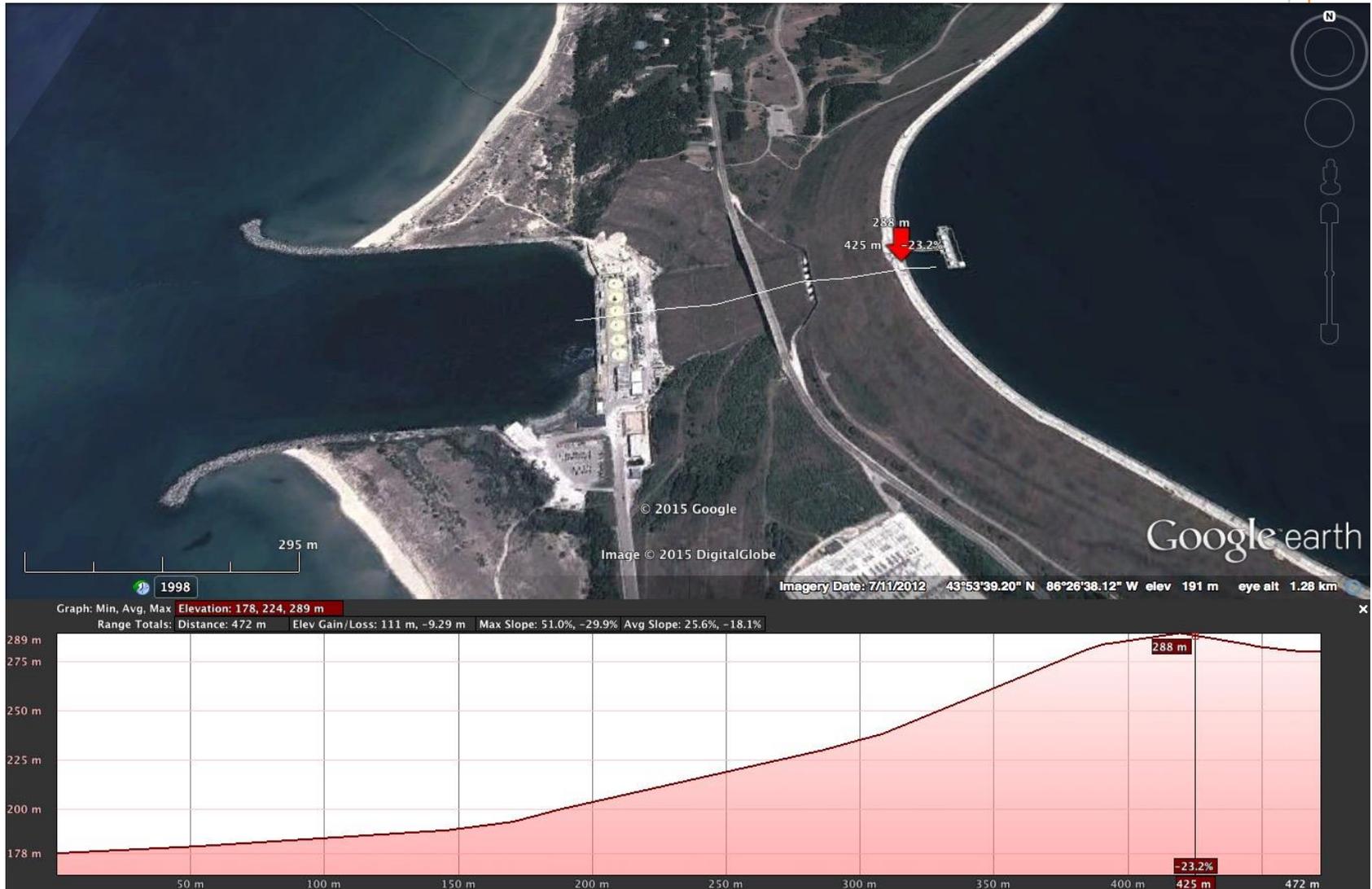


# Referencias proyectos Estaciones de Bombeo PHS

# Ludington – PHS – Michigan USA

- Operación desde 1973
- Lago Michigan - USA
- 1872 MW y 15000 MWh almacenamiento
- Seis turb/bombas reversibles
- Embalse: 4x1,6km
- 100 millones de mt<sup>3</sup>
- 70% eficiencia

# Ludington – PHS – Michigan USA



# Ludington – PHS – Michigan USA



Ubicación

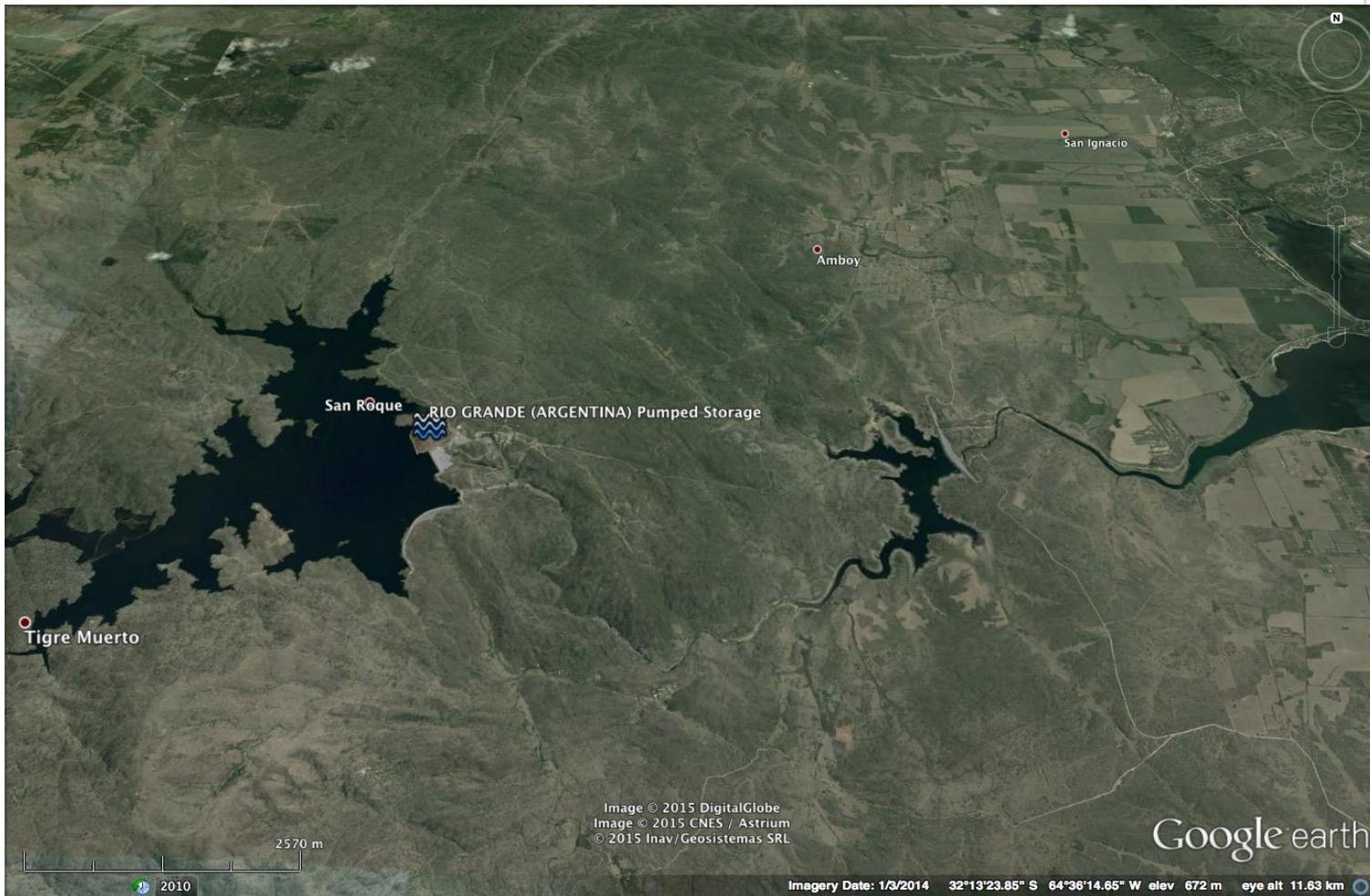
[43° 53'29.57"N 86° 26'3.27"W](#)

# Complejo hidroeléctrico Rio Grande – Argentina



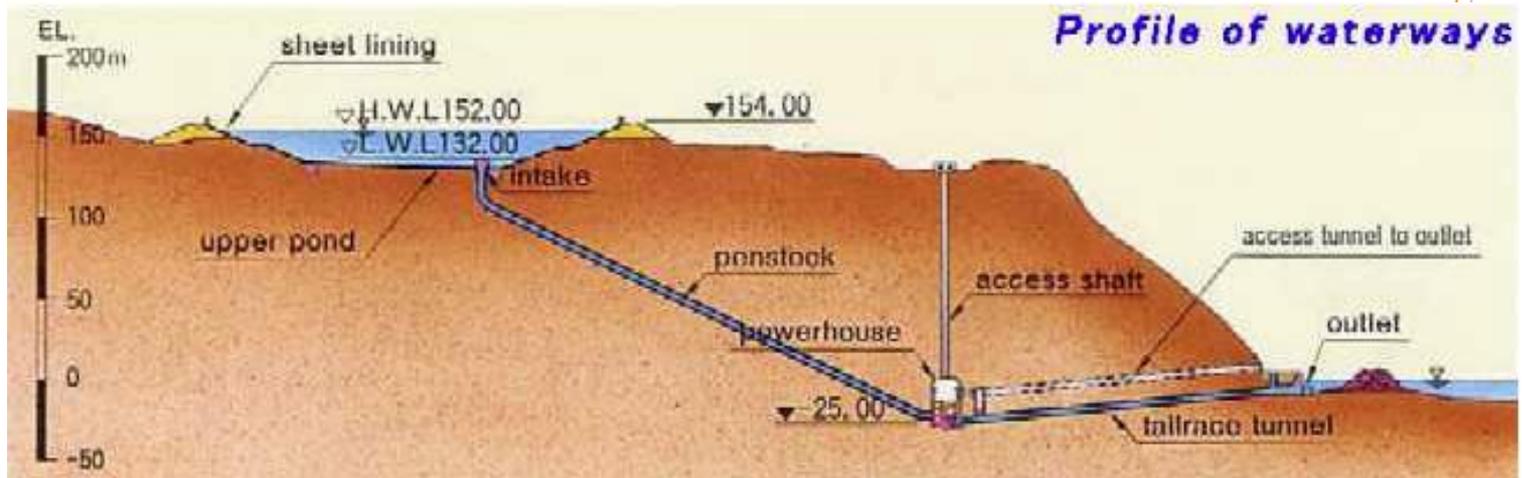
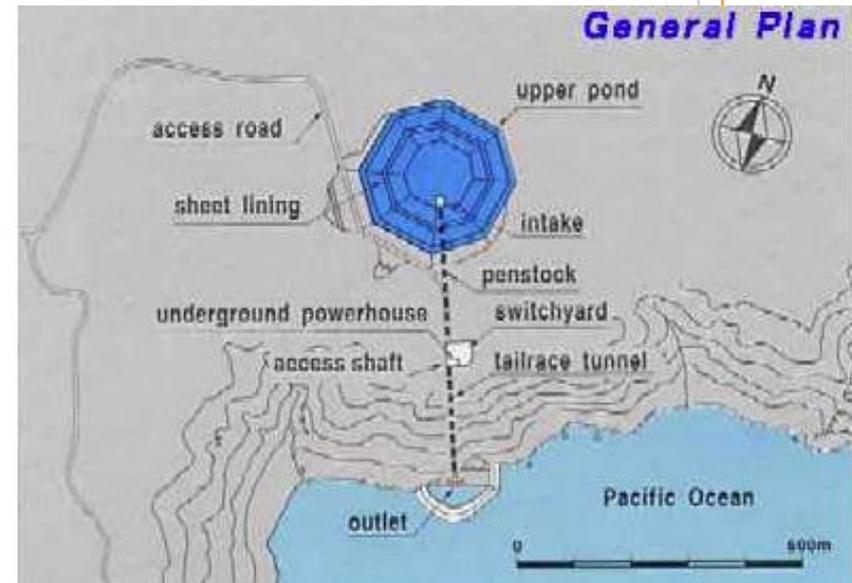
- En operación desde 1986
- Central reversible en caverna de 750MW
- Almacenamiento de aprox. 100 GWh
- Embalses: Cerro Pelado (3,6 Hm<sup>3</sup>)y Arroyo; desnivel de aprox. 185 mts
- Ubicación: Valle de Calamuchita, 130km de Córdoba.
- 4 turbina-bombas 187,5 MW c/u
- Tiempo de arranque 3 minutos

# Complejo hidroeléctrico Rio Grande – Argentina



# Okinawa PHS

- Isla de Okinawa – Japón
- Embalses: artificial – mar
- Embalse: 564000 mt<sup>3</sup>
- 30 MW – 26 mt<sup>3</sup>/seg – 136 mts



# Okinawa PHS



# Okinawa PHS



# Almacenamiento de Energía Eléctrica



	Beneficio	T.	Consumo final 10s de kW	Distribución y Transmisión 100s kW a 10s MW	Generación e ISOs 100s de MW
Alto valor de la energía almacenada \$/kWh	Energía \$/Kwh	Horas	Gestión energética	Postergación de inversiones en activos de Tx y Dx	Arbitraje de energía
	Potencia \$/Kw	Minutos	Fiabilidad		Capacidad, potencia firme
Alto valor de la potencia \$/kW	Fiabilidad \$/kW	Segundos	Recursos energéticos distribuidos	Suavización de ERNC	
	Operación \$/KVAR &\$/Kw		Calidad del producto	Soporte al Sistema de transmisión	Servicios Complementarios



# ***POWER BUSINESS***

*Technology and Expertise on Demand*



Gabriel Olguin, Ph.D.  
Socio Director Power Business,  
Profesor Universidad de Santiago

**GRACIAS**

[golguin@powerbusiness.cl](mailto:golguin@powerbusiness.cl)