

Energia in movimento per una rete più resiliente

Edizione completa 3.0 · IT

Questo articolo completo riunisce il post introduttivo, la spiegazione tecnica del generatore e i grafici di confronto tra tecnologie e costi. Esplora il concetto, guarda il video di un minuto e poi esamina ipotesi e piano di prova.

La macchina a magneti permanenti proposta può convertire in elettricità la potenza meccanica fornita dall'esterno all'albero. Con un azionamento bidirezionale adeguato e un rotore progettato per lo scopo, può anche far parte di un accumulo a volano. Sono due modalità operative con perimetri energetici diversi.

Come funziona il generatore, passo dopo passo

1. Seguiamo l'energia

Un motore o una turbina esterna fa ruotare un rotore con magneti NdFeB. Il campo magnetico variabile induce tensione negli avvolgimenti fissi di rame dello statore, su un nucleo di lamierini di acciaio elettrico. Nella legge di Faraday, λ è il flusso concatenato con l'avvolgimento. L'erogazione di corrente produce una coppia elettromagnetica resistente. A velocità costante, l'azionamento esterno fornisce l'uscita elettrica utile e tutte le perdite.

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

T_{shaft} è la coppia all'albero in N·m; ω è la velocità angolare in rad/s. I magneti forniscono il campo; l'energia arriva dall'azionamento.

2. Controlliamo l'elettricità

La frequenza della macchina dipende dal numero di coppie polari e dalla velocità: p indica le coppie polari e n i giri/min. Quattro poli a 1.500 giri/min producono 50 Hz prima della conversione elettronica. Raddrizzatore, bus DC e inverter adattano l'energia generata al carico. La carica del volano richiede un azionamento motore bidirezionale; un solo raddrizzatore passivo non può accelerarlo elettricamente.

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

Convertitore, controlli e requisiti di connessione devono essere progettati per il servizio elettrico previsto.

Come funziona il generatore, passo dopo passo

3. Accumuliamo energia nel movimento

La carica accelera il rotore; la scarica lo rallenta. J è il momento d'inerzia, mentre $\omega_{\max}$ e $\omega_{\min}$ definiscono l'intervallo di velocità utile. La formula indica la variazione dell'energia di rotazione accumulata. L'energia elettrica consegnata è inferiore dopo le perdite di conversione, attesa e ausiliari.

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

Per un ciclo completo di accumulo elettrico con gli stessi stati energetici interni iniziali e finali, $E_{\text{in}} = E_{\text{out}} + E_{\text{loss}}$. Includere carica, attesa, scarica e ausiliari una sola volta. Il rendimento da albero a CA del generatore e quello CA-CA dell'accumulo hanno perimetri diversi.

4. Valutiamo il risparmio del vuoto

Il vuoto riduce la resistenza aerodinamica, ma il pompaggio consuma energia e il minore raffreddamento tramite gas complica lo smaltimento del calore. Scegliere la pressione in base alle perdite totali misurate sul ciclo. Verificare temperatura e margine alla smagnetizzazione, isolamento, tensioni del rotore, ritenzione dei magneti, equilibratura, velocità critiche, protezione dalla sovravelocità e contenimento dei frammenti. Restano le perdite di rame, nucleo, supporti e convertitori.

Il confronto utile riguarda lo stesso servizio erogato in aria e in vuoto, includendo evacuazione, attesa, raffreddamento e tutti gli ausiliari.

5. Misuriamo prima di dichiarare un beneficio

Misurare coppia e velocità dell'albero, potenze elettriche attive in ingresso e uscita, pressione, temperature e ogni ausiliario su una base temporale sincronizzata. Integrare l'energia durante carica, attesa e scarica; dichiarare taratura, incertezza e stati energetici iniziali e finali. Pubblicare ripetibilità, perdite in attesa, vita utile e manutenzione.

Il video è un'animazione concettuale, non la dimostrazione di un prototipo funzionante. Il rendimento CA-CA ipotizzato dell'85% e gli scenari di prezzo restano ipotesi da verificare. Il risultato deve superare l'incertezza di misura e rispettare i requisiti del servizio, meccanici e termici definiti.

Edizione completa: 2 pagine di guida, l'articolo illustrato di 7 pagine e 4 grafici di confronto. Si conservano i numeri delle singole sezioni. Usa i segnalibri del PDF.

[Leggi l'edizione web completa e guarda il video](#)

[Documento tecnico originale](#)

SCIENZA E INGEGNERIA · ARTICOLO DI DIVULGAZIONE SCIENTIFICA

Energia in movimento per una rete più resiliente

Giuseppe Carilli | 21 ottobre 2026 | IT

Immagina una ruota pesante che funziona come una riserva ricaricabile. L'elettricità la fa girare più velocemente. In seguito la ruota rallenta e la stessa macchina restituisce parte di quell'energia come elettricità. Potrebbe aiutare a compensare brevi interruzioni della produzione solare o improvvise variazioni della domanda.

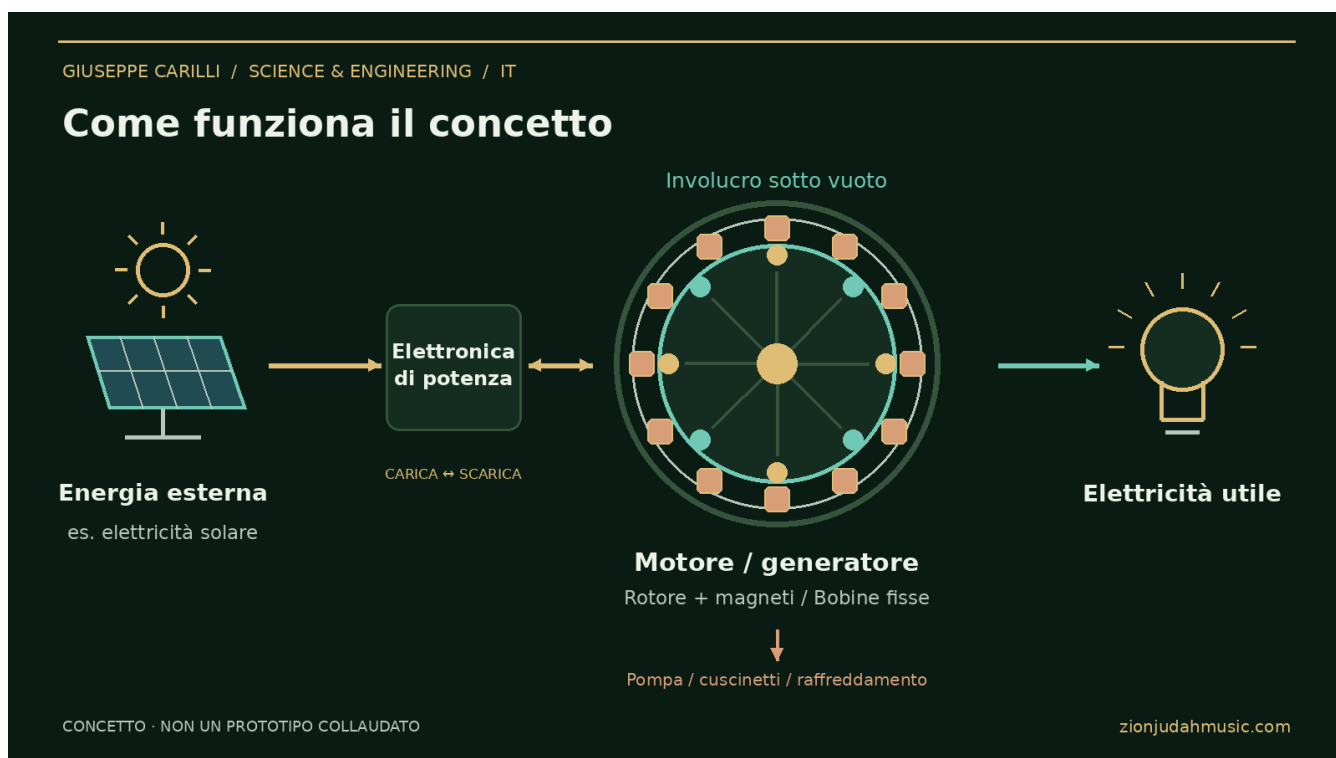
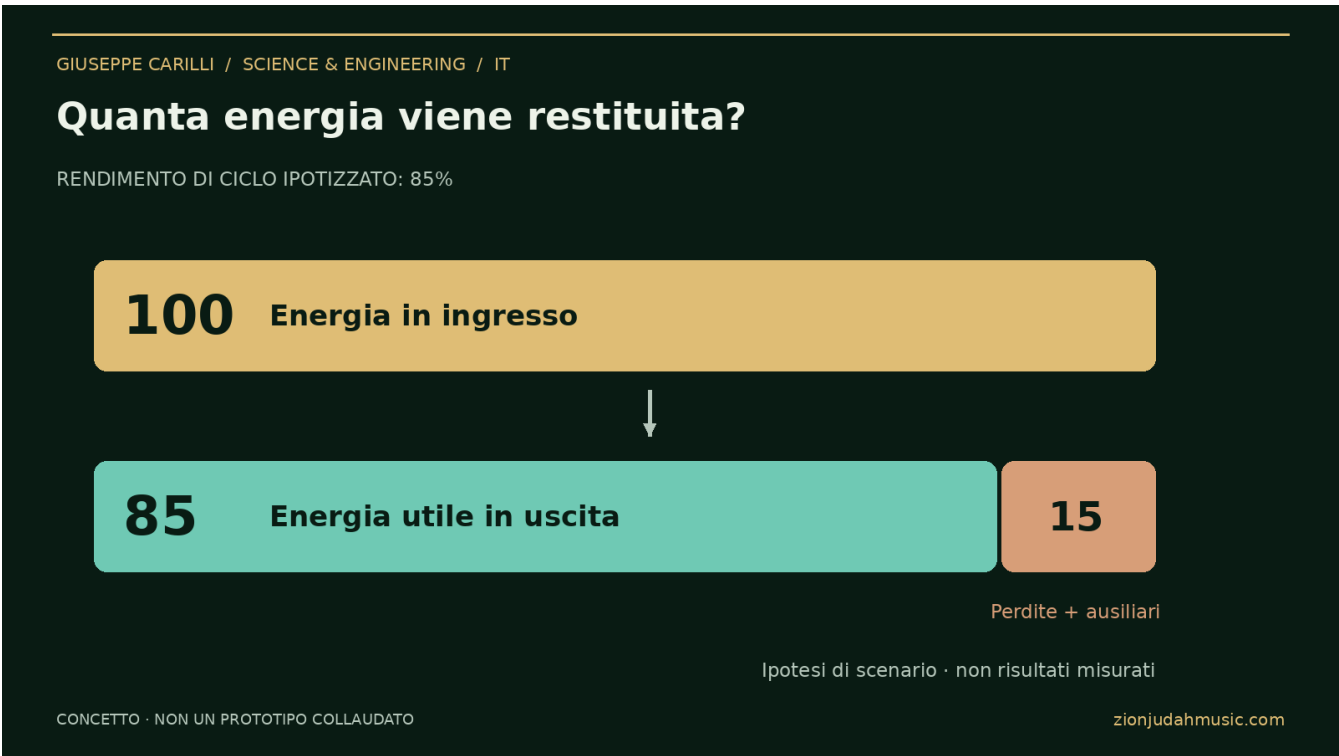


Illustrazione concettuale, non un disegno costruttivo. In accumulo, l'ingresso elettrico accelera il rotore; la scarica lo rallenta. In modalità generatore, un albero esterno fornisce energia meccanica. I due modi richiedono confini diversi per il rendimento. [1]

L'idea in un minuto

- L'energia arriva dall'esterno: per esempio da un impianto solare o da un'altra sorgente meccanica.
- Il rotore accumula energia nel movimento. I magneti aiutano a convertirla; non sono un combustibile.
- Il vuoto può ridurre l'attrito dell'aria. Pompa, raffreddamento, cuscinetti e controlli consumano comunque energia.
- L'obiettivo è un accumulo utile e conveniente. Il documento propone un progetto e delle prove; prestazioni e costo nel tempo devono ancora essere misurati.

Quanta energia viene restituita?



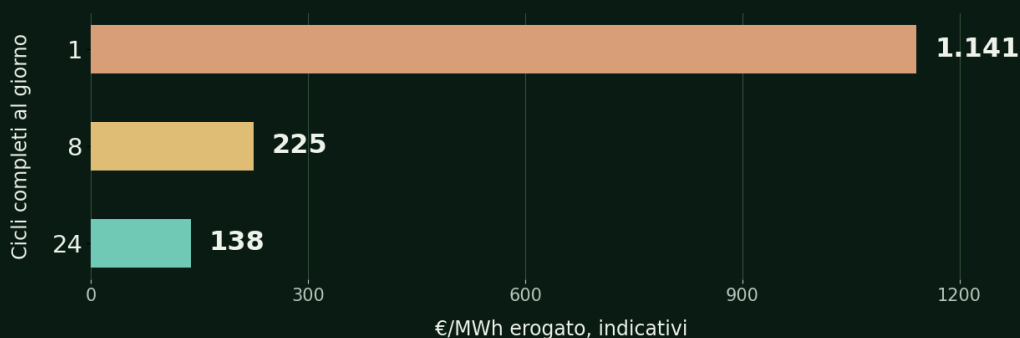
L'uso frequente può ridurre il costo?

Qui non è stata dimostrata una sorgente di elettricità gratuita. La luce solare può arrivare senza acquistare combustibile, ma raccolta, apparecchiature, perdite di ricarica e manutenzione hanno un costo. Il beneficio ambientale dipende dall'elettricità di ricarica e dall'intero ciclo di vita. L'esempio economico è un'ipotesi da verificare, non una promessa di prezzo.

GIUSEPPE CARILLI / SCIENCE & ENGINEERING / IT

L'uso frequente può ridurre il costo?

Ipotesi di scenario · non risultati misurati



$1 \text{ MW} \cdot 0,25 \text{ MWh} \cdot 800.000 \text{ €} \cdot 20 \text{ anni} \cdot 7\%$

$20.000 \text{ €/anno manutenzione} \cdot 80 \text{ €/MWh ricarica} \cdot \text{rendimento } 85\%$

CONCETTO · NON UN PROTOTIPO COLLAUDATO

zionjudahmusic.com

Costo indicativo per MWh erogato dello stesso impianto ipotetico a diversi livelli di utilizzo. Risultati arrotondati: 1.141, 225 e 138 €/MWh. Un uso maggiore ripartisce i costi fissi su più energia, ma richiede tempo per la ricarica, domanda e durata verificata.

Scenario illustrativo tratto dal lavoro

1 MW in uscita; 0,25 MWh consegnati per scarica completa (15 minuti); investimento installato di 800.000 €; manutenzione ordinaria di 20.000 €/anno; 20 anni; tasso del 7%; energia di ricarica a 80 €/MWh; rendimento AC-AC ipotizzato dell'85%, inclusi gli ausiliari per il profilo indicato. Sono ipotesi di calcolo, non prestazioni misurate né un'offerta commerciale. [1]

Calcolo con valori non arrotondati: fattore annuo del capitale 0,0943929; costo fisso annuo 95.514,34 €. $Q = 0,25 \times 365 \times c$. Costo unitario indicativo = $95.514,34 \text{ €} / Q + 80 \text{ €} / 0,85$.

Dentro la macchina

La configurazione di riferimento colloca i magneti permanenti sul rotore e gli avvolgimenti di rame su uno statore fisso. Raddrizzatore, bus DC e inverter adattano l'uscita al carico. Il vuoto può ridurre la resistenza aerodinamica, ma complica smaltimento del calore, tenute e manutenzione. La pressione ottimale è quella che migliora il sistema completo, anziché semplicemente la minima raggiungibile. [1, 3]

Elemento	Scelta ingegneristica	Verifica necessaria
Magneti	NdFeB; valutare SmCo o ferrite dove opportuno.	Temperatura, margine alla smagnetizzazione e tracciabilità.
Avvolgimenti e nucleo	Rame e lamierini isolati di acciaio elettrico.	Resistenza a caldo, isolamento e perdite sulla forma d'onda reale.
Rotore e involucro	Ritenzione qualificata, equilibratura e contenimento dei frammenti.	Tensioni, velocità critiche, fatica e risposta ai guasti.
Supporti e vuoto	Cuscinetti, tenute, pompa e supporti di emergenza ove necessari.	Consumi in attesa, infiltrazioni e perdita del controllo.
Raffreddamento e convertitori	Percorsi termici definiti ed elettronica protetta.	Punti caldi, perdite di conversione e uscita AC utilizzabile.

Un piccolo esempio rende visibile la scala

Un anello sottile ideale di 10 kg e raggio 0,20 m ha $J = 0,40 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$. A 3.000 giri/min contiene circa 5,48 Wh, equivalenti a 19,7 secondi a 1 kW soltanto se fosse recuperabile tutta l'energia cinetica senza perdite. Una macchina reale mantiene una velocità minima operativa: l'energia disponibile è quindi inferiore. Questo esempio è distinto dallo scenario economico di rete della pagina seguente. [1; ricalcolo in questa edizione]

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

J è il momento d'inerzia; ω è la velocità angolare in rad/s. L'energia elettrica consegnata è inferiore dopo perdite di conversione, attesa e ausiliari.

Il costo del suo utilizzo

Un impianto di accumulo deve sostenere il costo dell'energia ricevuta e delle apparecchiature che la restituiscono. Le alternative vanno confrontate a pari potenza, durata utile, risposta richiesta, attesa e utilizzo annuo. La metodologia DOE include ricarica e sostituzioni. Offre un quadro di analisi, non un preventivo né una validazione di questa macchina. [4]

Cicli completi/giorno	MWh utili/anno	Costo ipotizzato €/MWh
1	91,25	1.141
8	730	225
24	2.190	138

Calcolo con valori non arrotondati: fattore annuo del capitale 0,0943929; costo fisso annuo 95.514,34 €. $Q = 0,25 \times 365 \times c$. Costo unitario indicativo = $95.514,34 \text{ €} / Q + 80 \text{ €} / 0,85$.

Con queste ipotesi, scendere sotto 150 €/MWh richiede circa 18,73 cicli completi al giorno. A 24 cicli al giorno il modello implica 175.200 cicli in 20 anni, prima dei fermi. Utilizzo, vita utile e programma di ricarica devono essere dimostrati. Raddoppiando il capitale a 1,6 milioni €, la stima a 24 cicli sale a circa 172 €/MWh. Connessione, imposte, riparazioni straordinarie e fine vita restano esclusi da questo esempio semplificato. Il rendimento va rimisurato per ogni profilo di attesa.

Usare con attenzione i confronti di mercato

IRENA riporta, per nuovi impianti del 2025, costi medi globali ponderati di generazione di 33 USD/MWh per l'eolico terrestre e 44 USD/MWh per il fotovoltaico, in dollari 2025. Descrivono la generazione, non il costo dell'energia restituita da questo accumulo. Le stime EIA AEO2026 riguardano risorse statunitensi in servizio nel 2031, con ipotesi fiscali e finanziarie definite. Nessuno di questi valori è una tariffa locale, un prezzo garantito o una graduatoria unica di servizi intercambiabili. [5, 6]

Nel ciclo operativo reale, il vuoto fa risparmiare abbastanza energia da giustificare apparecchiature, consumi e manutenzione?

Un risultato utile sarebbe un risparmio netto ripetibile rispetto allo stesso compito in aria, superiore all'incertezza di misura, con temperature, contenimento meccanico e costo totale accettabili. Il passo successivo sono misure indipendenti.

Quali prove sarebbero convincenti?

Il prossimo passo credibile è un dimostratore di laboratorio confinato, valutato da progettisti qualificati prima di un pilota sul campo. Servizio e criteri decisionali vanno definiti prima dei risultati. Il lavoro fornito presenta una valutazione progettuale e scenari; non include misure indipendenti di un prototipo che provino risparmi netti o fattibilità commerciale. [1]

01 Definire il perimetro. Registrare tutti gli ingressi elettrici e meccanici, l'uscita utile e gli ausiliari. Includere batterie, bus DC ed energia iniziale del rotore.

02 Acquisire dati sincronizzati. Misurare insieme potenza attiva, coppia, giri, pressione e temperature. Dichiarare taratura, campionamento, integrazione e incertezza.

03 Confrontare aria e vuoto. Usare profili di carico e velocità equivalenti. Misurare evacuazione e attesa; confrontare una macchina convenzionale sullo stesso compito utile.

04 Chiudere il ciclo. Iniziare e terminare a pari velocità e stato degli altri accumuli, oppure correggere esplicitamente le variazioni. Integrare carica, attesa e scarica.

05 Pubblicare una decisione. Richiedere un beneficio netto ripetibile, superiore all'incertezza, temperature e contenimento accettabili e un costo di ciclo vita competitivo per il servizio definito.

Per un ciclo di accumulo con soli scambi elettrici e stati interni equivalenti: $E_{in} = E_{out} + E_{perdite}$, contando gli ausiliari una sola volta. Riportare rendimento AC-AC e perdite in attesa. Il rendimento da albero a uscita AC del generatore ha un perimetro diverso e va indicato separatamente.

Da un banco italiano a una discussione mondiale

Un pilota vicino a un carico industriale variabile o a un impianto solare può rendere misurabile il servizio. PVGIS può supportare la valutazione della risorsa solare dove pertinente; dati di carico misurati e requisiti locali di rete completano l'analisi. Connessione e accesso ai mercati richiedono verifiche e autorizzazioni aggiornate per la giurisdizione interessata. [7]

Il confronto ambientale deve includere produzione, approvvigionamento dei magneti, vita utile, riparazioni, contenimento ed elettricità per carica e ausiliari. Un volano presenta rischi di rottura meccanica e perdite continue. Batterie, supercondensatori e altri accumuli vanno confrontati sullo stesso servizio. Nuova generazione rinnovabile e accumulo efficace svolgono ruoli complementari.

Accolgo il confronto critico di ricercatori, ingegneri, studenti e di chiunque si interessi alla resilienza energetica. Il contributo che desidero offrire è concreto: un'ipotesi trasparente, misure riproducibili e una decisione verificabile. Conoscenza condivisa e rispetto per Madre Terra camminano insieme.

Fonti, metodo e note dell'edizione

Fonti primarie selezionate a sostegno dell'articolo. Il lavoro originale contiene una bibliografia più ampia di 25 voci. Link verificati il 21 ottobre 2026. Le fonti esterne descrivono principi consolidati o altri progetti; non costituiscono un'approvazione della macchina 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

Che cosa chiarisce questa edizione

- Aggiunge la relazione dell'energia utilizzabile tra velocità massima e minima e distingue il piccolo anello dallo scenario ipotetico da 1 MW.
- Ricalcola l'esempio finanziario, esplicita i costi esclusi e il requisito di vita utile con molti cicli.
- Distingue tecnologia documentata, scelte progettuali, ipotesi economiche e prove ancora necessarie. Non rivendica un nuovo principio fisico, un prototipo validato, revisione paritaria o maturità commerciale.

Animazione concettuale sottotitolata. Mostra accumulo e conversione, non un prototipo funzionante o prestazioni misurate. Senza voce narrante.

Equazioni e scenari sono stati ricalcolati dagli input dichiarati nel lavoro. Nessun insieme di dati sperimentali è stato fornito o generato per questa edizione. È un articolo di accompagnamento editoriale e non sostituisce il lavoro tecnico originale.

Giuseppe Carilli · [The Lion of Judah Music](#)
[LinkedIn](#) · [Giuseppe Carilli](#) | [zionjudahmusic.com](#)

Tecnologie diverse, funzioni diverse

Segui la fonte di energia prima di confrontare un costo per MWh.

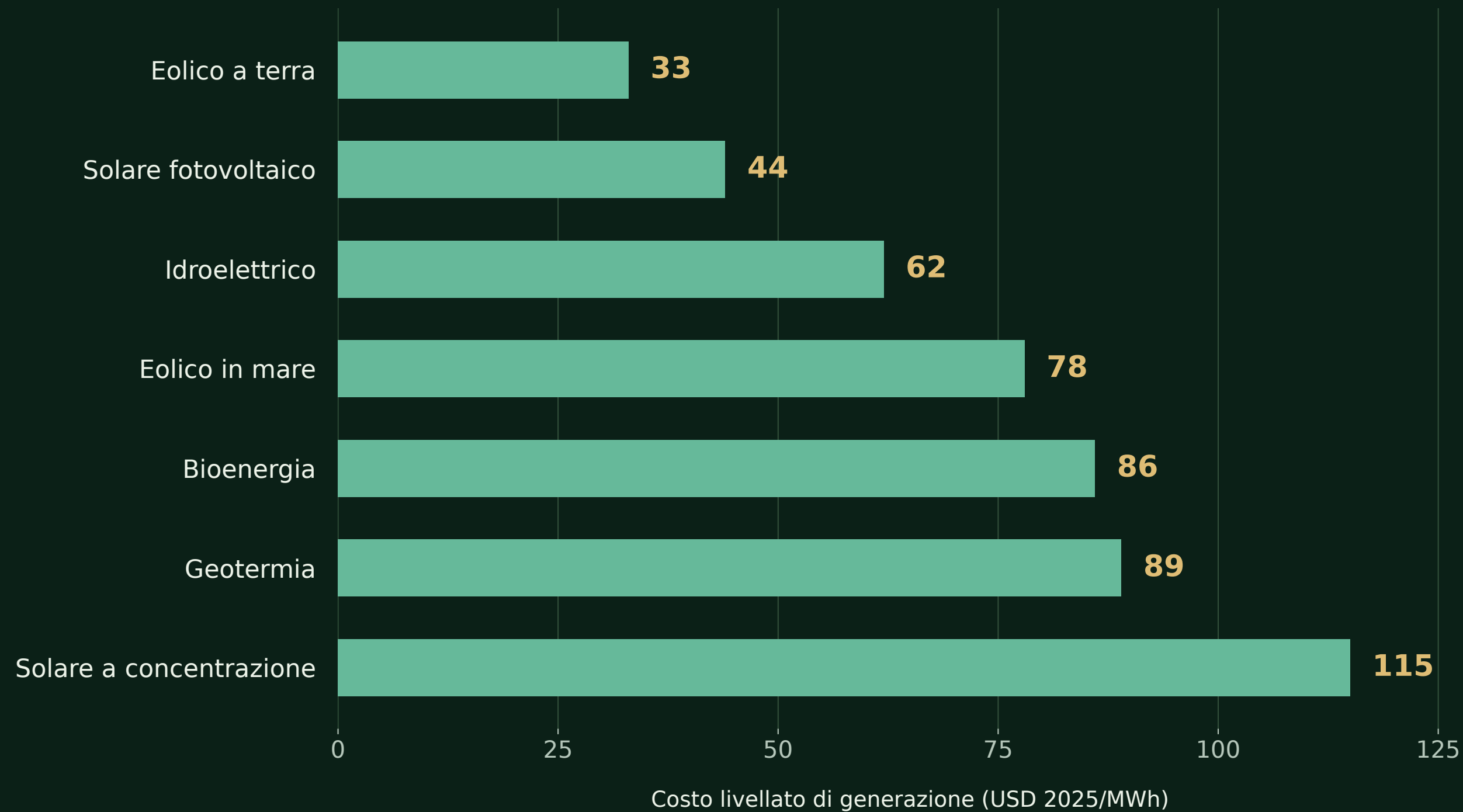
Tecnologia	Energia in ingresso	Funzione / limite principale
Solare fotovoltaico	Luce solare	Generazione / luce variabile
Eolico	Vento	Generazione / vento variabile
Idroelettrico	Acqua in moto o in bacino	Generazione / sito e risorse idriche
Fissione nucleare	Combustibile nucleare	Generazione / combustibile, calore e rifiuti
Generatore a magneti	Potenza meccanica esterna	Conversione / potenza in ingresso e perdite
Volano in vuoto	Elettricità fornita prima	Accumulo / perdite in attesa e contenimento
Batteria	Elettricità fornita prima	Accumulo / usura e gestione termica
Pompaggio idroelettrico	Elettricità fornita prima	Accumulo / siti adatti e acqua

Funzioni tecnologiche consolidate. La configurazione proposta del rotore richiede ancora prove.

Base: lavoro tecnico dell’autore; analisi DOE sull’accumulo; EIA AEO2026.

Costi della generazione rinnovabile nel mondo

Nuovi impianti su scala industriale nel 2025 - LCOE medio globale ponderato per capacità

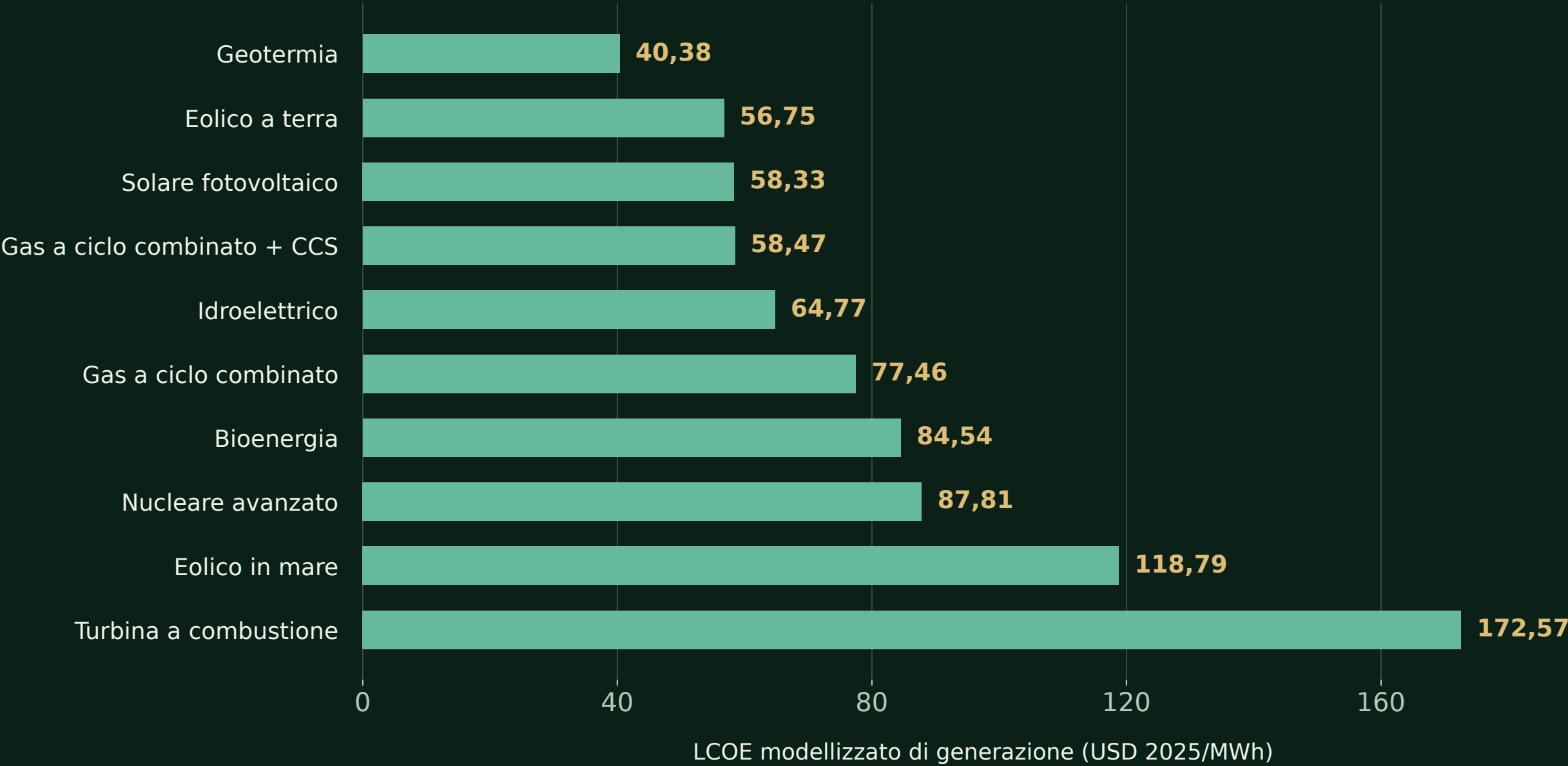


Costi di generazione: non sono tariffe elettriche né costi di fornitura garantita a ogni ora.

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

Uno scenario statunitense di generazione al 2031

EIA AEO2026 Counterfactual Baseline - medie regionali semplici, crediti inclusi



Ibrido FV + batteria da quattro ore: LCOE 94,20 USD/MWh

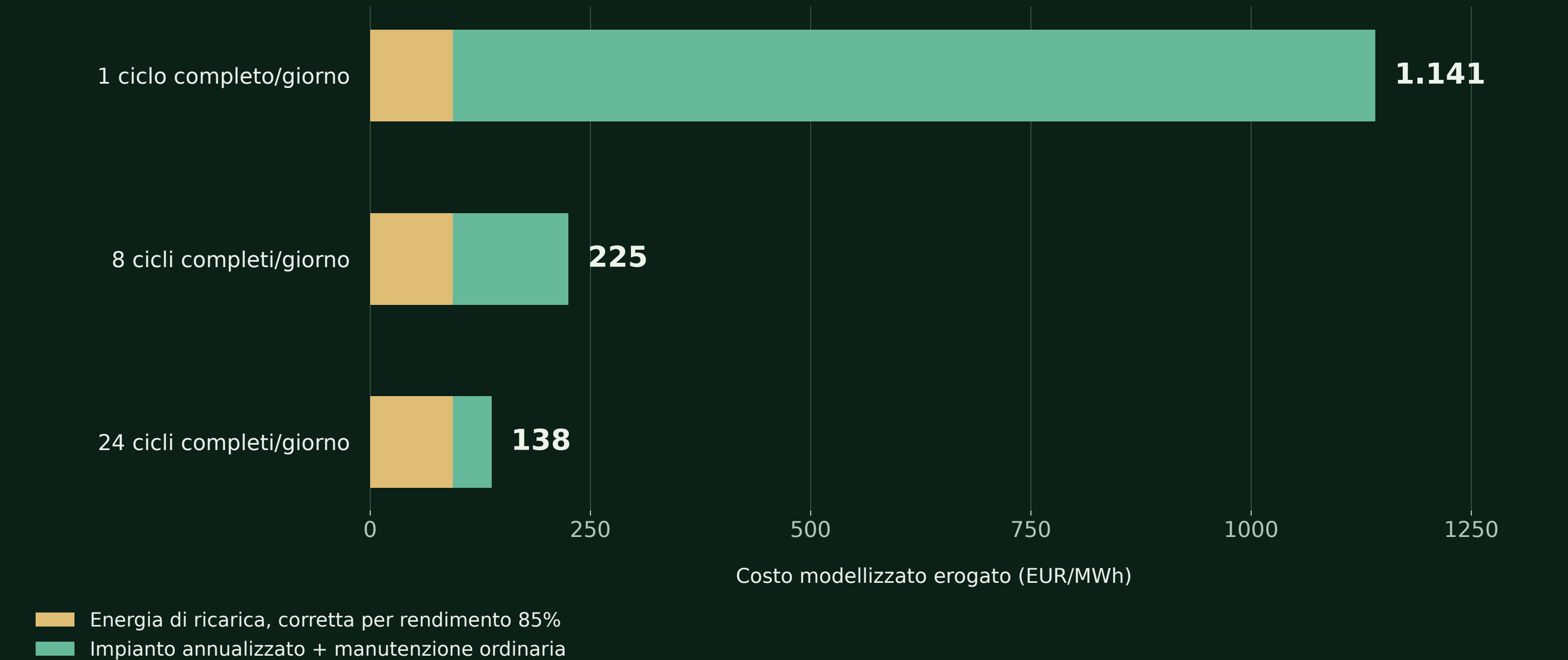
Batteria autonoma: LCOS 152,61 USD/MWh

Generazione ibrida e accumulo hanno confini diversi. Il solo LCOE non misura il valore per la rete.

Fonte: EIA AEO2026, rapporto sui costi livellati, p. 8. Politiche, luogo e utilizzo incidono.

Come l'utilizzo cambia il costo dell'accumulo

Stesso sistema proposto da 1 MW / 0,25 MWh - ipotesi, non prestazioni misurate



A 24 cicli/giorno: 175.200 cicli in 20 anni prima dei fermi. Durata e calendario di carica vanno dimostrati.

Scenario autore: capitale 800k EUR; manutenzione 20k EUR/anno; 20 anni; 7%; ricarica 80 EUR/MWh.