Apuntes

Energy Storage

Tema 3: Aire comprimido (CAES) y aire líquido (LAES)

Máster Universitario en Ingeniería de la Energía

ETSI Minas y Energía

Hugo Torres Orejudo

Noviembre 2026

Elaborado con IA a partir del material de la asignatura. Material no oficial.

Índice general

1 CAES: fundamentos **2**

2 Tipos de CAES **2**

3 Energía en depósitos **3**

4 LAES **4**

5 Compresión multietapa con refrigeración intermedia **4**

6 Rendimiento de un CAES **5**

7 Almacén de aire: cavernas y depósitos **5**

8 LAES: balance de licuación y comparación con CAES **6**

1 CAES: fundamentos

Se almacena energía interna (presión y calor) de aire. Un CAES se parece a un ciclo de Brayton partido: compresores en la carga y expansores en la descarga. La compresión calienta el aire. Se enfría para reducir el volumen y las pérdidas, y el calor se almacena o se pierde.

Fórmulas clave

$$PV = mR_aT \ (R_a = 287{,}058\,\mathrm{J/(kg\,K)}) \qquad r = \frac{P_1}{P_0} \qquad \frac{T_1}{T_0} = r^{\chi},\ \chi = \frac{\gamma - 1}{\gamma}$$

$$W_{ad} = mR_aT_0\,\frac{r^{\chi} - 1}{\chi} \qquad W_{iso} = mR_aT_0 \ln r$$

$$Ex = m[h - h_0 - T_0(s - s_0)] = Ex_{mec} + Ex_{ter}$$

$$Ex_{mec} = mR_aT_0 \ln \frac{P}{P_0} \qquad Ex_{ter} = mc_p\left(T - T_0 - T_0 \ln \frac{T}{T_0}\right)$$

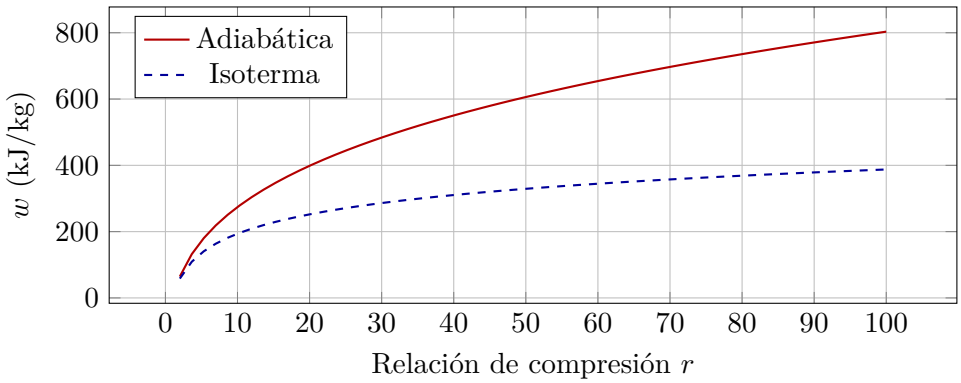


Figura 1. Trabajo específico de compresión ($T_0 = 293{,}15\,\mathrm{K}$, $\gamma = 1{,}4$).

La isoterma es el límite inferior de trabajo, y se aproxima con muchas etapas e *intercooling* o inyección de agua nebulizada.

2 Tipos de CAES

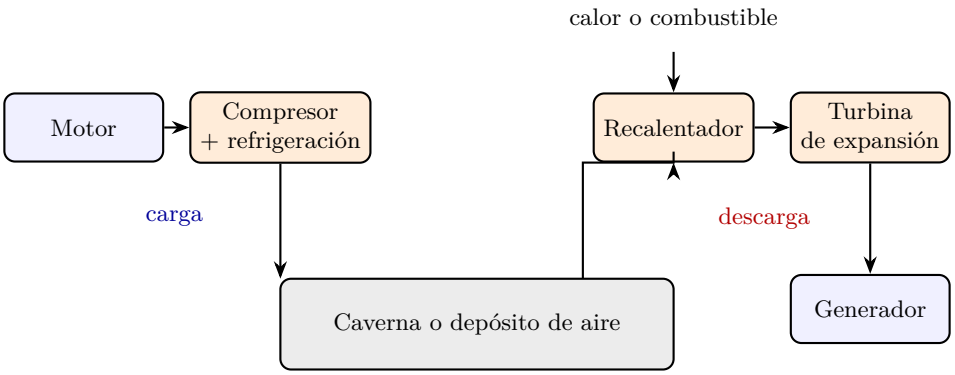


Figura 1. Esquema de un CAES diabático. En la carga un motor comprime aire y lo enfría antes de guardarlo. En la descarga se recalienta y se expande en una turbina que mueve el generador.

Tipo	Descripción	Observaciones
Diabático	Compresión con refrigeración intermedia (calor disipado). En la expansión se recalienta con gas natural.	Huntorf 1978 (290 MW, 2 h; 321 MW desde 2006). McIntosh: 110 MW, 26 h, $\approx 54\,\%$.
Adiabático (A-CAES)	Calor de compresión almacenado en TES (dos tanques o termoclino) y devuelto en la expansión.	Sin combustible. Mayor rendimiento potencial.
Isotermo	Compresión a T casi constante.	Máximo rendimiento de compresión.
Isobárico	Depósito a presión constante (columna de agua, bombeo, depósitos deformables).	Equipos en punto de diseño estable.
Híbrido	Integración con biomasa, geotermia, cogeneración.	Gestión inteligente del calor.

Componentes: compresión/expansión, almacén de aire (cavernas o depósitos), regeneración de calor y generación eléctrica.

3 Energía en depósitos

Fórmulas clave

$$E_v = \frac{n}{n-1} P_1 \left[1 - \left(\frac{P_0}{P_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}\right] \qquad E_{v,u} = E_v(P_1) - E_v(P_{min}) \qquad V_{st} = \frac{E_{st}}{E_{v,u}}$$

$n = 1$ isotermo; $n = 1{,}4$ adiabático; P_{min} es la presión mínima de las turbomáquinas. **Tanques:** tensión de Lamé y criterio de Von Mises. Espesor $e = r_{out}\left(1 - \sqrt{1 - \sqrt{3}\,\Delta P\, V M_r\, S/\sigma_y}\right) - e_c$. Depósito cilíndrico con cabezas semiesféricas: $V = \pi r_{in}^2 h + \frac{2}{3}\pi r_{in}^3$.

Revisar

Las expresiones de E_v, $E_{v,u}$ y Ex_{isoP} se reproducen de los apuntes de la asignatura. Verificar con el profesor el criterio de P_{min} y el factor T_0/T_1 de Ex_{isoP}.

4 LAES

- **Carga:** compresión por etapas con enfriamiento, enfriamiento en la *cold box* y licuación (Linde, Claude); aire a $\approx 79\,\mathrm{K}$ ($-194\,^\circ\mathrm{C}$) almacenado a presión atmosférica. Es imprescindible purificar (agua, CO_2, hidrocarburos) por adsorción PSA.
- **Descarga:** bomba criogénica ($\approx$ 40–80 bar), evaporación, recalentamiento con el calor de compresión y expansión en 2–3 etapas.
- **Cold storage (HGCS):** lecho de rocas que guarda el frío del evaporador y lo devuelve en la licuación.
- **Calor:** aceite térmico hasta $390\,^\circ\mathrm{C}$ en dos tanques.

Configuración	η_{RT}	Trabajo de licuación
Simple	$\approx 45\,\%$	Linde: $\approx 2500\,\mathrm{Wh/kg}$
Con reutilización de frío y calor	50–60 %	$\approx 270\,\mathrm{Wh/kg}$
Con calor/frío residual externo	hasta 70 %	–

Densidad energética 150–250 Wh/L. No tiene restricción geográfica, es modular y tiene vida útil de 30–40 años. Plantas: piloto de 350 kW/2,5 MWh (2011), Pilsworth 5 MW/15 MWh (2018).

Idea clave

El ciclo Linde enfría por laminación (Joule–Thomson, máximo cerca del punto crítico: 37,8 bar y 132 K). El ciclo Claude turbina parte del caudal para enfriar más.

5 Compresión multietapa con refrigeración intermedia

Con N etapas, refrigeración hasta T_0 entre etapas y relación de compresión total r, el trabajo es mínimo cuando todas las etapas tienen la misma relación $r_s = r^{1/N}$.

Fórmulas clave

$$r_s = r^{1/N} \qquad T_{sal,etapa} = T_0\, r_s^{\chi} \qquad W_N = N\, m\, R_a T_0\, \frac{r_s^{\chi} - 1}{\chi}$$

$$\lim_{N\to\infty} W_N = W_{iso} = m R_a T_0 \ln r$$

Cada etapa real añade un rendimiento isentrópico $\eta_c < 1$ ($W_{real} = W/\eta_c$ en compresión; $W_{real} = \eta_e W$ en expansión). El calor extraído en cada refrigeración es el que se almacena en un CAES adiabático: $Q = \dot{m}\, c_p (T_{sal} - T_0)$ por etapa, con $c_p \approx 1{,}005\,\mathrm{kJ/(kg\,K)}$. Cuanto mayor es la temperatura de salida de la etapa, más exergía tiene ese calor, pero más caro es el TES.

6 Rendimiento de un CAES

Fórmulas clave

$$\eta_{CAES,diab} = \frac{W_{sal}}{W_{ent} + Q_{comb}} \qquad \eta_{eq} = \frac{W_{sal}}{W_{ent} + Q_{comb}\,\eta_{ref}} \qquad \eta_{A-CAES} = \frac{W_{sal}}{W_{ent}}$$

En un diabático hay dos entradas (electricidad de compresión y combustible), por lo que conviene indicar cómo se contabiliza el combustible: sumando calor ($\eta_{CAES,diab}$ de Huntorf $\approx 42\,\%$) o convirtiéndolo a electricidad equivalente con un ciclo de referencia η_{ref} ($\approx 50\,\%$, McIntosh $\approx 54\,\%$). En un A-CAES el rendimiento es el producto de los rendimientos de compresión, TES y expansión; los demostradores y estudios dan 60–70 %.

	Huntorf (DE)	McIntosh (EE. UU.)
Inicio de operación	1978	1991
Potencia de descarga	290 → 321 MW	110 MW
Duración de descarga	2 h	26 h
Rendimiento aprox.	$\approx 42\,\%$	$\approx 54\,\%$
Caverna	domo salino	domo salino, 450 m, 45–74 bar

Datos de los apuntes de la asignatura; el año de McIntosh es de literatura [REVISAR].

7 Almacén de aire: cavernas y depósitos

- **Domos salinos:** cavernas por lixiviación (disolución con agua). Estancas, baratas por m^3, aptas para ciclos rápidos. Las más usadas hoy.
- **Acuíferos y roca dura:** requieren sellado y estudios geológicos; roca dura con revestimiento. Minas abandonadas, con riesgo de fugas.
- **Depósitos en superficie o submarinos:** sin restricción geológica, pero más caros por unidad de volumen (ver tabla de costes del tema 1: CAES superficie 263 $/MWh frente a 105 $/MWh en cavernas).
- **Operación a V constante (isocórica):** la presión baja durante la descarga y las turbinas funcionan fuera de diseño. Se mitiga operando en un rango P_{min}–P_{max} y con regulación de caudal.

8 LAES: balance de licuación y comparación con CAES

Rendimiento de licuación del ciclo Linde

$$y = \frac{m_{liq}}{m} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_f}$$

$$w_{liq} = \frac{W_{comp}}{y\, m} \quad [\mathrm{Wh/kg_{liq}}]$$

Con h_1 la entalpía del aire a baja presión y temperatura ambiente, h_2 la del aire a alta presión y temperatura ambiente y h_f la del líquido saturado. Es el efecto Joule–Thomson el que da $h_1 > h_2$ (y de pocos porcentajes en Linde simple), y por eso el trabajo por kg licuado es alto ($\approx 2500\,\mathrm{Wh/kg}$) y se prefiere Claude. Con recuperación de frío, el trabajo baja un orden de magnitud.

	CAES (70 bar, adiab.)	LAES	Bombeo
Densidad energética	$\approx 2{,}3\,\mathrm{Wh/L}$	150–250 Wh/L	$\approx 1\,\mathrm{Wh/L}$ (100 m)
Ubicación	geología	libre	orografía
η_{RT}	55–70 %	40–70 %	82–94 %
Madurez (TRL)	8	8	9

El valor del CAES se obtiene de $E_{v,u} = 8{,}1\,\mathrm{MJ/m^3}$ con $P_1 = 70$ bar y $P_{min} = 40$ bar (problema 3). El LAES es unas 90 veces más denso, por eso sus tanques son mucho menores.

Idea clave

Dos palancas explican casi todo: (1) el calor de compresión se almacena (A-CAES, LAES) o se pierde (diabático); (2) en LAES, el frío del evaporador se almacena y se devuelve a la licuación. Ambas elevan η_{RT} del 45 % al 50–60 % o más.