

# Intelligenza artificiale e robot: i due pilastri abilitanti della transizione energetica

L'integrazione tra robotica ed intelligenza artificiale rappresenta un'evoluzione significativa, in cui le capacità fisiche avanzate dei robot si combinano con la potenza analitica e decisionale dell'IA. Questo connubio consente di sviluppare sistemi autonomi in grado di percepire l'ambiente, adattarsi a condizioni variabili ed eseguire operazioni con un elevato livello di efficienza, abilitando al meglio le richieste di manutenzione predittiva, ottimizzazione dei processi produttivi e gestione delle infrastrutture energetiche sopra introdotti.

DOI 10.12910/EAI2025-014

di Stefano Chiesa, Saverio De Vito, Sofia Dutto, Marco Paoloni, Gabriele Piantadosi, Sergio Taraglio, Andrea Zanela e Girolamo Di Francia; Direzione Tecnologie Energetiche e Fonti rinnovabili - Laboratorio Energia e Data Science - ENEA

**U**n sistema energetico prevalentemente dipendente da fonti rinnovabili è caratterizzato da un grado elevato di incertezza produttiva dipendente sia dalla intrinseca natura non programmabile di queste fonti che dalle particolari caratteristiche di gestione operativa di centrali eoliche e fotovoltaiche. Tutto ciò, assieme al quasi perfetto bilanciamento cui deve tendere la rete elettrica in ogni istante, impone l'utilizzo sempre più pervasivo di tecniche di intelligenza artificiale, IA per ottimizzare la previsione della produzione di energia in relazione alle condizioni meteorologiche, per predire deterioramenti e guasti delle singole centrali e, infine, anche per la gestione dello stesso mercato energetico, caratterizzato sempre più da volumi crescenti di energie rinnovabili scambiati in tempi brevi.

In Figura 1 è ad esempio riportato l'andamento nel tempo delle transazioni energetiche sul mercato di inter-

scambio intra-giornaliero europeo. Come si vede l'andamento cresce rapidamente col crescere della penetrazione delle energie rinnovabili nei sistemi energetici di ciascun paese dell'Unione in ragione della maggio-

re affidabilità a breve termine nelle tecniche IA di previsione della produzione. Nel 2022 si registravano su questo mercato, oltre 10 transazioni al minuto. Evidentemente tutto ciò non sarebbe possibile se, asservita

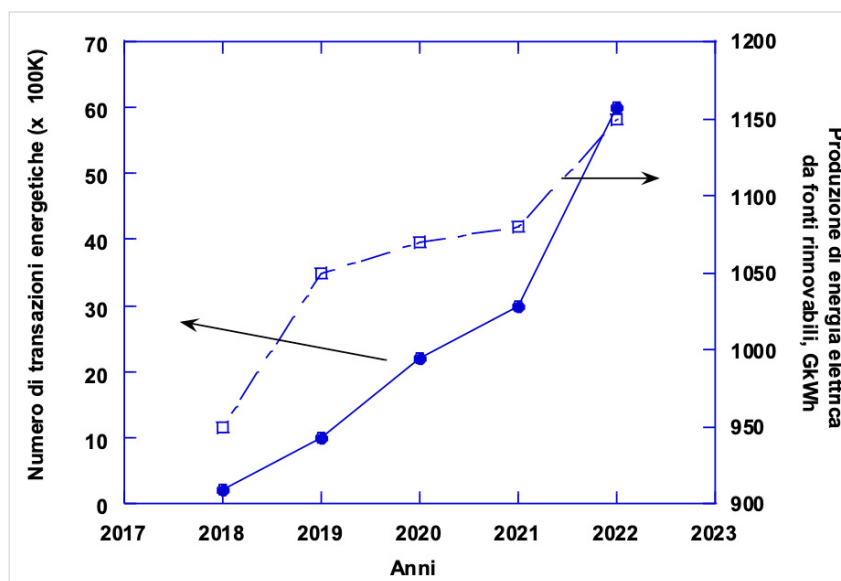


Figura 1: Transazioni energetiche sul mercato intraday UE e penetrazione delle rinnovabili

a questo mercato, non ci fosse una piattaforma digitale (XBID) capace di gestire le transazioni commerciali su questa scala temporale. A tutto ciò devono poi aggiungersi le tematiche di certificazione in sicurezza che accompagnano tutta la filiera di produzione dell'energia, dalla realizzazione degli impianti e fino alla commercializzazione del prodotto. **In questo contesto l'integrazione tra robotica ed intelligenza artificiale rappresenta un'evoluzione significativa, in cui le capacità fisiche avanzate dei robot si combinano con la potenza analitica e decisionale dell'IA. Questo connubio consente di sviluppare sistemi autonomi in grado di percepire l'ambiente, adattarsi a condizioni variabili ed eseguire operazioni con un elevato livello di efficienza, abilitando al meglio le richieste di manutenzione predittiva, di ottimizzazione dei processi produttivi e di gestione delle infrastrutture energetiche sopra introdotti.**

Dunque transire dal sistema energetico in cui oggi siamo, ad uno più sostenibile non potrebbe essere possibile senza i livelli che abbiamo oggi raggiunto nei sistemi di calcolo e nelle tecniche di trattamento di grandi moli di dati. In questo lavoro esaminiamo brevemente i due pilastri della transizione: l'IA e la robotica, descrivendone il loro uso nell'ambito delle energie rinnovabili.

### L'intelligenza artificiale

**L'intelligenza artificiale si sta rivelando uno degli strumenti più potenti nel supporto alla gestione ed ottimizzazione delle energie rinnovabili.** Grazie alla sua capacità di analizzare enormi quantità di dati e generare previsioni precise, l'IA sta migliorando la gestione degli impianti, l'efficienza energetica e la sostenibilità del settore. Ed è grazie a tecniche avanzate di machine learning, visione artificiale

ed analisi predittiva, che l'IA consente ai robot di monitorare impianti solari, eolici e idroelettrici, rilevando anomalie, ottimizzando la manutenzione e migliorando le prestazioni complessive. Inoltre, algoritmi di previsione energetica e meteorologica permettono di anticipare variazioni nelle condizioni operative, massimizzando l'efficienza degli impianti e garantendo una gestione più sostenibile delle risorse. **Le piattaforme software basate sull'intelligenza artificiale supportano la gestione delle energie rinnovabili analizzando dati in tempo reale per ottimizzare il forecasting energetico, la manutenzione predittiva e le transazioni. Questi strumenti migliorano l'efficienza degli impianti e contribuiscono ad una pianificazione più precisa e sostenibile della produzione e distribuzione energetica.**

- **Forecasting del prezzo.** La previsione dei prezzi dell'energia è una componente cruciale in mercati energetici sempre più dinamici e regolamentati. I prezzi sono influenzati da una combinazione di fattori, tra cui l'andamento della domanda, le condizioni di offerta, le politiche regolatorie e le variabili macroeconomiche. Algoritmi avanzati di intelligenza artificiale analizzano dati storici, trend di mercato e variabili esterne, come condizioni climatiche e politiche ambientali per generare stime precise e tempestive. Il forecasting del prezzo dell'energia consente agli operatori di mercato di anticipare fluttuazioni economiche, pianificare investimenti e ottimizzare le strategie di trading.

Queste previsioni non solo migliorano la redditività per produttori e distributori, ma aiutano anche i consumatori a prendere decisioni informate su quando acquistare energia, riducendo i costi. La capacità di prevedere le dinamiche di prezzo è inoltre essenziale per stabilire strategie di lungo termine, garantendo maggiore stabi-

lità e sostenibilità all'intero sistema energetico.

- **Transazioni energetiche. Lottizzazione delle transazioni energetiche, particolarmente rilevante nei mercati organizzati in sessioni day-ahead e intra-day, trae grande beneficio dall'accuratezza delle previsioni basate sull'intelligenza artificiale.** Nei mercati day-ahead, gli operatori devono comunicare al gestore una previsione della produzione oraria per il giorno successivo entro una scadenza specifica, stabilita a livello nazionale, per consentire l'acquisto all'ingrosso e la stipula di contratti. Errori nelle previsioni possono generare penalità economiche significative, sia per sovrapproduzione che per sottoproduzione, con impatti rilevanti sui costi operativi. Dunque, strumenti basati sull'intelligenza artificiale per la previsione dei prezzi, della produzione energetica e delle condizioni meteorologiche, migliorano la sostenibilità economica delle operazioni, ma si rivelano cruciali anche nel supporto a modelli decentralizzati come le comunità energetiche, che potrebbero beneficiare di previsioni più accurate per promuovere l'autoconsumo e gestire in modo più efficiente le risorse condivise.

- **Forecasting dell'energia. La capacità di prevedere con precisione la produzione energetica su orizzonti temporali diversificati, che spaziano da pochi minuti a diversi giorni, riveste un ruolo strategico nella gestione delle risorse rinnovabili.** Tale capacità risulta di particolare rilievo per i sistemi fotovoltaici, la cui produzione è fortemente influenzata da fattori ambientali e operativi. L'applicazione di modelli avanzati di intelligenza artificiale consente di affrontare in maniera efficace l'incertezza intrinseca alla variabilità delle fonti rinnovabili, offrendo previsioni più accurate e dettagliate. Queste analisi permettono una piani-

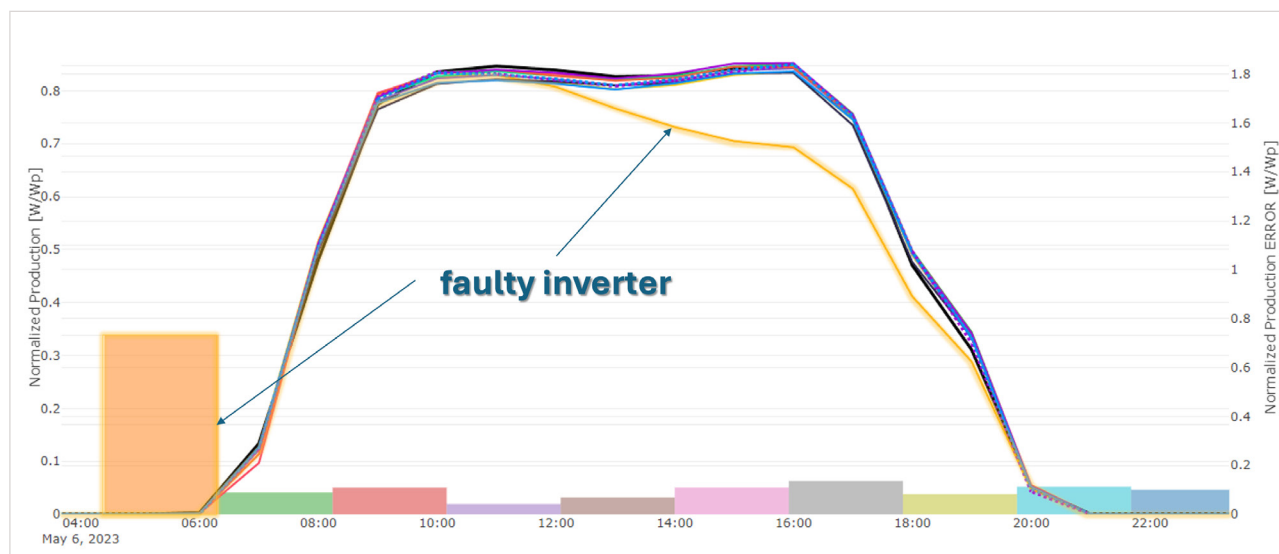


Figura 2: Predizione dei guasti dal confronto tra potenza prevista e potenza misurata a livello di inverter di impianto

ficazione energetica ottimizzata, favorendo un utilizzo più efficiente delle risorse disponibili e riducendo i rischi derivanti da stime imprecise della produzione.

- **Forecasting meteorologico.** La produzione energetica da fonti rinnovabili, quali il fotovoltaico e l'eolico, è fortemente condizionata dalla variabilità delle condizioni climatiche, generando sfide significative per la pianificazione e la gestione degli impianti. **Questa incertezza può essere affrontata attraverso l'impiego di modelli avanzati di forecasting meteorologico basati sull'intelligenza artificiale, progettati per prevedere con precisione parametri fondamentali come l'irraggiamento solare e la velocità del vento.** Tali strumenti riducono le incertezze operative, ottimizzano l'efficienza dei sistemi di produzione e favoriscono un utilizzo più sostenibile delle risorse rinnovabili [1].

- **Manutenzione predittiva.** La manutenzione predittiva, supportata da algoritmi di intelligenza artificiale, rappresenta un approccio strategico per ottimizzare l'efficienza e l'affidabilità degli impianti energetici ali-

mentati da fonti rinnovabili. Attraverso l'analisi combinata di dati storici e in tempo reale, tali sistemi consentono di rilevare tempestivamente segnali di guasto o degrado, permettendo interventi mirati prima che si verifichino interruzioni o danni rilevanti. Questo approccio non solo limita i costi legati a interventi straordinari, ma incrementa la disponibilità degli impianti, assicurando una produzione energetica continua e performante. L'adozione della manutenzione predittiva promuove, inoltre, una gestione più resiliente e sostenibile delle infrastrutture legate alle energie rinnovabili. Nella Figura 2 è ad esempio riportato come attraverso il confronto fra potenza prevista e potenza osservata si possono individuare malfunzionamenti in un impianto fotovoltaico [2].

**I robot.** L'integrazione della robotica nel settore delle energie rinnovabili rappresenta una delle soluzioni più innovative per migliorare l'efficienza, ridurre i costi operativi e affrontare le sfide legate alla manutenzione aumentando allo stesso tempo la sicurezza sul lavoro per gli operatori. L'utilizzo di approcci basati su robot

dotati di strumenti di Intelligenza Artificiale permette, inoltre, un'analisi predittiva sul comportamento futuro di un componente o di una infrastruttura, consentendone il monitoraggio ed una manutenzione con una notevole riduzione dei tempi di fermo. In particolare, la robotica trova applicazione nei sistemi di produzione di diverse tipologie di energia rinnovabile come gli impianti solari termodinamici, i fotovoltaici, gli eolici, gli idroelettrici ed anche nelle infrastrutture di trasmissione elettrica [3]. Di seguito ne viene riportato l'utilizzo in vari ambiti connessi alle energie rinnovabili.

- **Solare Termodinamico.** Nei sistemi solari termodinamici, i robot sono determinanti per compiti come la pulizia delle superfici riflettenti, il monitoraggio delle strutture e la manutenzione predittiva. Operazioni come la pulizia automatizzata degli specchi migliorano significativamente l'efficienza energetica, soprattutto in condizioni climatiche difficili quali quelle presenti negli impianti in zone desertiche. Oltre all'aspetto di pulizia, si usano correntemente droni aerei per l'ispezione dall'alto delle superfici

riflettenti, riuscendo a rilevare difetti di allineamento o usura degli impianti con una estrema precisione.

- **Fotovoltaico.** Anche nel settore fotovoltaico, i robot autonomi sono progettati ed utilizzati per la pulizia dei pannelli solari, eliminando polvere e detriti che possono ridurre la produzione di energia.

Alcuni di questi sistemi utilizzano dispositivi che non fanno uso di acqua, il che li rende particolarmente utili nelle aree desertiche. Questi sistemi utilizzano tecnologie avanzate quali gli algoritmi di machine learning per l'ottimizzazione delle operazioni di pulizia e manutenzione. Anche in questo scenario, l'impiego di droni per l'ispezione visiva e termografica consente di identificare guasti con tempestività e quindi monitorare la durata dei pannelli, permettendo un utilizzo ottimizzato dell'intero campo fotovoltaico. Esistono anche sistemi sperimentali per la costruzione automatica di impianti fotovoltaici, dove la soluzione robotica assembla e posiziona i singoli pannelli a terra.

- **Eolico.** Per quanto riguarda l'energia eolica, la robotica è impiegata nell'ispezione e manutenzione delle turbine, sia negli impianti a terra che in quelli offshore. Vengono utilizzati sia droni volanti che robot in grado di arrampicarsi sulle torri che sostengono le turbine. In Figura 3 è riportato un esempio di questi robot che, dotati di sensori avanzati, monitorano sia le condizioni delle pale eoliche che delle torri, rilevando con prontezza danni strutturali e usura. Esistono anche soluzioni in grado di monitorare la parte sommersa delle torri negli impianti offshore, che sono soggetti ad una usura più intensa, legata alla salinità del mare. L'utilizzo di robot negli impianti eolici riduce fortemente i rischi per il personale, migliorando la sicurezza e garantendo operazioni più efficienti.



Figura 3: Robot "arrampicatore" per la manutenzione di torri di generatore eolico

- **Idroelettrico.** Negli impianti idroelettrici, i robot svolgono un ruolo cruciale nel monitoraggio dell'integrità degli invasi, identificando problemi quali deformazioni, crepe, erosioni e usura. Robot arrampicatori, droni e robot sottomarini consentono l'ispezione della struttura, analizzando i dati forniti da telecamere, sensori di tipo ultrasonico e georadar sia sopra che sotto il livello dell'acqua. Un'altra applicazione in cui i robot rivestono un ruolo importante è la manutenzione delle turbine e dei condotti, grazie a sofisticate tecnologie di elaborazione immagini, possono individuare problemi come corrosione o danni ai materiali

senza la necessità di interrompere il funzionamento degli impianti. In Figura 4 è riportato un esempio dell'utilizzo di questi robot proprio nella manutenzione di una centrale idroelettrica.

- **Linee elettriche.** Anche nella manutenzione delle linee elettriche, i robot sono ampiamente utilizzati per ispezionare i tralicci, le linee di conduzione ed i loro accessori quali, ad esempio, gli isolatori e gli smorzatori di vibrazione, infrastrutture e rilevare anomalie termiche o meccaniche, prevenendo guasti e migliorando l'affidabilità della rete di trasmissione. Sono utilizzati principalmente due tipi di robot: i droni volanti e quelli in grado di muoversi lungo le linee conduttrici usando carrelli con ruote o degli arti dotati di dispositivi prensili per aggrapparsi a linee e tralicci. Per non interrompere il servizio, le ispezioni sono di solito eseguite con le linee sotto tensione, per cui i droni devono essere mantenuti a distanza di sicurezza. Entrambi i tipi sono di solito equipaggiati con telecamere (nel visibile ed in altre bande); quelli che si muovono sulle linee, avvalendosi della loro prossimità, possono anche trasportare altri tipi di sensore e perfino qualche utensile per eventuali interventi manutentivi. A parità di tempo di impiego, i droni

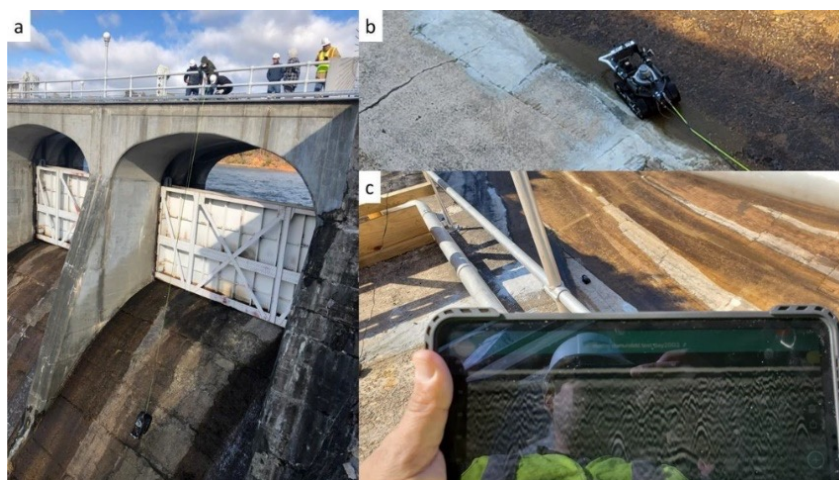


Figura 4. Robot per la manutenzione di impianti idroelettrici

raccogliono una mole molto più grande di dati, che richiede l'uso di algoritmi di intelligenza artificiale per la sua elaborazione. In generale, l'adozione della robotica nel settore delle energie rinnovabili sta rivoluzionando le modalità di gestione degli impianti, rendendoli più sostenibili, sicuri ed efficienti. L'evoluzione continua della tecnologia offre così opportunità sempre maggiori per affrontare le sfide della transizione energetica.

### Conclusioni

**Con questo lavoro abbiamo cercato di mostrare come Intelligenza Artificiale e robotica, intesa come braccio operativo della IA, costituiscono oggi elementi imprescindibili della transizione energetica.** Non è un caso, in effetti che, se mentre fino a soli pochi anni fa la professionalità più richiesta in ambito energetico era quella dell'esperto di dominio, oggi in tutte

le maggiori aziende di settore le professionalità più richieste sono quelle di **data scientist oppure di ingegnere informatico**. L'Italia vanta una buona tradizione in tal senso. Ma il settore cresce e si evolve molto rapidamente: viste le limitate risorse che abbiamo a disposizione, dobbiamo pensare a processi di svecchiamento e riallineamento a questa realtà.

*per info: [girolamo.difracia@enea.it](mailto:girolamo.difracia@enea.it)*

### Riferimenti bibliografici

1. Gabriele Piantadosi, Sofia Dutto, Antonio Galli, Saverio De Vito, Carlo Sansone, Girolamo Di Francia, Photovoltaic power forecasting: A Transformer based framework, Energy and AI, Volume 18, 2024, 100444.
2. AI in Industry: Activities of the CINI-AIIS Lab at University of Naples Federico II / Del Prete, A.; Dutto, S.; Ferraro, A.; Galli, A.; Moscatto, V.; Piantadosi, G.; Sansone, C.; Sperli, G.. - 3762:(2024), pp. 528-533. (Intervento presentato al convegno 2024 Ital-IA Intelligenza Artificiale - Thematic Workshops, Ital-IA 2024 tenutosi a ita nel 2024).
3. Taraglio, S.; Chiesa, S.; De Vito, S.; Paoloni, M.; Piantadosi, G.; Zanela, A.; Di Francia, G. Robots for the Energy Transition: A Review. Processes 2024, 12, 1982. <https://doi.org/10.3390/pr12091982>