

Macchina elettromagnetica con rotore in vuoto

Analisi ingegneristica dei materiali e applicazione sul territorio italiano

Il sistema qui studiato combina un generatore a magneti permanenti, elettronica di potenza e, opzionalmente, un rotore confinato in vuoto. Può convertire energia meccanica esterna in corrente alternata o restituire per breve tempo l'energia precedentemente accumulata nella rotazione. Non costituisce una fonte primaria autonoma: i magneti forniscono il campo, il vuoto riduce parte delle perdite e gli impulsi elettrici controllano la coppia, ma nessuno dei tre crea energia. La fattibilità economica va dimostrata con prestazioni misurate al punto di consegna e confrontata con un generatore convenzionale e con altre forme di accumulo. [1–4]

Architettura e dimensionamento iniziale

La configurazione di riferimento colloca i magneti NdFeB sul rotore e gli avvolgimenti sullo statore. Una fonte esterna muove il rotore tramite motore o turbina; gli avvolgimenti forniscono AC trifase a frequenza dipendente dai giri. Raddrizzatore, bus DC e inverter adattano l'energia al carico. Una bobina centrale rotante con magneti fissi è possibile, ma richiede contatti rotanti o trasferimento senza contatto e rende più difficili tenute e raffreddamento. Il vuoto è una scelta di ottimizzazione da verificare, non un prerequisito dell'induzione. [1, 2]

Leggi di progetto: $e = -N \cdot d\Phi/dt$; $f = p \cdot n/60$, con p coppie polari e n giri al minuto; $E_{\text{rot}} = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \omega^2$. Per quattro poli e 1.500 giri/min il generatore sincrono produce idealmente 50 Hz. A 1 kW meccanico e 1.500 giri/min la coppia richiesta è circa 6,37 N·m, prima delle perdite. Un volano idealizzato ad anello sottile di 10 kg e raggio 0,20 m a 3.000 giri/min immagazzina circa 5,5 Wh: a 1 kW coprirebbe circa 20 s perfino senza perdite. Questi numeri sono esempi, non una specifica costruttiva. [1, 2]



Schema di principio. Il ricircolo elettrico, se previsto, alimenta un ingresso già misurato e non aggiunge energia.

Tabella dei materiali elettromagnetici

La selezione dipende da temperatura massima, curva di smagnetizzazione, frequenza, perdite nel ferro, disponibilità e tracciabilità. Nessun grado commerciale va scelto soltanto dalla densità di flusso nominale. [3, 5]

Componente	Scelta proposta	Alternative	Criterio decisivo e verifica
Magnet del rotore	NdFeB sinterizzato, rivestito e con coercitività dimensionata	SmCo per migliore stabilità termica; ferrite se peso e ingombro sono accettabili	Pro: elevato flusso in poco volume. Contro: corrosione, smagnetizzazione termica, rischio sulla filiera delle terre rare. Misurare B-H e temperatura di guasto.

Componente	Scelta proposta	Alternative	Criterio decisivo e verifica
Avvolgimenti statorici	Rame smaltato e isolamento adatto alla temperatura	Alluminio, con sezione maggiore e giunzioni progettate	Pro: bassa resistenza a parità di geometria. Contro: massa e costo. Misurare R a caldo, perdite I^2R , isolamento e scariche parziali se pertinenti.
Nucleo statorico	Lamierini isolati di acciaio elettrico Fe-Si	Leghe amorfe o nanocristalline, se la frequenza giustifica la complessità	Pro: percorso di flusso efficiente. Contro: isteresi e correnti parassite. Calcolare perdite nel ferro sulla forma d'onda reale, non su una sola frequenza.
Camicia di ritenzione magneti	Composito in fibra di carbonio qualificato per rotor	Lega metallica ad alta resistenza, dopo stima delle correnti indotte	Pro: contenimento con minori correnti parassite. Contro: anisotropia, giunti e resine nel vuoto. Richiedere analisi delle tensioni e prova di sovravelocità.
Isolanti e fissaggi nel vuoto	Materiali con specifica di degassamento e compatibilità termica	Ceramiche e fissaggi meccanici ove appropriato	Verificare degassamento, stabilità dielettrica, vibrazioni e invecchiamento; minimizzare adesivi generici all'interno della camera.

Tabella dei materiali meccanici e dei sottosistemi

La camera riduce la resistenza aerodinamica, ma rende più difficile asportare il calore del rotore. Supporti, involucro e componenti ausiliari entrano nel bilancio netto. [2, 4-6]

Sottosistema	Opzione iniziale	Vantaggio	Rischio e prova richiesta
Involucro del vuoto	Acciaio inox saldato, con attraversamenti certificati	Tenuta, ispezionabilità e resistenza al carico esterno	Progettare per pressione differenziale e frammenti; evitare pareti metalliche non studiate nel traferro per correnti parassite.
Supporti del rotore	Cuscinetti meccanici idonei al vuoto nel banco; supporti magnetici attivi nel pilota	Soluzione semplice all'inizio; attrito ridotto e controllo dinamico nel pilota	I supporti magnetici consumano energia e richiedono cuscinetti di emergenza. Misurare perdite e modalità di guasto.
Pompa e tenute	Pompa da vuoto e tenute dimensionate sulla pressione ottimale misurata	Minori perdite aerodinamiche rispetto all'aria	Energia ausiliaria, infiltrazioni e manutenzione; confrontare pressione e potenza netta, non la sola pressione minima.
Raffreddamento	Statore condotto a scambiatore esterno e sensori su punti caldi	Perdite elettriche esportate fuori dalla camera	Nel vuoto manca convezione; calcolare conduzione, irraggiamento e temperatura dei magneti. [5]
Elettronica	Raddrizzatore e inverter industriale con protezioni	Tensione e frequenza utilizzabili, controllo della coppia	Perdite di conversione, armoniche, compatibilità elettromagnetica e protezione di interfaccia.

Sottosistema	Opzione iniziale	Vantaggio	Rischio e prova richiesta
Struttura e vibrazioni	Albero, giunti e fondazione verificati; equilibratura del rotore	Ripetibilità e contenimento delle vibrazioni	Verificare velocità critiche, fatica, sovravelocità, barriere fisiche ed equilibratura secondo la pertinente serie ISO 21940. [6]

Protocollo di prova e soglie decisionali

Si raccomanda un banco chiuso, a bassa tensione e senza parallelo alla rete, condotto da progettisti qualificati. Prima della prova definire carico resistivo, velocità, livello di vuoto, temperatura iniziale e durata; acquisire simultaneamente potenza attiva del motore, uscita AC, pompa, controlli, coppia, giri e temperature. Ripetere le condizioni a vuoto elettrico e con carico, in aria e in camera evacuata. Ogni ciclo deve iniziare e terminare con velocità del rotore e stato degli eventuali accumulatori registrati; il bilancio d'energia deve includere incertezza strumentale. [2, 4]

Grandezza	Definizione misurata	Esito necessario
Bilancio elettrico	$P_{AC\text{ utile}} - P_{motore,in} - P_{ausiliari}$	Misurare l'ingresso elettrico al motore alla sorgente; qualsiasi altro apporto energetico va documentato separatamente.
Rendimento di conversione	$E_{AC\text{ utile}} / E_{meccanica\text{ albero}}$, per ciclo definito	Confronto con alternatore equivalente senza camera.
Rendimento del ciclo	$E_{AC\text{ scaricata}} / E_{AC\text{ caricata}}$, con ausiliari e attesa	Sempre inferiore al 100% nel ciclo completo.
Energia iniziale e finale	$\frac{1}{2} J \omega^2$ e variazione di batteria o bus DC	Nessuna scarica nascosta deve sembrare produzione autonoma.
Valore economico	Costo totale attualizzato / MWh consegnati	Confronto sullo stesso servizio, durata e affidabilità.

Messa in pratica nel territorio italiano

La prima applicazione plausibile è la stabilizzazione rapida di un impianto fotovoltaico o di un carico industriale, dove la fonte di energia è identificabile e il servizio del volano può essere valutato. Per scegliere il sito, ricostruire la serie temporale di produzione solare con PVGIS, misurare il profilo dei carichi e verificare disponibilità elettrica e spazio con il gestore della rete. La scelta di Sicilia, Sud o distretti del Nord non si può giustificare con una sola media di irraggiamento. [18, 19]

Fase	Sede e attività	Decisione verificabile
1 Studio	Università o laboratorio industriale: FEM elettromagnetico, tensioni del rotore, costo preliminare e analisi dei guasti.	Selezionare servizio di pochi secondi/minuti e un comparatore reale.

Fase	Sede e attività	Decisione verificabile
2 Banco	Ambiente di prova confinato: dimostratore a bassa tensione, misura tarata di tutti i flussi energetici, test aria/vuoto.	Procedere solo se il beneficio netto del vuoto supera potenza della pompa e costo.
3 Pilota	Sito industriale vicino a carico variabile o fotovoltaico: prove di lunga durata, piano manutenzione, ciclo vita e sicurezza.	Confrontare €/MWh di servizio e affidabilità con batterie e supercondensatori.
4 Rete	Se il progetto prevede parallelo alla rete, interpellare il distributore; progettare interfaccia, protezioni, misure e pratiche.	Conformità e titolo di connessione prima di immissione; qualificazione di mercato solo se applicabile.

Per bassa tensione verificare l'edizione CEI 0-21:2026-07; per media tensione CEI 0-16:2026-07. Le procedure di connessione degli impianti di produzione fanno riferimento al TICA ARERA; la classificazione del volano e l'eventuale integrazione in impianto incentivato vanno verificati con distributore e GSE sul progetto reale. Per installare un pilota produttivo contattare il SUAP comunale per le pratiche pertinenti; per eventuali servizi alla rete consultare i requisiti e le procedure vigenti di Terna, senza assumere un diritto automatico a ricavi o incentivi. La verifica di sicurezza macchina, involucro, compatibilità elettrica e antincendio dipende da configurazione e sito. [14–18]

Confronto delle tecnologie elettriche nel mondo

La tabella confronta funzione, punti forti, limiti e analisi specifiche. Le tecnologie che sfruttano una risorsa primaria non vanno valutate come equivalenti a una macchina di conversione o accumulo. I risultati economici e ambientali dipendono dal sito e dal sistema elettrico; “plasma” qui indica fusione controllata, ancora in sviluppo per l'elettricità commerciale. [7–13]

Tecnologia e ruolo	PRO	CONTRO	Analisi speciale richiesta
Bobina NdFeB e vuoto conversione più accumulo breve	Risposta molto rapida; molti cicli potenziali; magneti senza eccitazione; minore attrito dell'aria.	Non crea energia primaria; durata limitata dalla massa e velocità; pompa e supporti consumano; rischio meccanico e materiali critici.	Bilancio chiuso con fonte esterna, rendimento di ciclo, perdite a riposo, contenimento, €/MW di risposta e €/MWh utile.
Idroelettrico fonte primaria	Impianti maturi; la diga con invaso può modulare potenza; vita lunga.	Dipendenza da portata e siccità; impatti su fiumi e habitat; grandi opere e tempi di autorizzazione.	Idrologia pluriennale, ecologia, sedimenti, sicurezza diga e disponibilità climatica.
Nucleare da fissione fonte primaria	Potenza continua programmabile; basse emissioni dirette di CO ₂ ; elevata densità energetica.	Capitale e tempi elevati; combustibile, rifiuti radioattivi e dismissione; sicurezza e accettabilità.	Ciclo combustibile, gestione rifiuti, acqua di raffreddamento, costo del capitale e rischio di progetto.
Fotovoltaico fonte primaria	Modulare; installabile su tetti; nessun combustibile in esercizio; costi d'uso contenuti.	Produzione diurna e meteo-dipendente; possibili rinforzi di rete; materiali e fine vita.	Serie PVGIS locale, profilo orario, autoconsumo, ombre, rete e gestione dei moduli a fine vita.

Tecnologia e ruolo	PRO	CONTRO	Analisi speciale richiesta
Eolico fonte primaria	Combustibile gratuito; scala industriale; basse emissioni in esercizio.	Variabilità del vento; impatti locali visivi/acustici e su fauna; necessità di rete e flessibilità.	Distribuzione delle velocità del vento, fondazioni, impatto ecologico, rete e fermate.
Gas naturale fonte primaria fossile	Impianti flessibili e programmabili; infrastrutture mature; adeguati a riserva e picchi.	Emissioni di CO ₂ e metano a monte; costo esposto al combustibile; dipendenza da importazioni.	Prezzo e sicurezza del gas, fughe di metano, fattore di utilizzo e costo della CO ₂ .
Carbone e olio combustibile fonti fossili	Potenza programmabile; alcune infrastrutture esistenti e uso di emergenza del diesel.	Alte emissioni climalteranti e inquinanti; estrazione, trasporto, residui e qualità dell'aria.	Emissioni sull'intero ciclo, salute, disponibilità combustibile, eventuale cattura CO ₂ e dismissione.
Geotermico fonte primaria	Potenza stabile quando la risorsa è disponibile; possibile cogenerazione di calore.	Localizzazione e perforazione vincolanti; investimento iniziale e rischio geologico.	Temperatura e portata del serbatoio, reiniezione, sismicità indotta e chimica dei fluidi.
Biomasse e biogas fonte primaria condizionata	Programmabili con combustibile stoccabile; valorizzazione di residui sostenibili.	Emissioni locali; logistica del combustibile; competizione con suolo e altri usi della biomassa.	Bilancio carbonico reale, provenienza del feedstock, impatti aria e costo logistico.
Maree e onde fonte primaria	Risorsa marina prevedibile in alcune aree; diversificazione geografica.	Disponibilità locale; corrosione, manutenzione in mare e maturità inferiore di molte soluzioni.	Energia del sito, impatti marini, fatica, accesso alla manutenzione e cavi.
Fusione nucleare a plasma ricerca	Potenziale futuro di potenza programmabile e basso carbonio se la filiera industriale riesce.	Nessuna centrale commerciale comprovata in questo confronto; materiali, trizio e conversione termica ancora da dimostrare.	Distinguere guadagno del plasma Q da elettricità netta esportata e consumi dell'intero impianto. ITER non produrrà elettricità. [9]

Confronto dei costi e convenienza a lungo termine

I valori sono costi livellati, non tariffe al consumatore né offerte per l'Italia. IRENA rileva medie globali degli impianti entrati in esercizio nel 2025; EIA modella impianti statunitensi con entrata nel 2031, ammortamento di 30 anni, costo del capitale del 7,27% e condizioni fiscali USA. Tutti gli importi sono in dollari 2025 per MWh; i due studi hanno confini e mercati diversi, quindi le loro righe non formano una graduatoria unica. [20, 21]

Tecnologia e riferimento	USD 2025/MWh	Lettura corretta del dato
Eolico terrestre · IRENA globale 2025	33	LCOE di nuova generazione; disponibilità eolica locale da verificare.
Solare FV · IRENA globale 2025	44	LCOE di nuova generazione; produzione non continua.
Idroelettrico · IRENA globale 2025	62	LCOE; sito, portata e infrastrutture determinanti.

Tecnologia e riferimento	USD 2025/MWh	Lettura corretta del dato
Eolico marino · IRENA globale 2025	78	LCOE; installazione e gestione dipendono dal sito.
Bioenergia · IRENA globale 2025	86	LCOE; logistica, origine e costo dei residui contano.
Geotermico · IRENA globale 2025	89	LCOE; risorsa geologica e perforazione sono decisive.
Gas · mercati ad alto prezzo, Italia inclusa	circa 100	LCOE IRENA orientativo; dipende da prezzo del gas e progetto.
Gas ciclo combinato · EIA USA 2031	77,46	LCOE di scenario, non preventivo per una centrale italiana.
Nucleare avanzato · EIA USA 2031	87,81	LCOE di scenario; valutare finanziamento, rifiuti e rischio.
Batteria · EIA USA 2031	152,61	LCOS per accumulo diurno; durata diversa dal volano breve.

Per carbone, olio combustibile, maree, fusione e macchina proposta manca qui una quotazione omogenea e trasferibile a un sito italiano; nessun prezzo va inventato. Confrontare LCOE di generazione e LCOS di accumulo sulla medesima funzione sarebbe fuorviante: la macchina deve acquistare o ricevere l'energia che restituisce. Per un progetto vero servono offerte firmate, profilo orario, capacità di rete, oneri e scenario di rischio. [20–22]

Scenario economico verificabile per il volano

Esempio puramente ipotetico, non prezzo commerciale: 1 MW di potenza, 0,25 MWh utili per scarica (15 minuti), investimento installato 800.000 €, manutenzione ordinaria 20.000 €/anno, vita 20 anni, tasso 7%, costo opportunità della ricarica 80 €/MWh in ingresso e rendimento AC–AC 85% assunto per il profilo, ausiliari compresi. Fattore annuo del capitale = $7\%/[1 - (1,07)^{-20}] = 0,09439$; costo fisso annuo = 95.514 €. Con c cicli completi al giorno, energia consegnata $Q = 0,25 \times 365 \times c$ MWh/anno e costo indicativo = $95.514/Q + 80/0,85$ €/MWh. Il rendimento va rimisurato per ogni durata di attesa. [22]

Cicli pieni al giorno	MWh utili all'anno	Costo modellato €/MWh	Interpretazione
1	91,25	1.141	Poco uso: il capitale pesa molto.
8	730	225	Costo fisso ripartito su più energia.
24	2.190	138	Richiede elevata utilizzazione e vita utile verificata.

Con queste sole ipotesi la soglia di 150 €/MWh richiede circa 19 cicli completi al giorno. Se l'investimento sale a 1,6 milioni €, a 24 cicli il costo modellato diventa circa 172 €/MWh; inoltre guasti, sostituzioni straordinarie, connessione e imposte possono aumentarlo. Il vantaggio a lungo termine è dunque possibile nei servizi rapidi e ripetuti, se prove su fatica, guasti e consumi confermano la vita utile e se un'offerta per batteria o supercondensatore sullo stesso servizio risulta meno favorevole. Un ricavo per riserva di potenza va conteggiato solo se contrattualizzato: ricavo annuo di capacità + $Q \times (\text{prezzo di vendita} - \text{costo ricarica/rendimento})$ deve coprire almeno il costo annuo completo. [21, 22]

Rischi ambientali del nucleare nel conto economico

La fissione fornisce potenza continua a basse emissioni dirette di CO₂; un volano non la sostituisce senza un'altra fonte primaria. Per confrontare investimenti di lungo periodo, chiedere esplicitamente come sono finanziati estrazione e ciclo del combustibile, smantellamento, isolamento dei rifiuti radioattivi, raffreddamento e prelievi idrici, protezione del sito, responsabilità e piani per incidenti rari ma potenzialmente gravi. IAEA richiede analisi lungo il ciclo di vita e fondi credibili per lo smaltimento; IEA segnala ritardi, extracosti e costo del capitale per nuovi reattori. Non si può aggiungere un sovrapprezzo unico e arbitrario al LCOE nucleare: va esaminato il perimetro di costi coperti e simulati scenari avversi. Il volano ha rischi diversi — terre rare, rottura del rotore, contenimento, elettricità della pompa e impatto della fonte di ricarica — che entrano a loro volta nel confronto. [21, 23–25]

Confronto mirato dei sistemi di accumulo

Sistema	Servizio più credibile	Vantaggi	Limiti e prova
Volano in vuoto	Risposta di secondi o minuti, alto numero di cicli.	Potenza e risposta rapida; assenza di degrado elettrochimico.	Perdite in attesa, involucro e rischio del rotore; misurare rendimento alla durata reale.
Batteria elettrochimica	Spostamento di energia da decine di minuti a più ore, secondo progetto.	Modularità ed elevata energia in poco spazio.	Degrado nel tempo e coi cicli, controllo termico e gestione di fine vita; confronto a pari profilo.
Pompaggio idroelettrico	Grandi energie e durate prolungate dove il sito lo consente.	Grande scala e lunga vita utile.	Siti idonei limitati, acqua, ambiente e lunghi lavori civili. [12]
Supercondensatori	Impulsi brevissimi e molta potenza.	Risposta rapida e molti cicli.	Energia specifica bassa e perdite a riposo; confronto per durata della scarica.

Analisi economiche e ambientali da non omettere

Calcolare LCOE soltanto per una filiera che specifichi la fonte primaria; per un sistema di accumulo usare costo dell'energia consegnata dopo carica, perdite e manutenzione, e valorizzare separatamente la potenza e la velocità di risposta. Confrontare lo stesso servizio di rete, lo stesso orizzonte temporale e lo stesso costo del capitale. Valutare inoltre emissioni e materiali lungo il ciclo di vita, approvvigionamento di terre rare, rumorosità e sicurezza del sito. Se si ipotizza una città da 100 MW medi, la domanda è 2,4 GWh ogni giorno; un volano da 100 MWh utili coprirebbe solo un'ora e avrebbe bisogno di ricarica. È uno scenario illustrativo, non una previsione di mercato. [3, 4, 8, 13]

Conclusione tecnica

Il primo obiettivo non è dimostrare autonomia energetica ma verificare se il vuoto migliora rendimento e costo rispetto a un alternatore ordinario e se un volano offre un servizio più conveniente rispetto alle alternative di accumulo. Il passaggio a impianti urbani richiede una fonte primaria, un progetto di rete, protezioni e prove indipendenti. L'ipotesi dei costi ultra ridotti resta aperta finché tali misure non la sostengono.

Giuseppe Carilli | LinkedIn: <https://es.linkedin.com/in/giuseppe-carilli-a03805b1>

Electromagnetic machine with a vacuum enclosed rotor

Engineering assessment of materials and a practical route in Italy

The proposed system combines a permanent magnet generator, power electronics and, optionally, a rotor enclosed in vacuum. It can convert externally supplied mechanical energy into alternating current or return rotational energy previously stored for a limited time. It is not an autonomous primary energy source: the magnets establish a field, vacuum removes part of the drag and electrical pulses regulate torque, but none creates energy. Economic feasibility must be established from metered power at the delivery point and compared with a conventional generator and competing storage systems. [1–4]

Architecture and initial sizing

The reference topology places NdFeB magnets on the rotor and windings on the stator. An external source drives the rotor through a motor or turbine; the windings supply three phase AC at a frequency set by speed. A rectifier, DC link and inverter adapt that energy to the load. A central rotating coil inside stationary magnets is also possible, but requires slip rings or contactless transfer and makes sealing and cooling harder. Vacuum is an optimization to test, not a prerequisite for induction. [1, 2]

Design relations: $e = -N \cdot d\Phi/dt$; $f = p \cdot n/60$, where p is the number of pole pairs and n is rpm; $E_{\text{rot}} = \frac{1}{2} J \cdot \omega^2$. A four pole synchronous generator at 1,500 rpm ideally produces 50 Hz. At 1 kW shaft power and 1,500 rpm the torque is about 6.37 N·m before losses. An ideal thin ring flywheel with mass 10 kg and radius 0.20 m at 3,000 rpm stores only about 5.5 Wh: at 1 kW this is about 20 s even with no losses. These figures are illustrations, not a construction specification. [1, 2]



Functional diagram. Any electrical return feeds an already metered input; it adds no energy.

Electromagnetic materials selection

Selection depends on maximum temperature, demagnetization curve, frequency, iron loss, availability and traceability. A commercial grade must not be chosen from rated flux density alone. [3, 5]

Component	Initial choice	Alternatives	Decisive criterion and verification
Rotor magnets	Coated sintered NdFeB with coercivity sized for the fault temperature	SmCo for greater thermal stability; ferrite if size and mass are acceptable	Pros: high flux in a small volume. Cons: corrosion, thermal demagnetization and rare earth supply risk. Measure B-H behavior and fault temperature.

Component	Initial choice	Alternatives	Decisive criterion and verification
Stator winding	Enamelled copper and insulation rated for the hot spot	Aluminium with a larger cross section and engineered joints	Pros: low resistance for a given geometry. Cons: mass and price. Measure hot resistance, I^2R loss, insulation and partial discharge where applicable.
Stator core	Insulated silicon steel laminations	Amorphous or nanocrystalline alloys where frequency justifies complexity	Pros: efficient flux path. Cons: hysteresis and eddy currents. Estimate core loss under the actual waveform rather than one nominal frequency.
Magnet retention sleeve	Rotor qualified carbon fibre composite	High strength alloy after induced current analysis	Pros: retention with fewer eddy currents. Cons: directional strength, joints and resin in vacuum. Require stress analysis and an overspeed test.
Vacuum insulation and fasteners	Materials specified for outgassing and thermal compatibility	Ceramics and mechanical retention where appropriate	Verify outgassing, dielectric strength, vibration and ageing; minimize generic adhesives inside the enclosure.

Mechanical materials and subsystem selection

Vacuum reduces aerodynamic drag but makes rotor cooling harder. Bearings, enclosure and auxiliaries must be included in the net balance. [2, 4–6]

Subsystem	Initial option	Benefit	Risk and required test
Vacuum vessel	Welded stainless steel with qualified feedthroughs	Leak tightness, inspectability and resistance to external pressure	Design for pressure differential and fragments; assess any conductive wall in the magnetic gap for eddy currents.
Rotor bearings	Vacuum compatible mechanical bearings in the bench; active magnetic bearings for a pilot	Simplicity first; reduced contact and controlled rotor dynamics later	Magnetic bearings consume power and need touchdown bearings. Measure losses and fault behavior.
Pump and seals	Vacuum pump and seals sized to the measured optimum pressure	Reduced aerodynamic loss relative to air	Auxiliary electricity, leakage and maintenance; optimize net power rather than minimum pressure.
Cooling	Conductively cooled stator and sensors at hot spots	Exports winding heat outside the chamber	There is no convection in vacuum; model conduction, radiation and magnet temperature. [5]
Power electronics	Industrial rectifier and inverter with protection	Useful voltage and frequency, torque control	Conversion loss, harmonics, electromagnetic compatibility and interface protection.
Structure and vibration	Verified shaft, joints and foundation; balanced rotor	Repeatable operation and limited vibration	Check critical speeds, fatigue, overspeed, barriers and balancing under the relevant ISO 21940 series. [6]

Test protocol and decision criteria

Use an enclosed, low voltage bench without a grid parallel connection, operated by qualified engineers. Set load, speed, vacuum level, initial temperature and test duration in advance; acquire motor active power, AC output, pump and control loads, torque, speed and temperatures simultaneously. Repeat electrical open circuit and loaded tests in air and in the evacuated chamber. Record rotor speed and every other store of energy at the beginning and end of each cycle; report measurement uncertainty. [2, 4]

Quantity	Measured definition	Required interpretation
Electrical balance	Useful AC output – measured motor input – auxiliaries	Measure motor input at its source; document any other energy input separately.
Conversion efficiency	Useful AC energy / shaft energy over a defined cycle	Compare with an equivalent generator without a vacuum enclosure.
Round trip efficiency	AC discharged / AC charged, including auxiliaries and hold time	Below 100% for the full cycle.
Initial and final energy	$\frac{1}{2} J\omega^2$ plus any change in battery or DC link	Hidden discharge must not appear to be autonomous production.
Economic value	Discounted total cost / MWh actually delivered	Compare the same service duration and reliability.

Practical implementation in Italy

The most plausible first use is fast smoothing of photovoltaic output or an industrial load, where the energy source is known and the flywheel service can be valued. For site selection, use PVGIS solar time series, meter the load profile and check electrical capacity and space with the grid operator. Sicily, southern Italy and northern industrial districts cannot be ranked by an irradiation average alone. [18, 19]

Stage	Site and activity	Evidence for progression
1 Design	University or industrial lab: electromagnetic FEA, rotor stress, preliminary cost and fault analysis.	Choose a seconds to minutes service and a real comparator.
2 Bench	Confined test facility: low voltage demonstrator, calibrated meters at all energy boundaries and air versus vacuum tests.	Proceed only if net vacuum benefits exceed pump power and added cost.
3 Pilot	Industrial site near variable demand or solar PV: endurance, maintenance, life cycle and safety tests.	Compare cost per MWh of service and reliability with batteries and supercapacitors.
4 Grid	If operating in parallel with the grid, consult the distributor; design the interface, protections, metering and application.	Obtain connection approval before exporting; seek market qualification only if eligible.

For low voltage, check CEI 0-21:2026-07; for medium voltage, CEI 0-16:2026-07. ARERA's TICA governs relevant connection procedures for generation plants. The classification of this flywheel and its possible inclusion in an incentivized plant need project-specific confirmation with the distributor and GSE. Contact the municipality's SUAP for applicable industrial permit procedures. Terna's current rules and tenders

control access to any grid service; revenue or incentives must not be assumed. Machinery, enclosure, electrical and fire safety checks depend on the actual configuration and site. [14–18]

Comparison with electricity technologies worldwide

The matrix distinguishes each technology’s function, strengths, limitations and required special analyses. Primary resources are not interchangeable with a converter or an energy store. Economic and environmental results depend on the site and power system. “Plasma” here means controlled fusion, still under development for commercial electricity. [7–13]

Technology and role	ADVANTAGES	LIMITATIONS	Special analysis
NdFeB coil and vacuum conversion plus short storage	Very fast response; potentially many cycles; no magnet excitation supply; reduced air drag.	No primary energy; duration limited by rotor mass and speed; pump and bearings draw power; mechanical and material risks.	Closed energy balance with external source, round trip loss, standby loss, containment, response cost per MW and useful cost per MWh.
Hydropower primary resource	Mature; reservoirs can dispatch power; long operating life.	Flow and drought exposure; river and habitat impacts; major civil works and approvals.	Multi year hydrology, ecology, sediment, dam safety and climate dependence.
Nuclear fission primary resource	Firm dispatchable power; low direct CO ₂ ; high energy density.	Capital and lead time; fuel and radioactive waste; decommissioning, safety and acceptance.	Fuel cycle, waste management, cooling water, financing and project execution risk.
Solar photovoltaic primary resource	Modular and rooftop compatible; no operating fuel; low operating emissions.	Daylight and weather dependent; possible network upgrades; materials and end of life.	Local PVGIS time series, hourly demand, self consumption, shading, network and module disposal.
Wind primary resource	No operating fuel; industrial scale; low operational emissions.	Variable wind; local visual, acoustic and wildlife effects; grid flexibility.	Wind speed distribution, foundations, ecological impacts, curtailment and connection.
Natural gas fossil primary resource	Dispatchable and flexible; mature infrastructure; suitable for reserve.	CO ₂ and upstream methane; fuel price exposure and import dependence.	Gas supply and price, methane leakage, duty factor and carbon cost.
Coal and fuel oil fossil primary resources	Dispatchable; legacy infrastructure and some backup applications.	High climate and air pollution burden; mining, transport, residues and health costs.	Life cycle emissions, health effects, fuel supply, possible carbon capture and retirement.
Geothermal primary resource	Firm output where the resource exists; can also supply useful heat.	Site and drilling constraints; up front cost and subsurface uncertainty.	Reservoir temperature and flow, reinjection, induced seismicity and fluid chemistry.
Biomass and biogas conditional primary resource	Dispatchable with stored feedstock; can valorize sustainable residues.	Local emissions and logistics; land competition and uncertain lifecycle carbon.	Actual carbon balance, feedstock origin, air impacts and delivery cost.

Technology and role	ADVANTAGES	LIMITATIONS	Special analysis
Tidal and wave primary resource	Locally predictable marine resource; geographic diversification.	Site limitations; corrosion and offshore maintenance; several approaches remain less mature.	Site energy, marine impacts, fatigue, maintenance access and cables.
Plasma fusion research	Potential future firm low carbon power if an industrial system succeeds.	No demonstrated commercial power station in this comparison; materials, tritium and heat conversion unresolved.	Separate plasma gain Q from net exported electricity and whole plant demand. ITER will not generate electricity. [9]

Cost comparison and long term conditions

These are levelized costs, not retail tariffs or bids for Italy. IRENA reports worldwide averages for plants commissioned in 2025. EIA models US plants entering service in 2031 with a 30 year recovery period, 7.27% cost of capital and US tax conditions. All figures are in 2025 US dollars per MWh. The studies have different boundaries and markets; their rows cannot be treated as one ranking. [20, 21]

Technology and reference	2025 USD/MWh	How to interpret the estimate
Onshore wind · IRENA world 2025	33	New generation LCOE; local wind resource still matters.
Solar PV · IRENA world 2025	44	New generation LCOE; output is intermittent.
Hydropower · IRENA world 2025	62	LCOE; site, flow and infrastructure matter.
Offshore wind · IRENA world 2025	78	LCOE; installation and operation depend on the site.
Bioenergy · IRENA world 2025	86	LCOE; logistics, origin and feedstock cost matter.
Geothermal · IRENA world 2025	89	LCOE; geological resource and drilling are decisive.
Gas · high price markets incl. Italy	about 100	Approximate IRENA LCOE; depends on gas price and design.
Combined cycle gas · EIA US 2031	77.46	Scenario LCOE, not a quotation for an Italian plant.
Advanced nuclear · EIA US 2031	87.81	Scenario LCOE; examine finance, waste and risk.
Battery storage · EIA US 2031	152.61	Diurnal storage LCOS, unlike a short duration flywheel.

Coal, fuel oil, tidal and wave, fusion and this proposed flywheel have no homogeneous Italian transferable price here; none should be invented. Comparing generation LCOE with storage LCOS for the same supposed function would be misleading: the flywheel must obtain the energy it later returns. A real project requires binding bids, an hourly duty profile, grid capacity, charges and a risk analysis. [20–22]

A testable long term flywheel cost case

Purely hypothetical calculation, not a commercial price: 1 MW of power, 0.25 MWh usable per discharge (15 minutes), installed capital of €800,000, ordinary maintenance of €20,000 per year, 20 year life, 7% discount rate, an €80/MWh opportunity cost for charging input, and assumed 85% AC to AC efficiency including auxiliaries under the stated duty. Capital recovery factor = $7\%/[1 - (1.07)^{-20}] = 0.09439$; annual fixed cost =

€95,514. At c full cycles per day, delivered energy $Q = 0.25 \times 365 \times c$ MWh/year, and indicative cost = $95,514/Q + 80/0.85$ €/MWh. Efficiency must be remeasured for each holding time. [22]

Full cycles per day	Useful MWh per year	Modelled €/MWh	Interpretation
1	91.25	1,141	Little use: capital dominates.
8	730	225	Fixed cost spreads over more energy.
24	2,190	138	Requires high use and verified service life.

With only these assumptions, reaching €150/MWh needs about 19 full cycles per day. If capital doubles to €1.6 million, at 24 cycles the model rises to about €172/MWh; faults, extraordinary replacements, connection and taxes could increase it. A long term advantage is possible for frequent fast services only if fatigue, failures and power draw tests establish the lifetime and a comparable battery or supercapacitor bid for the same duty is less favourable. Count fast reserve revenue only under an actual contract: annual capacity revenue + $Q \times (\text{sale price} - \text{charging price/efficiency})$ must at least cover full annual cost. [21, 22]

Nuclear environmental risks in the economic comparison

Fission provides continuous power with low direct CO₂ emissions; a flywheel cannot replace it without another primary source. For long term investment comparisons, explicitly verify the funding and impacts of uranium mining and the fuel cycle, decommissioning, isolation of radioactive waste, cooling water and thermal discharge, site security, liability and plans for rare but potentially severe accidents. IAEA calls for lifecycle assessment and credible disposal funding; IEA identifies delays, overruns and cost of capital for new reactors. Do not apply one arbitrary surcharge to nuclear LCOE: inspect which liabilities the study covers and test adverse cases. The flywheel has different risks — rare earth sourcing, rotor fracture, containment, pump electricity and the charging source's lifecycle impacts — which also belong in the comparison. [21, 23–25]

Focused comparison of storage options

System	Credible duty	Advantages	Limits and test
Vacuum flywheel	Seconds to minutes, frequent cycling.	Rapid response and power; no electrochemical ageing.	Standby loss, containment and rotor risk; measure efficiency over the real hold time.
Electrochemical battery	Energy shifting from tens of minutes to several hours depending on design.	Modular with high energy per footprint.	Ageing, thermal management and end of life; use the same duty profile for comparison.
Pumped hydro	Large energy volumes and longer durations where geography allows.	Utility scale and long service life.	Limited suitable sites, water and environment, long civil works. [12]
Supercapacitors	Very short, high power pulses.	Fast response and many cycles.	Low specific energy and standby loss; compare at the required discharge time.

Economic and environmental analyses to include

Calculate LCOE only for a generation chain with a stated primary energy resource. For storage, use the cost of energy delivered after charging, losses and maintenance, while valuing response speed and power separately. Compare the same grid service, period and cost of capital. Include lifecycle emissions and materials, rare earth sourcing, noise and site safety. A hypothetical city drawing 100 MW on average requires 2.4 GWh each day; a flywheel delivering 100 MWh would cover just one hour and then need recharging. This is an illustrative load, not a market forecast. [3, 4, 8, 13]

Engineering conclusion

The first objective is to test whether vacuum improves efficiency and cost versus an ordinary alternator and whether a flywheel offers a more competitive service than other storage systems. An urban scale plant requires a primary energy resource, grid engineering, protection and independent tests. The ultra low cost claim remains a hypothesis until measurements support it.

Giuseppe Carilli | LinkedIn: <https://es.linkedin.com/in/giuseppe-carilli-a03805b1>

Máquina electromagnética con rotor en vacío

Evaluación técnica de materiales e implantación práctica en Italia

El sistema estudiado combina un generador de imanes permanentes, electrónica de potencia y, de forma opcional, un rotor confinado en vacío. Puede convertir energía mecánica externa en corriente alterna o devolver durante un tiempo limitado la energía previamente almacenada en la rotación. No constituye una fuente primaria autónoma: los imanes aportan el campo, el vacío reduce parte del rozamiento aerodinámico y los impulsos eléctricos regulan el par, pero ninguno crea energía. La viabilidad económica exige medir la energía realmente entregada y compararla con un generador convencional y otros sistemas de almacenamiento. [1–4]

Arquitectura y dimensionamiento inicial

La configuración de referencia sitúa los imanes NdFeB en el rotor y los devanados en el estátor. Una fuente externa mueve el rotor mediante un motor o una turbina; los devanados suministran CA trifásica cuya frecuencia depende de las revoluciones. Un rectificador, un bus de CC y un inversor adaptan la energía a la carga. También puede girar una bobina central dentro de imanes fijos, pero necesita anillos rozantes o transferencia sin contacto y complica el sellado y la refrigeración. El vacío es una optimización a comprobar, no un requisito para la inducción. [1, 2]

Relaciones de diseño: $e = -N \cdot d\Phi/dt$; $f = p \cdot n/60$, con p pares de polos y n revoluciones por minuto; $E_{\text{rot}} = \frac{1}{2} J \cdot \omega^2$. Un generador síncrono de cuatro polos a 1.500 rpm produce idealmente 50 Hz. Con 1 kW mecánico y 1.500 rpm se requieren unos 6,37 N·m antes de pérdidas. Un volante idealizado como aro fino de 10 kg y radio 0,20 m a 3.000 rpm almacena solo unos 5,5 Wh: a 1 kW duraría aproximadamente 20 s incluso sin pérdidas. Son ejemplos ilustrativos, no especificaciones de construcción. [1, 2]



Esquema funcional. Un posible retorno eléctrico alimenta una entrada ya medida y no añade energía.

Selección de materiales electromagnéticos

La selección depende de la temperatura máxima, curva de desmagnetización, frecuencia, pérdidas del hierro, disponibilidad y trazabilidad. No debe elegirse un grado comercial solo por su densidad nominal de flujo. [3, 5]

Componente	Elección inicial	Alternativas	Criterio decisivo y verificación
Imanes del rotor	NdFeB sinterizado y revestido, con coercitividad según temperatura de fallo	SmCo para mayor estabilidad térmica; ferrita si se aceptan más masa y volumen	Pros: mucho flujo en poco espacio. Contras: corrosión, desmagnetización térmica y riesgo de suministro. Medir curva B-H y temperatura de fallo.

Componente	Elección inicial	Alternativas	Criterio decisivo y verificación
Devanado del estátor	Cobre esmaltado y aislamiento apto para el punto caliente	Aluminio con más sección y uniones diseñadas	Pros: baja resistencia para una geometría dada. Contras: masa y precio. Medir resistencia en caliente, pérdidas I^2R y aislamiento.
Núcleo del estátor	Chapas aisladas de acero eléctrico Fe-Si	Aleaciones amorfas o nanocristalinas si la frecuencia justifica su complejidad	Pros: camino de flujo eficaz. Contras: histéresis y corrientes parásitas. Estimar pérdidas con la forma de onda real.
Camisa de retención	Compuesto de fibra de carbono cualificado para rotores	Aleación de alta resistencia tras estudiar corrientes inducidas	Pros: retención con menos corrientes parásitas. Contras: resistencia direccional, juntas y resinas en vacío. Exigir cálculo mecánico y prueba de sobrevelocidad.
Aislantes y fijaciones	Materiales con especificación de desgasificación y compatibilidad térmica	Cerámica y sujeción mecánica cuando corresponda	Verificar desgasificación, resistencia dieléctrica, vibraciones y envejecimiento; reducir adhesivos genéricos dentro del recinto.

Selección mecánica y de subsistemas

El vacío reduce la resistencia aerodinámica, pero dificulta la evacuación de calor del rotor. Rodamientos, recinto y auxiliares forman parte del balance neto. [2, 4–6]

Subsistema	Opción inicial	Ventaja	Riesgo y prueba necesaria
Cámara de vacío	Acero inoxidable soldado con pasamuros cualificados	Estanqueidad, inspección y resistencia a presión externa	Diseñar para la presión diferencial y posibles fragmentos; analizar corrientes inducidas si hay metal en el entrehierro.
Apoyos del rotor	Rodamientos mecánicos compatibles con vacío en banco; apoyos magnéticos activos en piloto	Simplicidad inicial; menos contacto y control dinámico después	Los apoyos magnéticos consumen energía y necesitan apoyos de emergencia. Medir pérdidas y fallos.
Bomba y juntas	Bomba de vacío y juntas dimensionadas según la presión óptima medida	Menor resistencia aerodinámica que en aire	Consumo auxiliar, fugas y mantenimiento; optimizar potencia neta y no presión mínima.
Refrigeración	Estátor refrigerado por conducción y sensores en puntos calientes	Evacúa el calor de los devanados fuera de la cámara	En vacío no hay convección; calcular conducción, radiación y temperatura de los imanes. [5]
Electrónica	Rectificador e inversor industriales con protecciones	Tensión y frecuencia útiles, control del par	Pérdidas, armónicos, compatibilidad electromagnética y protección de interfaz.
Estructura y vibración	Eje, uniones y cimentación verificados; rotor equilibrado	Operación repetible y vibración limitada	Comprobar velocidades críticas, fatiga, sobrevelocidad, barreras y equilibrado según ISO 21940. [6]

Protocolo de ensayo y criterios de decisión

Utilizar un banco encerrado, a baja tensión y sin conexión en paralelo con la red, operado por profesionales cualificados. Definir previamente carga, velocidad, nivel de vacío, temperatura inicial y duración; registrar simultáneamente potencia activa del motor, salida de CA, consumo de bomba y controles, par, revoluciones y temperaturas. Repetir ensayos de circuito abierto y con carga tanto en aire como en cámara evacuada. Registrar al principio y al final la velocidad del rotor y toda reserva de energía; incluir incertidumbre de medida. [2, 4]

Magnitud	Definición medida	Interpretación requerida
Balance eléctrico	CA útil – entrada eléctrica del motor – auxiliares	Medir la entrada al motor en su fuente; documentar por separado cualquier otro aporte de energía.
Rendimiento de conversión	Energía CA útil / energía mecánica en eje en un ciclo definido	Comparar con generador equivalente sin cámara de vacío.
Rendimiento del ciclo	CA descargada / CA cargada, incluidos auxiliares y espera	Inferior al 100% en el ciclo completo.
Energía inicial y final	$\frac{1}{2} J\omega^2$ más cambio de batería o bus CC	Evitar que una descarga oculta parezca generación autónoma.
Valor económico	Coste total actualizado / MWh realmente entregados	Comparar igual servicio, duración y fiabilidad.

Implantación práctica en el territorio italiano

La primera aplicación razonable es suavizar rápidamente la producción fotovoltaica o una carga industrial, con fuente identificable y un servicio de volante cuantificable. Para elegir lugar, usar series solares de PVGIS, medir la demanda y comprobar capacidad de conexión y espacio con el operador de red. Sicilia, el sur y las zonas industriales del norte no se pueden ordenar por una media de irradiación. [18, 19]

Fase	Lugar y actividad	Prueba para avanzar
1 Diseño	Universidad o laboratorio industrial: simulación electromagnética, esfuerzos del rotor, coste inicial y análisis de fallos.	Seleccionar un servicio de segundos o minutos y una alternativa real.
2 Banco	Instalación de pruebas confinada: demostrador de baja tensión, contadores calibrados y ensayo aire frente a vacío.	Avanzar solo si el beneficio neto supera consumo de bomba y coste añadido.
3 Piloto	Centro industrial junto a demanda variable o solar: duración, mantenimiento, ciclo de vida y seguridad.	Comparar €/MWh del servicio y fiabilidad con baterías y supercondensadores.
4 Red	Si habrá paralelo con red, consultar al distribuidor; diseñar interfaz, protecciones, medidas y solicitud.	Aprobar conexión antes de verter; cualificar el servicio solo si cumple requisitos.

En baja tensión, comprobar CEI 0-21:2026-07; en media tensión, CEI 0-16:2026-07. El TICA de ARERA define los trámites aplicables a la conexión de instalaciones de producción. La clasificación del volante y su posible

integración en una instalación incentivada requieren confirmación específica del distribuidor y del GSE. Consultar el SUAP municipal para permisos industriales aplicables y los requisitos vigentes de Terna para cualquier servicio a la red, sin presumir ingresos ni ayudas. Las comprobaciones de seguridad de máquina, recinto, electricidad e incendios dependen de la configuración y el lugar. [14–18]

Comparación mundial de tecnologías eléctricas

La matriz separa función, ventajas, limitaciones y análisis particulares. Los recursos primarios no son equivalentes a un convertidor o a un almacén de energía. Coste e impacto ambiental dependen del emplazamiento y sistema eléctrico. “Plasma” se refiere aquí a fusión controlada, aún en desarrollo para electricidad comercial. [7–13]

Tecnología y función	VENTAJAS	LIMITACIONES	Análisis especial
Bobina NdFeB y vacío conversión más almacenamiento corto	Respuesta muy rápida; potencialmente muchos ciclos; imanes sin excitación; menor fricción del aire.	Sin energía primaria; duración limitada por masa y velocidad; consumos de bomba y apoyos; riesgo mecánico y materiales críticos.	Balance cerrado con fuente externa, eficiencia de ciclo, pérdidas en espera, contención, €/MW de respuesta y €/MWh útil.
Hidráulica recurso primario	Tecnología madura; embalses modulables; larga vida.	Dependencia de caudales y sequías; efectos sobre ríos y hábitats; obra civil y permisos.	Hidrología plurianual, ecología, sedimentos, seguridad de presas y clima.
Fisión nuclear recurso primario	Potencia firme programable; bajas emisiones directas de CO ₂ ; alta densidad de energía.	Capital y plazos elevados; combustible y residuos radiactivos; desmantelamiento y aceptación.	Ciclo de combustible, residuos, agua de refrigeración, financiación y riesgo de ejecución.
Fotovoltaica recurso primario	Modular y apta para tejados; sin combustible en operación; bajas emisiones operativas.	Depende del día y la meteorología; posibles refuerzos de red; materiales y fin de vida.	Serie PVGIS local, demanda horaria, autoconsumo, sombras, red y reciclaje.
Eólica recurso primario	Sin combustible; escala industrial; bajas emisiones en operación.	Viento variable; efectos visuales, sonoros y en fauna; necesidad de flexibilidad.	Distribución de vientos, cimentación, impactos ecológicos, vertidos y conexión.
Gas natural recurso primario fósil	Programable y flexible; infraestructura madura; útil en reservas y puntas.	CO ₂ y metano en la cadena; exposición al precio del gas e importaciones.	Precio y suministro, fugas de metano, factor de uso y coste del carbono.
Carbón y fuelóleo recursos fósiles	Programables; infraestructuras heredadas y ciertos usos de respaldo.	Altas emisiones y contaminación; extracción, transporte, residuos y costes sanitarios.	Ciclo de vida, salud, combustible, posible captura de CO ₂ y retirada.
Geotermia recurso primario	Generación estable donde existe recurso; posible suministro de calor útil.	Limitaciones geográficas y de perforación; inversión inicial e incertidumbre.	Temperatura y caudal, reinyección, sismicidad inducida y química de fluidos.

Tecnología y función	VENTAJAS	LIMITACIONES	Análisis especial
Biomasa y biogás recurso condicionado	Programables con combustible almacenado; aprovechan residuos sostenibles.	Emisiones locales y logística; competencia por tierra y carbono de ciclo incierto.	Balance real de carbono, origen del material, calidad del aire y transporte.
Mareas y olas recurso primario	Recurso marino previsible en algunos lugares; diversificación.	Pocos sitios adecuados; corrosión y mantenimiento; madurez desigual.	Energía local, impacto marino, fatiga, acceso y cables.
Fusión de plasma investigación	Posible futura potencia firme baja en carbono si se consigue la planta industrial.	Sin central comercial demostrada en este análisis; materiales, tritio y conversión de calor pendientes.	Distinguir ganancia del plasma Q de electricidad neta y consumo total. ITER no producirá electricidad. [9]

Comparación de costes y conveniencia a largo plazo

Son costes nivelados, no tarifas al consumidor ni presupuestos para Italia. IRENA ofrece medias mundiales de plantas inauguradas en 2025; EIA modela plantas estadounidenses que entrarían en servicio en 2031, con recuperación en 30 años, coste de capital del 7,27% y fiscalidad estadounidense. Todas las cifras son dólares de 2025 por MWh. Ambos estudios tienen mercados y criterios distintos: sus filas no constituyen una clasificación única. [20, 21]

Tecnología y referencia	USD 2025/MWh	Interpretación del importe
Eólica terrestre · IRENA mundial 2025	33	LCOE de nueva generación; depende del viento local.
Solar FV · IRENA mundial 2025	44	LCOE de nueva generación; producción variable.
Hidráulica · IRENA mundial 2025	62	LCOE; dependen del lugar, caudal e infraestructura.
Eólica marina · IRENA mundial 2025	78	LCOE; instalación y operación dependen del lugar.
Bioenergía · IRENA mundial 2025	86	LCOE; importan logística, origen y coste del material.
Geotermia · IRENA mundial 2025	89	LCOE; determinantes el recurso geológico y la perforación.
Gas · mercados caros, incluida Italia	cerca de 100	LCOE orientativo de IRENA; depende del gas y del diseño.
Gas ciclo combinado · EIA EE. UU. 2031	77,46	LCOE de escenario, no presupuesto para Italia.
Nuclear avanzado · EIA EE. UU. 2031	87,81	LCOE de escenario; evaluar financiación, residuos y riesgo.
Batería · EIA EE. UU. 2031	152,61	LCOS de almacenamiento diario, distinto del volante breve.

Carbón, fuelóleo, mareas y olas, fusión y el volante propuesto carecen aquí de un precio homogéneo transferible a Italia; no se debe inventar. Comparar LCOE de generación y LCOS de almacenamiento como si prestaran el mismo servicio induce a error: el volante necesita recibir la energía que después devuelve. Un proyecto real exige ofertas, perfil horario, capacidad de red, cargos y análisis de riesgos. [20–22]

Escenario comprobable de coste del volante a largo plazo

Cálculo meramente hipotético, no precio comercial: 1 MW de potencia, 0,25 MWh útiles por descarga (15 minutos), inversión instalada de 800.000 €, mantenimiento ordinario de 20.000 €/año, vida de 20 años,

descuento del 7%, coste de oportunidad de carga de 80 €/MWh entrante y rendimiento CA–CA supuesto del 85%, incluidos auxiliares en el perfil considerado. Factor anual de capital = $7\%/[1 - (1,07)^{-20}] = 0,09439$; coste fijo anual = 95.514 €. Con c ciclos completos al día, energía entregada $Q = 0,25 \times 365 \times c$ MWh/año y coste orientativo = $95.514/Q + 80/0,85$ €/MWh. Medir de nuevo el rendimiento para cada tiempo de espera. [22]

Ciclos completos al día	MWh útiles al año	Coste modelado €/MWh	Interpretación
1	91,25	1.141	Poco uso: domina el capital.
8	730	225	Coste fijo repartido entre más energía.
24	2.190	138	Exige mucho uso y vida útil demostrada.

Solo bajo estas hipótesis, llegar a 150 €/MWh exige unos 19 ciclos completos al día. Si la inversión sube a 1,6 millones €, con 24 ciclos el modelo asciende a unos 172 €/MWh; averías, sustituciones extraordinarias, conexión e impuestos pueden aumentarlo. Una ventaja a largo plazo sería posible en servicios rápidos y frecuentes si los ensayos de fatiga, fallos y consumo demuestran la vida útil, y si una oferta de batería o supercondensador para el mismo servicio resulta menos favorable. Contar ingresos por reserva rápida solo con contrato: ingreso anual por capacidad + $Q \times (\text{precio de venta} - \text{coste de carga/rendimiento})$ debe cubrir como mínimo el coste anual completo. [21, 22]

Riesgos ambientales nucleares en la comparación económica

La fisión ofrece potencia continua con bajas emisiones directas de CO₂; un volante no puede sustituirla sin otra fuente primaria. Para comparar inversiones a largo plazo, comprobar la financiación y los efectos de la minería del uranio y el ciclo de combustible, desmantelamiento, aislamiento de residuos radiactivos, agua de refrigeración y vertido térmico, protección de la planta, responsabilidad y planes ante accidentes infrecuentes pero potencialmente graves. El OIEA exige análisis del ciclo de vida y fondos solventes para el depósito final; la AIE identifica retrasos, sobrecostes y coste financiero en nuevas centrales. No aplicar un recargo arbitrario único al LCOE nuclear: revisar qué obligaciones incluye el estudio y simular situaciones adversas. El volante presenta otros riesgos — tierras raras, rotura del rotor, contención, electricidad de la bomba e impactos de la fuente de carga — que también cuentan. [21, 23–25]

Comparación específica de almacenamiento

Sistema	Uso más adecuado	Ventajas	Límites y prueba
Volante en vacío	Segundos a minutos y muchos ciclos.	Potencia y respuesta rápida; sin envejecimiento electroquímico.	Pérdidas en espera, contención y rotor; medir rendimiento según tiempo de reposo.
Batería electroquímica	Desplazar energía desde decenas de minutos hasta horas según diseño.	Modular y mucha energía por superficie.	Degradación, gestión térmica y fin de vida; comparar con el mismo perfil.
Bombeo hidráulico	Grandes energías y más duración donde hay geografía adecuada.	Gran escala y larga vida.	Sitios escasos, agua, ambiente y obra civil extensa. [12]

Sistema	Uso más adecuado	Ventajas	Límites y prueba
Supercondensadores	Pulsos muy breves de alta potencia.	Respuesta rápida y muchos ciclos.	Poca energía específica y pérdidas en espera; comparar por tiempo de descarga.

Análisis económicos y ambientales imprescindibles

Calcular LCOE solo para una cadena generadora cuya fuente primaria esté identificada. Para almacenamiento, usar coste de la energía entregada tras carga, pérdidas y mantenimiento, valorando potencia y rapidez por separado. Comparar el mismo servicio, periodo y coste de capital. Incorporar emisiones y materiales durante todo el ciclo de vida, tierras raras, ruido y seguridad. Una ciudad hipotética con 100 MW medios demanda 2,4 GWh al día; un volante de 100 MWh útiles la cubriría una hora y después necesitaría recarga. Es un ejemplo, no una predicción del mercado. [3, 4, 8, 13]

Conclusión técnica

El primer objetivo es medir si el vacío mejora eficiencia y coste frente a un alternador y si el volante compite con otros sistemas de almacenamiento. A escala urbana se requieren una fuente primaria, conexión a la red, protecciones y ensayos independientes. Los costes ultra bajos siguen siendo una hipótesis hasta contar con medidas.

Giuseppe Carilli | LinkedIn: <https://es.linkedin.com/in/giuseppe-carilli-a03805b1>

Fonti tecniche Technical sources Fuentes técnicas

Fonti primarie e documenti tecnici consultati il 24 settembre 2026. I riferimenti [1–25] sono condivisi fra le tre versioni linguistiche.

- [1] MIT OpenCourseWare — Faraday induction and generator load torque
- [2] NASA Glenn — magnetic bearings and flywheel vacuum testbed
- [3] US Department of Energy — Critical Materials Assessment 2023
- [4] US Department of Energy — Storage Cost and Performance Characterization
- [5] NASA — Thermal control and heat transfer in vacuum
- [6] ISO — ISO 21940-1 Rotor balancing
- [7] International Energy Agency — Renewables 2025
- [8] International Energy Agency — Electricity 2025
- [9] ITER — What will ITER do and what power its plasma does not export
- [10] International Energy Agency — The Future of Geothermal Energy
- [11] IAEA — Spent fuel management
- [12] US Department of Energy — Pumped Storage Hydropower
- [13] National Laboratory of the Rockies — ATB 2024 LCOE definitions
- [14] ARERA — Testo integrato delle connessioni attive TICA
- [15] CEI — Edizioni 2026-07 delle norme CEI 0-16 e CEI 0-21
- [16] GSE — Sistemi di accumulo e comunicazioni per impianti esistenti
- [17] SUAP — Sportello Unico per le Attività Produttive
- [18] Terna — Fast Reserve 2026 availability notice
- [19] European Commission JRC — PVGIS site-specific solar assessment
- [20] IRENA — Renewable Power Generation Costs in 2025, executive summary
- [21] US EIA — Levelized Costs of New Generation Resources, AEO 2026
- [22] US Department of Energy — 2022 Grid Energy Storage Cost and Performance Assessment
- [23] IAEA — INPRO methodology for nuclear environmental, safety and waste assessment
- [24] IEA — The Path to a New Era for Nuclear Energy, financing
- [25] IAEA — Costing Methods and Funding Schemes for Radioactive Waste Disposal