

Energia em movimento para uma rede mais resiliente

Edição completa 3.0 · PT

Este artigo completo reúne a publicação introdutória, a explicação técnica do gerador e os gráficos de comparação de tecnologias e custos. Explore o conceito, veja o vídeo de um minuto e depois examine os pressupostos e o plano de ensaios.

A máquina de ímanes permanentes proposta pode converter em eletricidade a potência mecânica externa fornecida ao veio. Com um acionamento bidirecional adequado e um rotor concebido para o efeito, também pode integrar um sistema de armazenamento por volante de inércia. São dois modos de funcionamento com fronteiras energéticas diferentes.

Como funciona o gerador, passo a passo

1. Vamos seguir a energia

Um motor ou uma turbina externa faz rodar um rotor com ímanes NdFeB. O campo magnético variável induz tensão nos enrolamentos fixos de cobre do estator, sobre um núcleo laminado de aço elétrico. Na lei de Faraday, λ é o fluxo concatenado com o enrolamento. A entrega de corrente produz um binário eletromagnético resistente. A velocidade constante, o acionamento externo fornece a saída elétrica útil e todas as perdas.

$$e = -d\lambda/dt \mid P_{\text{shaft}} = T_{\text{shaft}} \times \omega$$

T_{shaft} é o binário no veio em N·m; ω é a velocidade angular em rad/s. Os ímanes fornecem o campo; o acionamento fornece a energia.

2. Vamos controlar a eletricidade

A frequência da máquina depende dos pares de polos e da velocidade: p representa os pares de polos e n as rpm. Quatro polos a 1.500 rpm produzem 50 Hz antes da conversão eletrónica. Um retificador, ligação CC e inversor adaptam a eletricidade à carga. Carregar o volante exige um acionamento de motor bidirecional; um retificador passivo, por si só, não o pode acelerar eletricamente.

$$f = p \times n / 60$$

O conversor, os controlos e os requisitos de ligação devem ser concebidos para o serviço elétrico previsto.

Como funciona o gerador, passo a passo

3. Vamos armazenar energia no movimento

A carga acelera o rotor; a descarga abrandá-o. J é o momento de inércia e $\omega_{\max}$ e $\omega_{\min}$ definem o intervalo útil de velocidade. A fórmula representa a variação da energia de rotação armazenada. A energia elétrica entregue é menor após as perdas de conversão, espera e auxiliares.

$$E_{\text{usable}} = \frac{1}{2}J(\omega_{\max}^2 - \omega_{\min}^2)$$

Num ciclo elétrico completo com os mesmos estados energéticos internos iniciais e finais, $E_{\text{in}} = E_{\text{out}} + E_{\text{loss}}$. Incluir carga, espera, descarga e auxiliares uma única vez. A eficiência veio-CA do gerador e a eficiência CA-CA do armazenamento têm fronteiras diferentes.

4. Vamos avaliar o que o vácuo poupa

O vácuo reduz a resistência aerodinâmica, mas o bombeamento consome energia e a menor refrigeração por gás dificulta a remoção do calor. Escolher a pressão pelas perdas totais medidas do ciclo. Verificar temperatura e margem de desmagnetização, isolamento, tensões do rotor, retenção dos ímanes, equilibragem, velocidades críticas, proteção contra sobrevelocidade e contenção de fragmentos. Continuam a existir perdas no cobre, núcleo, rolamentos e conversores.

A comparação útil é o mesmo serviço entregue em ar e em vácuo, incluindo evacuação, espera, arrefecimento e todos os auxiliares.

5. Vamos medir antes de afirmar um benefício

Medir binário e velocidade do veio, potências elétricas ativas de entrada e saída, pressão, temperaturas e todos os auxiliares numa base temporal sincronizada. Integrar a energia na carga, espera e descarga; declarar calibração, incerteza e estados energéticos iniciais e finais. Publicar repetibilidade, perdas em espera, vida útil e manutenção.

O vídeo é uma animação conceptual, não uma demonstração de um protótipo operacional. A eficiência CA-CA suposta de 85% e os cenários de preço continuam a ser hipóteses por validar. O resultado deve superar a incerteza de medição e cumprir os requisitos definidos do serviço, mecânicos e térmicos.

Edição completa: 2 páginas de guia, o artigo ilustrado de 7 páginas e 4 gráficos de comparação. Mantêm-se os números de cada secção. Use os marcadores do PDF.

[Leia a edição web completa e veja o vídeo](#)

[Documento técnico original](#)

CIÊNCIA E ENGENHARIA · ARTIGO DE DIVULGAÇÃO CIENTÍFICA

Energia em movimento para uma rede mais resiliente

Giuseppe Carilli | 21 de outubro de 2026 | PT

Imagine uma roda pesada que funciona como uma reserva recarregável. A eletricidade faz com que rode mais depressa. Mais tarde, a roda abrandando e a mesma máquina devolve parte dessa energia como eletricidade. Poderia ajudar a compensar interrupções breves da produção solar ou alterações súbitas da procura.

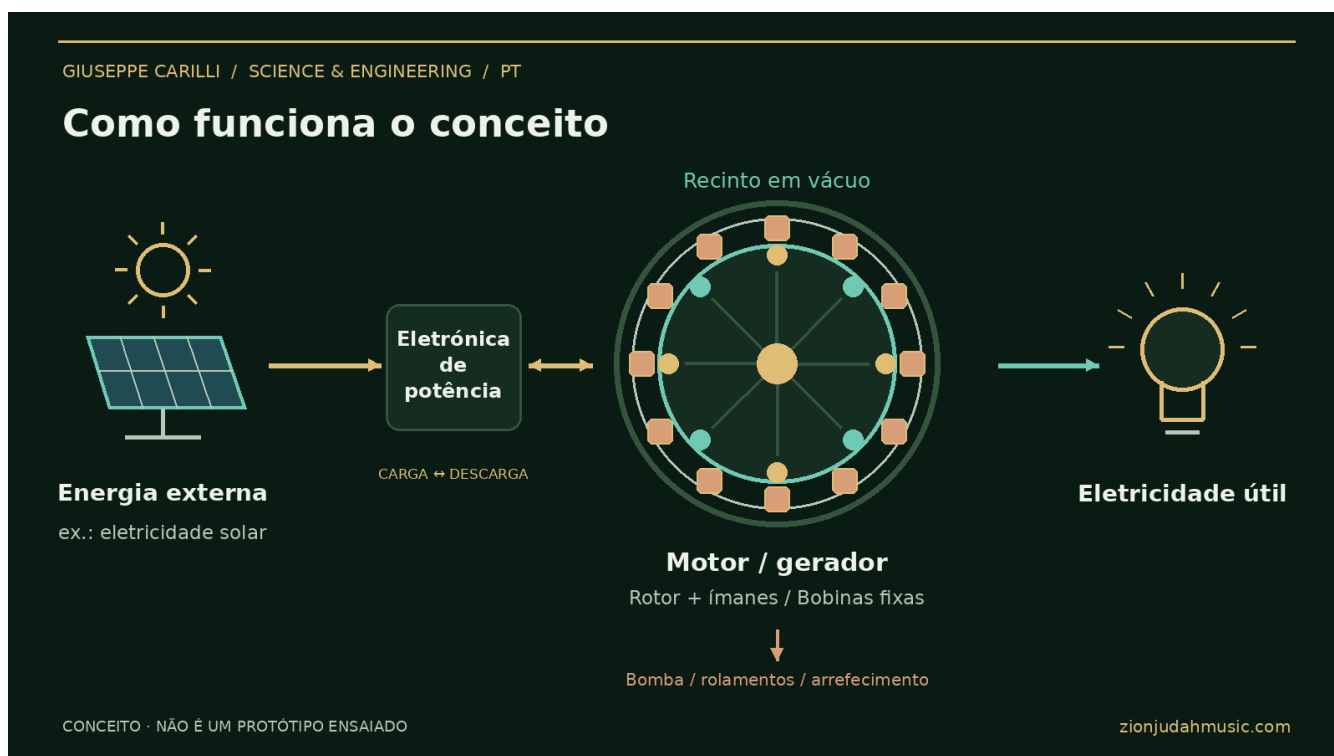
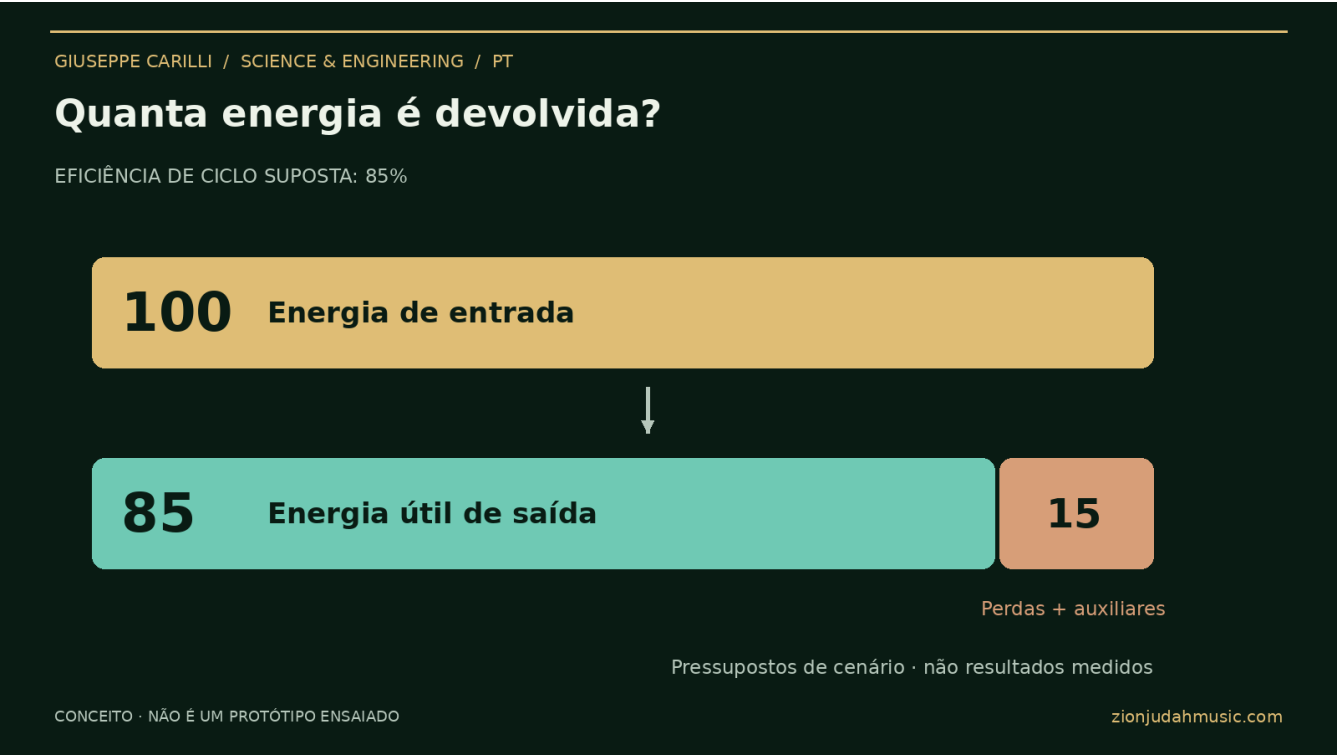


Ilustração conceptual, não um desenho de construção. No armazenamento, a entrada elétrica acelera o rotor e a descarga abrandando-o. Como gerador, um veio externo fornece energia mecânica. Os dois modos têm fronteiras de eficiência diferentes. [1]

A ideia num minuto

- A energia vem do exterior: por exemplo, de uma central solar ou de outra fonte mecânica.
- O rotor armazena energia no movimento. Os ímanes ajudam a convertê-la; não são um combustível.
- O vácuo pode reduzir a resistência do ar. Bomba, arrefecimento, rolamentos e controlos continuam a consumir energia.
- O objetivo é um armazenamento útil e acessível. O documento propõe um projeto e ensaios; o desempenho e o custo a longo prazo ainda têm de ser medidos.

Quanta energia é devolvida?



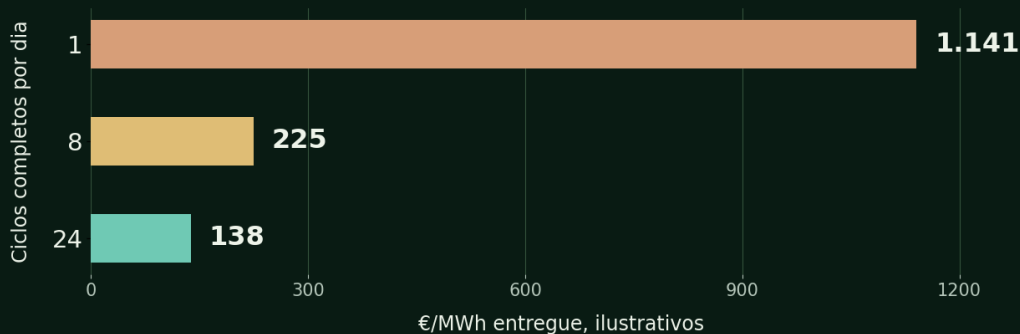
O uso frequente pode reduzir o custo?

Aqui não foi demonstrada uma fonte de eletricidade gratuita. A luz solar pode chegar sem comprar combustível, mas a captação, os equipamentos, as perdas de carga e a manutenção custam dinheiro. O benefício ambiental depende da eletricidade de carga e de todo o ciclo de vida. O exemplo económico é uma hipótese a testar, não uma promessa de preço.

GIUSEPPE CARILLI / SCIENCE & ENGINEERING / PT

O uso frequente pode reduzir o custo?

Pressupostos de cenário · não resultados medidos



1 MW · 0,25 MWh · 800.000 € · 20 anos · 7%
20.000 €/ano manutenção · 80 €/MWh carga · eficiência 85%

CONCEITO · NÃO É UM PROTÓTIPO ENSAIADO

zionjudahmusic.com

Custo ilustrativo por MWh entregue da mesma instalação hipotética com diferentes níveis de utilização. Resultados arredondados: 1.141, 225 e 138 €/MWh. Mais utilização distribui os custos fixos por mais eletricidade, mas exige tempo de carga, procura e vida útil verificada.

Cenário ilustrativo do trabalho

1 MW de saída; 0,25 MWh entregues por descarga completa (15 minutos); investimento instalado de 800.000 €; manutenção corrente de 20.000 €/ano; 20 anos; taxa de 7%; energia de carga a 80 €/MWh; eficiência CA-CA assumida de 85%, incluindo os auxiliares no perfil indicado. São hipóteses do modelo, não desempenho medido nem proposta comercial. [1]

Cálculo sem arredondamento intermédio: fator de recuperação do capital 0,0943929; custo fixo anual de 95.514,34 €. $Q = 0,25 \times 365 \times c$. Custo unitário indicativo = $95.514,34 \text{ €} / Q + 80 \text{ €} / 0,85$.

Dentro da máquina

A configuração de referência coloca os ímanes permanentes no rotor e os enrolamentos de cobre num estator fixo. Retificador, barramento de corrente contínua e inversor adaptam a saída à carga. O vácuo pode reduzir a resistência aerodinâmica, mas dificulta a remoção de calor, a vedação e a manutenção. A pressão ideal é a que melhora o sistema completo, em vez de ser apenas a mínima alcançável. [1, 3]

Elemento	Decisão de engenharia	Verificação necessária
Ímanes	NdFeB; ponderar SmCo ou ferrite quando adequado.	Temperatura, margem de desmagnetização e rastreabilidade.
Enrolamentos e núcleo	Cobre e chapas isoladas de aço elétrico.	Resistência a quente, isolamento e perdas na forma de onda real.
Rotor e câmara	Retenção qualificada, equilibragem e contenção de fragmentos.	Tensões, velocidades críticas, fadiga e resposta a falhas.
Apoios e vácuo	Rolamentos, vedantes, bomba e apoios de emergência quando necessários.	Consumo em espera, fugas e perda de controlo.
Arrefecimento e conversores	Percursos térmicos definidos e eletrónica protegida.	Pontos quentes, perdas de conversão e saída CA útil.

Um pequeno exemplo torna a escala visível

Um anel fino ideal de 10 kg e raio de 0,20 m tem $J = 0,40 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$. A 3.000 rpm contém cerca de 5,48 Wh, equivalentes a 19,7 segundos a 1 kW apenas se toda a energia cinética pudesse ser recuperada sem perdas. Uma máquina real mantém uma velocidade mínima de funcionamento, pelo que a energia disponível é inferior. Este exemplo é independente do cenário económico de rede da página seguinte. [1; cálculo revisto nesta edição]

$$E_{\text{rot}} = \frac{1}{2} J \omega^2 \quad E_{\text{usable}} = \frac{1}{2} J (\omega_{\text{max}}^2 - \omega_{\text{min}}^2)$$

J é o momento de inércia; ω é a velocidade angular em rad/s. A energia elétrica entregue é inferior após perdas de conversão, espera e auxiliares.

O custo de o utilizar

Um projeto de armazenamento deve pagar a energia que recebe e os equipamentos que a devolvem. As alternativas devem ser comparadas com a mesma potência, duração útil, resposta exigida, espera e utilização anual. A metodologia do DOE inclui carga e substituições. Fornece um quadro de análise, não um orçamento nem uma validação desta máquina. [4]

Ciclos completos/dia	MWh úteis/ano	Custo modelado €/MWh
1	91,25	1.141
8	730	225
24	2.190	138

Cálculo sem arredondamento intermédio: fator de recuperação do capital 0,0943929; custo fixo anual de 95.514,34 €. $Q = 0,25 \times 365 \times c$. Custo unitário indicativo = $95.514,34 \text{ €} / Q + 80 \text{ €} / 0,85$.

Com estas hipóteses, descer abaixo de 150 €/MWh exige cerca de 18,73 ciclos completos por dia. A 24 ciclos diários, o modelo implica 175.200 ciclos em 20 anos, antes das paragens. É necessário demonstrar essa utilização, vida útil e calendário de carga. Duplicar o capital para 1,6 milhões € eleva a estimativa a 24 ciclos para cerca de 172 €/MWh. Ligação à rede, impostos, reparações extraordinárias e fim de vida ficam fora deste caso simplificado. A eficiência deve ser novamente medida para cada perfil de espera.

Usar com cuidado as comparações de mercado

A IRENA indica custos médios globais ponderados de geração de novos projetos de 2025 de 33 USD/MWh para eólica terrestre e 44 USD/MWh para solar fotovoltaica, em dólares de 2025. Descrevem geração, não o custo da energia devolvida por este armazenamento. As estimativas EIA AEO2026 referem-se a recursos dos EUA que entram em serviço em 2031, segundo hipóteses políticas e financeiras definidas. Nenhum destes valores é uma tarifa local, preço garantido ou classificação única de serviços intercambiáveis. [5, 6]

No ciclo real de funcionamento, o vácuo poupa energia suficiente para justificar os equipamentos, o consumo e a manutenção?

Um resultado útil seria uma poupança líquida repetível face à mesma tarefa em ar, superior à incerteza de medição, com temperaturas, contenção mecânica e custo total aceitáveis. O próximo passo são medições independentes.

Que provas seriam convincentes?

O próximo passo credível é um demonstrador de laboratório confinado, avaliado por engenheiros qualificados antes de um piloto no terreno. O serviço e os critérios de aceitação devem ser definidos antes dos resultados. O trabalho fornecido apresenta uma avaliação de projeto e cenários; não inclui medições independentes de um protótipo que demonstrem poupanças líquidas ou viabilidade comercial. [1]

01 Definir o perímetro. Registrar todas as entradas elétricas e mecânicas, saída útil e auxiliares. Incluir baterias, barramento de corrente contínua e energia inicial do rotor.

02 Medir dados sincronizados. Registrar em conjunto potência ativa, binário, velocidade, pressão e temperaturas. Indicar calibração, amostragem, integração e incerteza.

03 Comparar ar e vácuo. Usar trajetórias equivalentes de carga e velocidade. Medir evacuação e espera; comparar uma máquina convencional na mesma tarefa útil.

04 Fechar o ciclo. Começar e terminar com igual velocidade e estado dos restantes acumuladores, ou corrigir explicitamente as variações. Integrar carga, espera e descarga.

05 Publicar uma decisão. Exigir um benefício líquido repetível, superior à incerteza, temperaturas e contenção aceitáveis e custo de ciclo de vida competitivo para o serviço definido.

Num ciclo com apenas trocas elétricas e estados internos equivalentes: $E_{in} = E_{out} + E_{perdas}$, contando os auxiliares uma única vez. Indicar eficiência CA-CA e perdas em espera. A eficiência do gerador entre o veio e a saída CA usa outro perímetro e deve ser identificada separadamente.

De um banco italiano a uma conversa mundial

Um piloto junto de uma carga industrial variável ou de uma central solar pode tornar o serviço mensurável. O PVGIS pode apoiar a avaliação do recurso solar quando pertinente; consumos medidos e requisitos locais de rede completam a análise. A ligação e o acesso aos mercados exigem verificações e autorizações atuais em cada jurisdição. [7]

A comparação ambiental deve incluir fabrico, origem dos ímanes, vida útil, reparações, contenção e eletricidade para carga e auxiliares. Um volante apresenta riscos de falha mecânica e perdas contínuas. Baterias, supercondensadores e outros armazenamentos devem ser comparados para o mesmo serviço. Mais geração renovável e armazenamento eficaz desempenham funções complementares.

Convido à análise crítica investigadores, engenheiros, estudantes e todas as pessoas interessadas numa energia resiliente. O contributo que pretendo dar é concreto: uma hipótese transparente, medições reproduzíveis e uma decisão que outros possam verificar. Conhecimento partilhado e respeito pela Mãe Terra caminham juntos.

Fontes, método e notas da edição

Fontes primárias selecionadas que apoiam este artigo. O trabalho original contém uma bibliografia mais ampla de 25 referências. Ligações verificadas em 21 de outubro de 2026. As fontes externas descrevem princípios estabelecidos ou outros projetos; não constituem aprovação desta máquina proposta.

[1] Giuseppe Carilli · [Electromagnetic machine with a vacuum enclosed rotor](#)

Author-supplied technical paper · 22 pages · IT / EN / ES

[2] U.S. Department of Energy · [Grid-Scale Flywheel Energy Storage Plant](#)

Project fact sheet · October 2012

[3] NASA · [7.0 Thermal Control](#)

Small Spacecraft Technology State of the Art · 2026

[4] U.S. Department of Energy · [2022 Grid Energy Storage Technology Cost and Performance Assessment](#)

Storage methodology and lifecycle cost boundaries · 2022

[5] IRENA · [Renewable Power Generation Costs in 2025: Executive Summary](#)

2026 · 2025 USD · pp. 6-7

[6] U.S. Energy Information Administration · [Levelized Costs of New Generation Resources in AEO2026](#)

April 2026 · 2031 online year · pp. 2-3, 6 and 8

[7] European Commission, Joint Research Centre · [Photovoltaic Geographical Information System \(PVGIS\)](#)

Site-specific solar-resource tools

O que esta edição esclarece

- Acrescenta a relação da energia utilizável entre velocidades máxima e mínima e separa o pequeno anel do cenário hipotético de 1 MW.
- Recalcula o exemplo financeiro, identifica custos excluídos e explicita a exigência de vida útil com muitos ciclos.
- Distingue tecnologia documentada, decisões de projeto, economia assumida e provas em falta. Não reivindica um novo princípio físico, protótipo validado, revisão por pares ou maturidade comercial.

Animação conceptual legendada. Mostra armazenamento e conversão, não um protótipo em funcionamento nem desempenho medido. Sem narração.

As equações e os cenários foram recalculados a partir dos dados declarados no trabalho. Não foi fornecido nem gerado um conjunto de dados experimentais para esta edição. Trata-se de um artigo editorial complementar, que não substitui o trabalho técnico original.

Giuseppe Carilli · [The Lion of Judah Music](#)

[LinkedIn](#) · [Giuseppe Carilli](#) | [zionjudahmusic.com](#)

Tecnologias diferentes, funções diferentes

Segue a fonte de energia antes de comparar um custo por MWh.

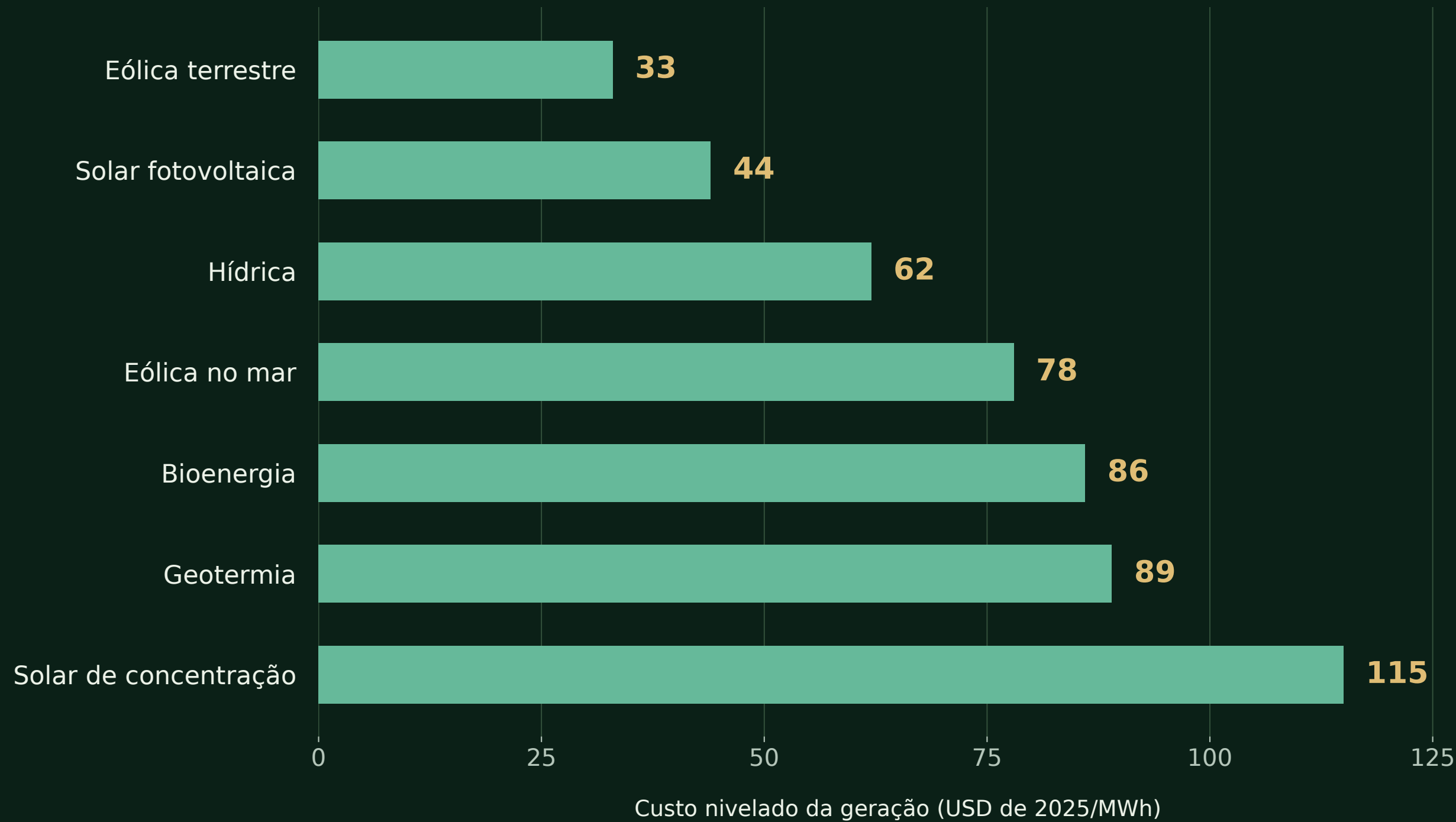
Tecnologia	Energia que entra no sistema	Função / limite principal
Solar fotovoltaica	Luz solar	Geração / luz variável
Eólica	Vento	Geração / vento variável
Hídrica	Água em movimento ou armazenada	Geração / local e recursos hídricos
Fissão nuclear	Combustível nuclear	Geração / combustível, calor e resíduos
Gerador de ímanes	Potência mecânica externa	Conversão / potência de entrada e perdas
Volante em vácuo	Eletricidade fornecida antes	Armazenamento / perdas e contenção
Bateria	Eletricidade fornecida antes	Armazenamento / desgaste e controlo térmico
Bombagem hídrica	Eletricidade fornecida antes	Armazenamento / locais e água adequados

Funções tecnológicas estabelecidas. A configuração proposta do rotor ainda exige validação.

Base: trabalho técnico do autor; avaliação DOE do armazenamento; EIA AEO2026.

Custos da geração renovável no mundo

Novas centrais à escala industrial em 2025 - LCOE global ponderado pela capacidade

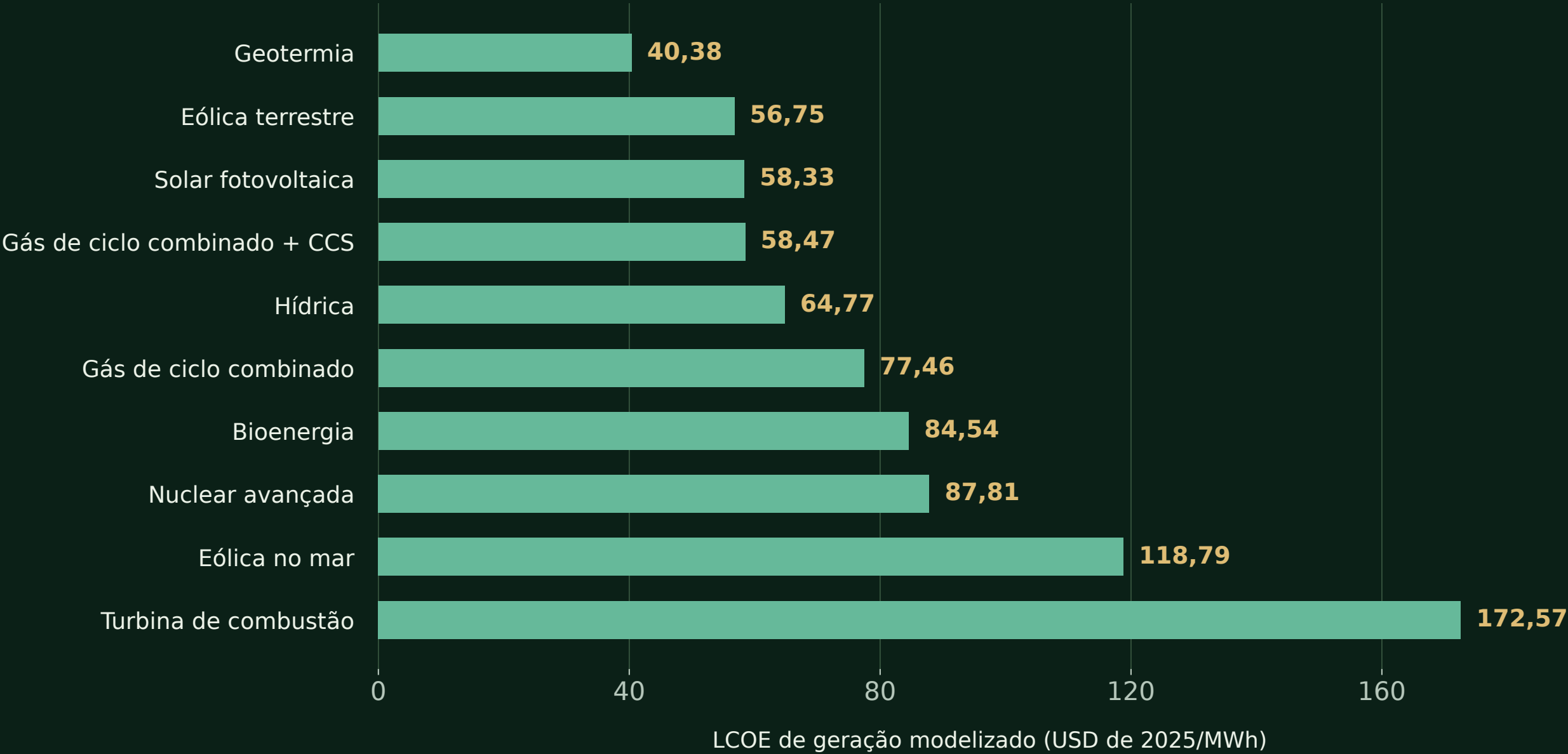


São custos de geração, não tarifas elétricas nem o custo de fornecimento garantido a toda a hora.

Fonte: IRENA, Renewable Power Generation Costs in 2025, resumo, pp. 3, 6-7.

Um cenário de geração nos EUA para 2031

EIA AEO2026 Counterfactual Baseline - médias regionais simples, créditos incluídos



Híbrido FV + bateria de quatro horas: LCOE 94,20 USD/MWh

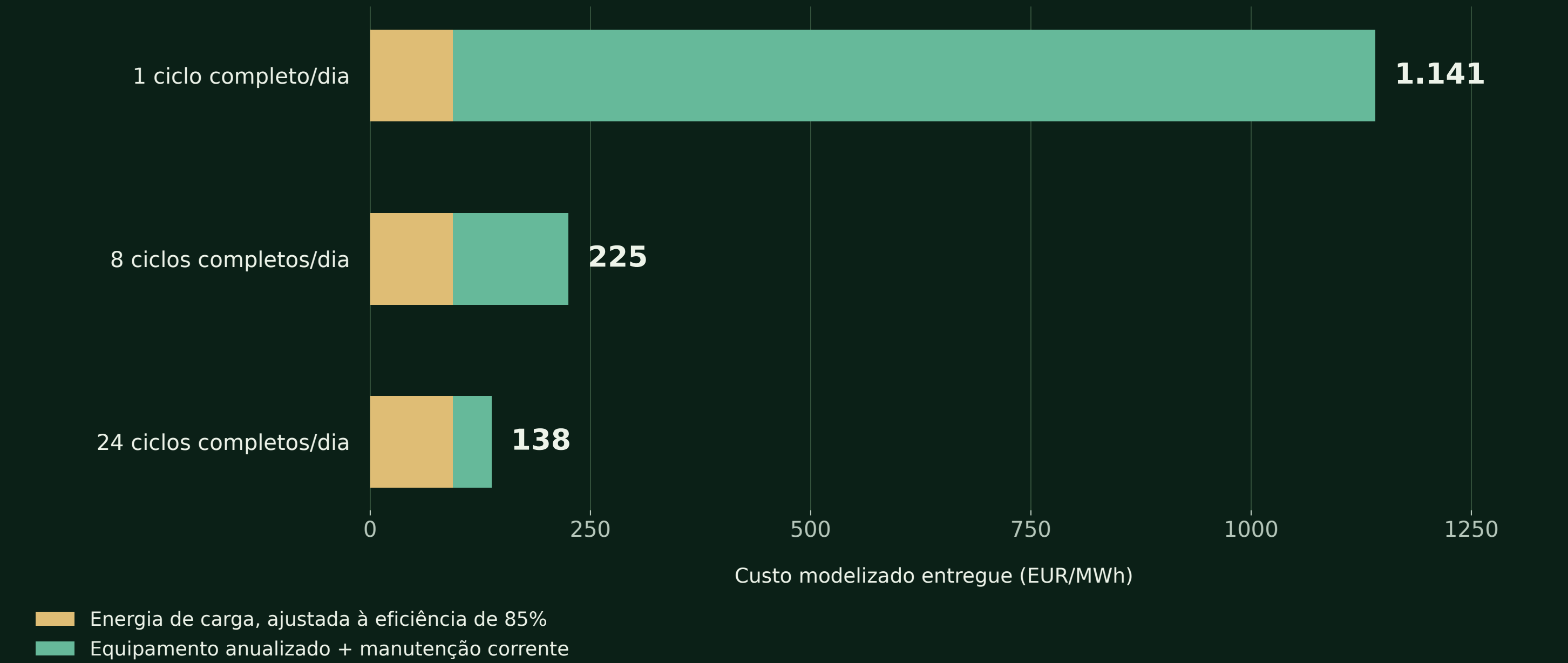
Bateria autónoma: LCOS 152,61 USD/MWh

Geração híbrida e armazenamento têm limites distintos. O LCOE, por si só, não mede o valor para a rede.

Fonte: EIA AEO2026, relatório de custos nivelados, p. 8. Políticas, local e uso influenciam o resultado.

Como o uso altera o custo do armazenamento

Mesmo sistema proposto de 1 MW / 0,25 MWh - pressupostos, não resultados medidos



A 24 ciclos/dia: 175.200 ciclos em 20 anos antes de paragens. Vida útil e calendário de carga exigem prova.

Cenário autor: capital 800k EUR; manutenção 20k EUR/ano; 20 anos; 7%; carga 80 EUR/MWh.