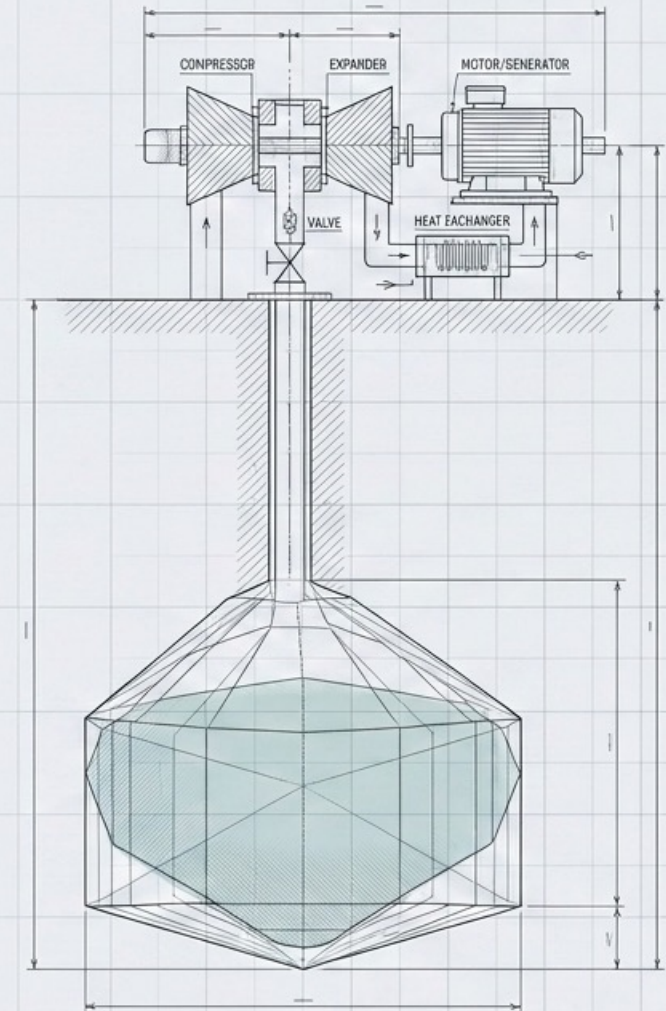


Armazenamento de Energia por Ar Comprimido (CAES)

Evolução Histórica, Classificação e Perspectivas no Cenário Brasileiro

RELATÓRIO TÉCNICO DE AVALIAÇÃO DE ESTADO DA ARTE



Evolução Histórica: Da Potência Mecânica à Escala Utility

Origens e Era Conceitual

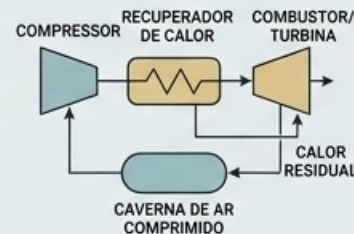
1877 (Viena) / 1888 (Paris): Redes pneumáticas urbanas para transmissão de potência mecânica.



1949: Patente fundacional pela Stal Laval, introduzindo o conceito de estocagem de ar em cavernas.

Era Diabática / Fóssil

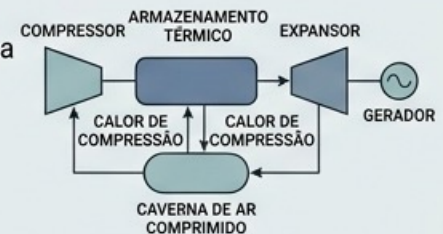
1978 (Huntorf, Alemanha): Primeira planta CAES comercial (321 MW) em cavernas de sal.



1991 (McIntosh, EUA): Segunda planta comercial (226 MW expandido). Adição de recuperador de calor.

Era Adiabática / Zero Emissões

2019: Goderich (Canadá) – Planta de referência comercial A-CAES (Hydrostor).

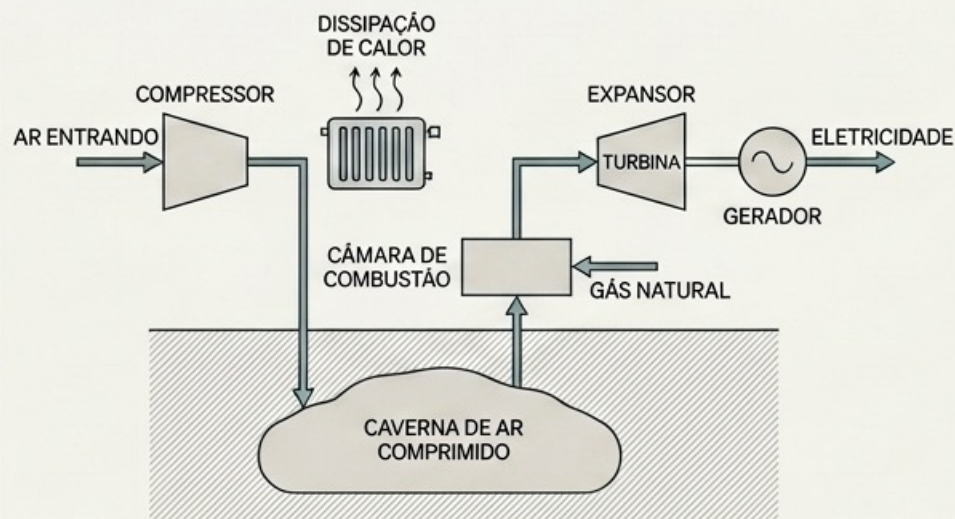


2022–2026: Comissionamento de super-usinas chinesas sem combustão (Jintan 60 MW, Zhangjiakou 100 MW, Yingcheng 300 MW, Huai'an 600 MW).

2026+: Projetos ocidentais Silver City (200 MW) e Willow Rock (500 MW) recebem aprovações.

Tipos e Gestão Térmica (D-CAES e A-CAES)

D-CAES - Diabático

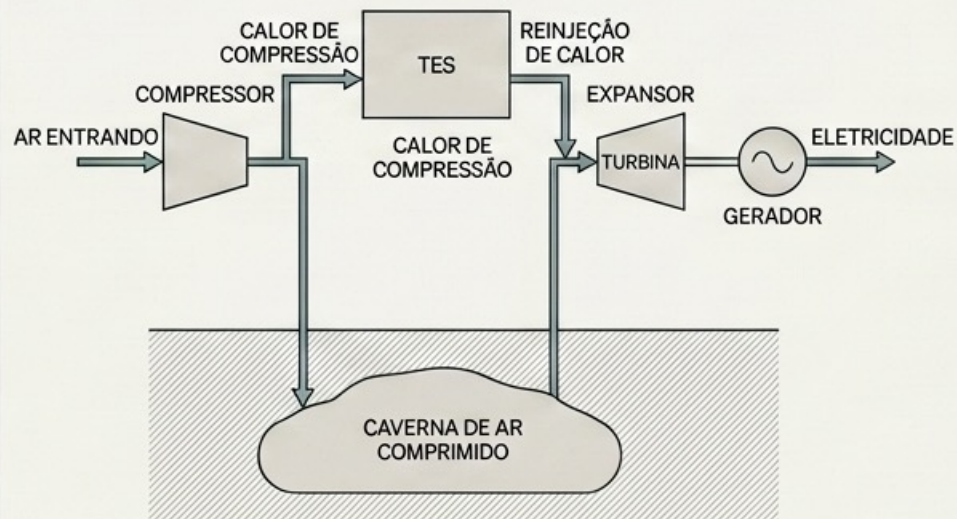


Mecanismo: O calor gerado na compressão é dissipado na atmosfera.

Descarga: Exige a combustão de gás natural para reaquecer o ar comprimido antes da expansão nas turbomáquinas, evitando o congelamento das pás.

Status: Tecnologia amplamente madura e comprovada, porém associada à emissão de gases de efeito estufa.

A-CAES / AA-CAES - Adiabático Avançado

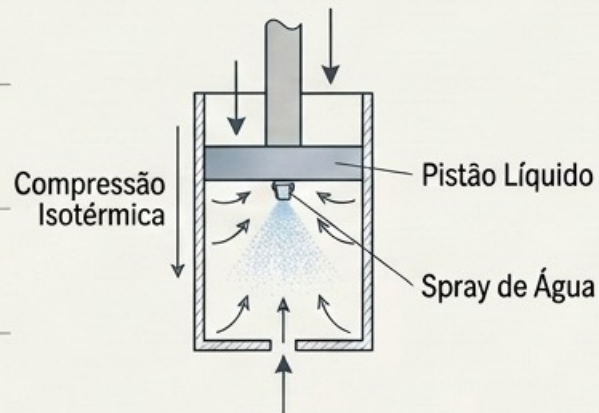


Mecanismo: O calor da compressão é capturado e armazenado em um sistema TES.

Descarga: O calor armazenado é reinjetado no fluxo de ar durante a descarga, eliminando a necessidade de queima de combustível.

Status: Estado da arte comercial. Maior eficiência global e zero emissões diretas de escopo 1.

Tecnologias Avançadas (I-CAES e Sistemas Isobáricos)

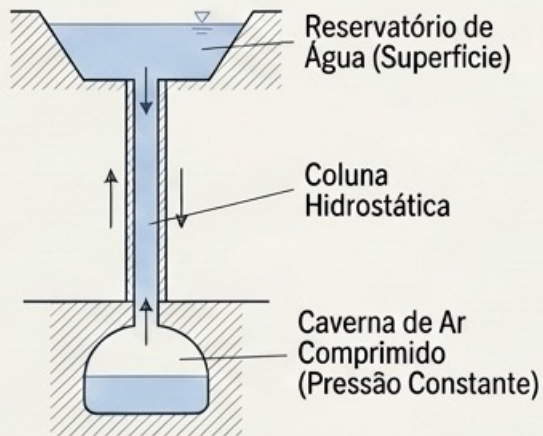


I-CAES - Isotérmico

Princípio: Busca realizar a compressão e expansão mantendo a temperatura constante ($n \approx 1$).

Engenharia: Utiliza troca térmica instantânea (ex: spray de água ou pistão líquido) para absorver o calor do ar contínua e rapidamente.

Realidade Comercial: Apresenta altíssima eficiência teórica, mas a complexidade mecânica o restringe a fases de P&D e projetos piloto.



Sistemas Isobáricos / Hidrostáticos

Princípio: Mantém a pressão do reservatório de ar virtualmente constante durante os ciclos de carga e descarga ($P \approx \rho gh$).

Engenharia: Emprega uma coluna de água que desloca o volume de ar na caverna, atuando como compensador de pressão.

Vantagem: Simplifica o controle e otimiza a eficiência das turbomáquinas ao evitar operação off-design provocada por grandes variações de pressão.

Desempenho e Viabilidade Financeira

Parâmetro	D-CAES	A-CAES	I-CAES
Eficiência Round-Trip	42% – 54%	65% – 72%	70% – 80% (Teórico)
Razão de Pressão Operacional	4 – 8 MPa	7 – 20 MPa	5 – 40 MPa
CAPEX Estimado (US\$/kW)	\$760 – \$1.200	\$850 – \$1.870	\$1.500 – \$6.000
Temperatura de Operação	Até 1023 K	773 K – 873 K	< 353 K
Temperatura de Operação	Até 1023 K	Zero	Zero
Dependência de Combustível	Alta (Gás Natural)	Zero	Zero
Maturidade Técnica	Comercial Histórica	Escala Utility Emergente	Piloto / P&D

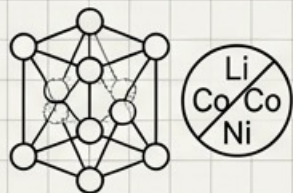
Nota técnica: Embora a eficiência RTE do A-CAES seja inferior à de baterias de lítio, seu LCOS (Levelized Cost of Storage) para longas durações é expressivamente superior em capacidades utilitárias.

Vantagens Sistêmicas e Casos de Uso Prioritários

Vantagens Estruturais



Longevidade: Vida útil projetada de décadas para cavernas e turbomáquinas, com ausência de degradação química ou autodescarga significativa.

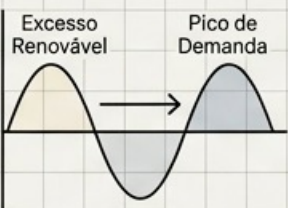


Independência Material: Não requer minerais críticos (lítio, cobalto, níquel), mitigando riscos de cadeia de suprimentos.

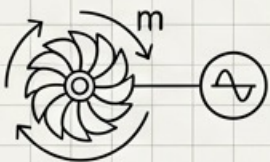


Economia de Escala: Custo marginal baixíssimo para expansão da duração de armazenamento (adicionar capacidade de caverna é mais barato que adicionar células químicas).

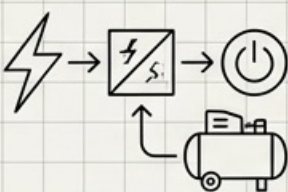
Casos de Uso na Rede



Arbitragem Temporal (Time Shifting): Deslocamento massivo de energia renovável (eólica e solar) de horários de restrição/excesso para os picos de demanda noturna.



Inércia Síncrona: Fornecimento de inércia mecânica real (rotação física de turbomáquinas) para estabilidade de frequência, crucial em redes com alta penetração de inversores.



Black Start e Reserva: Capacidade comprovada de reinício autônomo da rede elétrica a partir da energia primária armazenada (ar comprimido).

Restrições Técnicas e Desvantagens Inerentes

Dependência Geológica Estrita

A viabilidade em larga escala exige maciços rochosos de baixíssima permeabilidade, aquíferos ou depósitos de sal estruturalmente saudáveis. Soluções artificiais encarecem drasticamente o CAPEX.

Barreiras de CAPEX e Cronograma

Exige engenharia civil e geotécnica pesada. O ciclo de desenvolvimento (licenciamento, perfuração, comissionamento) leva de 4 a 6 anos, afugentando capital de curto prazo.

Eficiência Termodinâmica Relativa

O RTE global do sistema A-CAES (60%–72%) permanece estruturalmente inferior ao de baterias Li-ion (85%–90%) e hidrelétricas reversíveis - PHS (75%–80%).

Complexidade de Operação Off-Design

A contínua variação de pressão e temperatura dentro da caverna exige estratégias complexas de controle das turbomáquinas e trocadores de calor em sistemas não isobáricos.

O Contexto Brasileiro I: P&D e Estrutura Regulatória

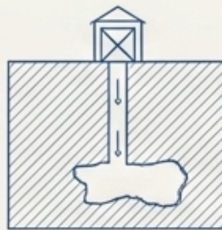
Hub GeoStorage
(RCGI / USP)

Principal pólo investigativo do Brasil. Estimativas apontam implantação de CAES a 50% do custo das hidrelétricas reversíveis e até 20x menor que baterias de lítio em larga escala. Desenvolvimento de tecnologia patenteada de separação gravitacional de CH₄/CO₂ em cavernas de sal.

Marco Regulatório
(EPE / ONS)

O principal gargalo atual é o mercado. A viabilização do CAES exige a implementação de um mercado de capacidade transparente e a correta precificação de serviços ancilares (inércia, regulação de frequência) fornecidos por turbomáquinas.

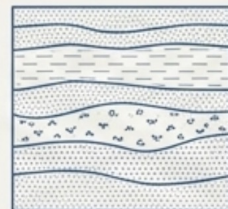
O Contexto Brasileiro II: Potencial Geológico e Mapeamento



Minas Exauridas (MG e Nordeste): Possibilidade latente de reaproveitamento de cavidades de rocha dura oriundas do longo histórico minerário do país para a alocação de sistemas A-CAES isobáricos/hidrostáticos.



Bacia de Santos e Pré-Sal (Cavernas de Sal): O Brasil lidera a geologia salina offshore. Possibilidade de integrar CAES e hidrogênio azul diretamente nas plataformas escavando cavernas por dissolução, mitigando reinjeção excessiva de CO₂.



Bacia Sedimentar do Paraná: Uma das maiores bacias da América do Sul. Oferece propriedades petrofísicas ideais (porosidade e profundidade) para o armazenamento seguro e hermético de fluidos sob altíssima pressão.

O Contexto Brasileiro II: Potencial Geológico e Mapeamento



Minas Exauridas (MG e Nordeste): Possibilidade latente de reaproveitamento de cavidades de rocha dura oriundas do longo histórico minerário do país para a alocação de sistemas A-CAES isobáricos/hidrostáticos.



Bacia de Santos e Pré-Sal (Cavernas de Sal): O Brasil lidera a geologia salina offshore. Possibilidade de integrar CAES e hidrogênio azul diretamente nas plataformas escavando cavernas por dissolução, mitigando reinjeção excessiva de CO₂.



Bacia Sedimentar do Paraná: Uma das maiores bacias da América do Sul. Oferece propriedades petrofísicas ideais (porosidade e profundidade) para o armazenamento seguro e hermético de fluidos sob altíssima pressão.



T E C N O L O G I A

www.gt2.com.br