

Energía en movimiento para una red más resiliente

Edición completa 3.0 · ES

Este artículo completo reúne el post introductorio, la explicación técnica del generador y los gráficos de comparación de tecnologías y costes. Explora el concepto, mira el vídeo de un minuto y después examina los supuestos y el plan de pruebas.

La máquina de imanes permanentes propuesta puede convertir en electricidad la potencia mecánica externa suministrada al eje. Con un accionamiento bidireccional adecuado y un rotor diseñado para ello, también puede formar parte de un sistema de almacenamiento con volante de inercia. Son dos modos de funcionamiento con límites energéticos diferentes.

Cómo funciona el generador, paso a paso

1. Sigamos la energía

Un motor o una turbina externa hace girar un rotor con imanes NdFeB. El campo magnético variable induce tensión en los devanados fijos de cobre del estator, sobre un núcleo laminado de acero eléctrico. En la ley de Faraday, λ es el flujo concatenado con el devanado. Al entregar corriente aparece un par electromagnético resistente. A velocidad constante, el accionamiento externo aporta la salida eléctrica útil y todas las pérdidas.

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

T_{shaft} es el par del eje en N·m; ω es la velocidad angular en rad/s. Los imanes aportan el campo; el accionamiento aporta la energía.

2. Controlemos la electricidad

La frecuencia de la máquina depende de los pares de polos y la velocidad: p son los pares de polos y n las rpm. Cuatro polos a 1.500 rpm producen 50 Hz antes de la conversión electrónica. Un rectificador, enlace de CC e inversor adaptan la electricidad al consumo. Cargar el volante requiere un accionamiento de motor bidireccional; un rectificador pasivo por sí solo no puede acelerarlo eléctricamente.

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

El convertidor, los controles y los requisitos de conexión deben diseñarse para el servicio eléctrico previsto.

Cómo funciona el generador, paso a paso

3. Almacenemos energía en movimiento

La carga acelera el rotor; la descarga lo ralentiza. J es el momento de inercia y $\omega_{\max}$ y $\omega_{\min}$ delimitan el intervalo de velocidad útil. La fórmula expresa el cambio de energía de rotación almacenada. La energía eléctrica entregada es menor tras las pérdidas de conversión, espera y auxiliares.

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

Para un ciclo eléctrico completo con iguales estados energéticos internos iniciales y finales, $E_{\text{in}} = E_{\text{out}} + E_{\text{loss}}$. Incluir una sola vez carga, espera, descarga y auxiliares. La eficiencia eje-CA del generador y la eficiencia CA-CA del almacenamiento tienen límites distintos.

4. Evaluemos qué ahorra el vacío

El vacío reduce la resistencia aerodinámica, pero el bombeo consume energía y la menor refrigeración por gas dificulta evacuar calor. Elegir la presión según las pérdidas totales medidas del ciclo. Verificar temperatura y margen de desmagnetización, aislamiento, tensiones del rotor, retención de imanes, equilibrado, velocidades críticas, protección contra sobrevelocidad y contención de fragmentos. Persisten las pérdidas de cobre, núcleo, cojinetes y convertidores.

La comparación útil es el mismo servicio entregado en aire y en vacío, incluyendo evacuación, espera, refrigeración y todos los auxiliares.

5. Midamos antes de afirmar un beneficio

Medir par y velocidad del eje, potencias eléctricas activas de entrada y salida, presión, temperaturas y cada auxiliar con una base temporal sincronizada. Integrar la energía durante carga, espera y descarga; declarar calibración, incertidumbre y estados energéticos iniciales y finales. Publicar repetibilidad, pérdidas en espera, vida útil y mantenimiento.

El vídeo es una animación conceptual, no una demostración de un prototipo operativo. La eficiencia CA-CA supuesta del 85% y los escenarios de precio siguen siendo hipótesis que validar. El resultado debe superar la incertidumbre de medida y cumplir los requisitos definidos del servicio, mecánicos y térmicos.

Edición completa: 2 páginas de guía, el artículo ilustrado de 7 páginas y 4 gráficos comparativos. Se conservan los números de cada sección. Usa los marcadores del PDF.

[Lee la edición web completa y mira el vídeo](#)

[Documento técnico original](#)

CIENCIA E INGENIERÍA · ARTÍCULO DE DIVULGACIÓN CIENTÍFICA

Energía en movimiento para una red más resiliente

Giuseppe Carilli | 21 de octubre de 2026 | ES

Imagina una rueda pesada que funciona como una reserva recargable. La electricidad hace que gire más deprisa. Después, la rueda se ralentiza y la misma máquina devuelve parte de esa energía como electricidad. Podría ayudar a compensar interrupciones breves de la generación solar o cambios repentinos de la demanda.

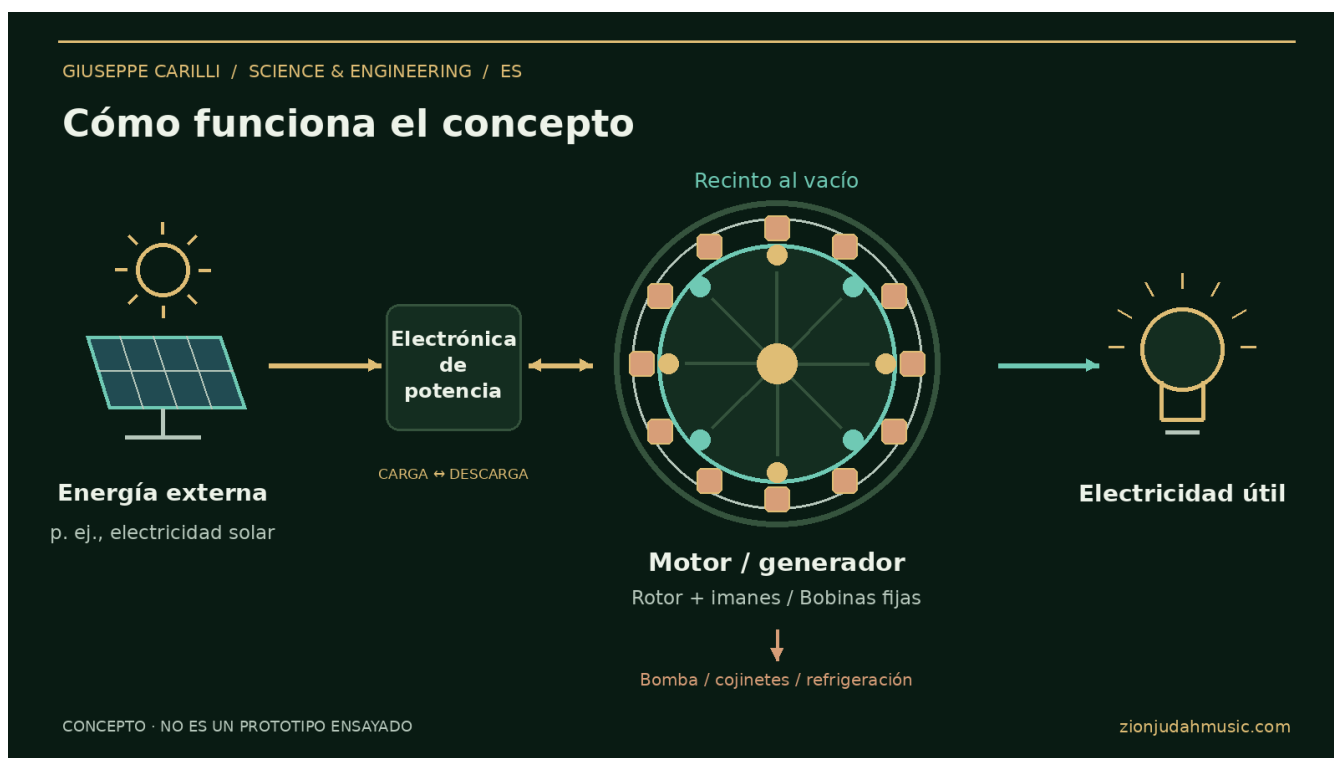
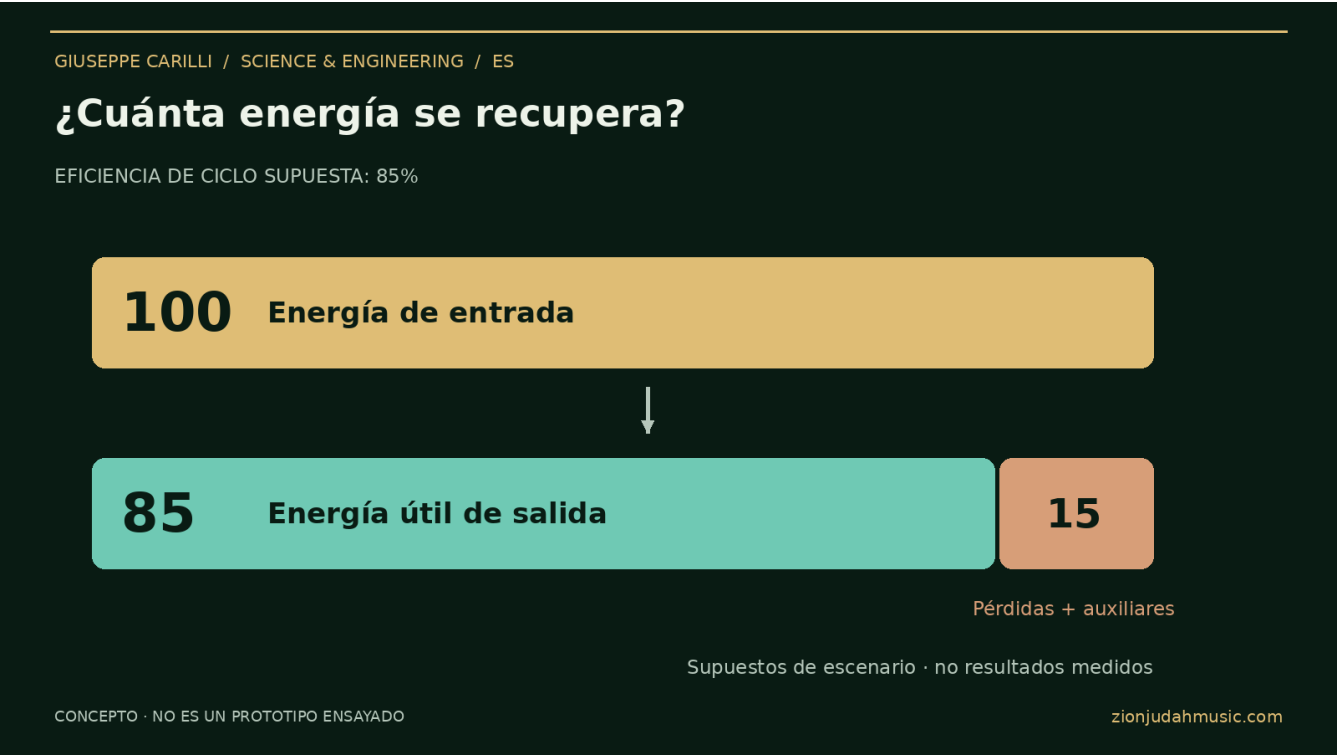


Ilustración conceptual, no un plano de construcción. En almacenamiento, la entrada eléctrica acelera el rotor y la descarga lo ralentiza. Como generador, un eje externo aporta energía mecánica. Ambos modos tienen límites de eficiencia diferentes. [1]

La idea en un minuto

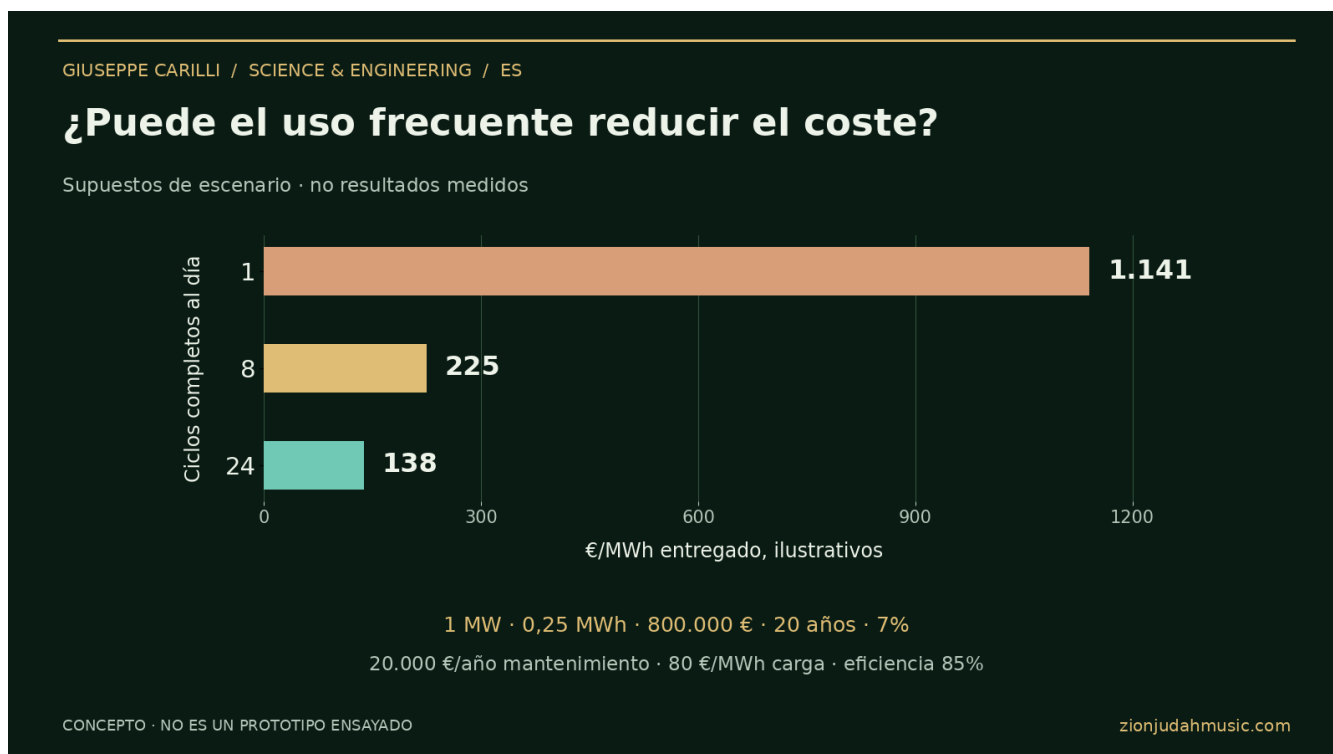
- La energía llega del exterior: por ejemplo, de una planta solar o de otra fuente mecánica.
- El rotor almacena energía en el movimiento. Los imanes ayudan a convertirla; no son un combustible.
- El vacío puede reducir el rozamiento con el aire. Bomba, refrigeración, cojinetes y controles siguen consumiendo energía.
- El objetivo es un almacenamiento útil y asequible. El documento propone un diseño y pruebas; el rendimiento y el coste a largo plazo aún deben medirse.

¿Cuánta energía se recupera?



¿Puede el uso frecuente reducir el coste?

Aquí no se ha demostrado una fuente de electricidad gratuita. La luz solar puede llegar sin comprar combustible, pero la captación, los equipos, las pérdidas de carga y el mantenimiento cuestan dinero. El beneficio ambiental depende de la electricidad de carga y de todo el ciclo de vida. El ejemplo de costes es una hipótesis que probar, no una promesa de precio.



Coste ilustrativo por MWh entregado de la misma planta hipotética con distintos niveles de uso. Resultados redondeados: 1.141, 225 y 138 €/MWh. Más uso reparte los costes fijos entre más electricidad, pero exige tiempo de carga, demanda y una vida útil verificada.

Escenario ilustrativo del trabajo

1 MW de salida; 0,25 MWh entregados por descarga completa (15 minutos); inversión instalada de 800.000 €; mantenimiento ordinario de 20.000 €/año; 20 años; tasa del 7%; energía de carga a 80 €/MWh; eficiencia CA-CA supuesta del 85%, incluidos los auxiliares para el perfil indicado. Son hipótesis del modelo, no prestaciones medidas ni una oferta comercial. [1]

Cálculo sin redondeo intermedio: factor de recuperación del capital 0,0943929; coste fijo anual 95.514,34 €. $Q = 0,25 \times 365 \times c$. Coste unitario indicativo = $95.514,34 \text{ €} / Q + 80 \text{ €} / 0,85$.

Dentro de la máquina

La configuración de referencia sitúa los imanes permanentes en el rotor y los devanados de cobre en un estator fijo. Rectificador, bus de continua e inversor adaptan la salida a la carga. El vacío puede reducir la resistencia aerodinámica, pero complica la evacuación del calor, el sellado y el mantenimiento. La presión óptima mejora el sistema completo, en lugar de ser simplemente la mínima alcanzable. [1, 3]

Elemento	Decisión de ingeniería	Verificación necesaria
Imanes	NdFeB; valorar SmCo o ferrita cuando proceda.	Temperatura, margen frente a desmagnetización y trazabilidad.
Devanados y núcleo	Cobre y chapas aisladas de acero eléctrico.	Resistencia en caliente, aislamiento y pérdidas según la onda real.
Rotor y envolvente	Retención cualificada, equilibrado y contención de fragmentos.	Tensiones, velocidades críticas, fatiga y respuesta a fallos.
Cojinetes y vacío	Cojinetes, sellos, bomba y apoyos de emergencia cuando sean necesarios.	Consumo en espera, fugas y pérdida de control.
Refrigeración y convertidores	Vías térmicas definidas y electrónica protegida.	Puntos calientes, pérdidas de conversión y salida CA útil.

Un pequeño ejemplo muestra la escala

Un anillo delgado ideal de 10 kg y 0,20 m de radio tiene $J = 0,40 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$. A 3.000 rpm contiene unos 5,48 Wh, equivalentes a 19,7 segundos a 1 kW solo si pudiera recuperarse toda la energía cinética sin pérdidas. Una máquina real conserva una velocidad mínima de funcionamiento, por lo que la energía disponible es menor. Este ejemplo es independiente del escenario económico de red de la página siguiente. [1; cálculo revisado aquí]

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

J es el momento de inercia; ω es la velocidad angular en rad/s. La energía eléctrica entregada es menor tras las pérdidas de conversión, espera y auxiliares.

El coste de utilizarlo

Un proyecto de almacenamiento debe pagar la energía que recibe y los equipos que la devuelven. Hay que comparar alternativas con la misma potencia, duración útil, respuesta exigida, espera y uso anual. La metodología del DOE incluye carga y sustituciones. Proporciona un marco de análisis, no un presupuesto ni una validación de esta máquina. [4]

Ciclos completos/día	MWh útiles/año	Coste modelado €/MWh
1	91,25	1.141
8	730	225
24	2.190	138

Cálculo sin redondeo intermedio: factor de recuperación del capital 0,0943929; coste fijo anual 95.514,34 €. $Q = 0,25 \times 365 \times c$. Coste unitario indicativo = $95.514,34 \text{ €} / Q + 80 \text{ €} / 0,85$.

Con estas hipótesis, bajar de 150 €/MWh exige unos 18,73 ciclos completos al día. A 24 ciclos diarios, el modelo implica 175.200 ciclos en 20 años, antes de las paradas. Hay que demostrar ese uso, vida útil y programa de carga. Duplicar el capital hasta 1,6 millones € eleva la estimación a 24 ciclos a unos 172 €/MWh. Conexión, impuestos, reparaciones extraordinarias y fin de vida quedan fuera de este caso simplificado. La eficiencia debe medirse de nuevo para cada perfil de espera.

Usar con cuidado las comparaciones de mercado

IRENA sitúa los costes medios globales ponderados de generación de nuevos proyectos de 2025 en 33 USD/MWh para eólica terrestre y 44 USD/MWh para solar fotovoltaica, en dólares de 2025. Describen generación, no el coste de la energía devuelta por este almacenamiento. Las estimaciones EIA AEO2026 corresponden a recursos estadounidenses que entrarían en servicio en 2031, bajo hipótesis políticas y financieras definidas. Ninguno es una tarifa local, un precio garantizado o una clasificación única de servicios intercambiables. [5, 6]

En el ciclo real de funcionamiento, ¿ahorra el vacío suficiente energía para justificar sus equipos, consumo y mantenimiento?

Un resultado útil sería un ahorro neto repetible frente a la misma tarea en aire, superior a la incertidumbre de medida, con temperaturas, contención mecánica y coste total aceptables. El siguiente paso son mediciones independientes.

¿Qué pruebas serían convincentes?

El siguiente paso creíble es un demostrador de laboratorio confinado, evaluado por ingenieros cualificados antes de un piloto de campo. El servicio y los criterios de aceptación deben fijarse antes de los resultados. El trabajo facilitado presenta una evaluación de diseño y escenarios; no aporta mediciones independientes de un prototipo que demuestren ahorro neto o viabilidad comercial. [1]

01 Definir el perímetro. Registrar todas las entradas eléctricas y mecánicas, salida útil y auxiliares. Incluir baterías, bus de continua y energía inicial del rotor.

02 Medir datos sincronizados. Registrar conjuntamente potencia activa, par, velocidad, presión y temperaturas. Indicar calibración, muestreo, integración e incertidumbre.

03 Comparar aire y vacío. Usar trayectorias equivalentes de carga y velocidad. Medir evacuación y espera; comparar una máquina convencional en la misma tarea útil.

04 Cerrar el ciclo. Empezar y terminar con la misma velocidad y estado de los demás almacenamientos, o corregir explícitamente sus variaciones. Integrar carga, espera y descarga.

05 Publicar una decisión. Exigir un beneficio neto repetible, mayor que la incertidumbre, temperaturas y contención aceptables y un coste de ciclo de vida competitivo para el servicio definido.

Para un ciclo con solo intercambios eléctricos y estados internos equivalentes: $E_{in} = E_{out} + E_{pérdidas}$, contando los auxiliares una sola vez. Informar de eficiencia CA-CA y pérdidas en espera. La eficiencia del generador desde el eje hasta la salida CA tiene otro perímetro y debe identificarse por separado.

De un banco italiano a una conversación mundial

Un piloto junto a una carga industrial variable o una planta solar puede hacer medible el servicio. PVGIS puede apoyar la evaluación del recurso solar donde proceda; los consumos medidos y los requisitos locales de red completan el análisis. La conexión y el acceso a mercados requieren verificaciones y autorizaciones vigentes en cada jurisdicción. [7]

La comparación ambiental debe incluir fabricación, origen de los imanes, vida útil, reparaciones, contención y electricidad para carga y auxiliares. Un volante presenta riesgos de fallo mecánico y pérdidas continuas. Baterías, supercondensadores y otros almacenamientos deben compararse sobre el mismo servicio. Más generación renovable y almacenamiento eficaz cumplen funciones complementarias.

Invito a la revisión crítica de investigadores, ingenieros, estudiantes y de cualquier persona interesada en una energía resiliente. Mi contribución busca ser concreta: una hipótesis transparente, mediciones reproducibles y una decisión que otras personas puedan comprobar. Conocimiento compartido y respeto por la Madre Tierra van de la mano.

Fuentes, método y notas de edición

Fuentes primarias seleccionadas que respaldan este artículo. El trabajo original incluye una bibliografía más amplia de 25 referencias. Enlaces comprobados el 21 de octubre de 2026. Las fuentes externas describen principios consolidados u otros proyectos; no avalan esta máquina propuesta.

[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

Qué aclara esta edición

- Añade la relación de energía utilizable entre velocidades máxima y mínima y separa el pequeño anillo del escenario hipotético de 1 MW.
- Recalcula el ejemplo financiero, identifica costes excluidos y explicita la exigencia de vida útil con muchos ciclos.
- Distingue tecnología documentada, decisiones de diseño, economía supuesta y pruebas pendientes. No reivindica un nuevo principio físico, prototipo validado, revisión por pares ni madurez comercial. Animación conceptual subtitulada. Muestra almacenamiento y conversión, no un prototipo en funcionamiento ni resultados medidos. Sin narración.

Las ecuaciones y los escenarios se recalcularon a partir de los datos declarados en el trabajo. No se facilitó ni generó un conjunto de datos experimentales para esta edición. Es un artículo editorial complementario y no sustituye al trabajo técnico original.

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

Tecnologías distintas, funciones distintas

Sigue la fuente de energía antes de comparar un coste por MWh.

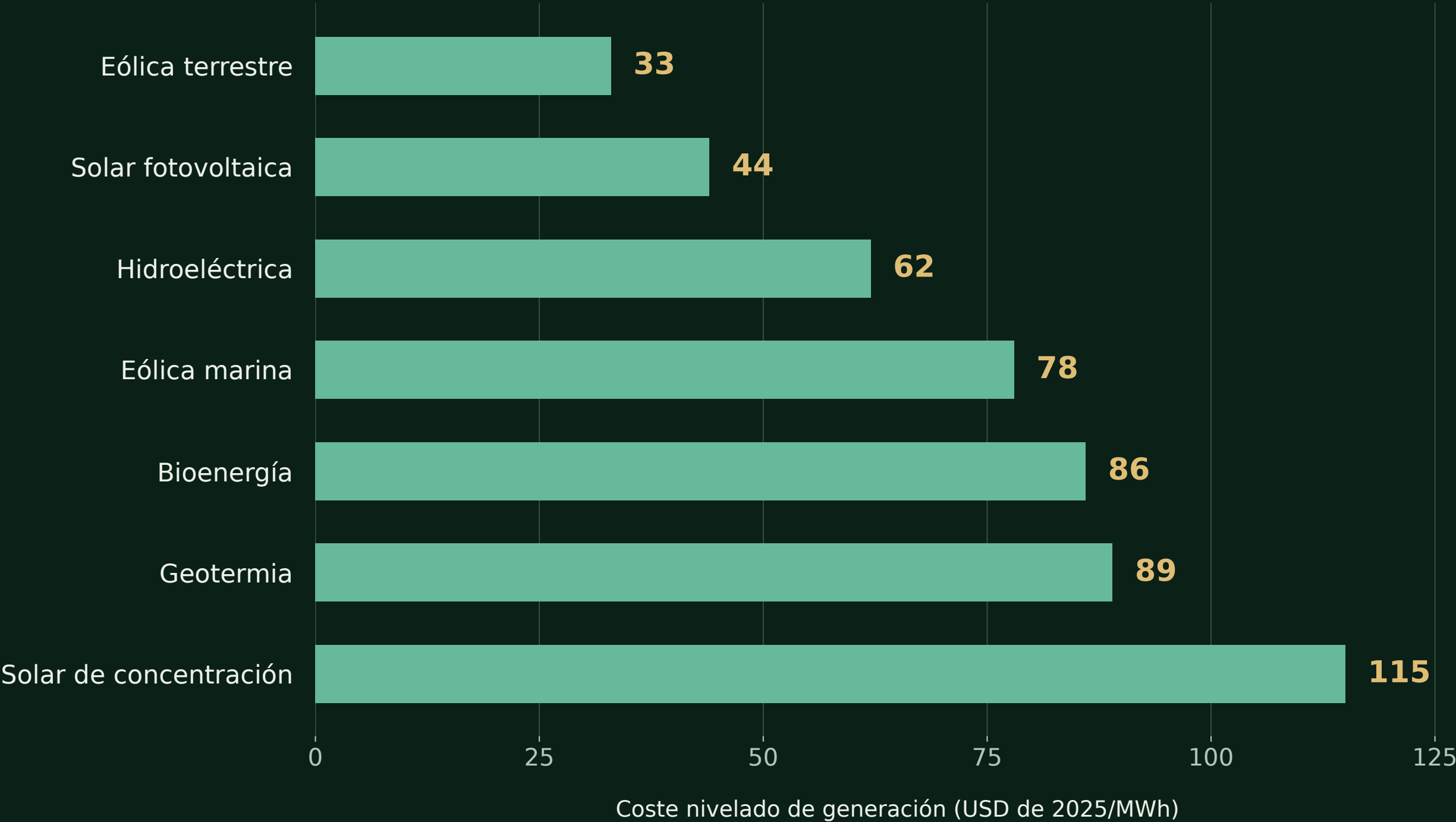
Tecnología	Energía que entra al sistema	Función / limitación principal
Solar fotovoltaica	Luz solar	Generación / luz variable
Eólica	Viento	Generación / viento variable
Hidroeléctrica	Agua en movimiento o embalsada	Generación / lugar y recursos hídricos
Fisión nuclear	Combustible nuclear	Generación / combustible, calor y residuos
Generador de imanes	Potencia mecánica externa	Conversión / potencia de entrada y pérdidas
Volante en vacío	Electricidad suministrada antes	Almacenamiento / pérdidas y contención
Batería	Electricidad suministrada antes	Almacenamiento / desgaste y control térmico
Bombeo hidroeléctrico	Electricidad suministrada antes	Almacenamiento / lugares y agua adecuados

Funciones tecnológicas establecidas. La configuración propuesta del rotor aún requiere validación.

Base: trabajo técnico del autor; evaluación DOE del almacenamiento; EIA AEO2026.

Costes de generación renovable en el mundo

Nuevas plantas a escala industrial en 2025 - LCOE global ponderado por capacidad

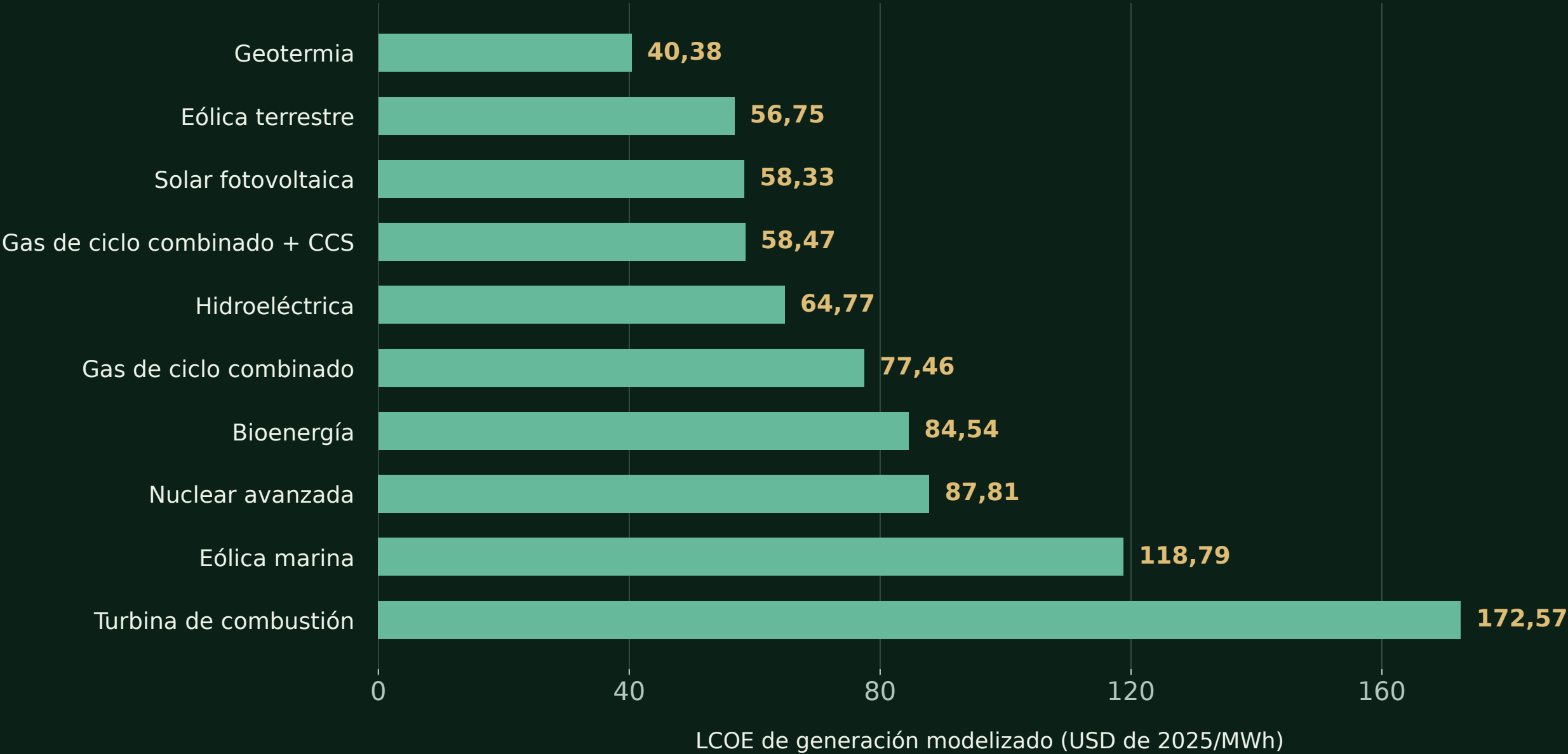


Son costes de generación, no tarifas eléctricas ni el coste de suministro garantizado a toda hora.

Fuente: IRENA, Renewable Power Generation Costs in 2025, resumen, pp. 3, 6-7.

Un escenario de generación en EE. UU. para 2031

EIA AEO2026 Counterfactual Baseline - medias regionales simples, créditos incluidos



Híbrido FV + batería de cuatro horas: LCOE 94,20 USD/MWh

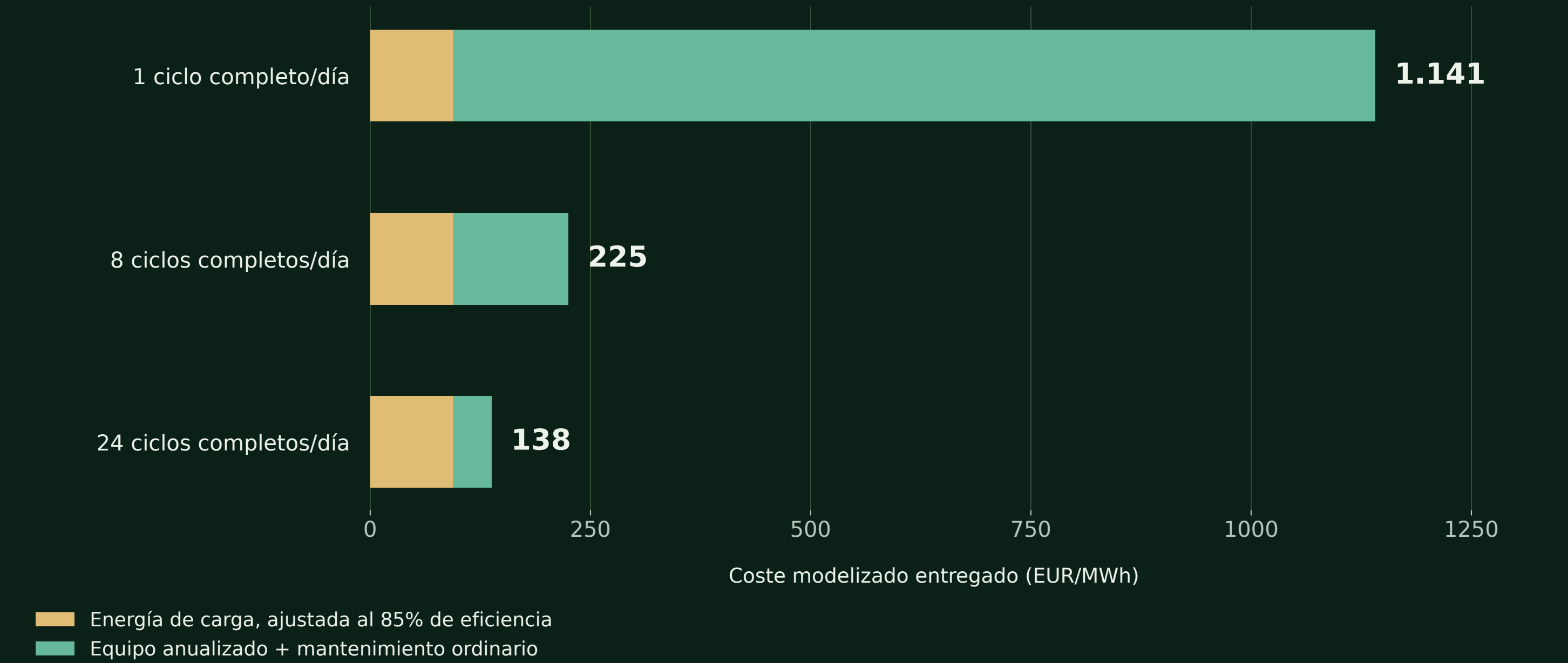
Batería independiente: LCOS 152,61 USD/MWh

Generación híbrida y almacenamiento tienen límites distintos. El LCOE solo no mide el valor para la red.

Fuente: EIA AEO2026, informe de costes nivelados, p. 8. Influyen políticas, lugar y uso.

Cómo el uso cambia el coste del almacenamiento

Mismo sistema propuesto de 1 MW / 0,25 MWh - supuestos, no resultados medidos



A 24 ciclos/día: 175.200 ciclos en 20 años antes de paradas. Vida útil y calendario de carga deben demostrarse.

Escenario autor: capital 800k EUR; mantenimiento 20k EUR/año; 20 años; 7%; carga 80 EUR/MWh.