Almacenamiento de energía

Presentado por:

Amparo Céspedes Hidalgo

Instituto de Energía

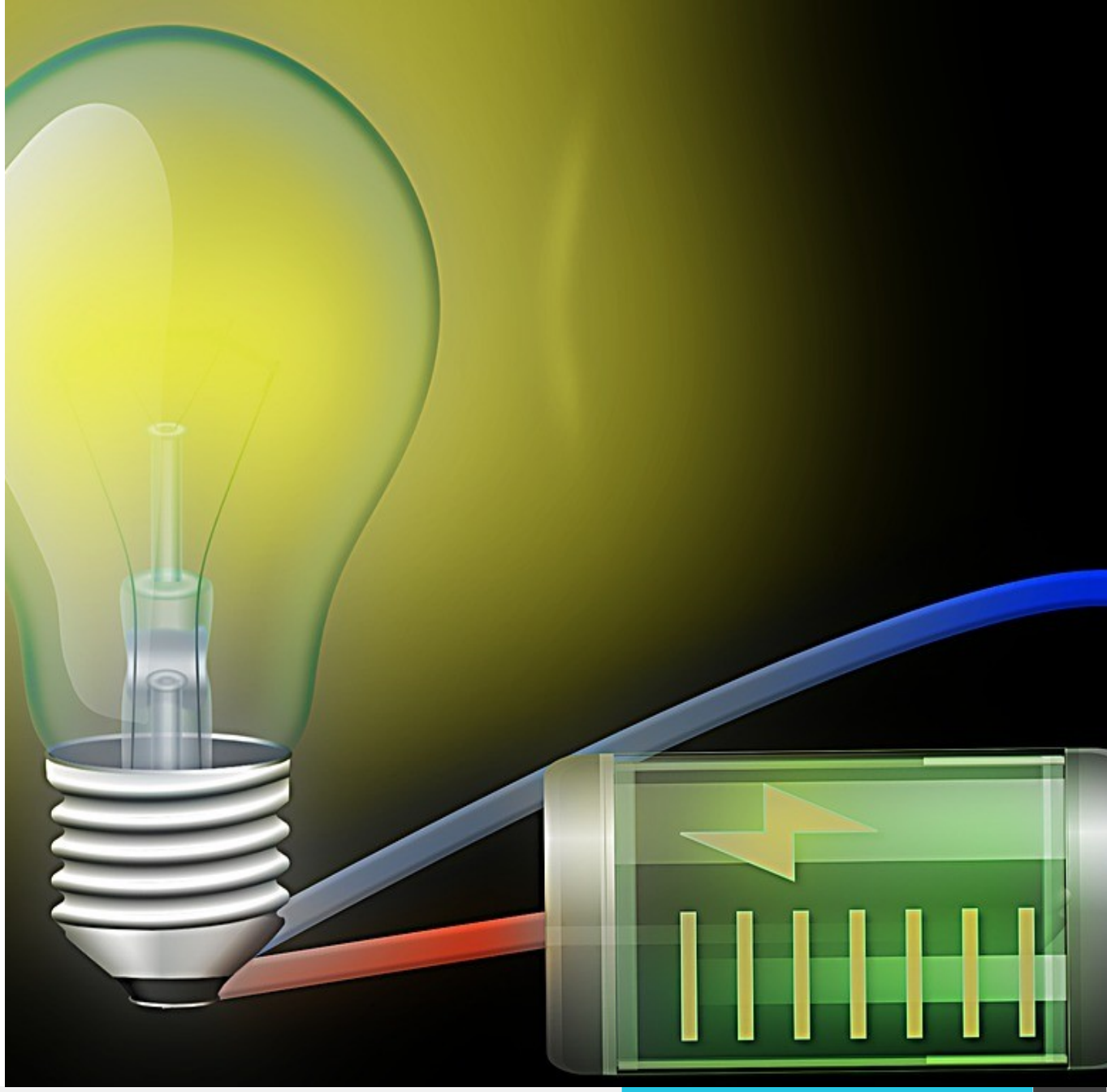
Feria Tecnológica de la FIA

1 de diciembre 2023

Santo Domingo de Guzmán

INTRODUCCIÓN

El almacenamiento de energía es un componente fundamental en el panorama energético actual, ya que permite equilibrar la oferta y la demanda de energía, gestionar la intermitencia de fuentes renovables y mejorar la confiabilidad del suministro eléctrico. Esta tecnología desempeña un papel crucial en la transición hacia sistemas energéticos más sostenibles y eficientes.



INTRODUCCIÓN

La necesidad de almacenar energía surge de la naturaleza variable de muchas fuentes de generación, como la solar y la eólica, que dependen de condiciones climáticas cambiantes. Además, la demanda de energía también varía a lo largo del día y en diferentes épocas del año. El almacenamiento de energía aborda estos desafíos al permitir la captura y el almacenamiento temporal de la energía generada durante los momentos de excedente y su posterior liberación cuando la demanda es alta.

INTRODUCCIÓN

Existen diversas tecnologías de almacenamiento de energía, cada una con sus propias características, ventajas y desventajas.

INTRODUCCIÓN

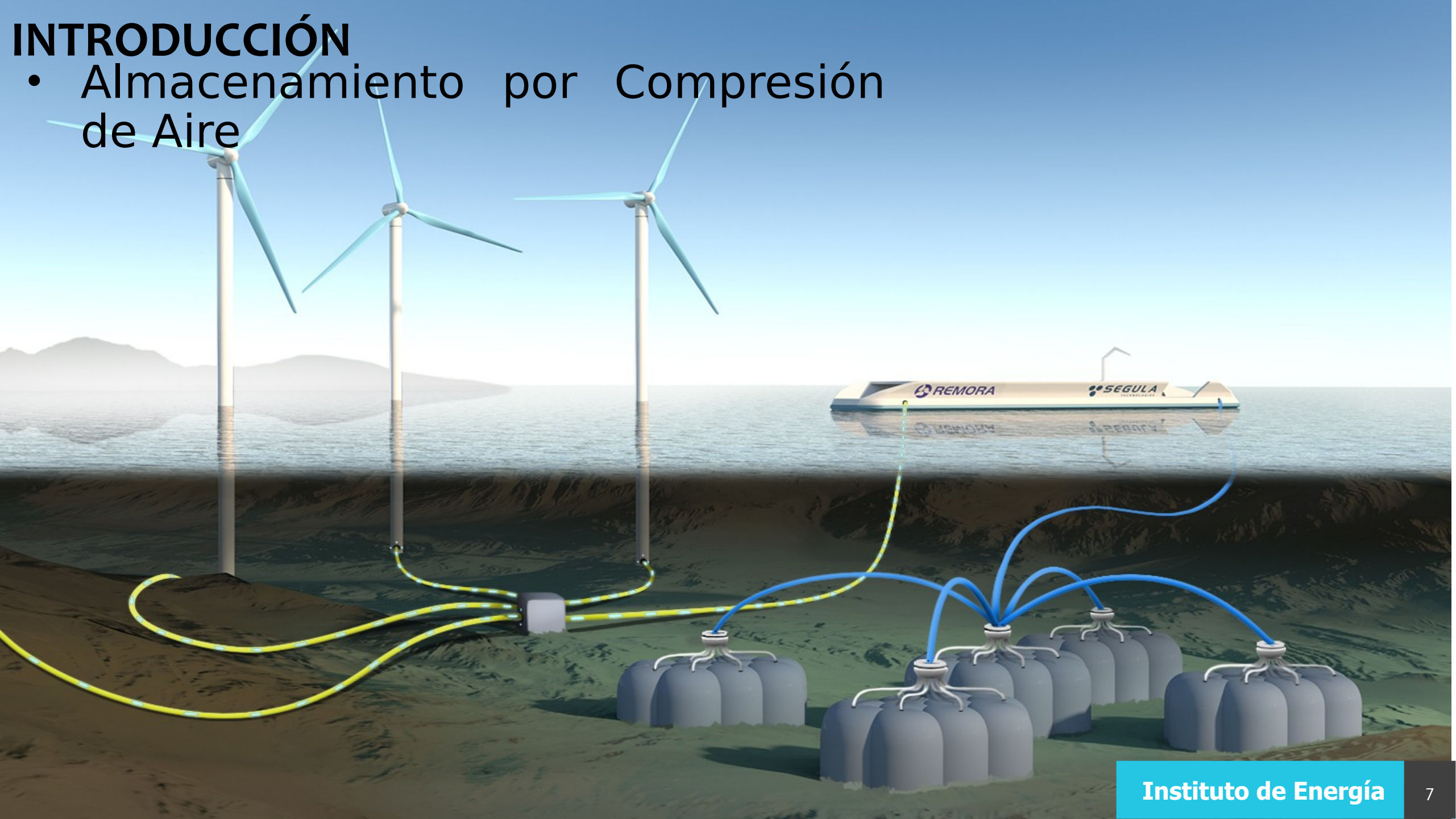
- Baterías

INTRODUCCIÓN

- Almacenamiento Térmico

INTRODUCCIÓN

- Almacenamiento por Compresión de Aire



INTRODUCCIÓN

- Supercapacitores

INTRODUCCIÓN

- Almacenamiento Hidroeléctrico por bombeo

Almacenamiento de energía hidroeléctrica por bombeo

Almacenar energía solar es invertir en un futuro más brillante y sostenible

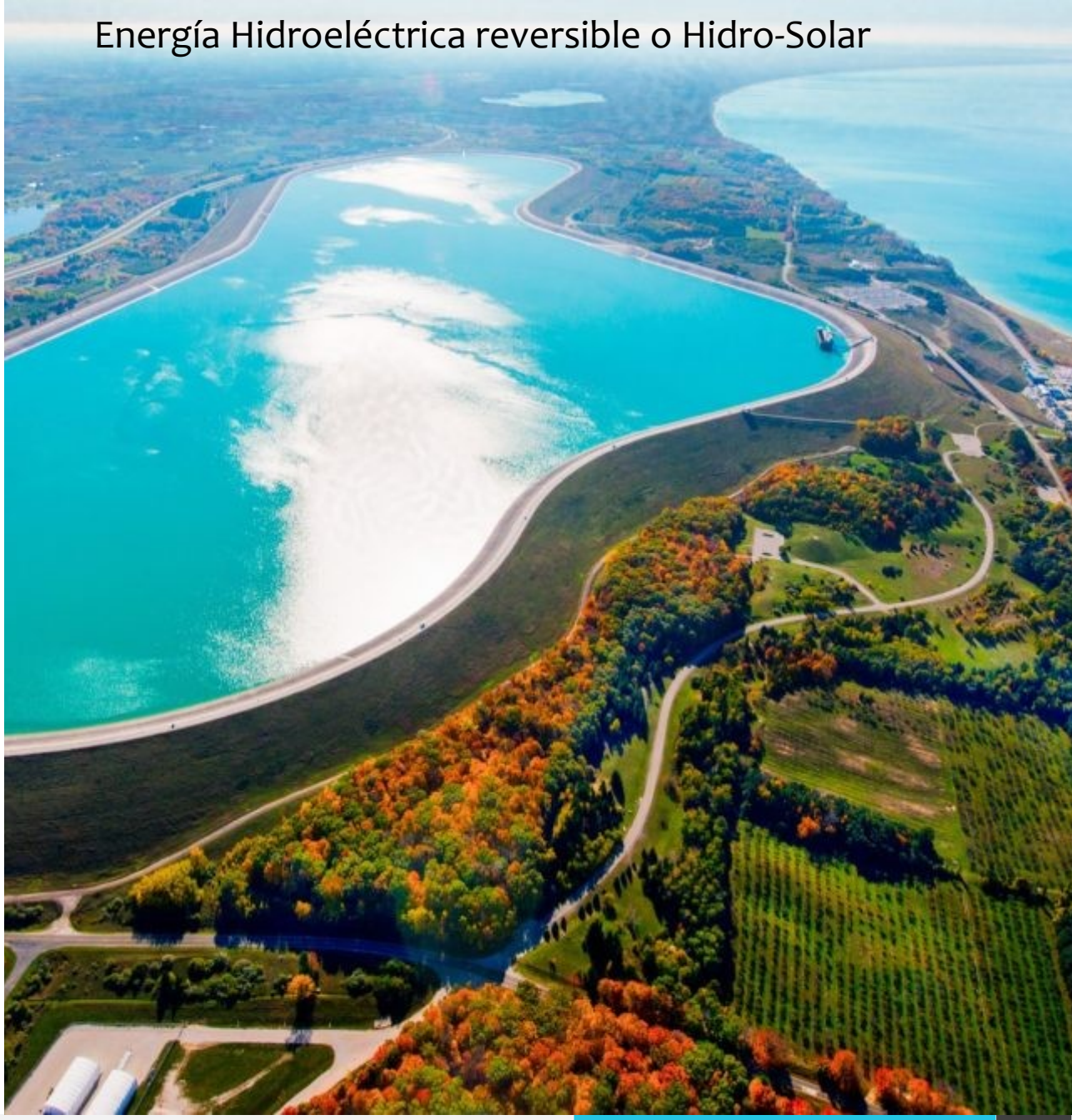
INSTITUTO DE ENERGÍA • UASD • FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA • UASD

Aprovechando el poder del agua

Generar electricidad a partir del poder del agua representa grandes cantidades de energía limpia y renovable. El 71 % de la superficie terrestre está cubierta por agua. Hasta el momento, el potencial hidroeléctrico mundial instalado es de 4 millones de GWh/año. Queda un enorme potencial hidroeléctrico de 16 millones de GWh/año.

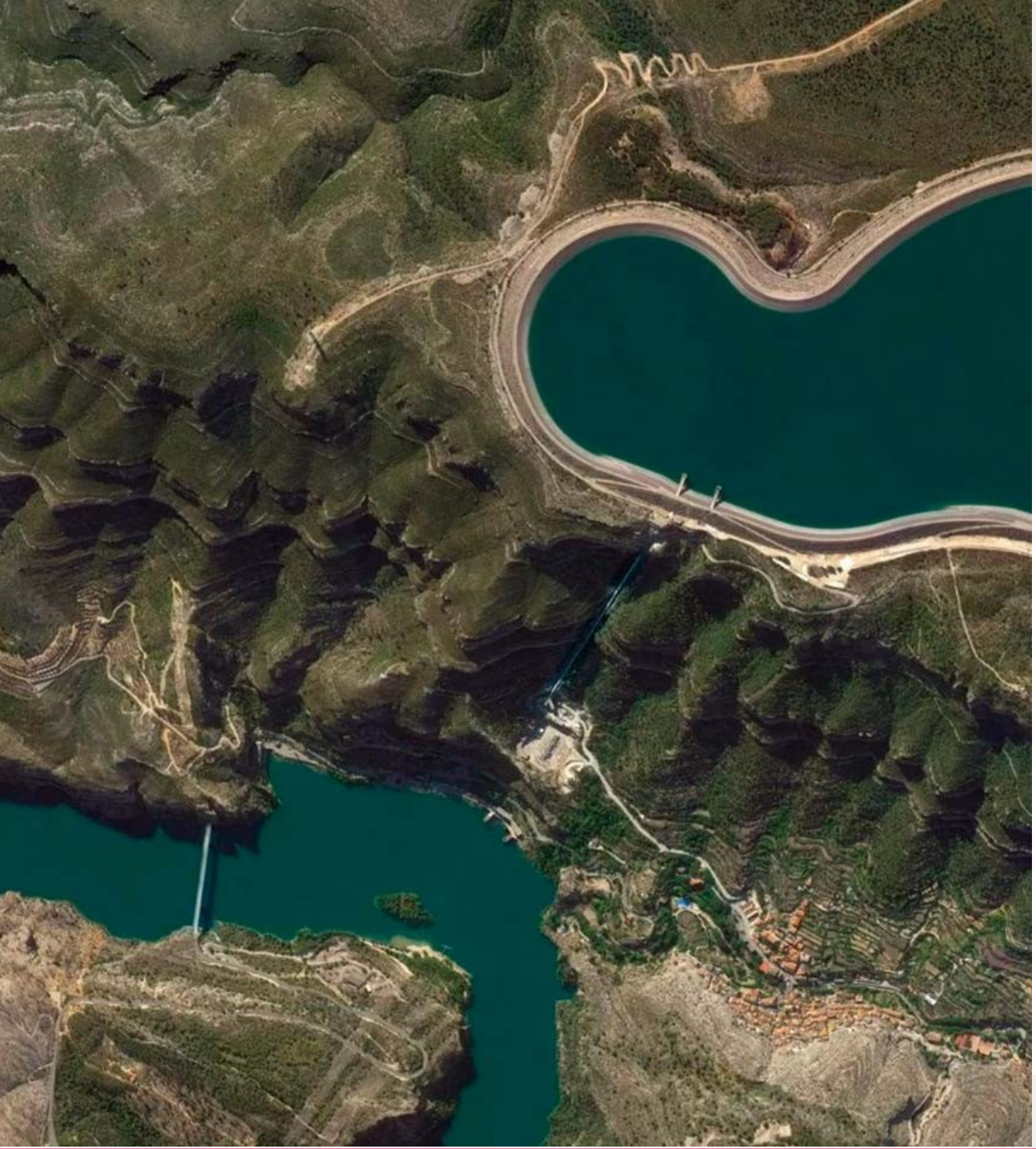
Central hidroeléctrica más almacenamiento de energía

El consumo de energía crece rápidamente. Al mismo tiempo, cada vez es más difícil mantener el equilibrio entre la producción y el consumo de energía en todo momento. Como plantas de energía multifuncionales, las instalaciones de almacenamiento por bombeo tienen un gran beneficio para este desafío, porque la tecnología detrás de ellas es la única forma técnicamente probada y rentable a largo plazo de almacenar energía a gran escala, lo que la hace disponible a corto plazo.



Almacenamiento de energía hidroeléctrica por bombeo

El almacenamiento de energía hidroeléctrica por bombeo es un método de almacenamiento de energía que implica el uso de energía eléctrica para bombear agua desde un depósito a un depósito en un nivel más alto.



Almacenamiento con Energías Renovables

Proyecto de Magtel en As Pontes, Galicia

La gestión eficaz para garantizar la flexibilidad de carga y generación requerirá una serie de pasos que incluyen

- Mejorar la eficiencia energética e implementar la respuesta a la demanda.
- Llevar los recursos al mercado a través de la transmisión y la utilización oportuna.
- Almacenamiento de energía.

Tipología aprovechamientos hidroeléctricos reversibles

Central de Ludington. 1.872 MW. Estados Unidos

Central de Guangdong o Guangzhou. 2.400 MW. China

Tipología aprovechamientos hidroeléctricos reversibles

Central de Grand'Maison. 1,800 MW. Francia

Cortes-La Muela. 1,772 MW. España

El almacenamiento de energía hidráulica por bombeo (PHES)

Comparativa de la evolución de la potencia instalada de almacenamiento energético tipo PHES a gran escala (MW) para el periodo 2010-2019

Área	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Mundo	99,756	102,993	105,617	106,856	108,597	111,853	116,942	119,849	120,496	120,844
Unión Europea	26,701	26,708	26,839	26,857	27,326	28,332	28,601	28,473	28,334	28,344
España	2,449	2,465	2,465	2,455	2,455	3,280	3,337	3,337	3,337	3,337

Fuente: Tesis Doctoral, D. Hilario José Torres Herrera

Una gestión eficaz para para garantizar la flexibilidad de la carga y la generación requerirá una serie de pasos que incluyen:

1	2	3	4	5
Mejorar la eficiencia energética y responder a la demanda	Utilizando la diversidad espacial y de generación de fuentes que muestran perfiles complementarios	Llevar los recursos al mercado mediante la transmisión y la utilización oportuna	**Almacenamiento de energía**	**Mejorar las comunicaciones de datos de las compañías eléctricas para integrar los pasos anteriores**

Una gestión eficaz para para garantizar la flexibilidad de la carga y la generación requerirá una serie de pasos que incluyen:

De los cinco pasos para aportar flexibilidad a la energía de un sistema eléctrico, el almacenamiento de energía hidráulica por bombeo es un paso clave para acomodar la variabilidad. Un PHES facilita la alineación de la generación renovable con las cargas. La generación de carga base tiene el mayor impacto en los factores de emisión y produce la mayor parte de la energía. Para que la generación renovable tenga un impacto significativo en las emisiones generadas por la electricidad, debe ser capaz de afectar a la generación de carga base.

Amparo Céspedes

21/06/2023

Día Yield:10kWh

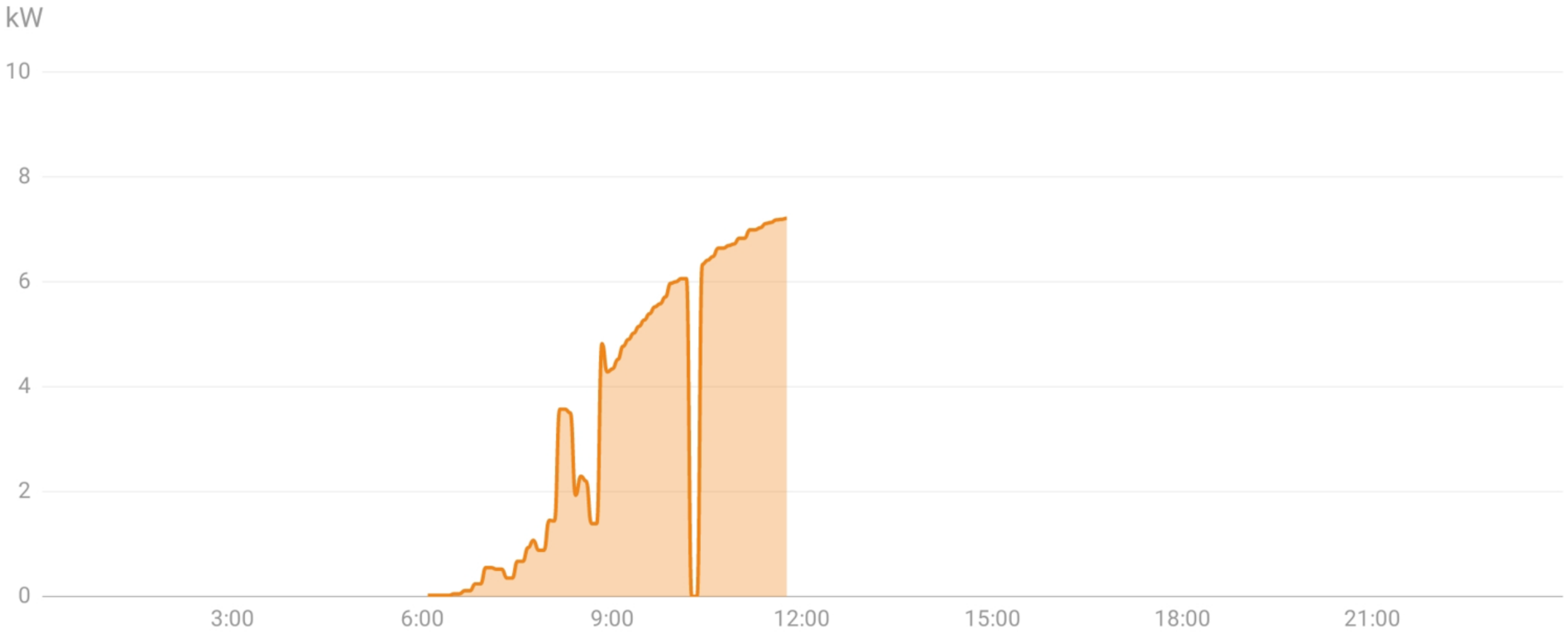
Día Earning/Full Load Hours:130.9DOP/1.11h

Amparo Céspedes

21/06/2023

Día Yield:19kWh

Día Earning/Full Load Hours:248.71DOP/2.11h

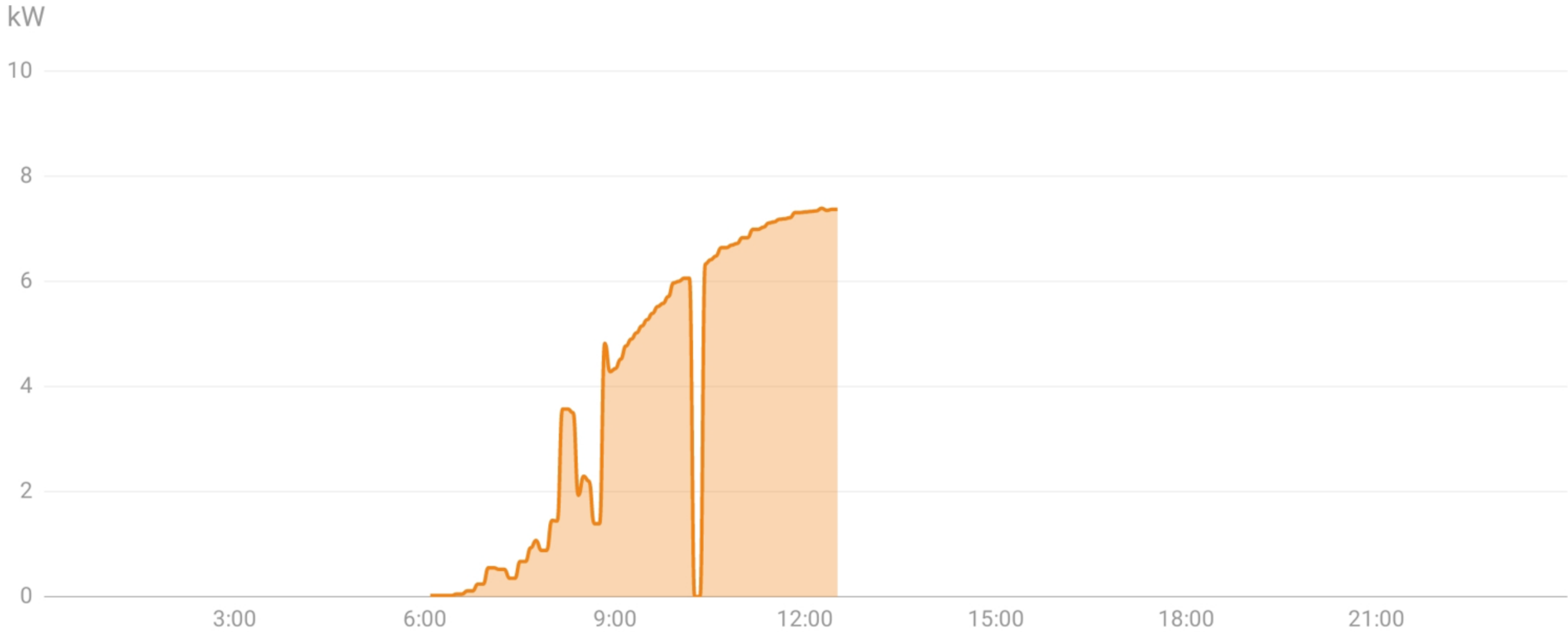


Amparo Céspedes

21/06/2023

UASD-Instituto Ener... Cuando se realizó la conversión de DPP a ciclo combinado, el PPA fue firmado con CDEEE

Día Earning/Full Load Hours:327.25DOP/2.78h



Amparo Céspedes

21/06/2023

Día Yield:53kWh

Día Earning/Full Load Hours:693.77DOP/5.89h

Retos y soluciones para la integración de fuentes de energías renovables

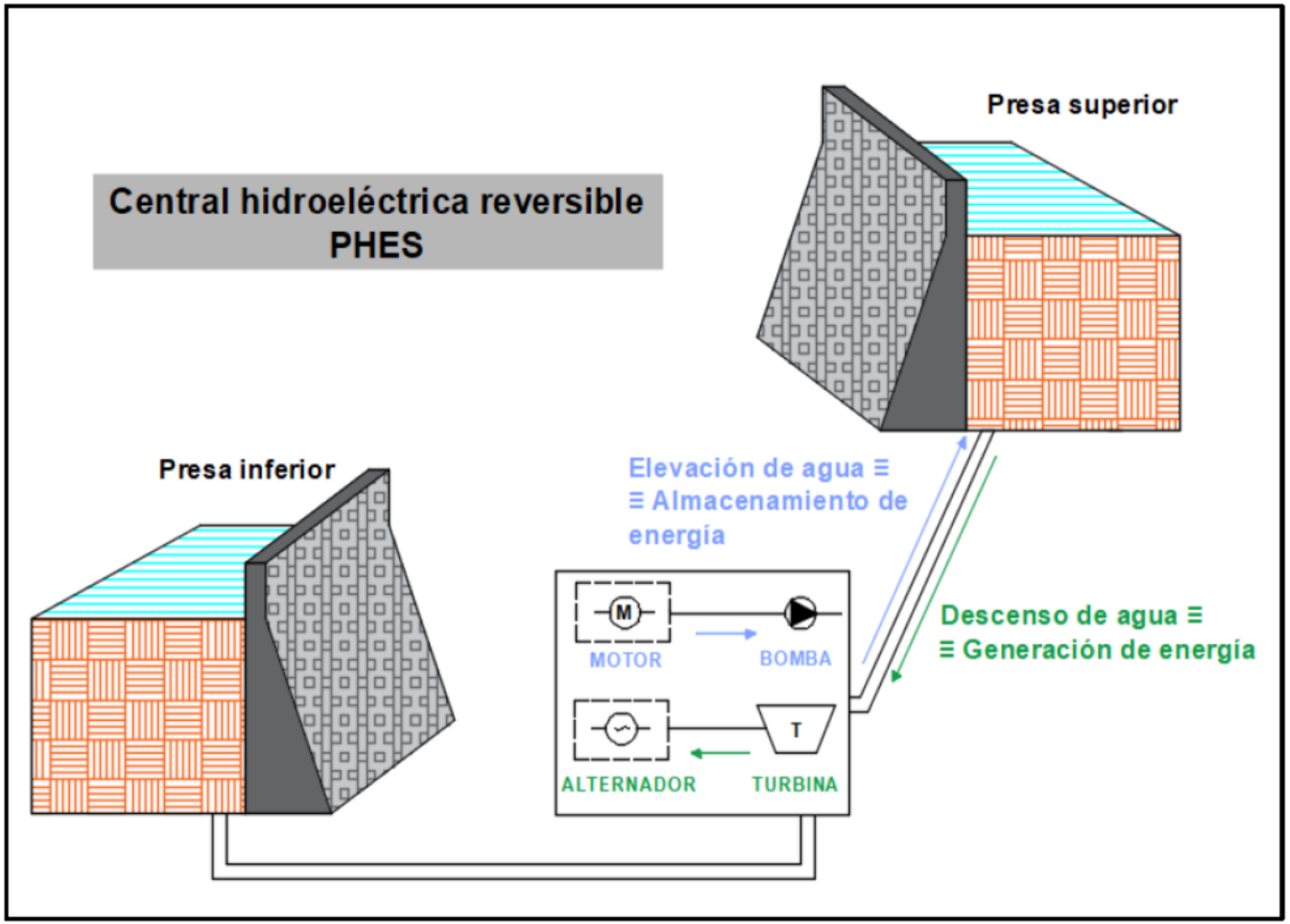
RETOS	Soluciones
Cubrir toda la demanda de energía eléctrica	Aumentar la flexibilidad en la generación y potenciar la gestión de la demanda (almacenamiento energético)
Controlar y supervisar de la generación distribuida	Crear o mejorar el centro de control de las renovables
Mitigar la variabilidad en la producción a través de fuentes renovables	Desarrollar y mejorar herramientas de predicción
Evitar que los excedentes en la generación no se integren en el sistema	Adaptar y mejorar los generadores eléctricos

Almacenamiento de energía hidroeléctrica por bombeo

Valor del PHES para los sistemas eléctricos interconectados: A medida que el mundo se embarca en una nueva era de sistemas de energías eléctricas distribuidas y, en ocasiones, no despachables, la capacidad de gestionar niveles crecientes de generación variable será fundamental para todas las regiones operativas.

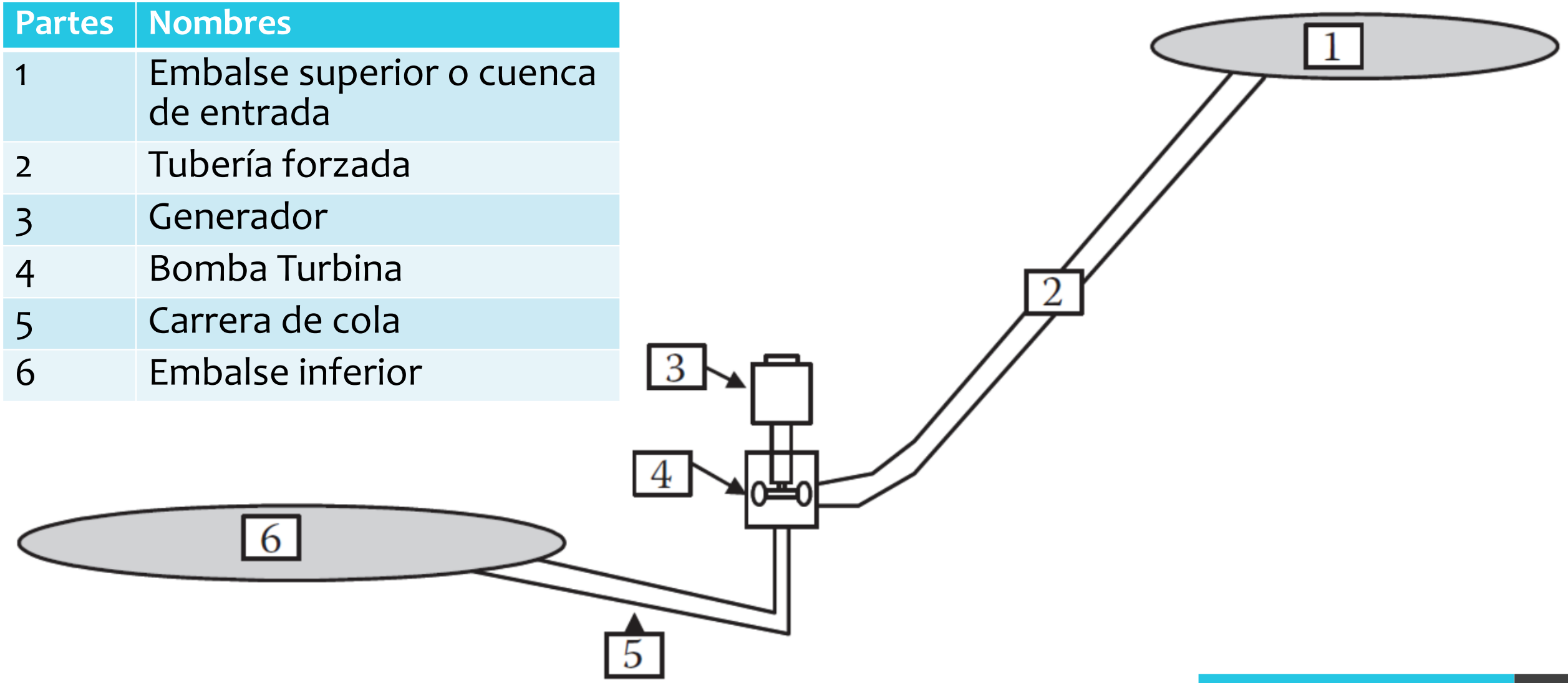
El almacenamiento de energía hidráulica por bombeo (PHES)

El almacenamiento de energía hidráulica por bombeo (PHES) puede llevarse a cabo según el esquema expuesto en la Figura. Puede aprovecharse el modo reversible de las bombas para dos soluciones: turbinar agua desde el depósito superior hacia el depósito inferior, generando así energía hidroeléctrica para los períodos de máxima demanda; o bien, bombear agua hacia el depósito superior si se tienen excedentes de producción de Fuente de energías renovables, para almacenarla y poder aprovecharla cuando se necesite.

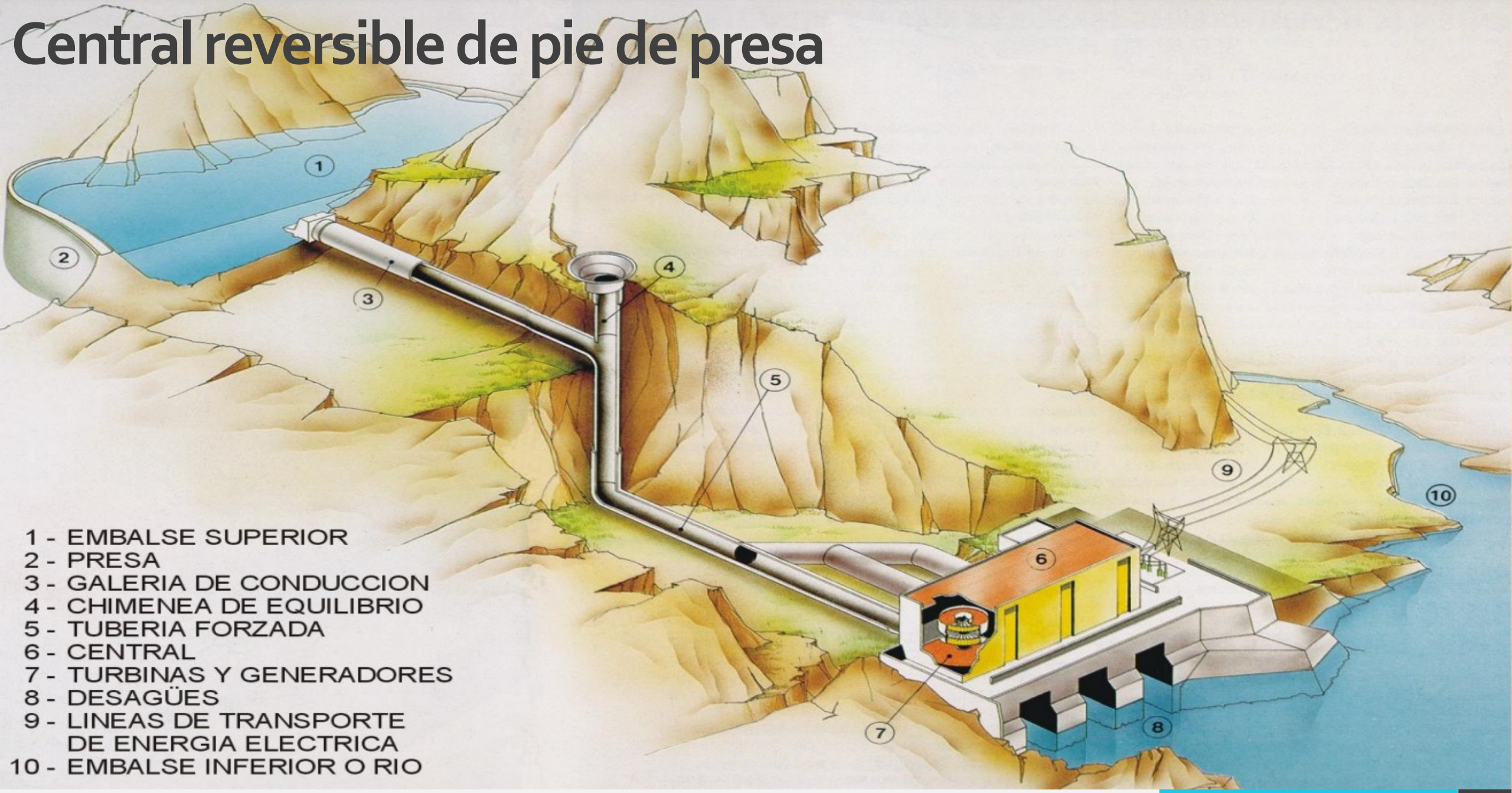


Grandes sistemas de almacenamiento de energía

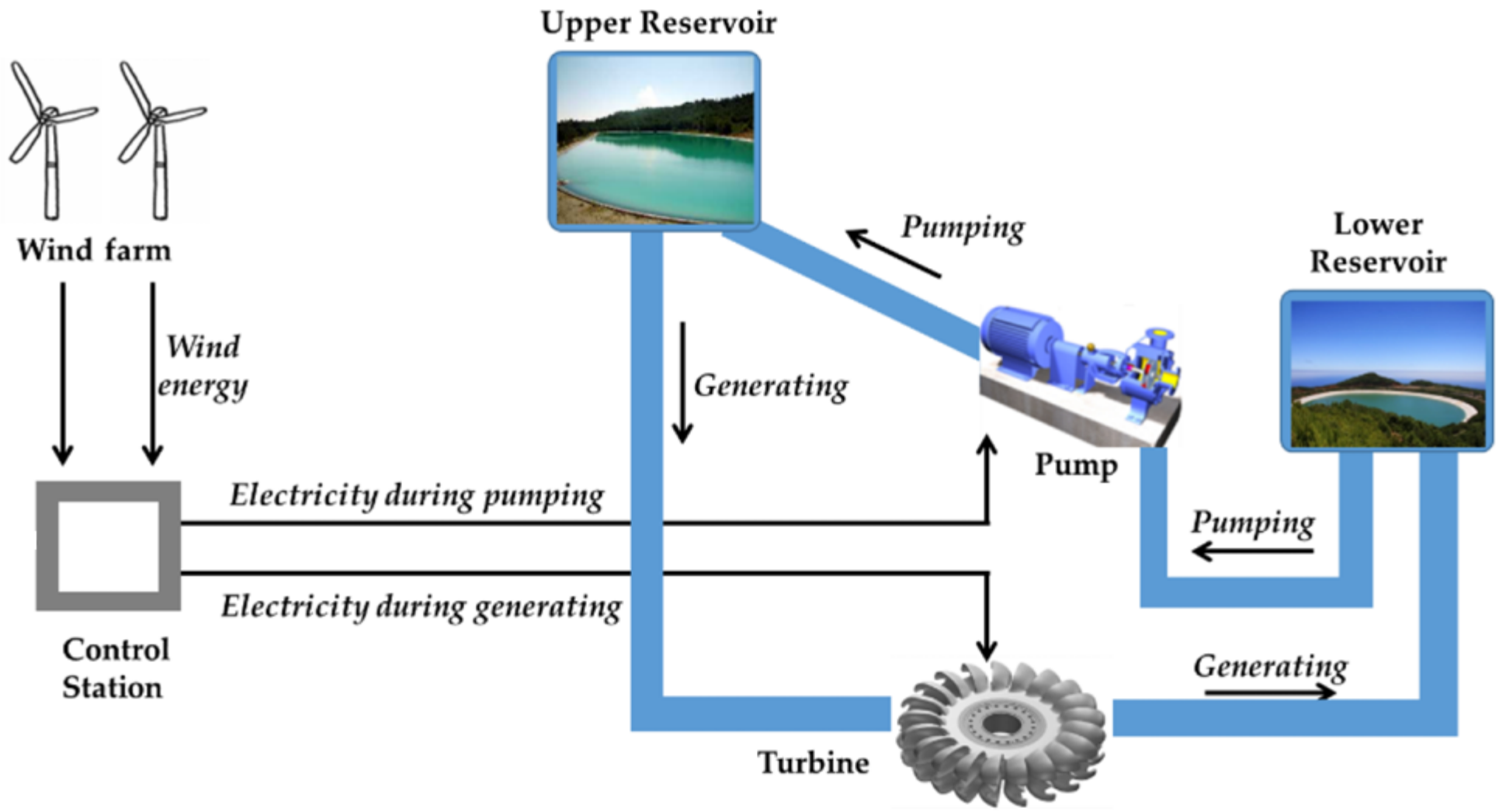
Partes	Nombres
1	Embalse superior o cuenca de entrada
2	Tubería forzada
3	Generador
4	Bomba Turbina
5	Carrera de cola
6	Embalse inferior



Central reversible de pie de presa



El almacenamiento energético PHES



Las centrales hidroeléctricas con tecnología PHES pueden ser usadas tanto para almacenar cómo para producir energía.

Clasificación de la PHES, según la potencia instalada

- **Microcentrales hidroeléctricas:** aquellas con menos de 1 MW de potencia instalada.
- **Minicentrales hidroeléctricas:** aquellas cuya potencia instalada se encuentra en el rango de 1 MW a 10 MW.
- **Centrales hidroeléctricas de gran potencia:** aquellas cuya potencia instalada es mayor de 10 MW.

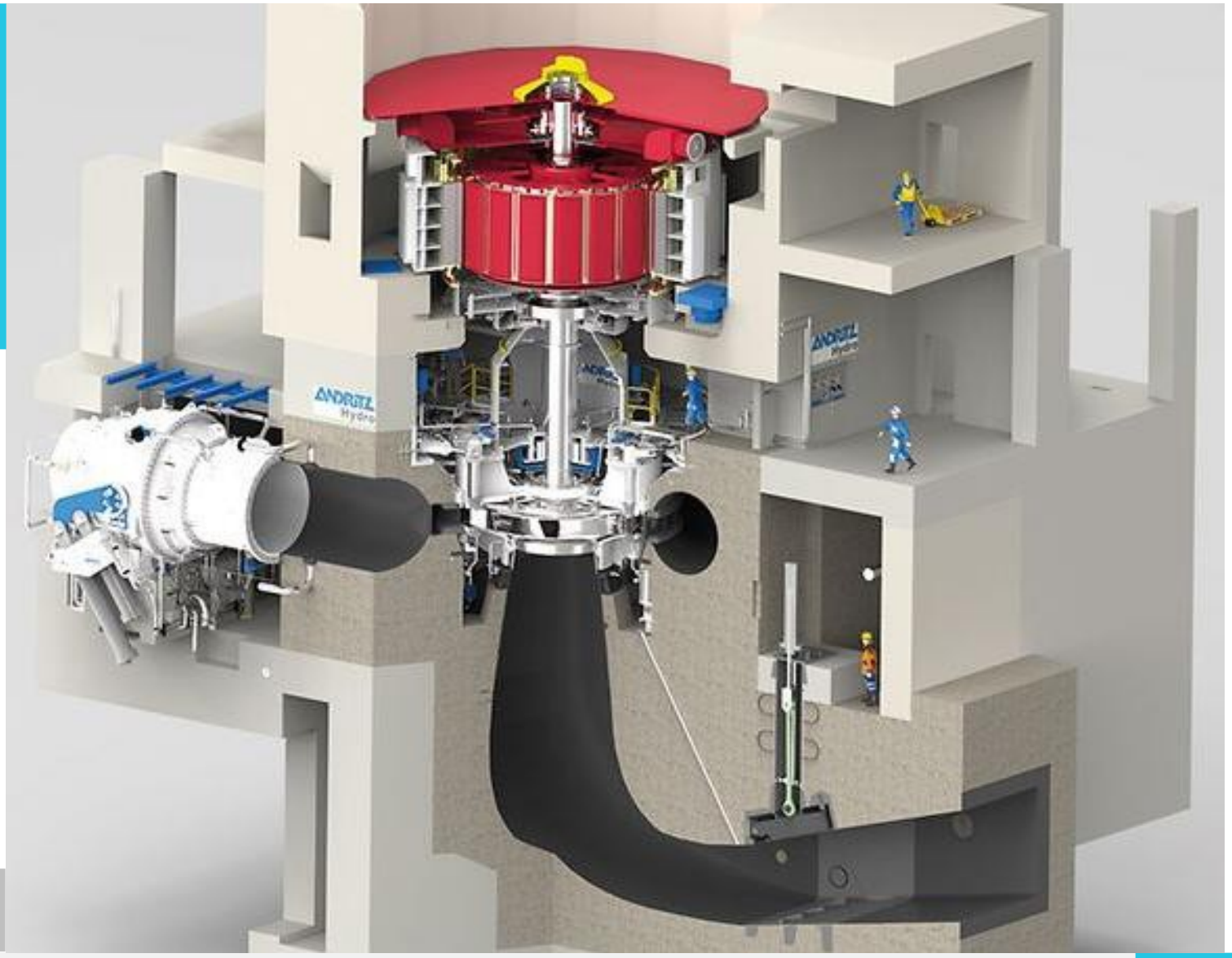
Clasificación de las centrales de bombeo según el tipo de tecnología hidráulica escogida:

- **Sistema hidráulico con bombas y turbinas independientes:** son aquellas en las que ambos tipos de máquinas se instalan por separado, pero acopladas.

- **Sistema hidráulico reversible:** son máquinas hidráulicas que pueden funcionar tanto como una bomba para almacenar la energía, o cómo una turbina para generarla. Por tanto, se elimina el acoplamiento, además de reducir el espacio de instalación y las tuberías que se requieren para las entradas y salidas del fluido.

Tipología Según el tipo de maquinarias

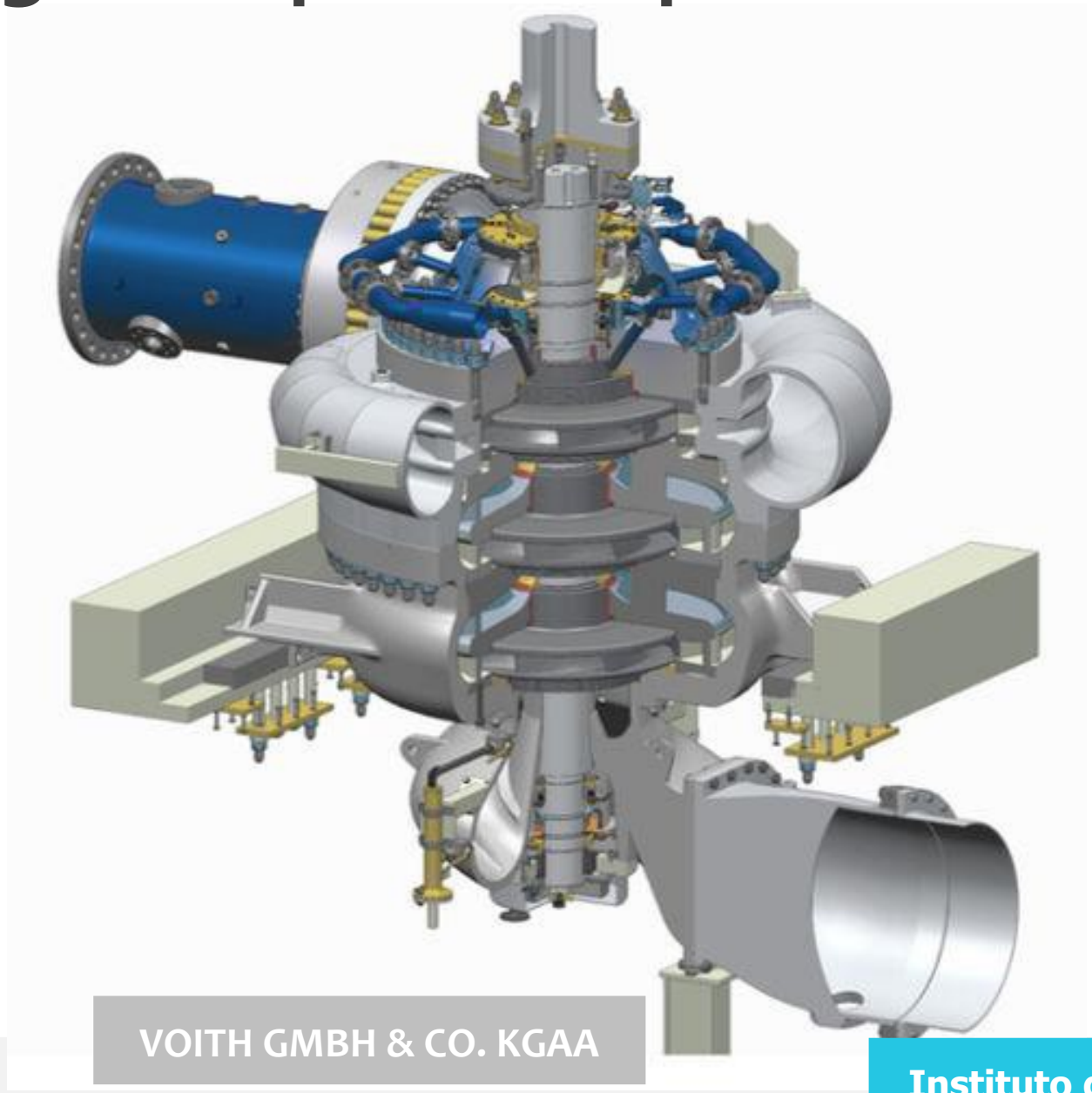
BINARIA
GENERADOR/MOTOR
Y TURBINA-BOMBA



VOITH GMBH & CO. KGAA

Tipología Según el tipo de maquinarias

TERNARIA GENERADOR/ MOTOR, UNA TURBINA Y UNA BOBA ACOPLADA SOBRE EL MISMO EJE



VOITH GMBH & CO. KGAA

Eficiencia de PHES

El proceso de bombear agua hacia arriba y liberarla de nuevo hacia abajo para lograr el retorno de energía no es 100% eficiente. Parte de la energía eléctrica utilizada para para bombear el agua hacia arriba no se devuelve como energía eléctrica utilizable al hacia abajo.

Esta pérdida de eficiencia se debe a la resistencia a la rodadura y a las turbulencias en la tubería forzada y la cola, así como pérdidas de rendimiento en el generador y la turbina de la bomba. Además, el agua retiene algo de energía cuando a medida que fluye hacia el canal de cola.

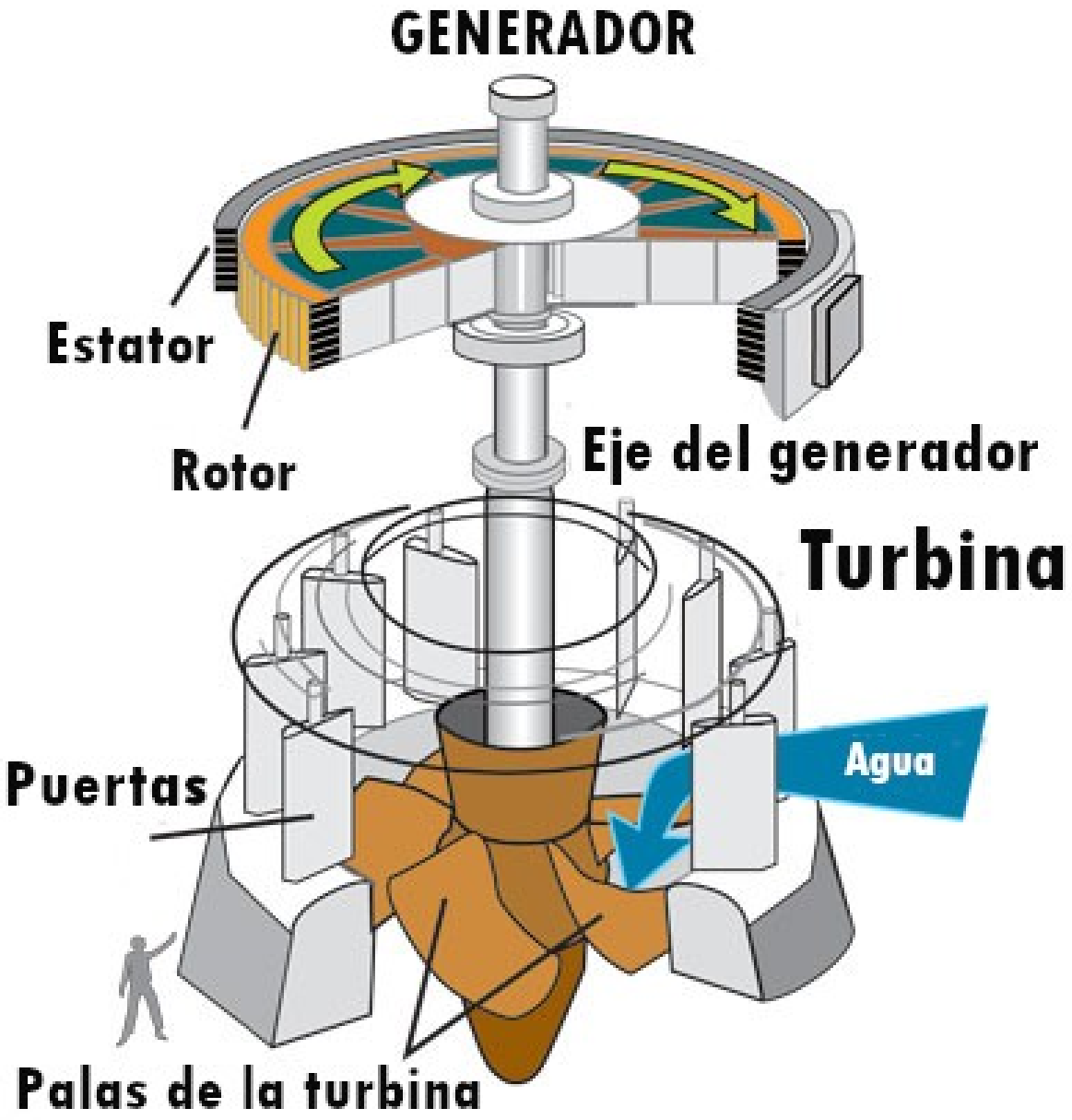
Eficiencia de PHES

Teniendo en cuenta todas estas pérdidas, el rendimiento de la PHES oscila entre el 70 y el 80%, dependiendo de las características del diseño. En ejemplo, si una instalación PHES tuviera una eficiencia del 80%, eso significaría que por cada diez unidades de energía almacenadas, ocho pueden ser devueltas a la demanda.

PHES Cycling Efficiency

	Low %	High %
Generating Components		
Water conductors	97.40	98.50
Pump turbine	91.50	92.00
Generator motor	98.50	99.00
Transformer	99.50	99.70
Subtotal	87.35	89.44
Pumping Components		
Water conductors	97.60	98.50
Pump turbine	91.60	92.50
Generator motor	98.70	99.00
Transformer	99.50	99.80
Subtotal	87.80	90.02
Operational	98.00	99.50
Total	**75.15%**	**80.12%**

Source: Chen, H.H. 1993. Pumped storage. In *Davis' Handbook of Applied Hydraulics*, 4th ed. Zipparro, V.J. and H. Hansen, Eds. McGraw



Potencial energético y de potencia

$$PE = mgH \qquad (1)\}$$

PE = Energía potencial en Joule

m = Masa $\left[\text{volumen en } (m^3) \times \text{ densidad } (1000)\, kg/m^3\right]$

g = Aceleración de la gravedad $9.81\ m/s^2$

H = Altura hidráulica en (m)

Las instalaciones PHES requieren dos recursos fundamentales: el cambio de elevación (altura) y el agua. Averiguando el cambio de elevación potencial y el agua disponible, es posible determinar la disponibilidad de potencia y energía de una instalación PHES según la ecuación (1)

Almacenamiento de energía hidroeléctrica por bombeo

$$P = QH\rho g\eta \quad (2)$$

Donde: $P =$ potencia de salida generada en vatios (W)

$Q =$ caudal de fluido en m^3/s

$H =$ altura hidráulica en (m)

$\rho =$ densidad en (kg/m^3)

$g =$ aceleración de la gravedad en m/s^2

$\eta =$ eficiencia

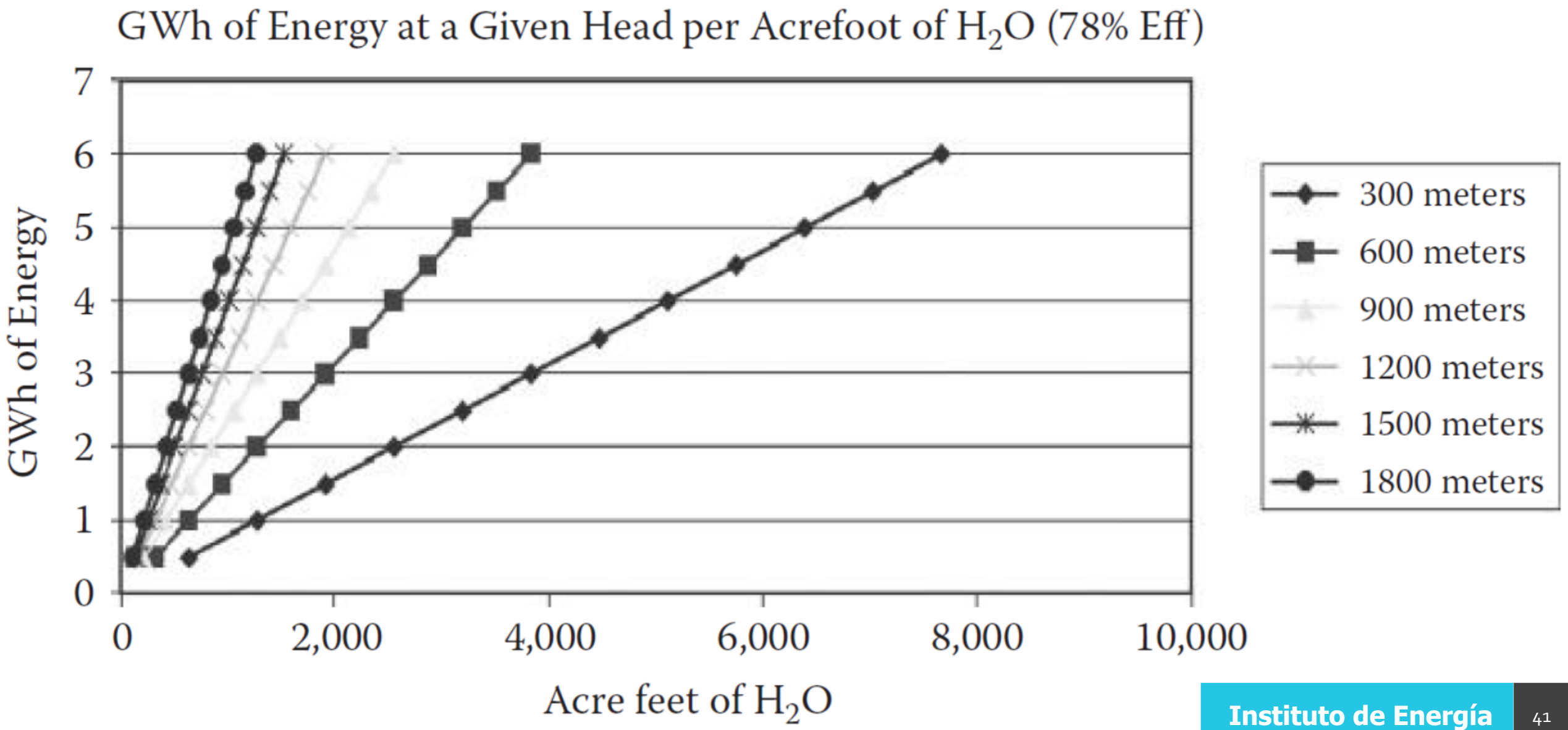
Almacenamiento de energía hidroeléctrica por bombeo

Como se muestra en la ecuación (2), las variables modificables son el caudal volumétrico, la altura y la eficiencia de la instalación. Asumiendo que la altura y gran parte de la eficiencia vendrán dictadas por la ubicación de la instalación, el caudal se convierte en un punto de diseño importante de una instalación PHES.

Almacenamiento de energía hidroeléctrica por bombeo

La altura y el caudal tienen una relación importante: si la altura es mayor, se puede minimizar el uso del agua. Lo contrario también es cierto: si se puede maximizar el caudal, se puede reducir la altura. Se pueden encontrar ejemplos de instalaciones de PHES que utilizan las compensaciones entre altura y caudal.

Almacenamiento de energía hidroeléctrica por bombeo

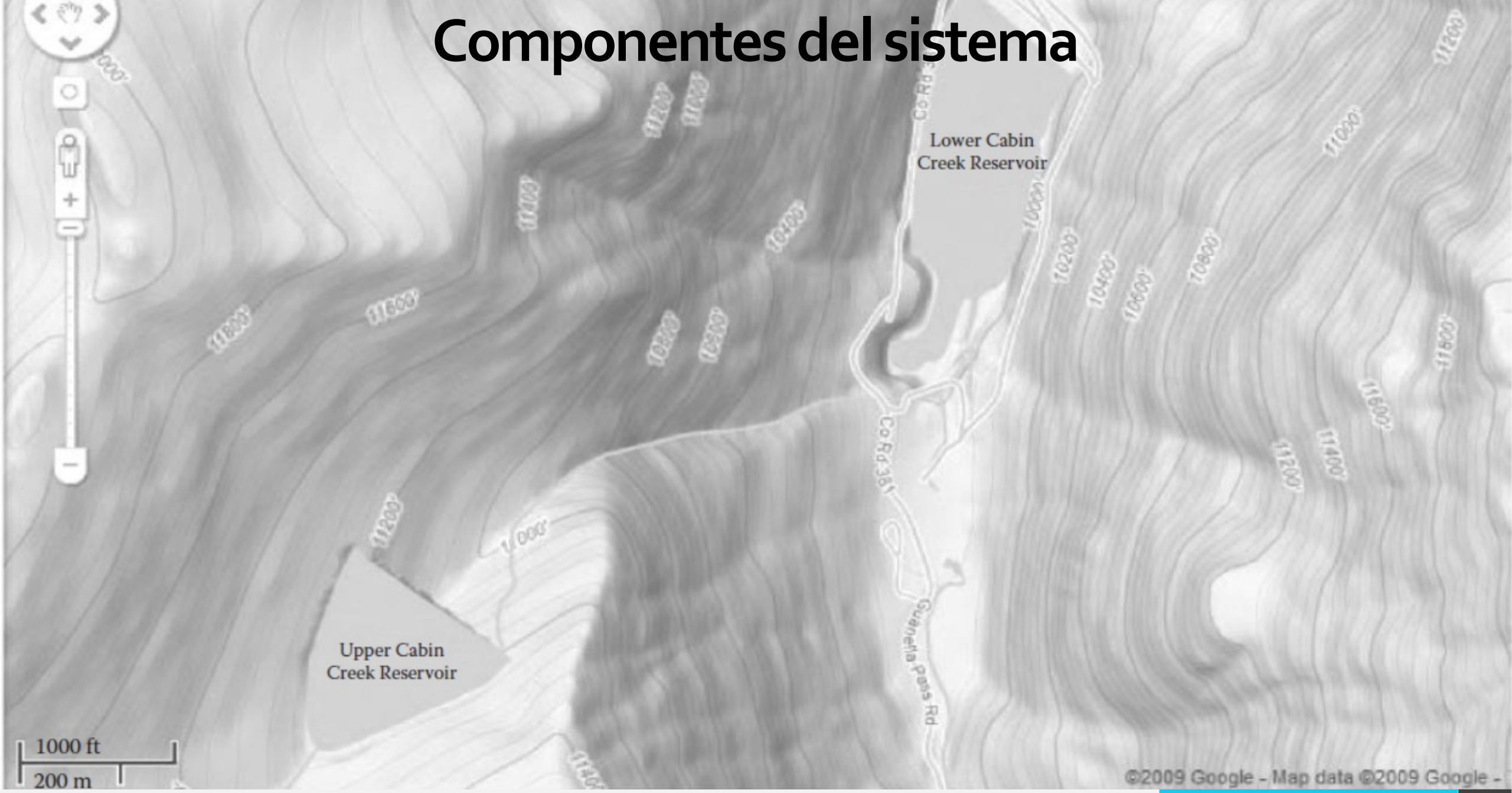


Componentes del sistema

Embalses: Los embalses que dan servicio a un sistema PHES son fundamentales para su viabilidad.

Embalses superiores: El desarrollo de nuevos embalses superiores puede llevarse a cabo de varias formas, entre las que se incluyen un embalse en el valle de un arroyo o un embalse en la cima de una colina.

Componentes del sistema



Fuente: Taylor & Francis Group, LLC

Componentes del sistema

Depósitos inferiores: Los embalses inferiores pueden encontrarse en embalses existentes o en los valles de arroyos y ríos. valles de arroyos y ríos. El área de la cuenca secundaria debe ser lo suficientemente grande como para para cubrir las necesidades de vertido del embalse superior.

Componentes del sistema

Vías de conducción de agua: Los elementos de las vías de conducción de agua necesarios para un sistema PHES son la obra de cabecera, la tubería forzada, el canal de desagüe y uno o varios tanques de compensación que permiten mover el agua entre la cámara de carga y la cámara de popa.

Componentes del sistema

Obra de cabecera: Las obras de cabecera conectan la presa con la tubería forzada y sirven de entrada en el modo de generación y de salida en el modo de bombeo. Este requisito de doble dirección de una instalación PHES significa que el flujo debe evitar vórtices en ambas direcciones para maximizar la eficiencia de la instalación. Las obras de cabecera también deben incluir rejillas de basura para eliminar los residuos y evitar que entren en el sistema.

Componentes del sistema

Tuberías forzadas: Una tubería forzada o conducto principal de agua entre la presa y la turbo maquinaria es un componente importante del diseño de una instalación de PHES. Una PHES puede tener una o varias tuberías forzadas situadas por encima o por debajo del suelo.

Componentes del sistema

Una de las principales consideraciones a la hora de ubicar una instalación PHES es reducir al mínimo la relación entre la longitud total del conductor de agua y la altura de elevación. longitud total del conductor de agua respecto a la altura. Lo ideal es que esta relación sea de 1:1, es decir, que la longitud total del conductor sea igual a la altura.

Componentes del sistema

Para dimensionar una tubería forzada para una turbina Francis o de hélice de más de 5 pies de diámetro se puede empezar con la fórmula empírica desarrollada por Sarkaria. Con un diámetro aproximado de la tubería forzada y una potencia nominal deseada, se pueden aproximar las velocidades del agua.

Componentes del sistema

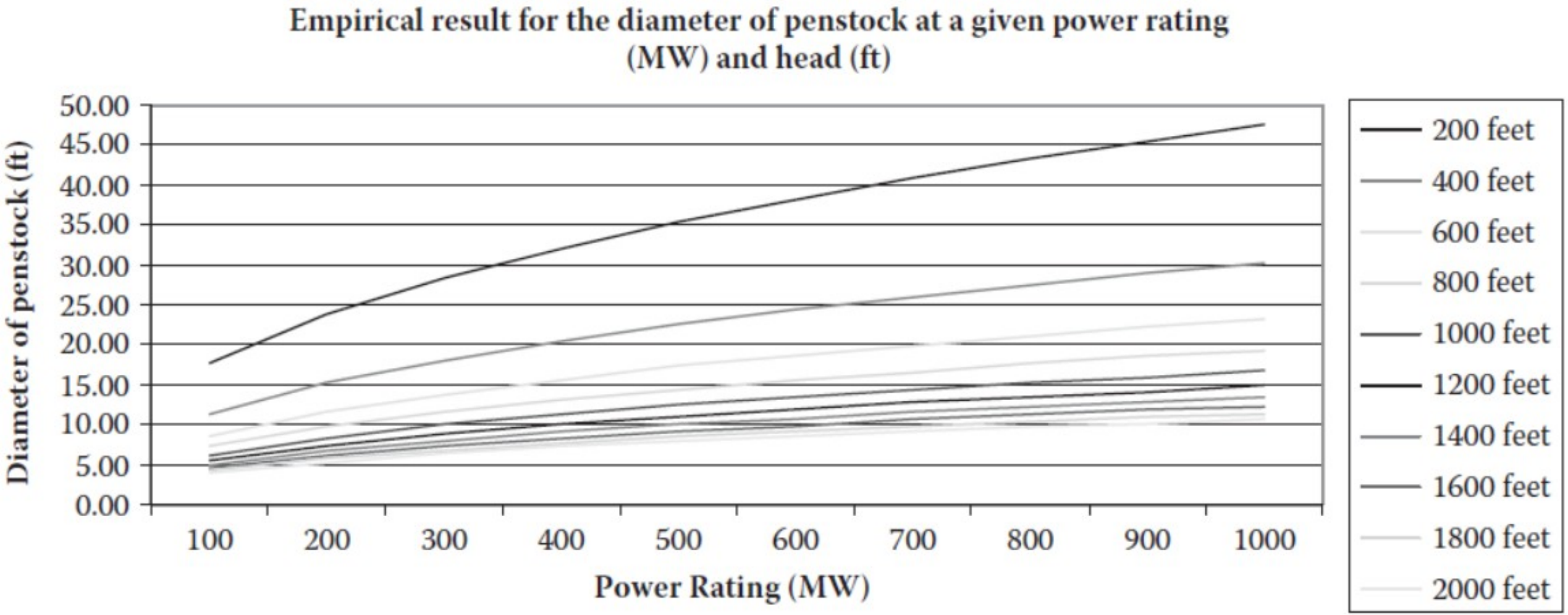
$$D = 4.44\left(\frac{P^{0.43}}{H^{0.65}}\right) \quad (3)$$

$D =$ diámetro económico de la tubería forzada (pies)

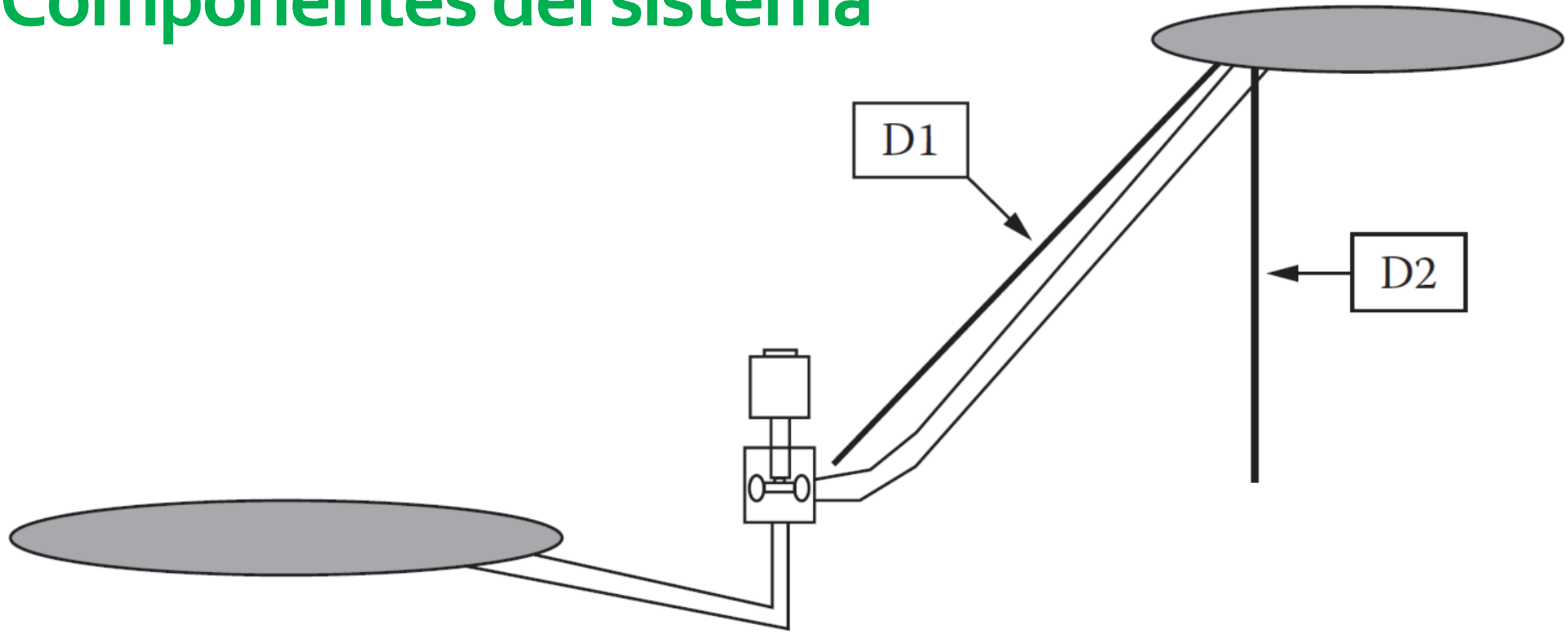
$P =$ potencia nominal (HP) de la turbina

$H =$ altura nominal de la turbina (pies).

Componentes del sistema



Componentes del sistema



Concepto básico del uso de la relación entre la distancia total de la tubería forzada y la distancia de la cabeza. La relación debe ser inferior o igual a 10:1; 1:1 es óptimo. D1 es la distancia del conducto y D2 es la distancia del cabezal.

Componentes del sistema

El dimensionamiento del conducto de agua tiene una relación directa con el tiempo de arranque de una unidad PHES. El tiempo de arranque de una unidad debe estar comprendido entre 1 y 2.4 segundos y no superar los 2.55 segundos. El tiempo de arranque del agua de una instalación hidráulica es el tiempo necesario para que el agua se desplace por los conductos hasta la turbo maquinaria.

Componentes del sistema

Puede calcularse sumando las longitudes de las secciones de diámetro constante por la velocidad del fluido en esa sección, sobre una constante gravitacional por la altura neta. Este cálculo se expresa como

$$T_W = \sum \frac{LV}{hg} \quad (4)$$

T_W = tiempo de arranque del agua

L = longitud de la sección de diámetro constante de la tubería de agua

V = velocidad media del flujo en una sección relacionada a L

g = gravedad

h = cabezal neto

Componentes del sistema

El tiempo de arranque mecánico es el tiempo necesario para que la turbomáquina alcance la velocidad de giro e inicie el funcionamiento

$$T_m = \frac{WR^2 n^2}{1,620,000P} \quad (5)$$

T_m = tiempo de arranque mecánico

WR^2 = producto del peso de las piezas giratorias (eje, rodete de la turbina y rotor del generador) y el cuadrado de su radio de giro

n = velocidad de rotación de turbina y generador para un sincrónico conectado directamente

P = capacidad de la turbina a plena potencia (HP).

Componentes del sistema

El tiempo de arranque mecánico sobre el tiempo de arranque del agua () mide la estabilidad de la unidad.

Si se espera que una unidad PHES siga a la carga o a la generación variable para la integración y proporcionar regulación de frecuencia, la relación debe ser igual o superior a 5

Componentes del sistema

Tubo de tiro

Cuando se utiliza una turbina de reacción, es necesario un tubo de tiro que se diseña simultáneamente con la turbina de bombeo. El tubo de tiro extrae el agua del rodete de la turbina y la conduce al canal de cola por debajo de la elevación del agua de cola.

El tubo permite aprovechar toda la altura de elevación de la instalación, ya que facilita la utilización de la altura de aspiración.

Componentes del sistema

Canal de cola

Un canal de cola es un conducto de agua situado entre el desagüe o el agua de cola y el calado o turbomáquina. Un canal de cola transporta agua desde el agua de cola durante el bombeo y hacia el agua de cola durante la generación.

Depósito o cámara de compensación:

Los depósitos de compensación pueden instalarse tanto aguas arriba como aguas abajo de un sistema de conducción de agua.

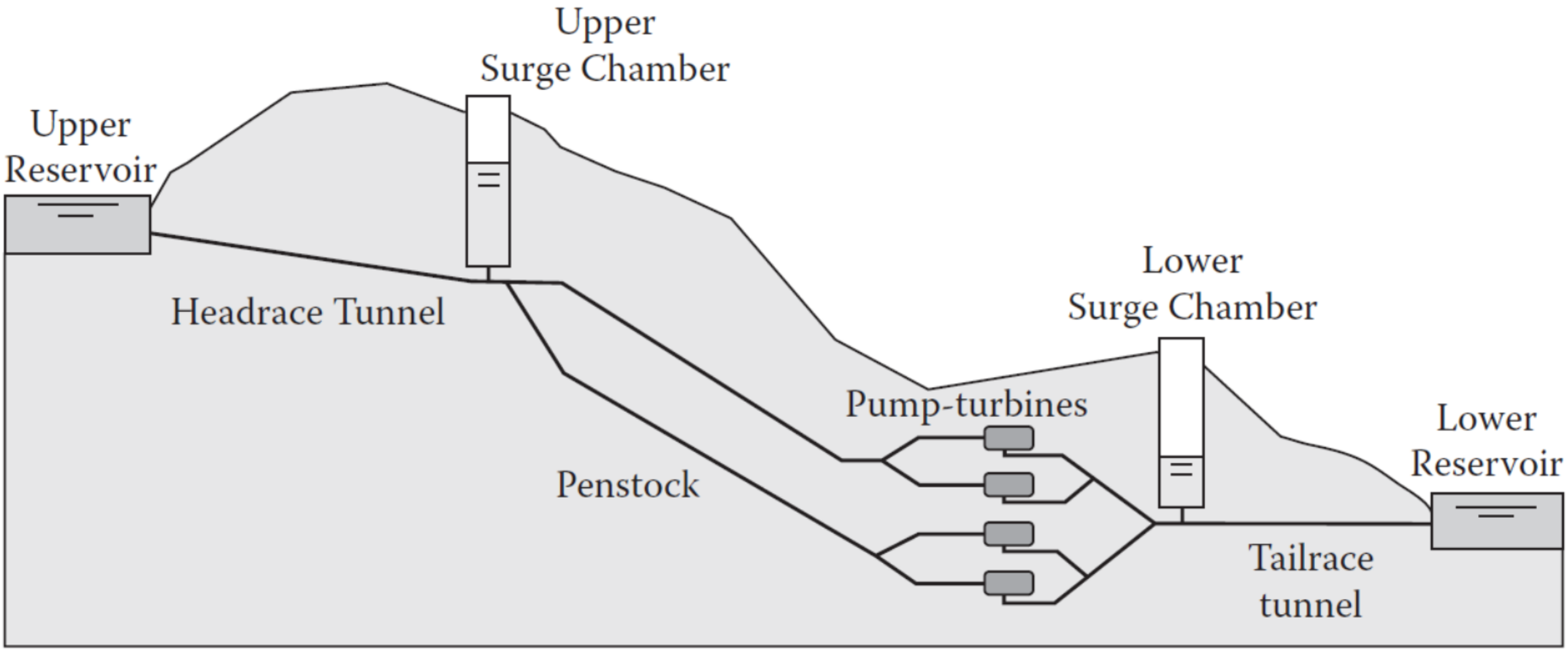
Componentes del sistema

Maquinaria turbo

La mayoría de los desarrollos de PHES están diseñados con turbinas de bombeo estilo Francis.

Estos dispositivos bombean y generan a la vez; generalmente se clasifican como turbinas de reacción. Otra opción es el uso de una bomba y turbina independientes.

Componentes del sistema



In *Handbook of Energy Systems Engineering Production and Utilization*, Wiley Interscience

Componentes del sistema

Turbinas de reacción:

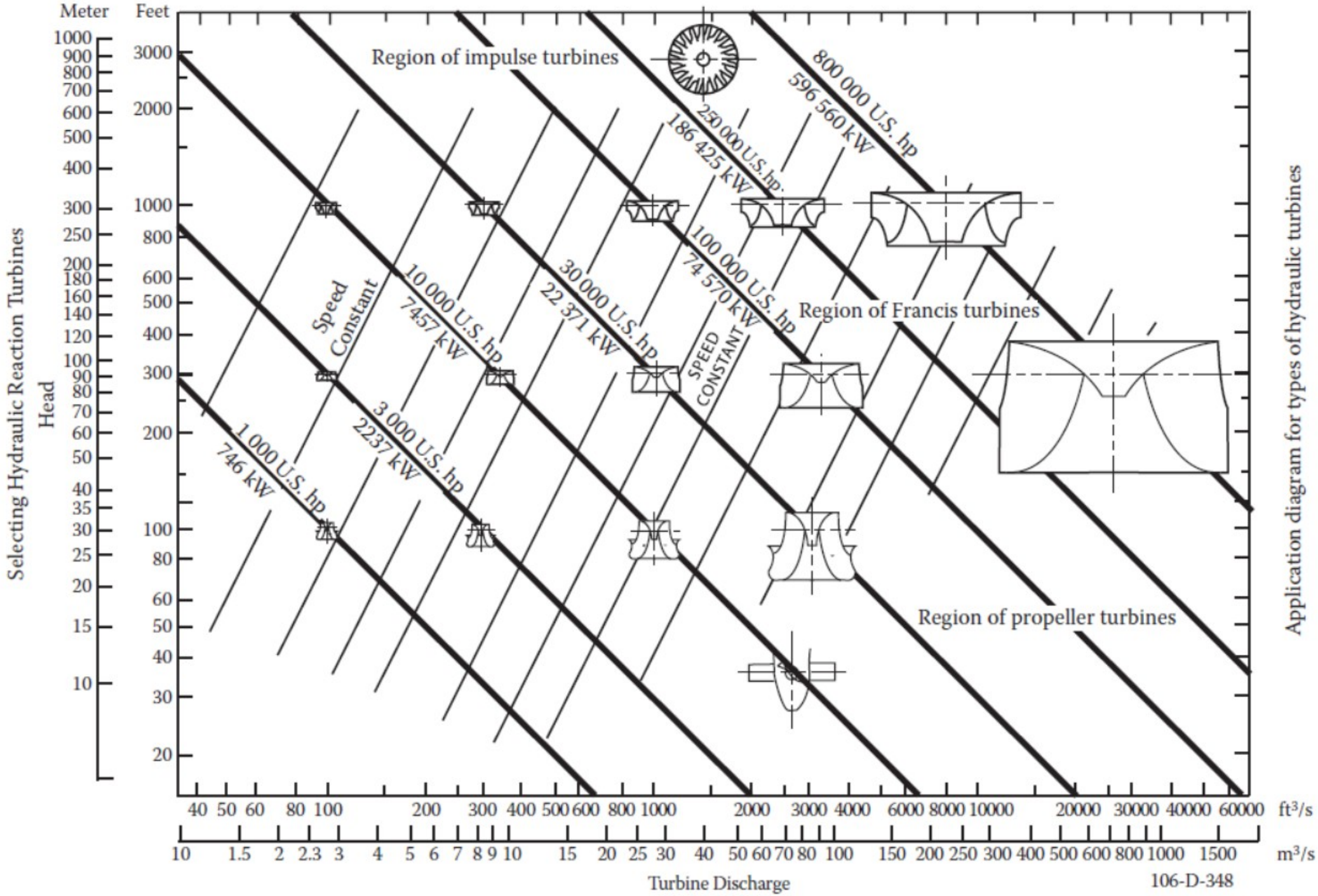
La mayoría de las instalaciones modernas de PHES utilizan turbinas de reacción. Estas turbinas funcionan por fuerzas reactivas. A diferencia de las turbinas de impulsión, las toberas o cangilones de las turbinas de reacción están fijadas a las cajas de las turbinas espirales. Al girar, el agua es empujada por la máquina o empuja a la máquina, según el estado de funcionamiento (bombeo o generación, respectivamente).

Componentes del sistema

Turbinas de reacción:

Las turbinas de bomba reversibles se dividen en tres subgrupos: de flujo radial tipo Francis, diagonal de flujo mixto y axial.

Turbinas de tipo Francis de flujo radial También conocidas como turbinas de bombeo de tipo Francis, estos tipos son los más comunes. Estos tipos son las aplicaciones más comunes para las instalaciones de PHES.


Meter
Feet
Selecting Hydraulic Reaction Turbines
Head
Region of impulse turbines
Region of Francis turbines
Region of propeller turbines
800 000 U.S. hp
596 560 kW
250 000 U.S. hp
186 425 kW
100 000 U.S. hp
74 570 kW
30 000 U.S. hp
22 371 kW
10 000 U.S. hp
7457 kW
3 000 U.S. hp
2237 kW
1 000 U.S. hp
746 kW
Speed Constant
SPEED CONSTANT
ft³/s
m³/s
Turbine Discharge
106-D-348
Application diagram for types of hydraulic turbines

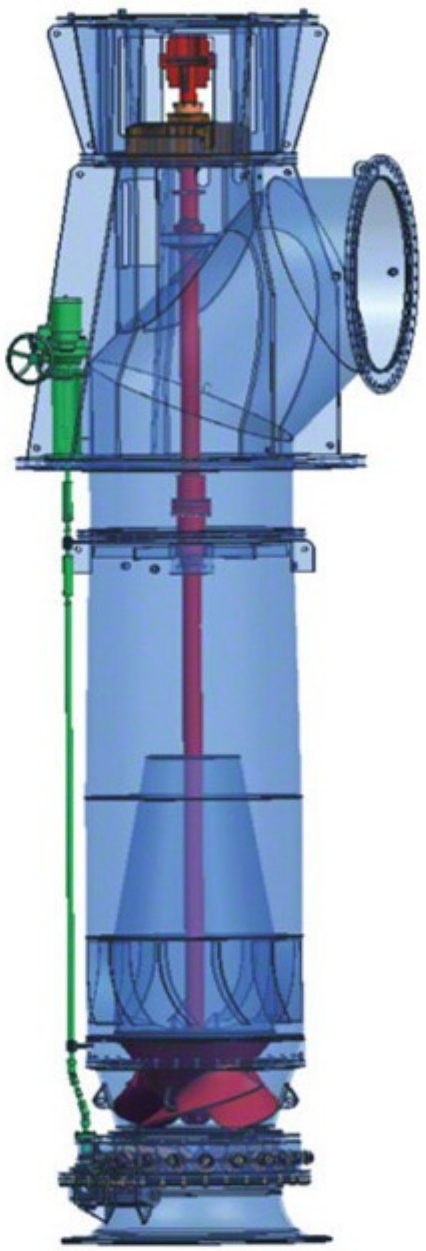
Límites de altura de la turbina de bombeo

Pump Turbine Head Limits

	Facility	Turbine Max Head (m)	Turbine Max Power (MW)	Pump Max Head (m)	Pump Max Power (MW)	Manufacturer(s)
Single-stage reversible pump turbines	Ohira (Japan)	512	256	545	269	Hitachi, Toshiba
	Raccoon Mtn (US)	316	400	323	400	Allis Chalmers
	Bajina Basta (Serbia)	600	315	621	310	Toshiba
	Bath County (US)	384	457	387	420	Allis Chalmers
Multistage reversible pump turbines	La Coche (France)	930	79	944	80.6	Neyrpic, Vevey
	Edolo (Italy)	1224	122	1237	142	Hydroart, De Pretto Escher Wyss
	Chiotas (Italy)	1047	147	1069	160	Hydroart, De Pretto Escher Wyss
Tandem units with impulse turbines	San Fiorano (Italy)	1401	140	1439	106	De Pretto Escher Wyss
	Rottau (Austria)	1100	200	1100	144	Voith
Tandem units with Francis turbines	Hornburg (Germany)	625	243	625	250	Voith, Escher Wyss
	Rosshag (Austria)	672	58	736	59	Voith, Escher Wyss

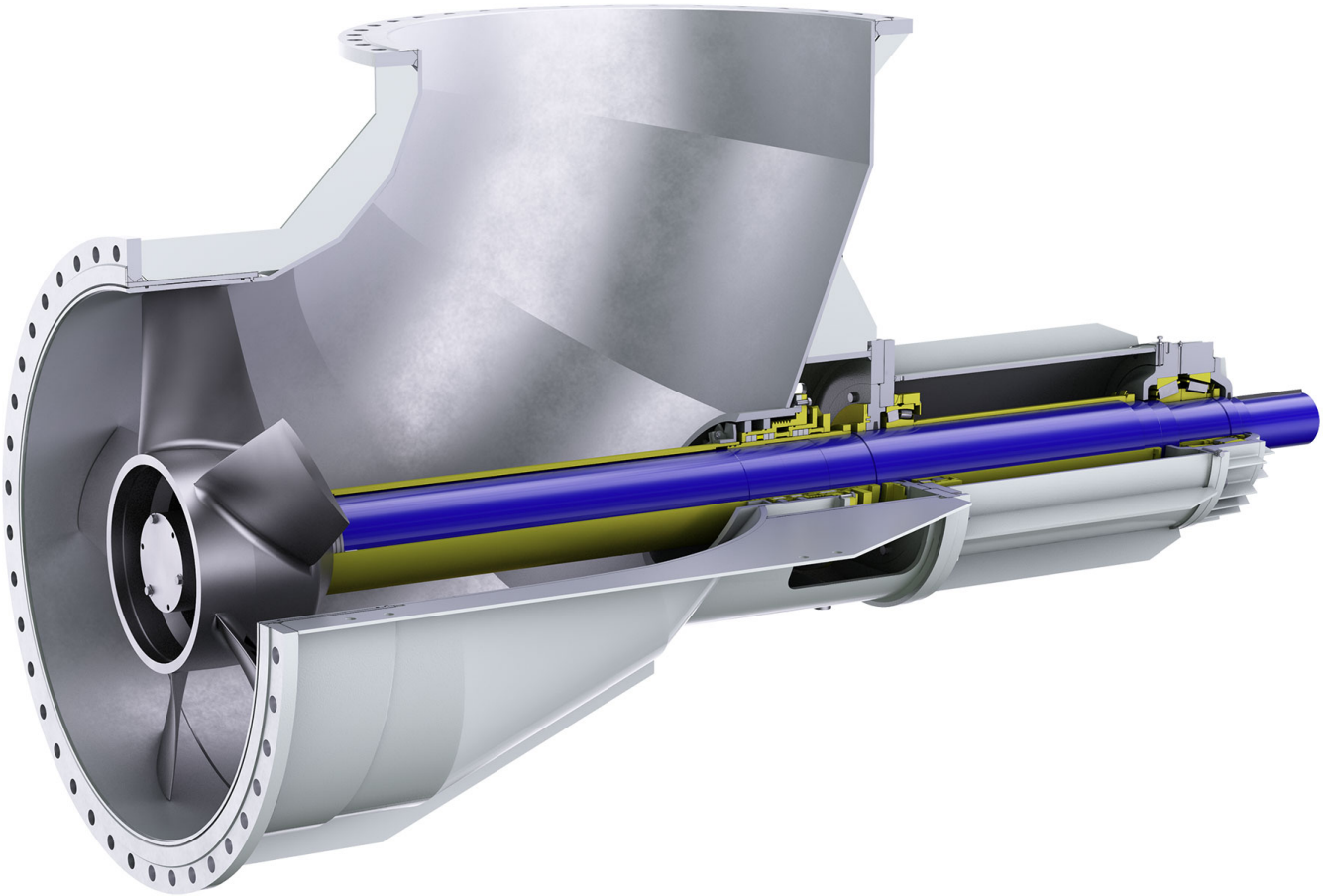
Componentes del sistema

Turbinas de flujo mixto o diagonal: Estas turbinas suelen aplicarse entre 35 y 300 pies (10 a 90 metros) Este diseño es más pequeño y más ágil que el diseño de tipo Francis de flujo radial. Las unidades de flujo mixto o diagonal tienen tiempos de arranque de la bomba más rápidos y se adaptan a la variabilidad más fácilmente que las unidades Francis. A pesar de su menor tamaño, estas unidades suelen costar más que las de tipo Francis.



Componentes del sistema

Turbinas de bomba de flujo axial: Estas turbinas se aplican entre 3 y 45 pies (1 a 15 metros) de altura. Su aplicación a baja altura es muy adecuada para operaciones mareomotrices. Las turbinas de flujo axial presentan un rendimiento razonable en todo el espectro de sus rangos de funcionamiento.



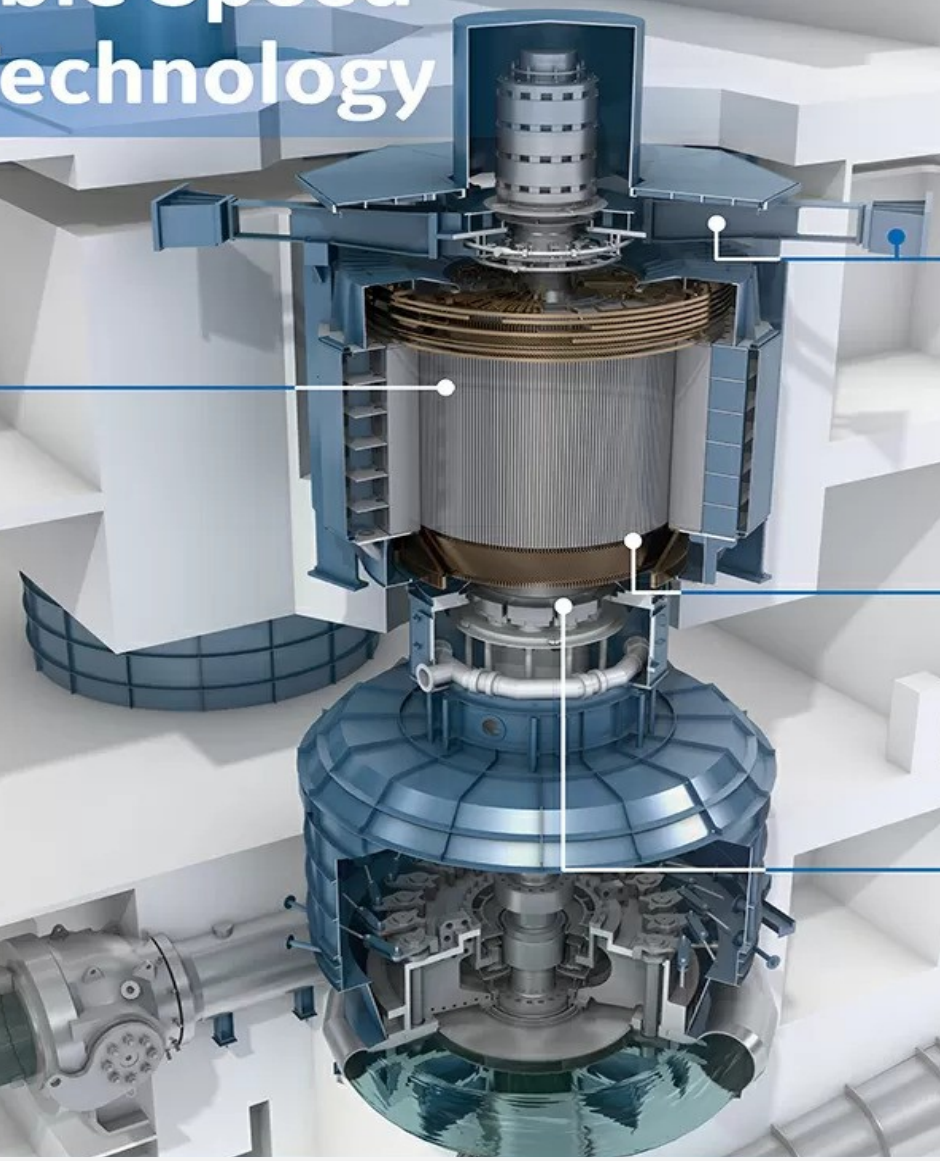
Componentes del sistema

Turbinas de velocidad variable:

Las instalaciones PHES se caracterizan regularmente por elevadas variaciones en el rendimiento de la altura de elevación, por lo que se producen pérdidas durante el funcionamiento. Los puntos óptimos de diseño para los modos de bombeo y generación difieren. Para hacer frente a estos retos, las unidades de doble velocidad utilizan una disposición devanados del estator para alternar entre números de polos. Las dos configuraciones alcanzan velocidades síncronas.

Hydropower Variable Speed Pumped Storage Technology

GE Renewable Energy



3-Phase Wound Rotor
Features GE's winding system, including bar roundpacking, that optimizes mechanical and thermal connection while allowing bar dismantling.

Special Bar Insulation
Optimized and tested to withstand high harmonics levels associated with the converter.

SPMAX* Controller
Manages all specific controls related to variable speed units and optimizes the speed and power set points, maximizing the unit global performance.

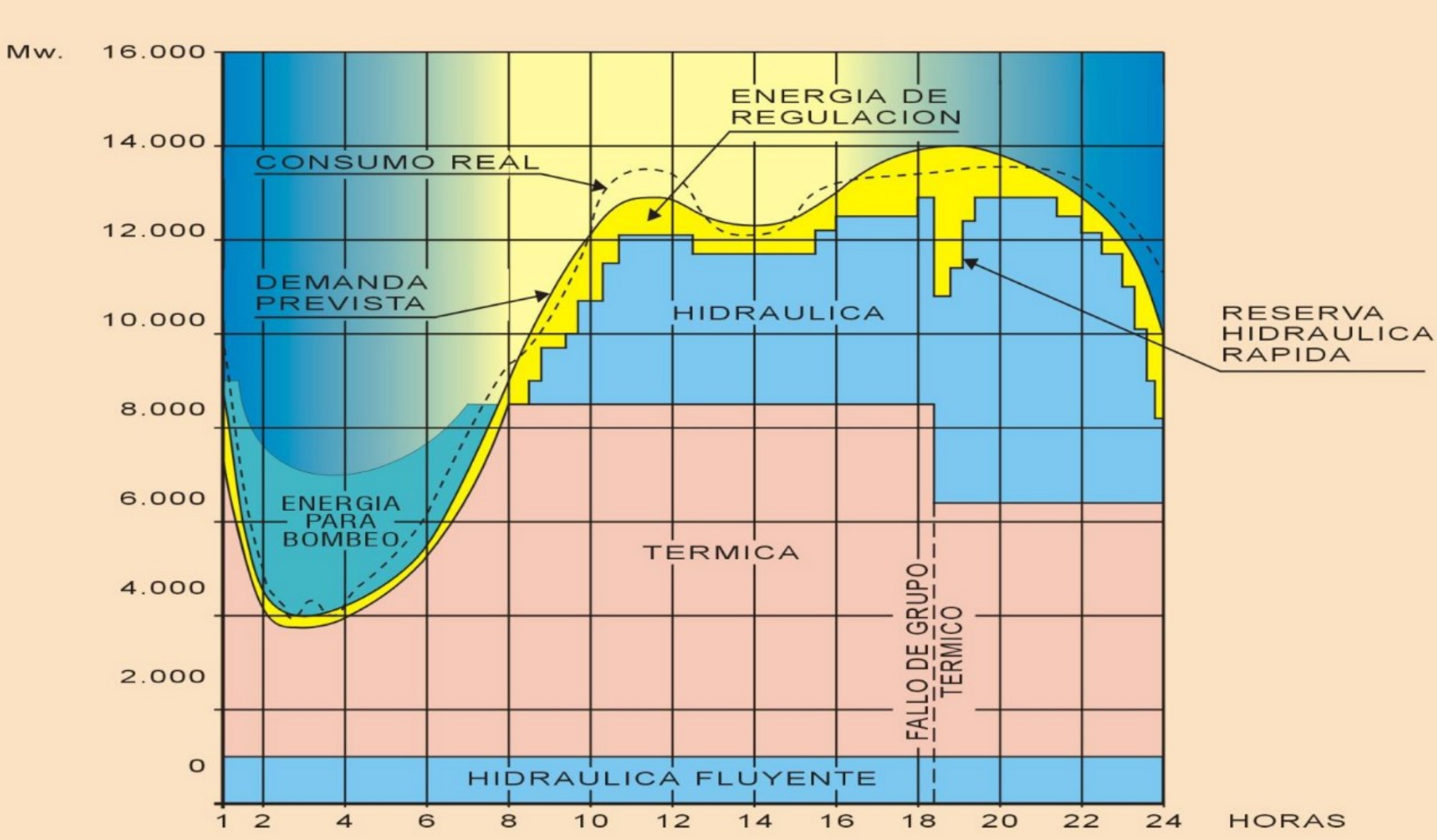
Oblique Elements
GE's oblique elements maintain the circular shape of the stator and therefore the concentricity of the air gap.

Rotor Core Pressing System
Patented system that prevents loosening of core components, increasing reliability.

Thrust Bearing Membrane Technology
Self-adjusts and reduces overheating risk.

Función tradicional de un almacenamiento por bombeo

- Cubrir las puntas de demanda.
- Reserva hidráulica rápida.
- Consumo nocturno de energía producida por centrales térmicas.
- Ingresos : arbitraje producción en punta y bombeo en valle.
- Servicios complementarios y de ajuste.
- Pago por capacidad



FLEXIBILIDAD, RAPIDEZ DE RESPUESTA y FIABILIDAD

1. Balance de energía

El almacenamiento facilita la integración de las energías renovables gestionando su variabilidad no solamente en base diaria o semanal sino también estacional. Por tanto, el factor clave de un almacenamiento es su tamaño medido en horas de energía

Solar Fotovoltaica	**Almacenamiento que funciona en un periodo de 6-8 horas: almacena energía durante las horas de sol y la entrega durante las horas nocturnas**
Eólica	Almacenamiento de energía los días de exceso de generación eólica y entrega de energía los días de poco o nulo viento

FLEXIBILIDAD, RAPIDEZ DE RESPUESTA y FIABILIDAD

2. Servicios complementarios

- Regulación de frecuencia de la red (inercia mecánica de los generadores)
- Ajuste de la curva de demanda horaria (Mercado secundaria y terciaria)
- Reposición del servicio ante un cero de tensión en la red
- Potencia firme para el Sistema (pagos por capacidad)

CONCLUSIONES:

El almacenamiento de energía por bombeo es imprescindible para la transición fiable y segura hacia un sistema eléctrico basado en energías renovables

- Tecnología madura
- De elevada eficiencia (70-80%) y sin emisiones de GEI
- Planificación a largo plazo (8 a 10 años)
- Oportunidad de creación de empleo de calidad y en zonas rurales al disponer localmente de las capacidades de diseño, construcción, fabricación y explotación

GRACIAS

Me pueden contactar en:

acespedes09@uasd.edu.do