

Sistemas de Almacenamiento de Energía en el SEP

Gabriel Olguin, Ph.D.
Socio Director Power Business,

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.

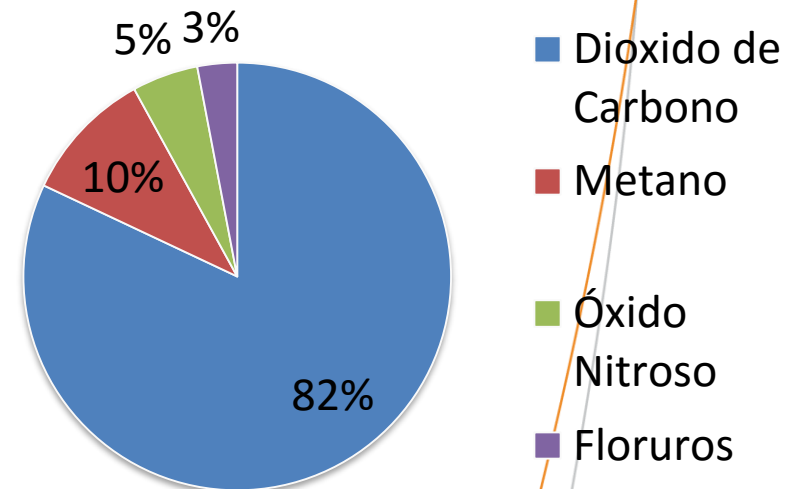
Gases de efecto invernadero

Gases que atrapan el calor en la atmósfera

- **Dióxido de carbono CO_2**
 - Quema de combustibles fósiles
- **Metano CH_4**
 - Industria de alimentos (carne) y rellenos sanitarios
- **Óxido Nitroso N_2O**
 - Actividades industriales, agricultura y quema de fósiles
- **Gases fluoruros**
 - Variedad de procesos

Emisiones totales 2013 USA

6673 Millones de toneladas CO_2



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 CO₂

- 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 CO₂
 - Grupo de tecnologías que evitan o reducen la emisión de CO₂

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

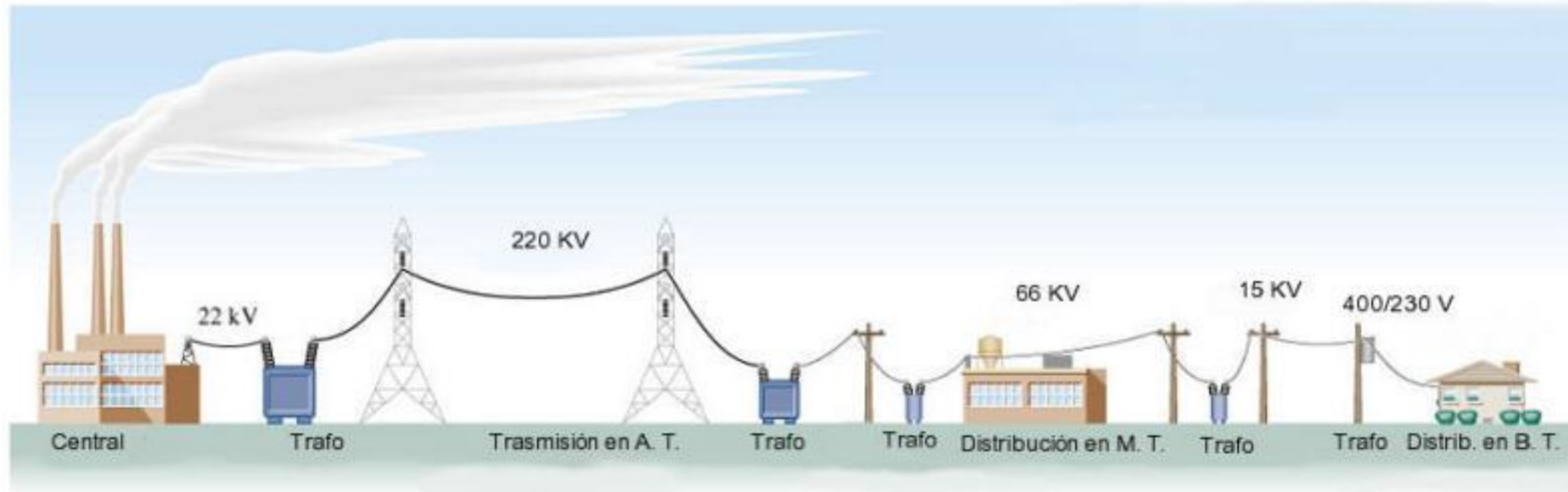
- Colombia tiene zonas donde las energías renovables presentan condiciones favorables
- El aprovechamiento de ese potencial plantea desafíos, entre ellos los relacionados con la expansión de los sistemas de transmisión y con el manejo de la variabilidad de la producción renovable del sol y el viento

Transmisión versus Almacenamiento

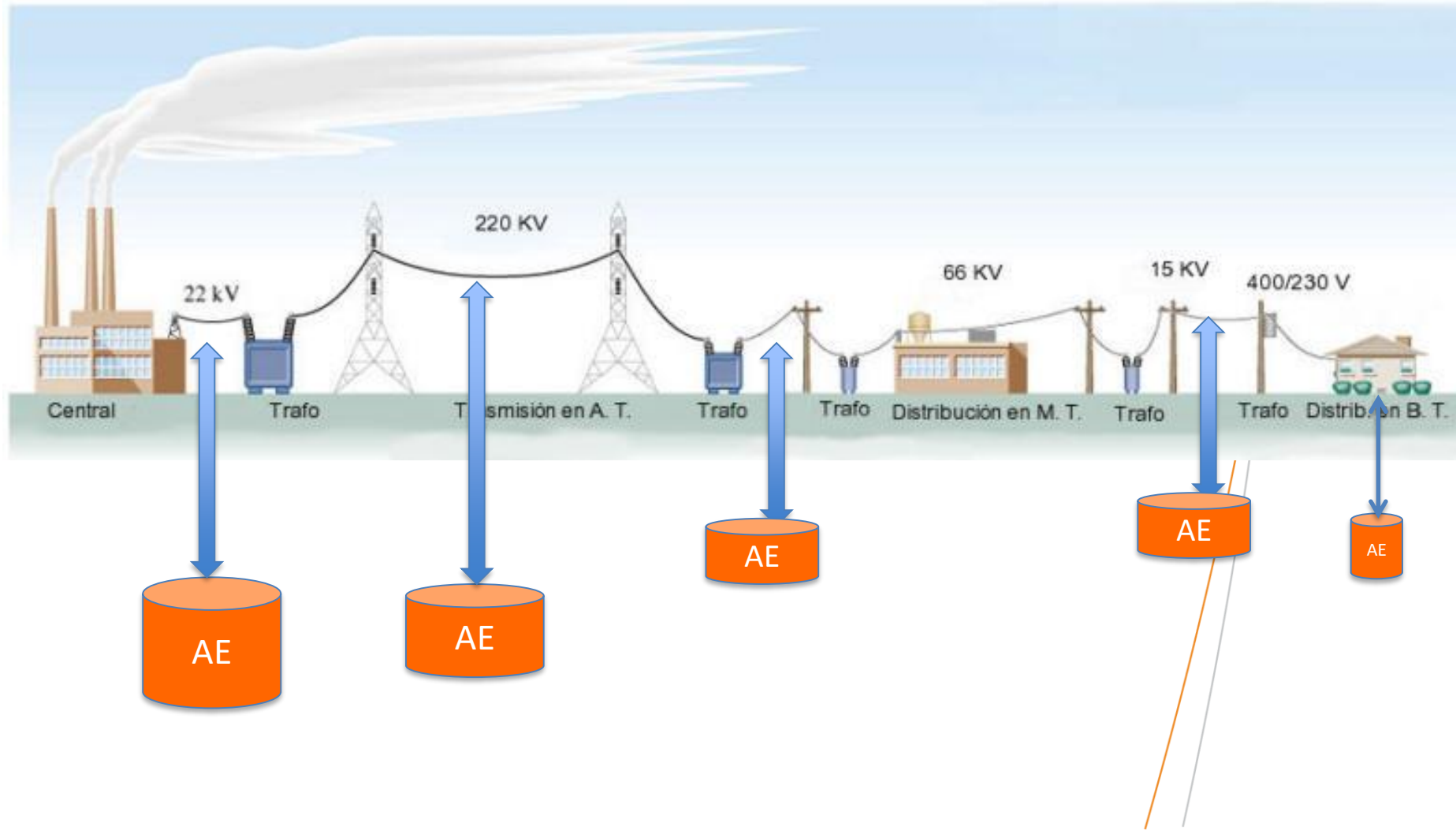
Dónde versus Cuándo

- 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, postergación de inversiones en activos de T&D
	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

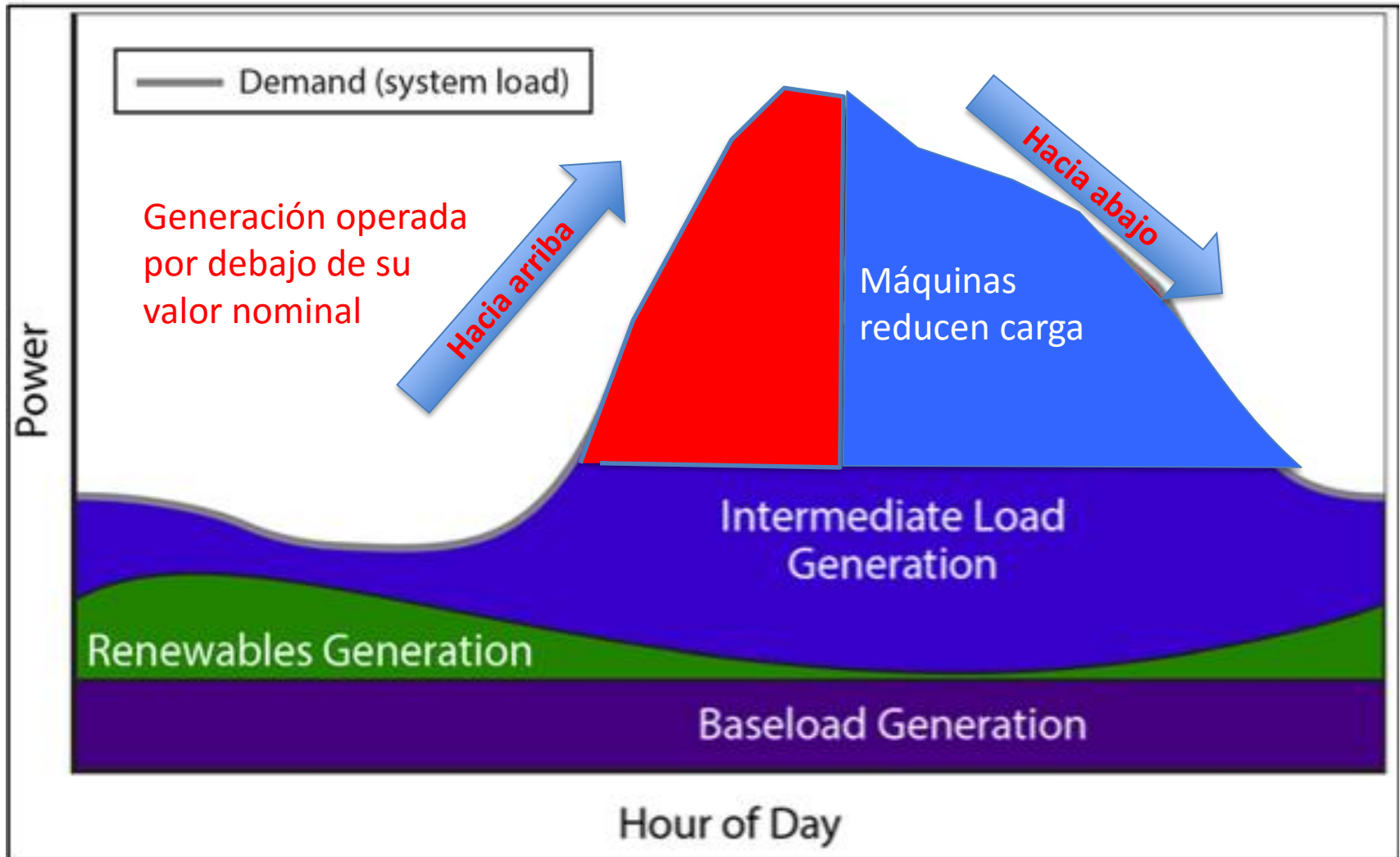


Figure 9. Electric Supply Resource Stack

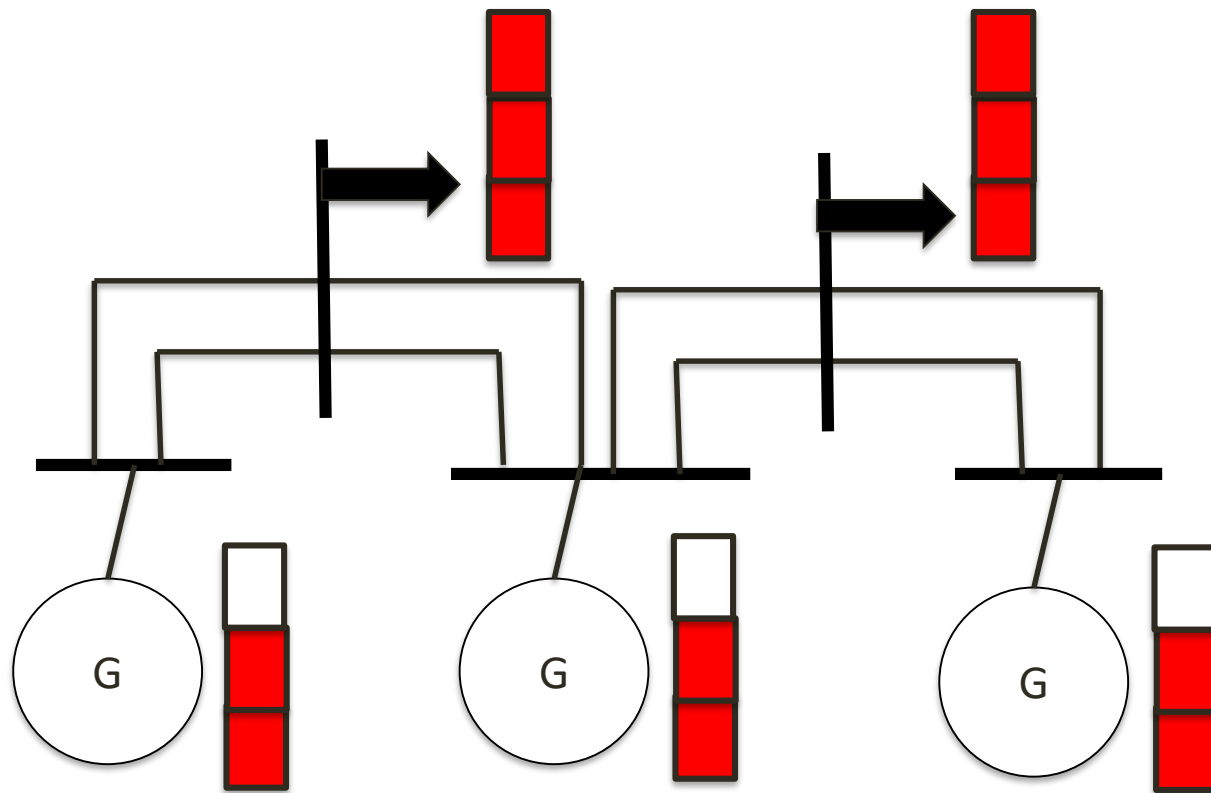
Reserva en Giro

- **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**

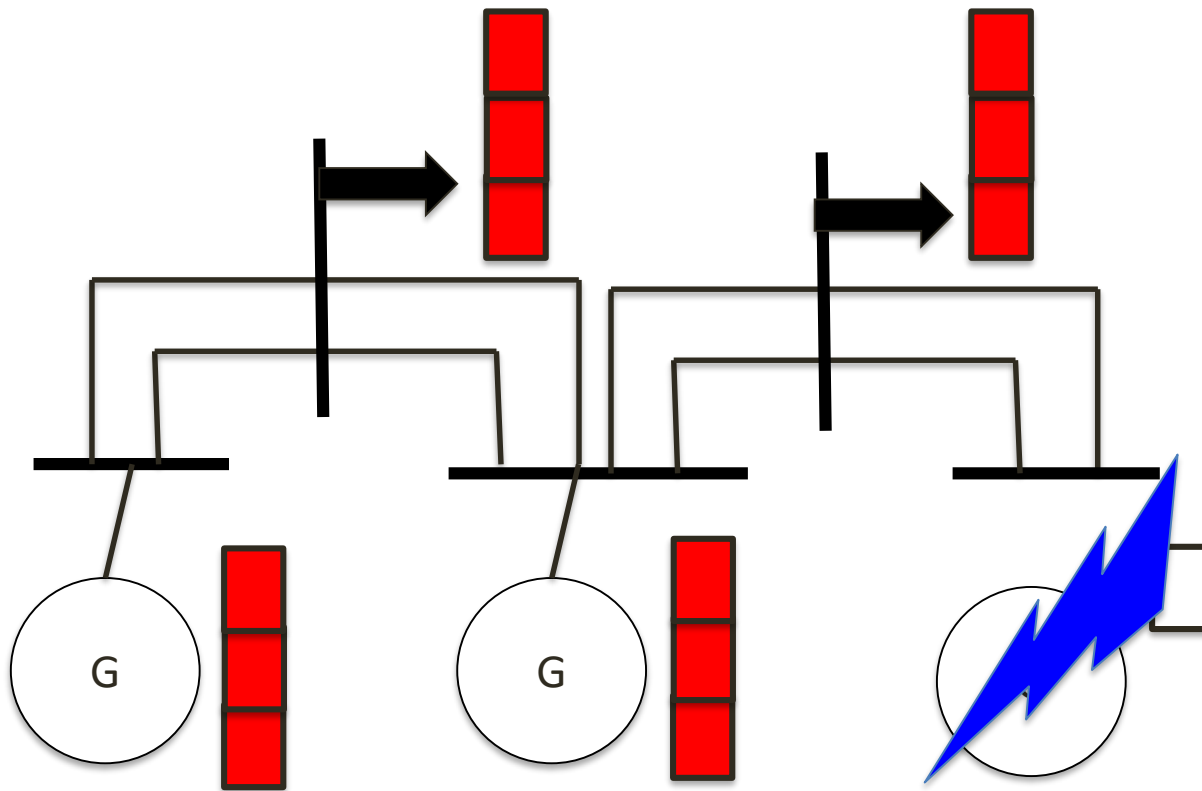
- El nombre “reserva en giro” hace referencia a **cierta capacidad de generación disponible y de rápido re-despacho en máquinas sincronizadas con el objeto lograr balance oferta demanda y controlar la frecuencia del sistema**
- Un nombre más apropiado a la **disponibilidad tecnológica actual es reserva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

Reserva sincronizada / en giro

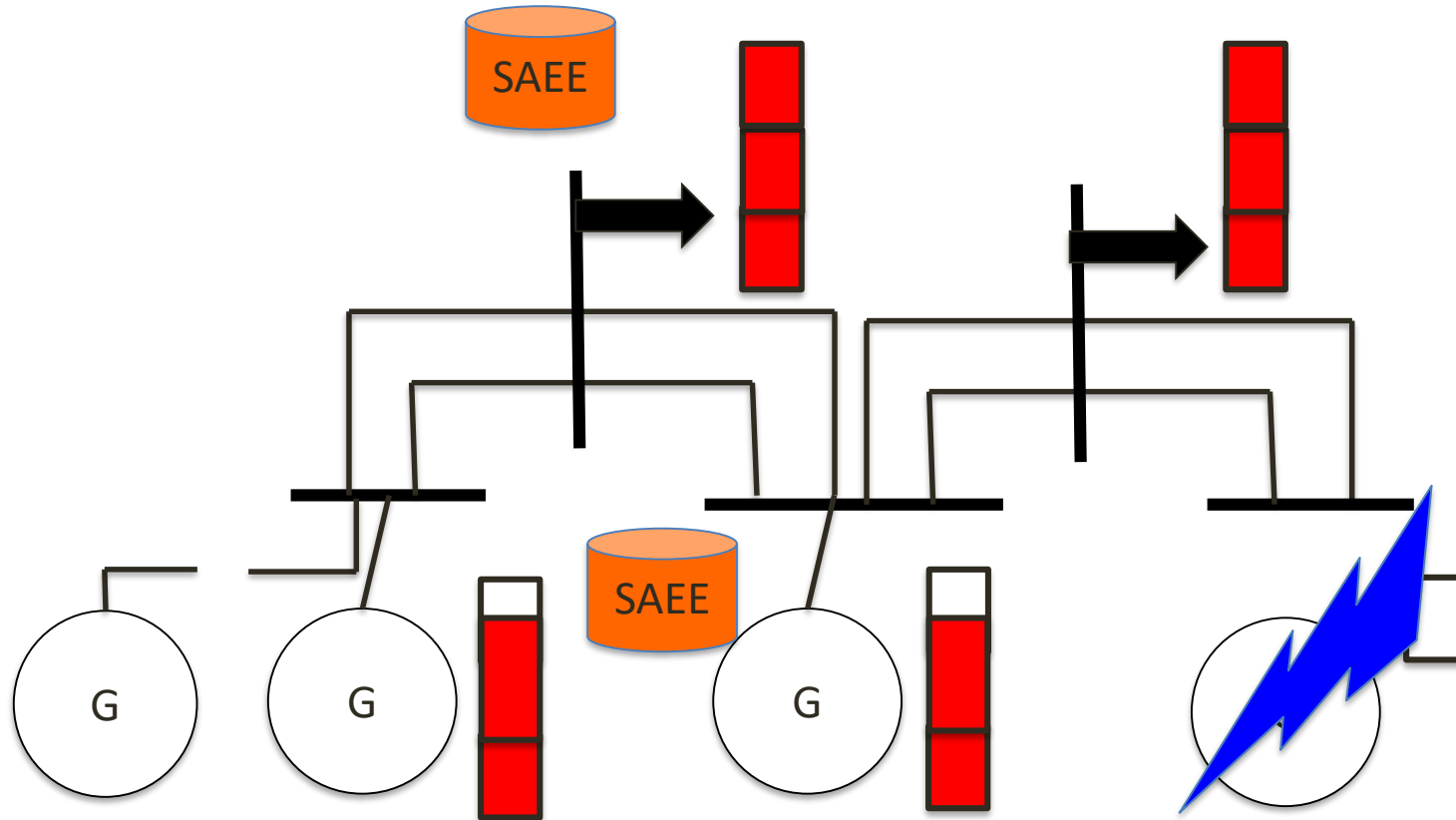


Unidades aportando reserva sincronizada o reserva en giro

Reserva sincronizada / en giro

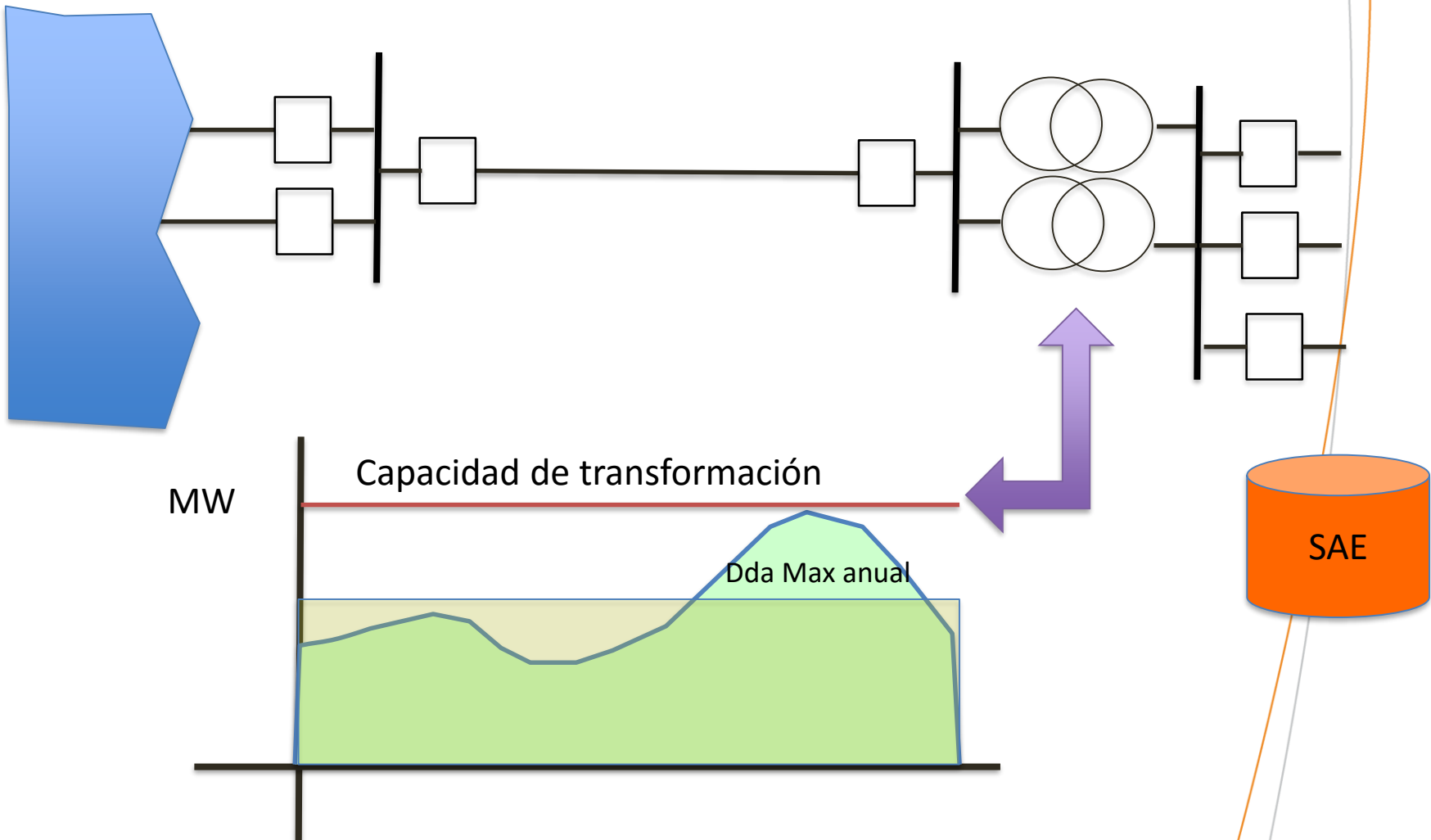


Reserva sincronizada / en giro

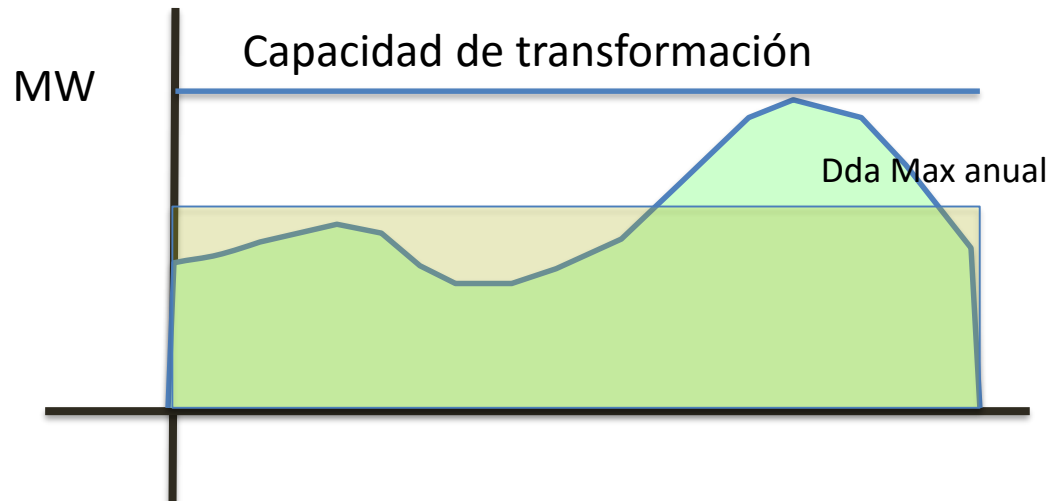
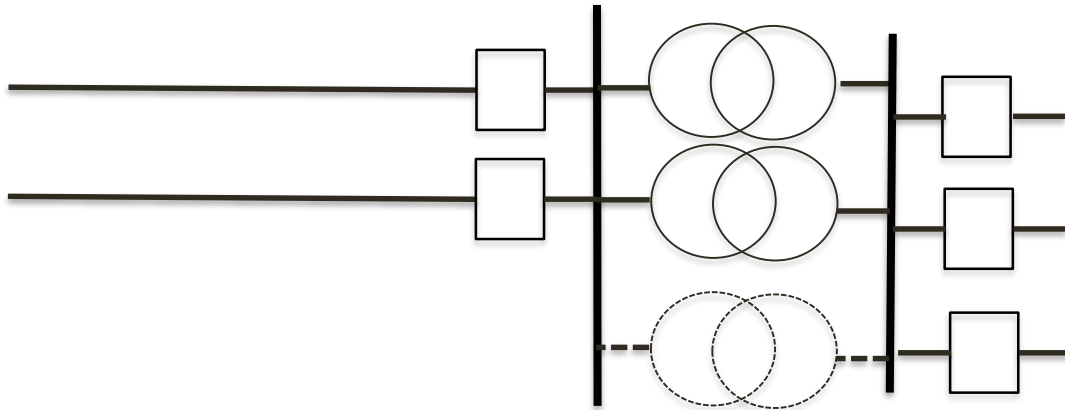


Postergación de Inversiones en Tx

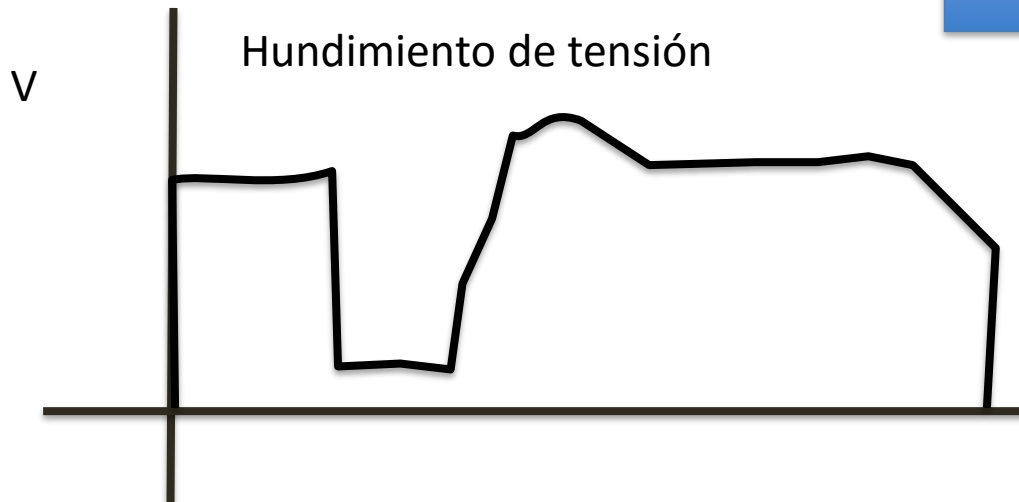
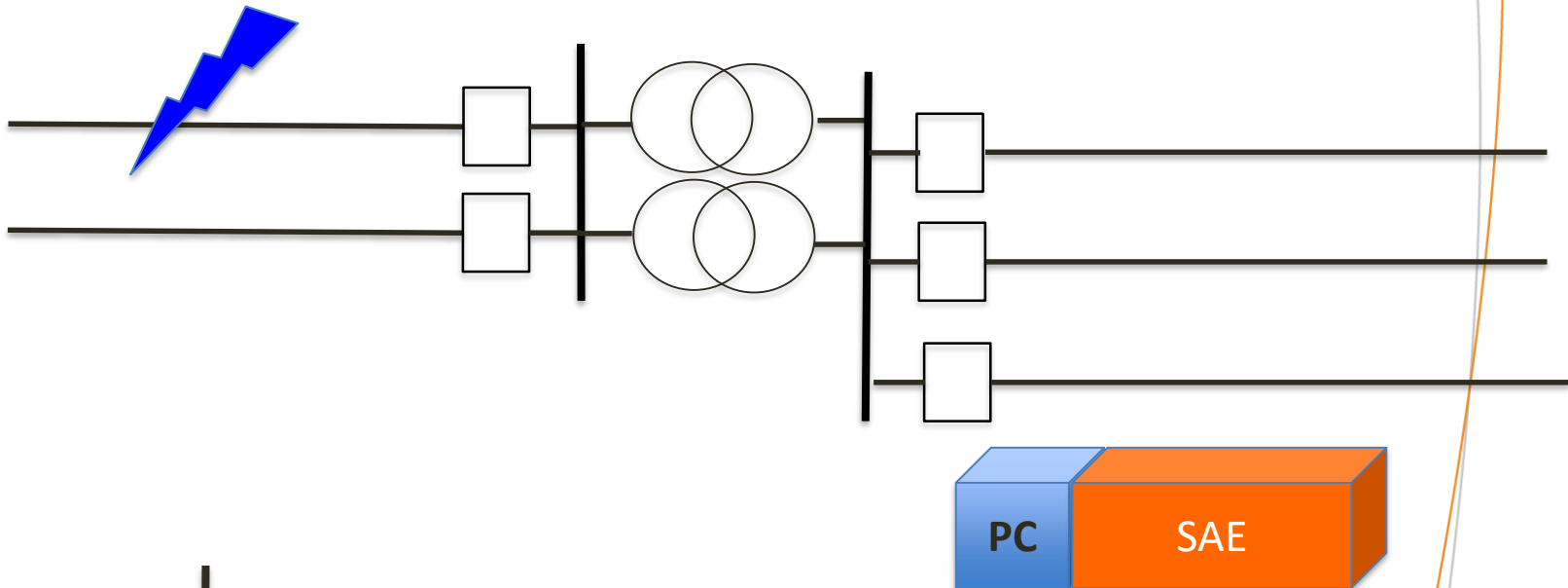
Alivio de congestión en Tx



Postergación de Inversiones en Dx



Calidad de la potencia: Hundimientos de tensión



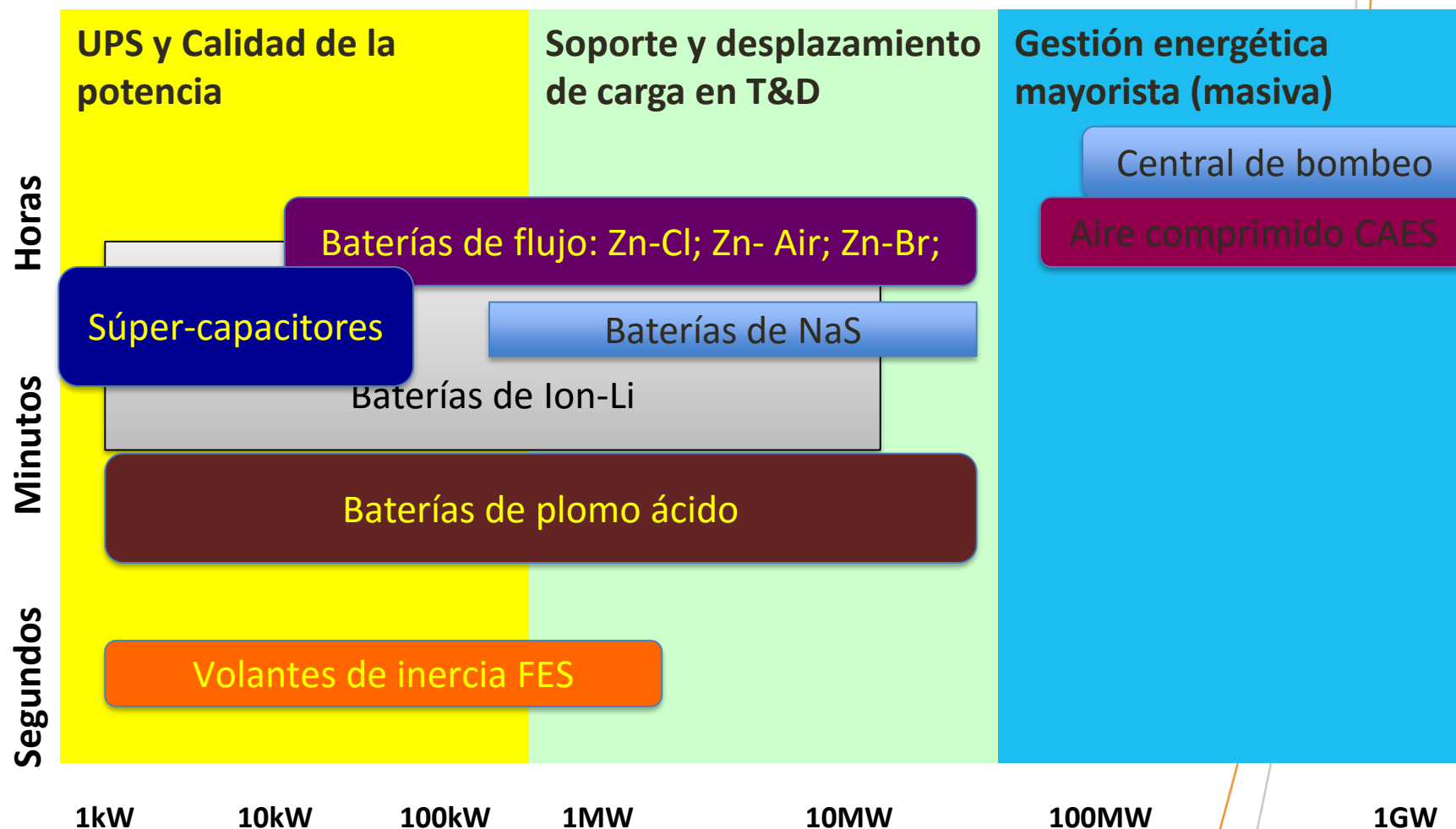
Otras prestaciones:

- 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

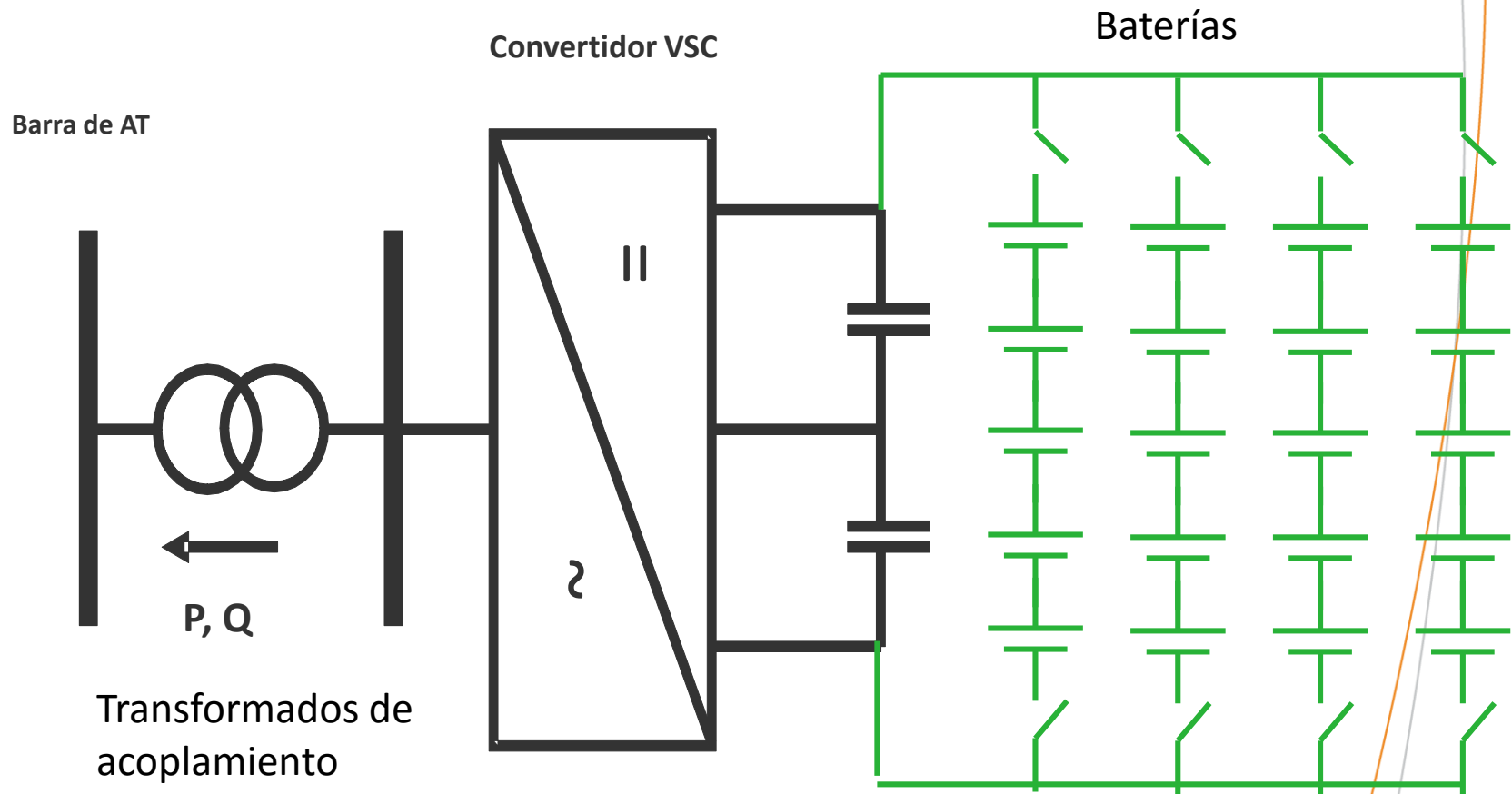
Gabriel Olguin, Ph.D.

Socio Director Power Business,
Profesor Universidad de Santiago

Battery Energy Storage System: BESS

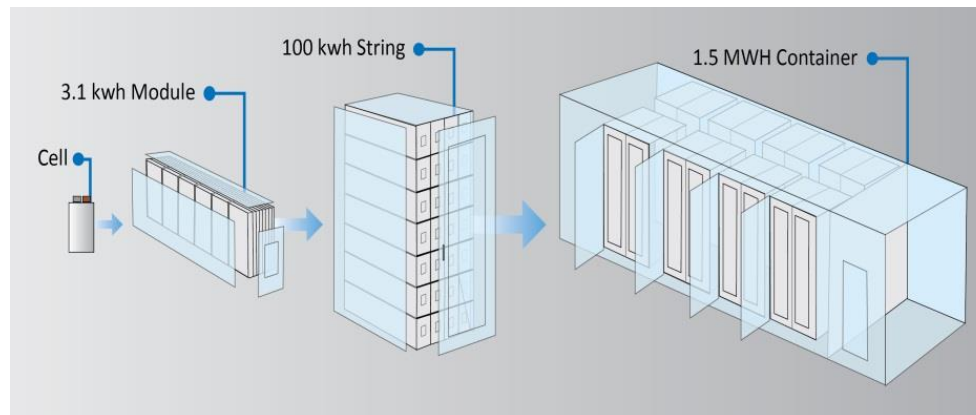
- Medio de almacenamiento: baterías electroquímicas (varios tipos):
 - Sulfuro de sodio (NAS) 89%, Plomo ácido 75-85%, Níquel Cadmio (NiCd) 60-70%, Ion Litio 95%.
- Sistema de convertidor de potencia:
 - Semiconductores, electrónica de potencia
- Balance of plant (conexión y auxiliares):
 - Transformador,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

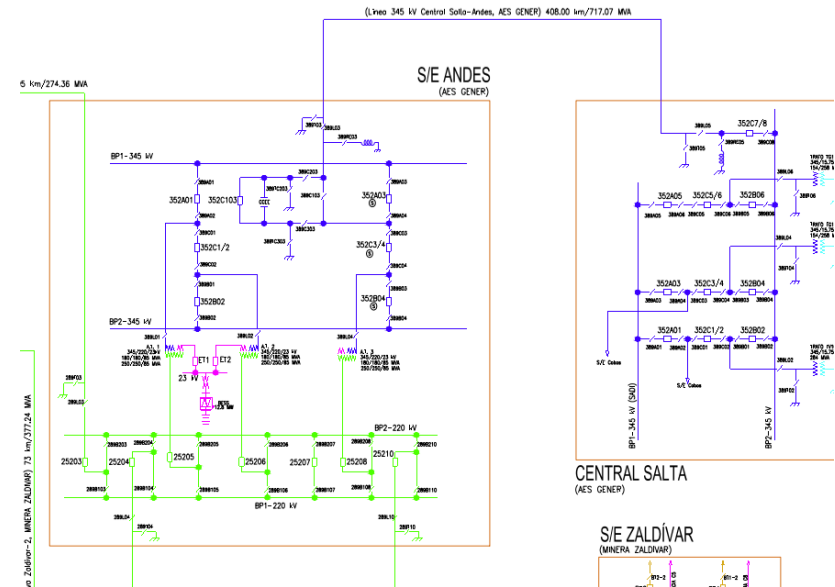
- Dos 19.8MW/7.8MWh proyectos en Chicago
- Regulación de frecuencia PJM, op. Junio 2015

AES GENER Los Andes BESS



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

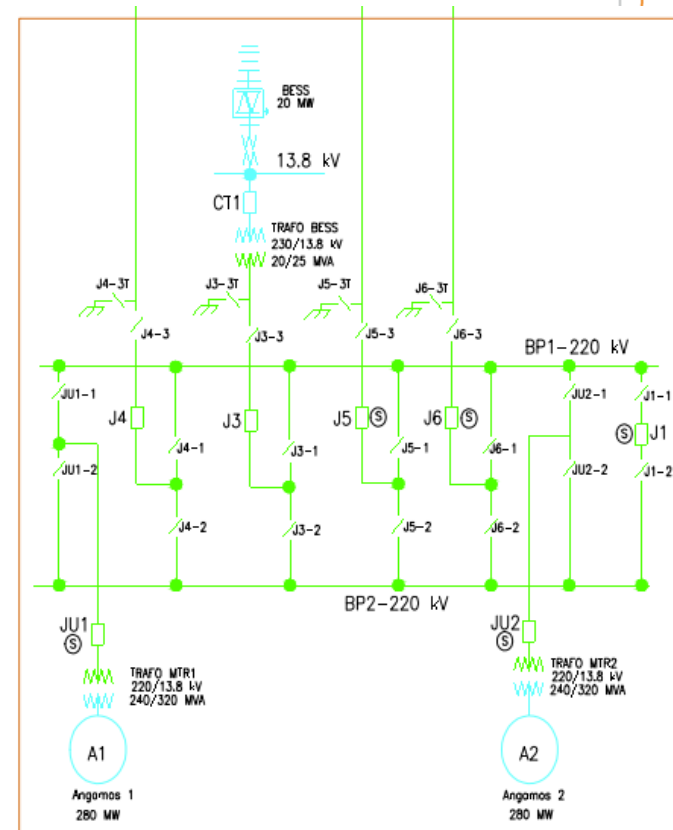
AES GENER Los Andes BESS



- Un SAEЕ 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

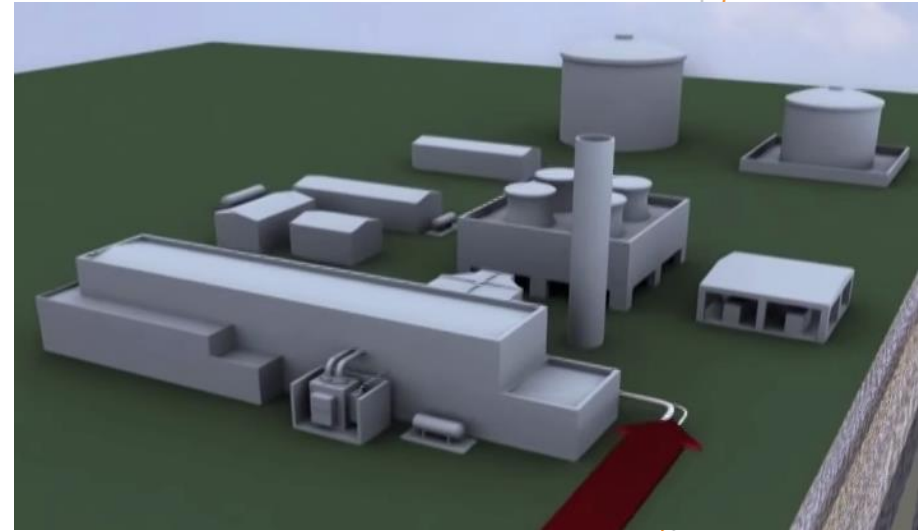
110MW CAES McIntosh Alabama



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

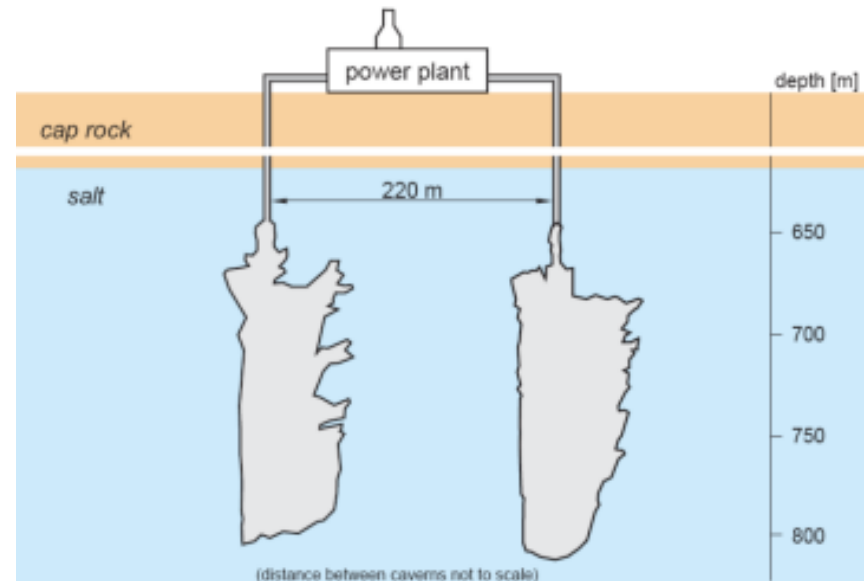
<https://www.youtube.com/watch?v=dGd7PIC09AM>

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 m³
- 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

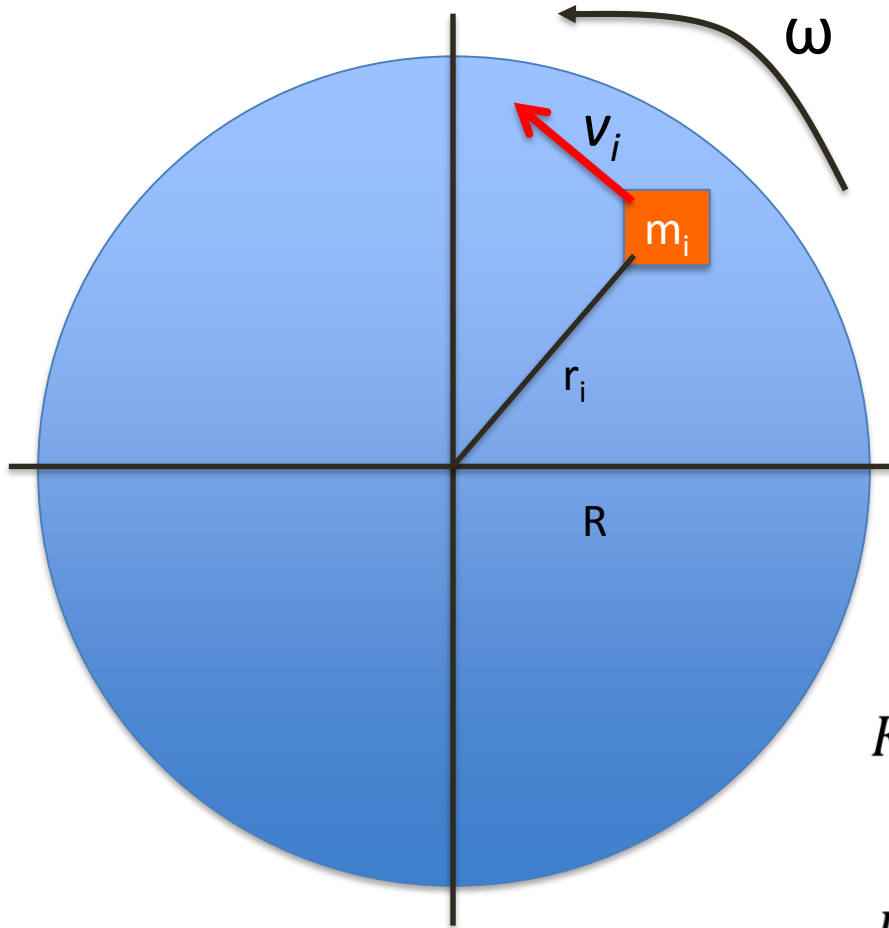


Volantes de Inercia Flywheel Energy Storage Systems FESS

Gabriel Olguin, Ph.D.

Socio Director Power Business,
Profesor Universidad de Santiago

Energía cinética rotatoria



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

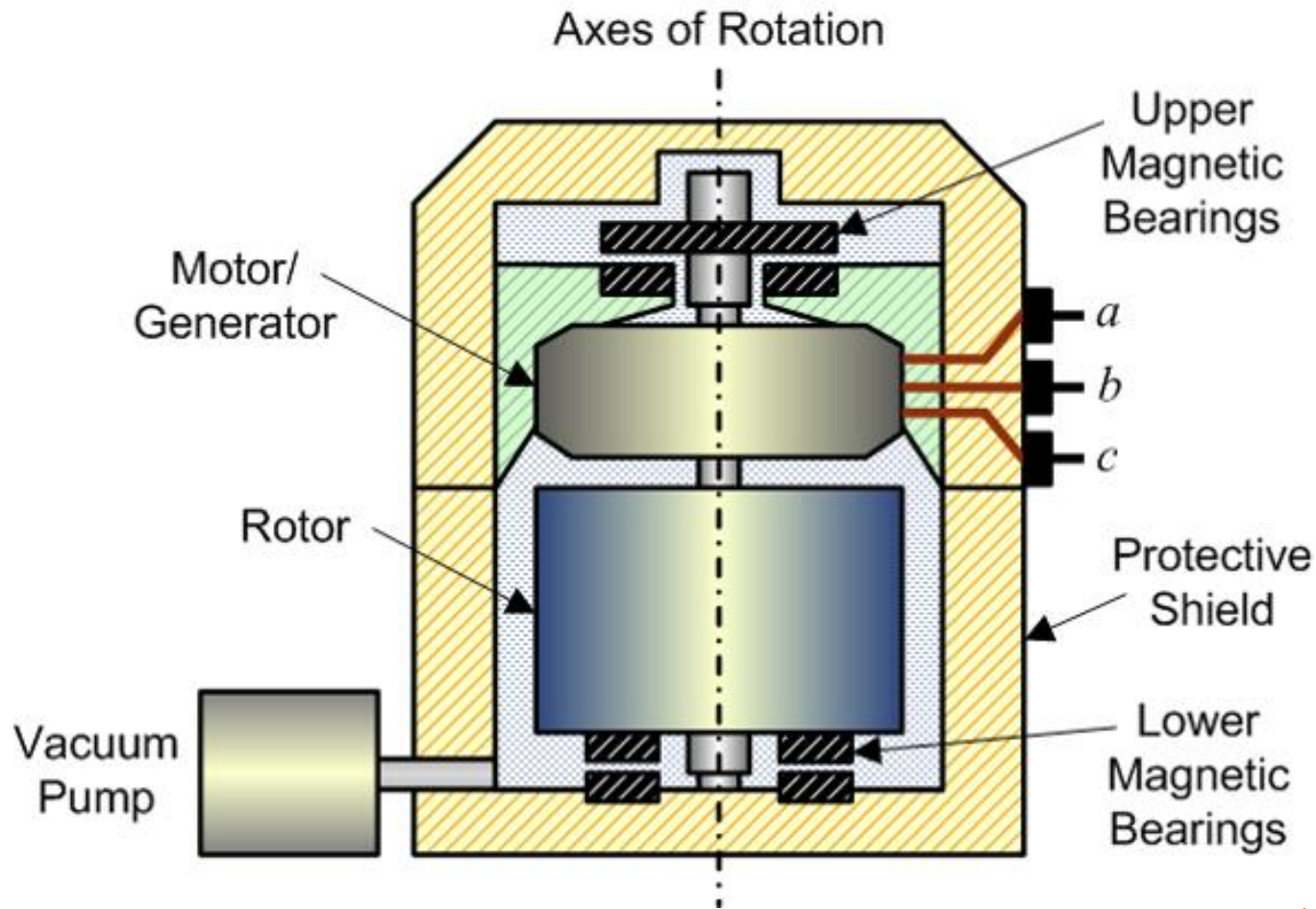
$$K_{disco} = \frac{\omega^2}{2} \sum m_i r_i^2 = \frac{\omega^2}{2} I$$

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

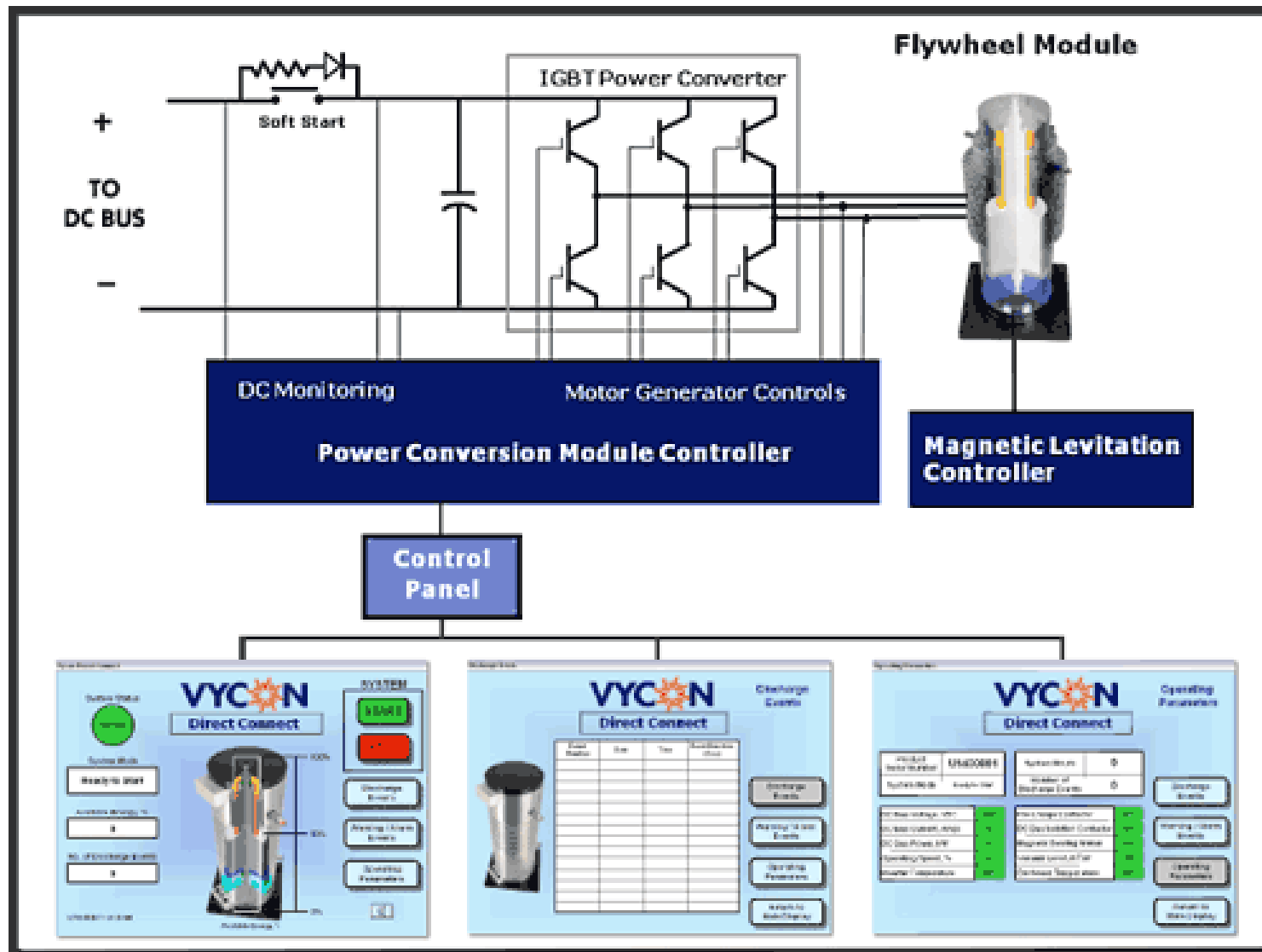
Volantes de Inercia

- 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 ω
 - $E = \frac{1}{2} \cdot I \cdot \omega^2$
- El principal objetivo de diseño de un volante de inercia es eliminar perdidas 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

Beacon Power: Hazle Township, Pennsylvania

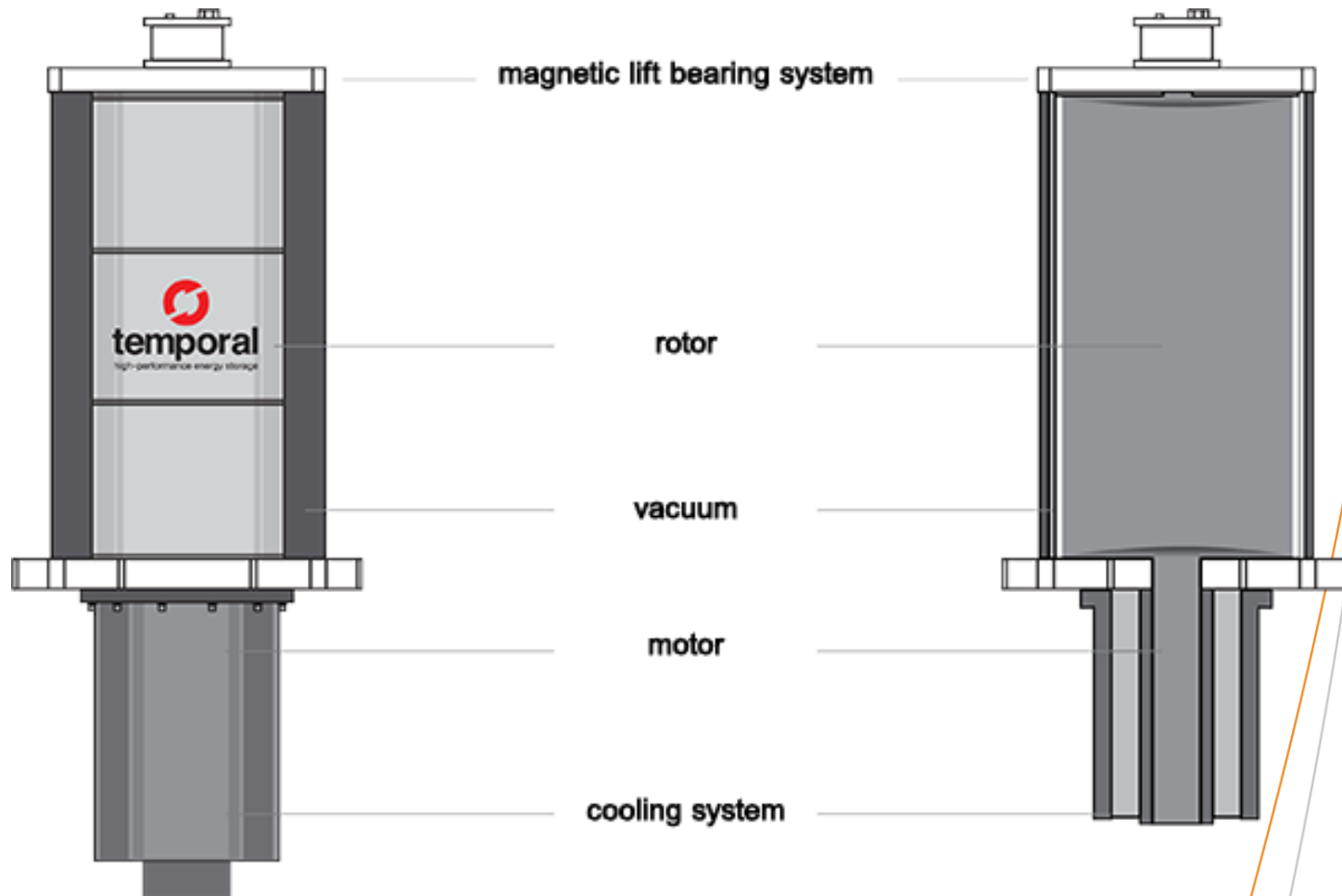


- 20 MW para regulación de frecuencia PJM
- 200 unidades en operación desde Julio de 2014
- PCC en 66kV

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

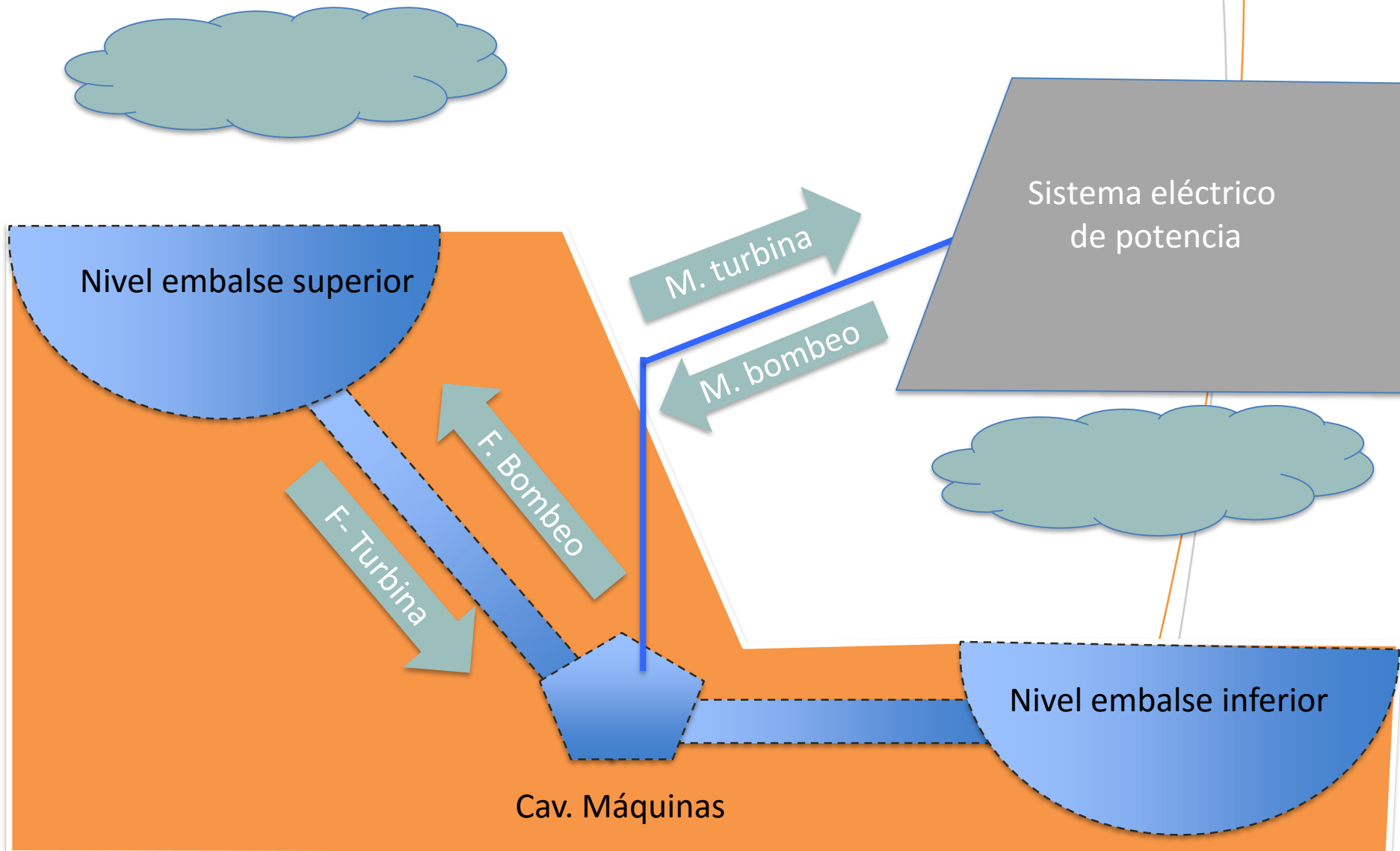
Características básicas

- 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 ($\approx 70\text{-}80\%$) 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 embalses 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

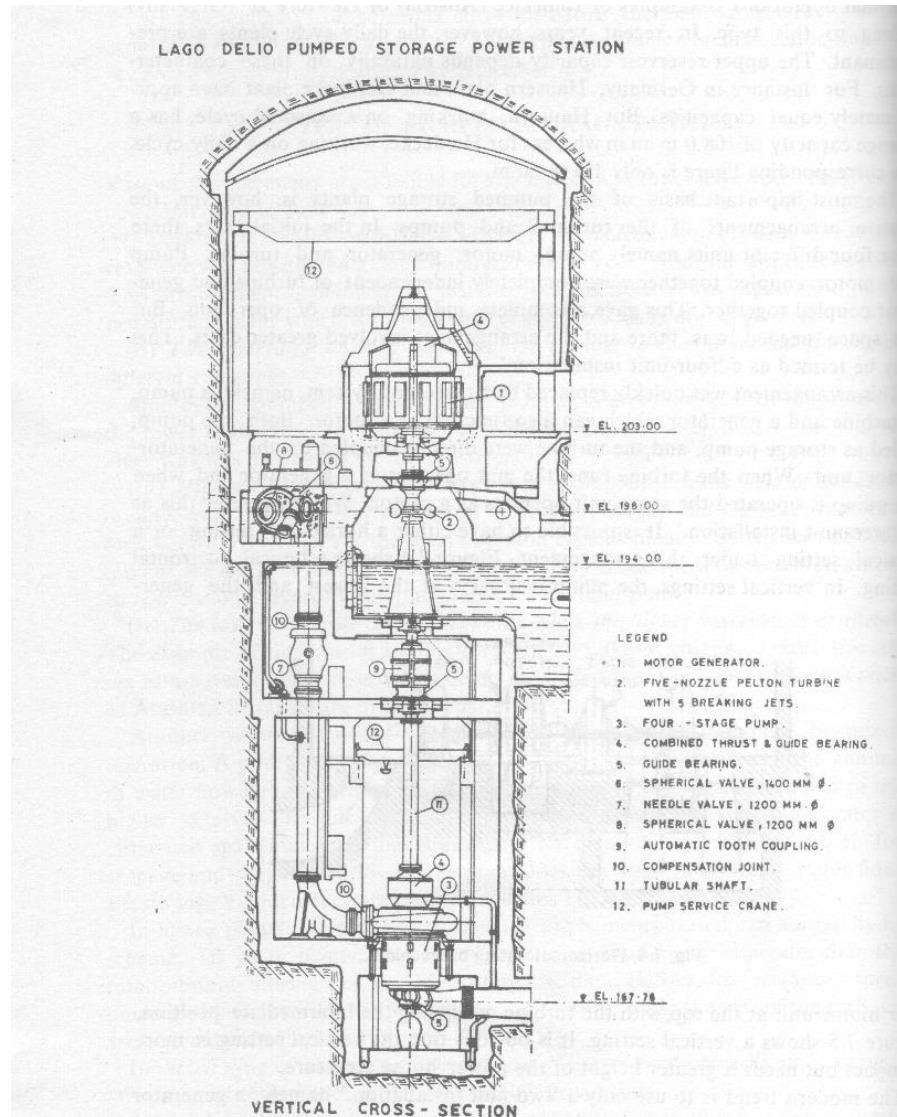


Fig. 7.5. Vertical setting of machines.

Ventajas y Desventajas de PHS

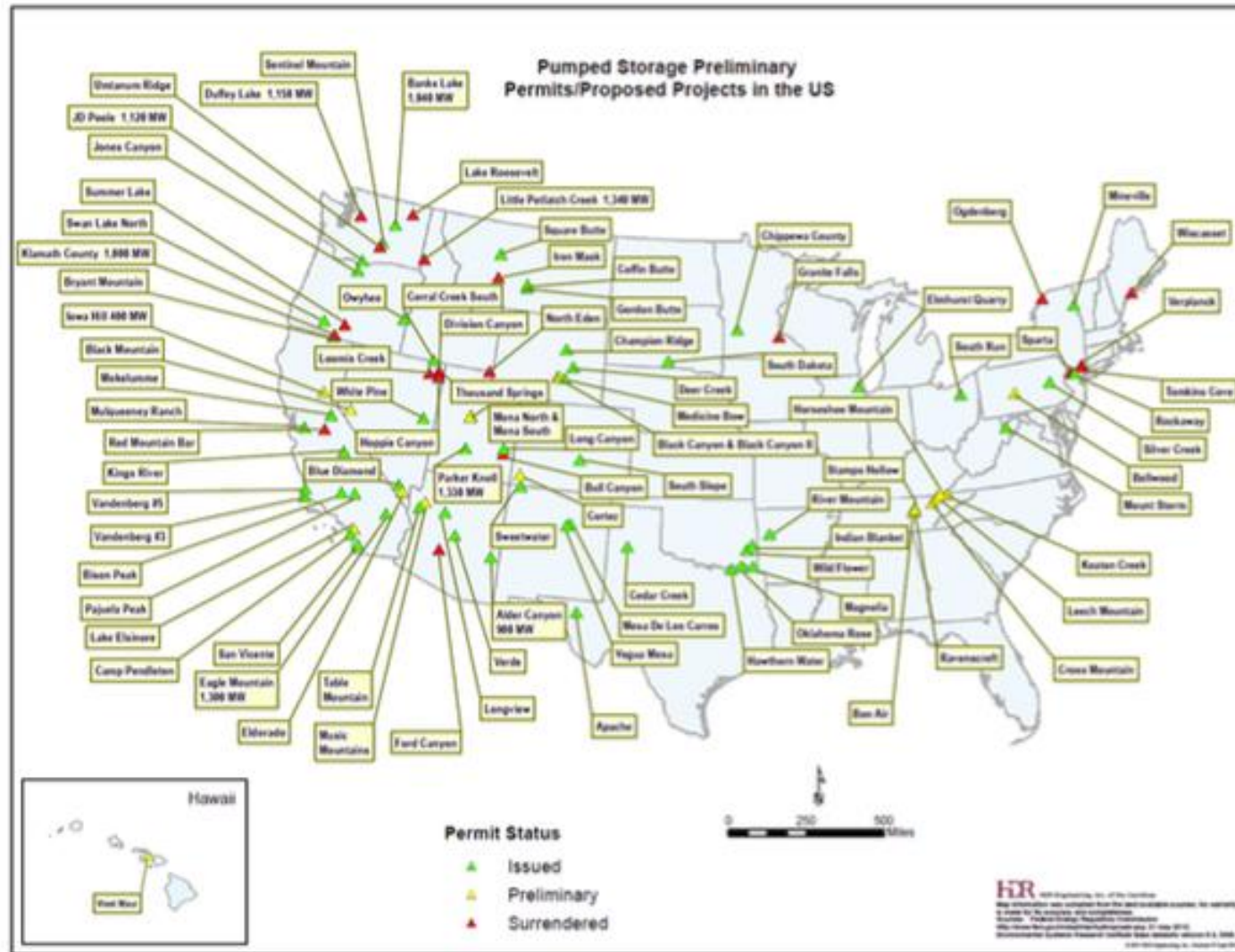
Ventajas

- 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

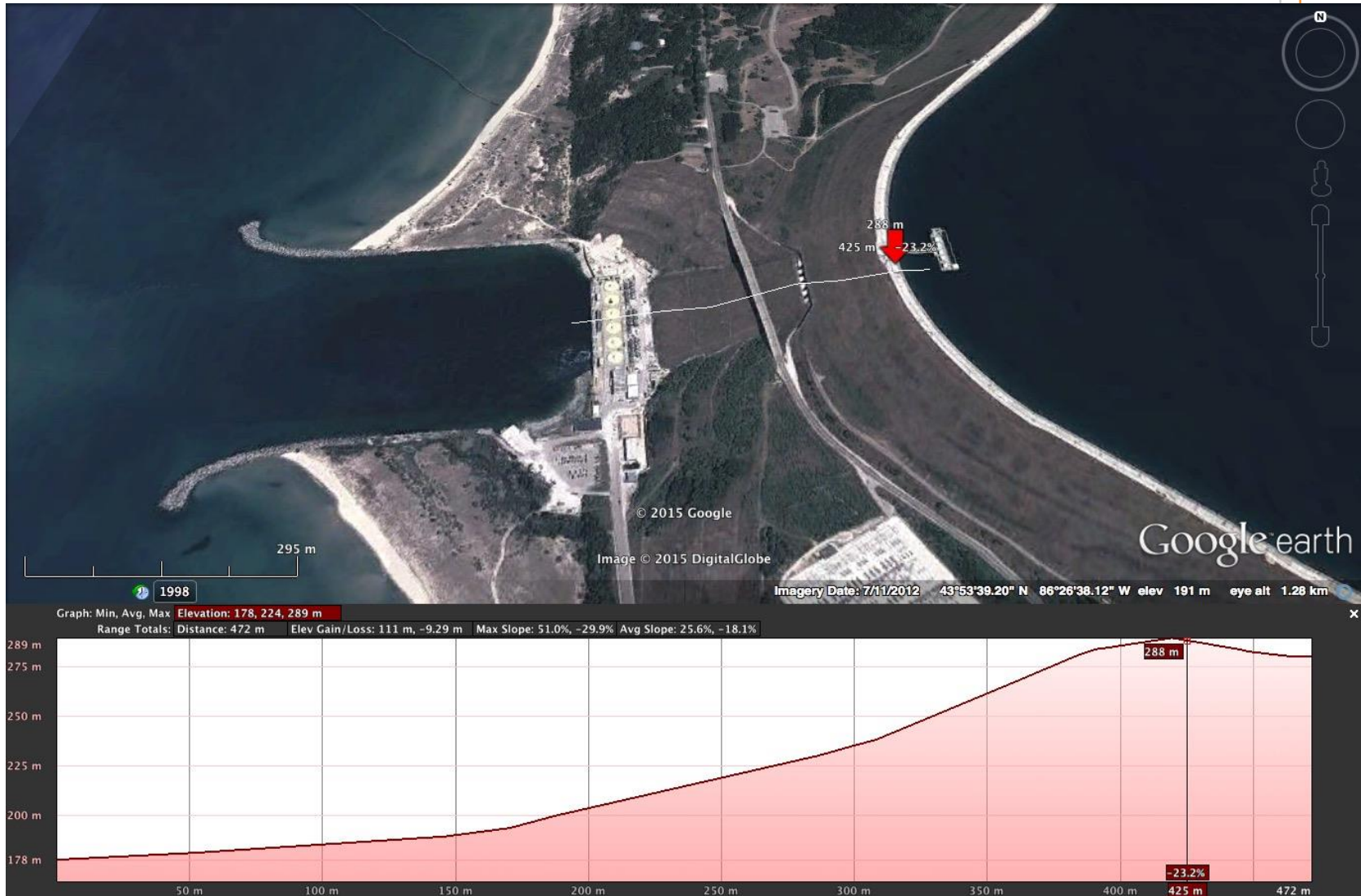


Referencias proyectos Estaciones de Bombeo PHS

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 mt³
- 70% eficiencia

Ludington – PHS – Michigan USA



Ludington – PHS – Michigan USA



Ubicación

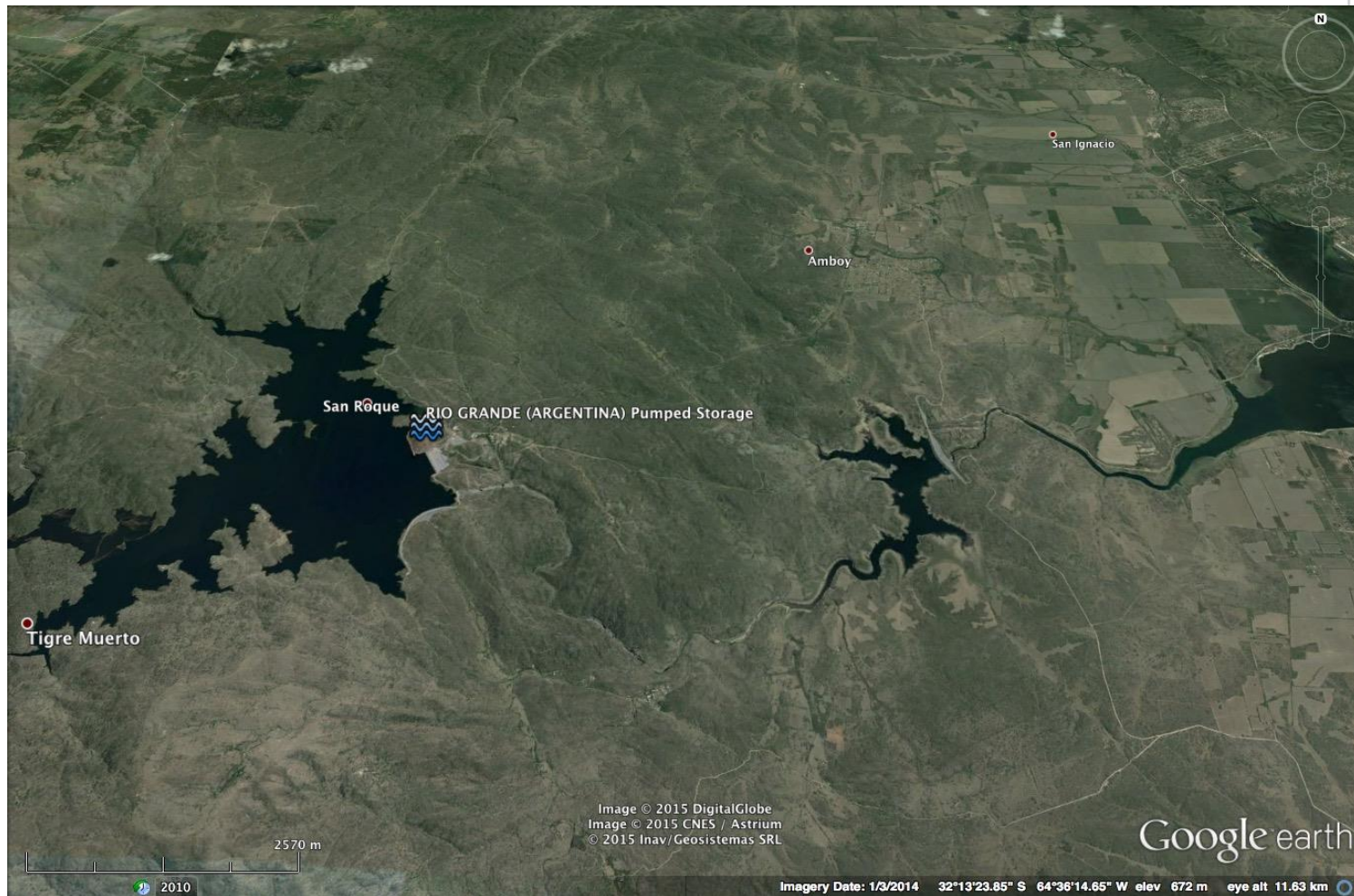
[43° 53'29.57"N 86° 26'3.27"W](#)

Complejo hidroeléctrico Rio Grande – Argentina



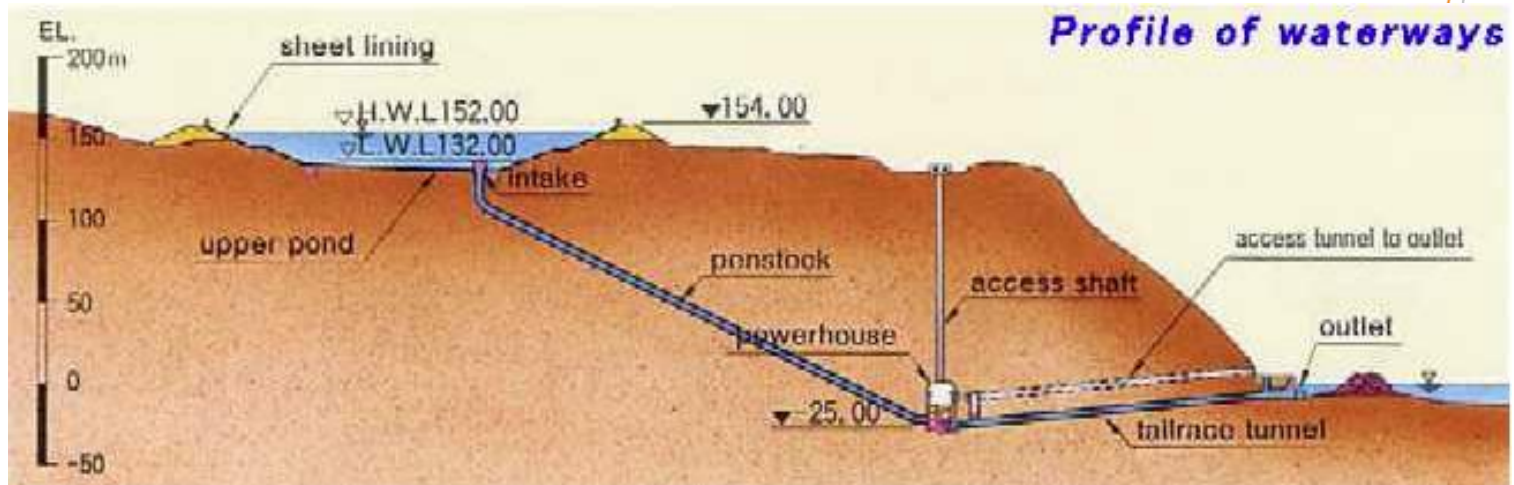
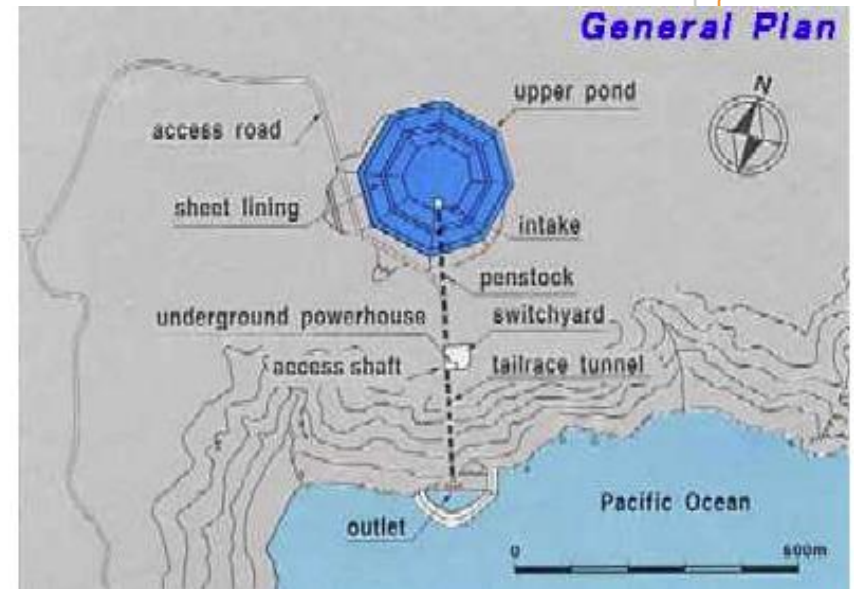
- En operación desde 1986
- Central reversible en caverna de 750MW
- Almacenamiento de aprox. 100 GWh
- Embalses: Cerro Pelado (3,6 Hm³) y Arroyo; desnivel de aprox. 185 mts
- Ubicación: Valle de Calamuchita, 130km de Córdoba.
- 4 turbina-bombas 187,5 MW c/u
- Tiempo de arranque 3 minutos

Complejo hidroeléctrico Rio Grande – Argentina

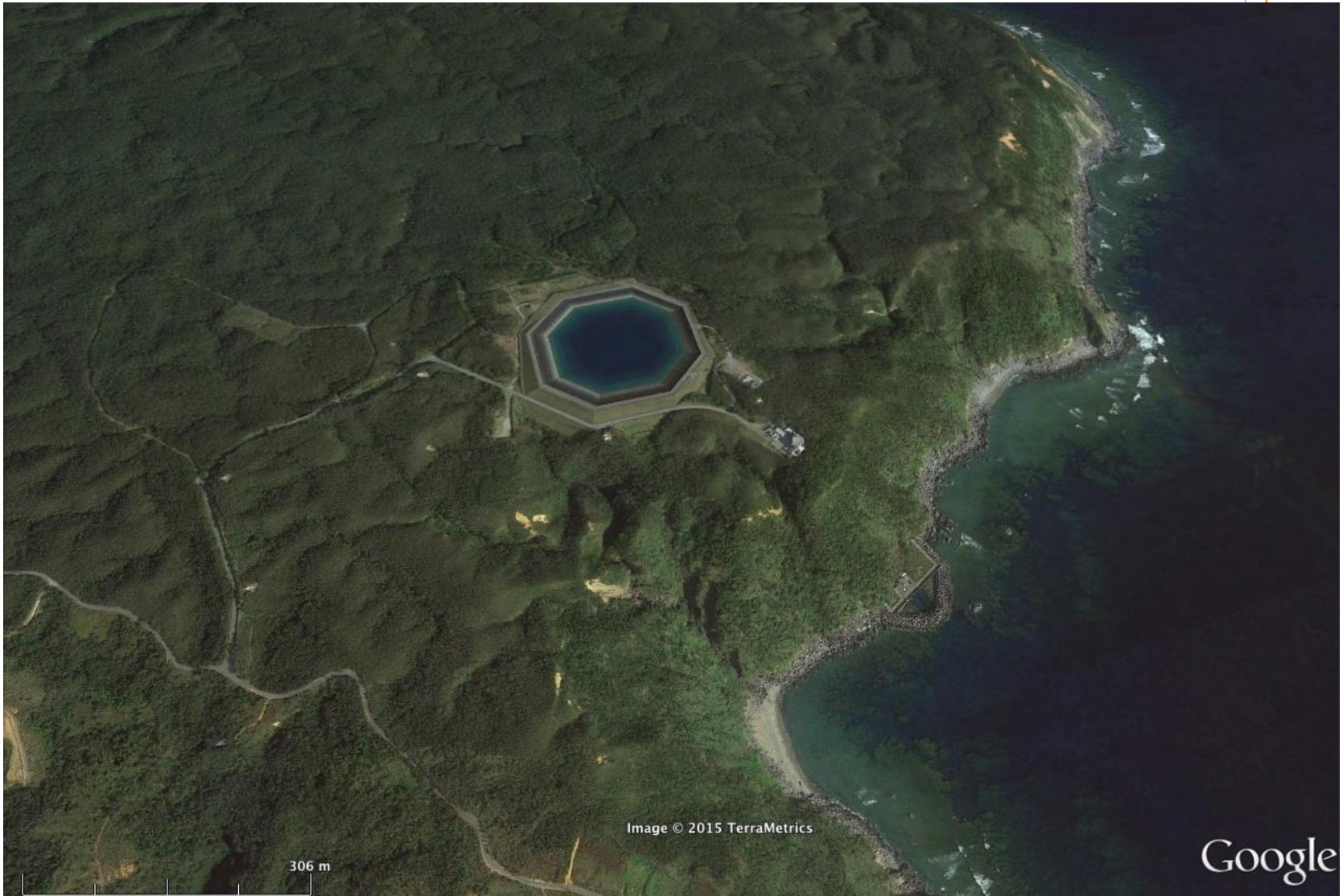


Okinawa PHS

- Isla de Okinawa – Japón
- Embalses: artificial – mar
- Embalse: 564000 mt³
- 30 MW – 26 mt³/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