Robotica intelligente ed *embodied AI*: scenari, rischi e responsabilità verso il 2050

GIORGIO METTA, ARASH AJOUDANI, VALENTINA MALCOTTI, GIOVANNA GIUFFRÈ

NOVEMBRE 2026

Abstract

I progressi scientifici e tecnologici nella robotica e nell'intelligenza artificiale (IA) hanno aperto a enormi cambiamenti, fuori dal software e dentro il mondo fisico: nei luoghi di lavoro, della cura e della vita quotidiana. È la cosiddetta *embodied AI*[1], per usare un'espressione inglese.

Assumere il 2050 come orizzonte significa interrogarsi sugli effetti strutturali di lungo periodo che sistemi dotati di corpo, autonomia e capacità di interazione avranno su organizzazione del lavoro, modelli di cura, relazioni di fiducia e distribuzione delle responsabilità.

Nel contesto europeo[2], queste trasformazioni si intrecciano con processi già in atto: dall'invecchiamento demografico alla pressione sui sistemi di welfare, fino alla ridefinizione del lavoro umano e alla crescente competizione globale sulle tecnologie strategiche.

Questo *Future brief* esplora futuri possibili della robotica intelligente[3] attraverso un approccio di *foresight*, mettendo in luce incertezze critiche e traiettorie alternative orientabili tramite scelte di governance, investimenti e gestione dell'innovazione[4].

L'invito è a spostare lo sguardo dalla robotica come singola tecnologia a infrastruttura sociale di lungo periodo. La robotica non pone soltanto questioni di sviluppo tecnico, bilanciamento regolatorio e implicazioni economiche, ma chiama a una scelta di civiltà su come organizzare, nel tempo, il rapporto tra esseri umani, macchine e società.

Parole chiave

ROBOTICA INTELLIGENTE, AUTOMAZIONE, CO-EVOLUZIONE, GOVERNANCE, RESPONSABILITÀ.

1 Con *embodied AI* si intende un paradigma della robotica intelligente in cui percezione, azione e apprendimento sono strettamente integrati e le capacità del sistema emergono dall'interazione continua tra un agente dotato di un corpo (fisico o simulato) e l'ambiente.

2 L'analisi assume come principale riferimento il contesto europeo, pur considerando le dinamiche globali nella misura in cui incidono sulle traiettorie di sviluppo della robotica intelligente in Europa.

3 Ai fini del presente brief, per *robotica intelligente* si intendono sistemi robotici autonomi in grado di percepire l'ambiente, elaborare informazioni, pianificare e svolgere azioni finalizzate al raggiungimento di uno o più obiettivi, integrando tecniche di controllo, pianificazione e intelligenza artificiale.

4 L'analisi presenta due principali limiti: metodologico, poiché gli scenari proposti si configurano come ipotesi e non come esito di un percorso completo di foresight; e di scopo, poiché non costituisce una roadmap di politica industriale né un piano di investimenti, ma un contributo di orientamento strategico rivolto principalmente ai decisori pubblici, pur offrendo elementi di riflessione anche alla comunità scientifica e all'ecosistema produttivo. La cornice di riferimento dei *Future brief* è consultabile qui.

La posta in gioco

Quando l'intelligenza artificiale prende corpo: dalla promessa tecnologica all'infrastruttura sociale

Quando la robotica intelligente entrerà stabilmente nei luoghi del lavoro, della cura e dei servizi[5], smetterà di essere una tecnologia sperimentale per diventare parte delle infrastrutture che regolano il funzionamento quotidiano della società. È in questo passaggio dai prototipi alla "normalizzazione" che si concentrano i rischi maggiori: scelte oggi percepite come tecniche tendono a consolidarsi nel tempo, producendo effetti cumulativi difficili da correggere. Il vero impatto non emerge nella fase sperimentale, ma quando queste tecnologie si innestano stabilmente negli apparati sociali.

Verso il 2050

Per la robotica, l'adozione su larga scala è plausibile attorno al 2050: un orizzonte abbastanza lontano da consentire **maturazione tecnologica**[6] in molteplici ambiti — dalla manifattura alla sanità, dalla logistica all'agricoltura, dalla gestione delle emergenze all'assistenza alla persona, fino ai servizi urbani e alla tutela ambientale — ma sufficientemente vicino da ricadere sotto la responsabilità delle decisioni attuali. Guardare a questa soglia, anche attraverso la lente del *technology foresight*[7], significa interrogarsi oggi non solo su quali tecnologie diventeranno disponibili, ma su quali modelli di organizzazione sociale, economica e istituzionale contribuiranno a costruire, nonché su quali modelli si affermeranno e con quali effetti sistemici su processi decisionali, competenze e relazioni sociali.

Il 2050 si conferma una scadenza chiave per le principali strategie globali, dalla sfida climatica alla transizione energetica fino all'attuazione di modelli di sviluppo sostenibile. È inoltre una soglia coerente con l'approccio europeo al *foresight* strategico, che invita a valutare fin d'ora gli effetti di lungo periodo delle scelte tecnologiche, per evitare *lock-in*, ossia condizioni di dipendenza da specifiche tecnologie o piattaforme che rendono difficile adottare soluzioni alternative.

Il 2050 coincide con il centenario della pubblicazione di *Computing Machinery and Intelligence*, il saggio in cui Alan Turing, matematico e logico britannico, tra i fondatori dell'informatica moderna, ha posto le basi concettuali dell'intelligenza artificiale e della sua versione incarnata. Nel guardare al futuro della robotica incarnata, riemerge così il **sogno di Turing**: l'idea che l'intelligenza, per essere davvero tale, debba avere un corpo, fare esperienza del mondo fisico e interagire con l'ambiente. È una traiettoria teorica che accompagna l'IA fin dalle sue origini e che oggi, grazie alla convergenza tra robotica, apprendimento automatico e capacità computazionale, sta uscendo dai laboratori. In questa prospettiva, la robotica non è solo un'applicazione, ma il punto in cui una linea di ricerca di lungo periodo si sposta dalla robotica industriale e di precisione verso ambienti quotidiani, non strutturati e ad alta interazione con le persone.

Aspetti chiave

Il tema di ricerca è vasto e complesso. Questo brief si sofferma su tre aspetti centrali.

Un primo nodo riguarda il **lavoro.** L'adozione di sistemi dotati di corpo e autonomia si inserisce in dinamiche già in atto: carenze di manodopera, invecchiamento della forza lavoro, esigenze di sicurezza e riorganizzazione dei processi produttivi e logistici. La robotica intelligente può generare *displacement* di alcune mansioni, ma anche compensare la carenza di manodopera, riconfigurare ruoli, competenze e responsabilità, incidendo soprattutto sulla qualità del lavoro [1][8] [2], oltre che sui livelli occupazionali. Ridurre questa trasformazione a una questione di produttività o sostituzione netta sarebbe fuorviante: il punto decisivo è quale spazio resti all'essere umano in un contesto di automazione pervasiva e se sia progettato in termini di supervisione passiva, adattamento subordinato o reale co-evoluzione tra capacità umane e sistemi robotici.Senza una traiettoria esplicita di **co-evoluzione tra lavoro e tecnologie**, il rischio è un progressivo impoverimento dell'*agency* umana: minori capacità decisionali e di apprendimento, minore senso del lavoro. Una robotica ben progettata può invece facilitare una reciprocità dei benefici dell'au-

5 Qui si espolarano le applicazioni civili della robotica intelligente. Le implicazioni del dual use e degli impieghi in ambito difesa e sicurezza sono solo richiamate, in quanto richiedono un'analisi dedicata.

6 Per *maturazione tecnologica* si intende il progressivo avanzamento di una tecnologia lungo i Technology Readiness Levels (TRL), una scala standardizzata a nove livelli che ne misura il grado di sviluppo, dai principi scientifici di base (TRL 1) fino al sistema validato e operativo in condizioni reali (TRL 9).

7 Il *technology foresight* è la branca di foresight che si occupa di anticipare le possibili evoluzioni delle tecnologie e i loro impatti.

8 Fare riferimento alla bibliografia a fine *brief*.

tomazione, sostenendo benessere, ergonomia e ruolo attivo dei lavoratori, rafforzandone le capacità fisiche e cognitive. La posta in gioco non è quindi soltanto quanto lavoro verrà automatizzato, ma quale qualità del lavoro emergerà, come verrà distribuito il valore generato e quali effetti vi saranno su competenze, capacità e *agency* delle persone.
Nel medio-lungo periodo, superata la fase collaborativa in cui i robot affiancano gli operatori, l'aumento dell'autonomia delle macchine può ridefinire radicalmente la distribuzione dei compiti. In assenza di scelte consapevoli, il lavoro umano rischia un ridimensionamento quantitativo e qualitativo, con effetti che vanno oltre l'occupazione. A tendere, l'automazione potrebbe richiedere di **ripensare la distribuzione della ricchezza** e i meccanismi con cui la società attribuisce valore alle attività umane, sia in termini economici sia di riconoscimento sociale.
Il possibile disaccoppiamento tra lavoro, reddito e distribuzione del valore generato dall'automazione merita quindi attenzione strategica. Entità ed effetti dipenderanno dalle scelte di politica industriale, fiscale e sociale e dalle modalità di governo dell'innovazione, rendendo essenziale una co-evoluzione sostenibile tra automazione e nuovi modelli economici e sociali. Una dinamica analoga è visibile nell'uso dei **modelli linguistici di grandi dimensioni (LLM)**: sistemi che non si limitano a eseguire compiti, ma influenzano apprendimento, scrittura e ragionamento. Miglioriamo questi modelli attraverso l'uso, ma allo stesso tempo impariamo o, talvolta, "disimpariamo" da essi. La letteratura evidenzia effetti ambivalenti [3]: da un lato, questi strumenti possono aumentare produttività e qualità del lavoro; dall'altro, possono favorire forme di *cognitive offloading* e, in alcuni casi, processi di deskilling, con implicazioni per lo sviluppo e il mantenimento di alcune competenze.

Un secondo aspetto riguarda **salute, cura e assistenza**, ambiti destinati a crescere in Europa per effetto dell'invecchiamento demografico e della pressione sui sistemi di welfare. La robotica è spesso presentata come risposta a questi bisogni, ma la qualità tecnologica non garantisce di per sé un buon uso. Il rischio non è solo tecnico: soluzioni orientate a efficienza e sostenibilità possono ridefinire silenziosamente ciò che viene considerato "cura accettabile", comprimendone la dimensione relazionale ed empatica.
Più in generale, l'intelligenza artificiale applicata ai processi biologici e biomedici potrebbe aprire prospettive di trattamento più efficace e personalizzato, con potenziali effetti sulla durata della vita in salute. Si tratta tuttavia di una traiettoria possibile, non di un esito garantito: l'impatto dipenderà dalla maturità tecnologica, ma anche da accessibilità, sostenibilità, investimenti e scelte organizzative e di policy che ne orienteranno diffusione e adozione.

Un terzo aspetto riguarda **fiducia, responsabilità e accettazione sociale**. Quando l'intelligenza artificiale prende corpo, le decisioni diventano azioni fisiche con conseguenze immediate: l'accettazione dipende meno dalle prestazioni tecniche e più da trasparenza, prevedibilità e chiarezza nelle responsabilità. Anche il design conta: negli umanoidi, la maggiore intuitività dell'interazione con sistemi antropomorfi può accompagnarsi a resistenze, aspettative e percezioni di sostituzione che incidono sulla loro integrazione sociale. Su queste tecnologie si concentra inoltre una forte competizione industriale e simbolica. **Il potenziale di mercato e la pressione competitiva possono anticipare la riflessione sociale**, spingendo verso adozioni guidate dall'*hype* più che da una valutazione matura di performance e implicazioni. Essere i primi sul mercato con un umanoide significa **presidiare un immaginario potente**, con il rischio che dimostrazioni spettacolari e narrazioni di imminente disponibilità oscurino nodi ancora aperti: affidabilità, sicurezza, sostenibilità economica e integrazione sociale. Il tema non è quindi solo quanto velocemente la robotica avanzerà, ma secondo quali criteri verranno orientati design, diffusione e uso. A ciò si aggiunge una dimensione strategica: la **capacità di scelta collettiva**. La diffusione della robotica dipende da piattaforme, standard e modelli di sviluppo che si stanno consolidando a livello globale. Chi controllerà infrastrutture e dati? Come sarà distribuito il valore economico generato? Chi sarà responsabile di rischi e sicurezza? Per l'Europa, la vulnerabilità non è la carenza di competenze scientifiche, ma la difficoltà di tradurle in un ecosistema capace di sostenere sviluppo, adozione e autonomia strategica, anche per la scarsità di investimenti necessari a trasformare la ricerca in prodotti. Questa fragilità si intreccia con il rapporto tra sperimentazione e rischio. La robotica intelligente richiede apprendimento sul campo, margini di errore e adattamento progressivo: occorre una **cultura dell'innovazione orientata alla curiosità**, capace di accettare l'incertezza e bilanciare regolazione e sperimentazione. Il problema non è schivare i rischi, ma gestirli in spazi di sperimentazione governata, evitando che le traiettorie siano determinate da chi controlla piattaforme, capitali e mercati. Alcune trasformazioni, soprattutto nel lavoro, sono inevitabili: la scelta è prepararsi a nuovi assetti oppure tentare di contenerli con un sistema di regole preventive, rischiando di impedire l'azione anziché orientarla. Lo stesso vale per il ***dual use***: le capacità che abilitano cura, supporto e resilienza possono essere riconvertite in sorveglianza o impieghi coercitivi militari, così come tecnologie nate per la difesa possono trovare applicazioni civili ad alto impatto sociale. Governare questa ambivalenza richiede responsabilità anticipatoria di fronte alle richieste di efficienza della competizione globale, non solo contenimento regolatorio.

La questione, quindi, **non è se la robotica intelligente entrerà nel nostro mondo, ma a quali condizioni lo trasformerà**. Nel brief, la riflessione riguarda soprattutto lavoro, cura e servizi, pur mantenendo una rilevanza più ampia verso altri settori applicativi. Le decisioni su investimenti, sperimentazione e regolazione definiscono così il perimetro delle possibilità future: non solo quali tecnologie saranno disponibili, ma chi ne beneficerà, con quali garanzie e dentro quale idea di società.

La situazione oggi

Tra maturazione tecnologica, frammentazione sistemica e pressione globale

La robotica si trova in una fase intermedia: non è più una promessa, ma non è ancora un'infrastruttura diffusa. La convergenza tra intelligenza artificiale, sensori avanzati, capacità computazionale e robotica ha prodotto sistemi capaci di operare in ambienti non strutturati e adattarsi nel tempo. Tuttavia, la maturità tecnica non coincide con la capacità di diffusione su larga scala.

In Europa questa distanza è strutturale. Pur eccellendo nella ricerca e nella robotica avanzata, il continente fatica a tradurre le competenze in piattaforme industriali scalabili e filiere integrate. Il nodo non è solo dimostrare che una tecnologia funziona, ma creare le condizioni perché entri in un ecosistema imprenditoriale, produttivo e sociale capace di sostenerne nascita, crescita e operatività; altrimenti resta confinata al prototipo o viene adottata secondo modelli sviluppati altrove.

Questa fragilità emerge anche nel **legame con le grandi transizioni**, a partire da quella climatica. Secondo l'International Energy Agency (IEA), per raggiungere la neutralità climatica entro il 2050 solo circa il 30% delle tecnologie necessarie è oggi maturo e standardizzato; un ulteriore 40% è dimostrato ma non ancora scalato; il restante 30% è noto a livello di principio ma privo di filiere industriali consolidate. Il limite non è scientifico, ma sistemico: investimenti, produzione e integrazione.

La robotica intelligente segue dinamiche simili. Alcune applicazioni — dalla robotica collaborativa alla logistica autonoma e a specifici ambiti clinici — sono già validate ma non ancora diffuse. Altre componenti centrali, soprattutto legate all'autonomia general-purpose, all'interazione continua con le persone e all'uso sicuro in contesti quotidiani, restano da sviluppare. Il loro contributo dipenderà non solo dall'avanzamento tecnico, ma dalla capacità di tradurre il potenziale in filiere, standard e modelli di adozione affidabili.

Il quadro è complicato dalla **competizione globale**. Stati Uniti e Cina investono massicciamente in piattaforme general-purpose, umanoidi e automazione avanzata, integrando ricerca, industria e capitale privato. Indipendentemente dall'attuale applicabilità al mercato, questa competizione sta già plasmando le catene del valore della robotica futura. Anche se i robot più diffusi entro il 2050 potrebbero non essere umanoidi, le capacità sviluppate oggi stanno consolidando un vantaggio competitivo rilevante per i due Paesi.

L'Europa opera in uno spazio più ristretto, segnato da cautela regolatoria, investimenti pubblici e privati limitati e frammentazione produttiva. L'incognita non è l'assenza di soluzioni, ma **la difficoltà di costruire massa critica** e trasformare la sperimentazione in impatto, con il rischio di restare ai margini del mercato globale.

Permane anche un **disallineamento tra sviluppo tecnologico e riflessione sociale** che alimenta inoltre aspettative sproporzionate, spesso legate a dimostrazioni spettacolari. Il vero banco di prova per l'IA incarnata è però la capacità di operare in contesti critici, dove chiudere una valvola guasta in condizioni proibitive conta più del clamore di vedere un umanoide fare capriole sul palco.

A questo si aggiunge una minore **propensione al rischio tecnologico e all'iniziativa imprenditoriale**, che in Europa tende a favorire innovazioni incrementali rispetto a quelle radicali. Le politiche pubbliche possono contribuire a modificare questa dinamica, creando contesti favorevoli alla sperimentazione, all'ambizione e alla trasformazione della ricerca in innovazione. Diventa quindi centrale promuovere forme di competizione sana, capaci di stimolare ambizione e impegno senza sfociare in meccanismi distorsivi come il *social scoring*. Nel loro insieme, questi elementi delineano una **fase ad alto potenziale ma con forte incertezza direzionale**. La robotica è sufficientemente avanzata da incidere su lavoro, salute, sostenibilità e competitività, ma non ancora stabilizzata da imporre un percorso unico. Questa combinazione di maturità parziale, gap nelle filiere produttive e pressione globale rende il momento attuale decisivo per orientare gli sviluppi futuri.

Accanto alle dinamiche tecnologiche emerge **un limite strutturale del sistema europeo di ricerca e innovazione**. I grandi progetti collaborativi finanziati dalla Commissione Europea tendono a **diluire il focus tecnologico** attraverso consorzi numericamente sovradimensionati, generando iniziative solide sul piano formale ma meno efficaci nel concentrare risorse, competenze e visioni su obiettivi tecnologici chiari.

L'incertezza non riguarda la qualità della ricerca europea, ma l'architettura con cui è organizzata e finanziata, che incide sulla capacità di costruire infrastrutture tecnologiche condivise e influenzare lo sviluppo della robotica. Bandi frequenti e tassi di successo molto bassi spingono gruppi e laboratori a inseguire temi emergenti anziché consolidare linee ad alto potenziale, alimentando una ricerca spesso guidata dall'*hype* che fatica a tradursi in piattaforme robuste e impatto sistemico. L'Unione Europea dovrebbe quindi non solo **sostenere l'innovazione oltre la fase di ricerca**, ma anche rimuovere gli ostacoli alla crescita e alla commercializzazione: frammentazione di mercato e finanza, alto costo dell'energia e assenza di un vero mercato unico della conoscenza.

Negli ultimi venticinque anni le capacità tecnologiche — dal digitale all'intelligenza artificiale — sono cresciute rapidamente, mentre l'economia reale europea è rimasta stagnante e, per l'Italia, è mancato un disegno anticipativo. Questa divergenza segnala la **difficoltà di tradurre progresso tecnologico in produttività e nuovi modelli di lavoro**. La robotica rischia così di diventare un'ulteriore eccellenza scientifica non pienamente assorbita dal sistema economico e sociale.

Il principale collo di bottiglia oggi non è la tecnologia, ma la capacità di **agire su due fronti complementari**: promuovere una **ricerca focalizzata**, continuativa e capace di assumersi rischi, e favorire il **trasferimento tecnologico** affinché i risultati della ricerca si traducano in applicazioni industriali e benefici sociali. È qui che si gioca la possibilità europea di indirizzare la robotica intelligente verso uno sviluppo realmente trasformativo.

Scenari possibili per il futuro della robotica intelligente

Per questo brief abbiamo deciso di concentrarci su alcune incertezze critiche, riportate nella Tabella 1. Dalla mappatura di tali variabili emergono due dimensioni fondamentali che, più di altre, strutturano i futuri possibili della robotica intelligente: **il modo in cui viene governato il rapporto tra esseri umani e macchine intelligenti (rapporto uomo-macchina)**, e **l'assetto socio-tecnico**[9] **che ne orienta sviluppo e diffusione (ecosistema di ricerca e sviluppo)**. Queste due dimensioni costituiscono gli assi della Figura 1 e definiscono il quadro interpretativo adottato nel brief. Dal loro incrocio emergono quattro scenari, intesi non come previsioni, ma come configurazioni plausibili di come la robotica potrebbe evolvere in futuro. [4] [5] [6] [7]. Pur senza esaurire la complessità del tema, le dimensioni selezionate sono state ritenute le più rilevanti per l'analisi. Successive attività di *foresight* potranno ampliare il quadro, includendo ulteriori incertezze critiche e variabili.

Incertezze Critiche				
Ecosistemi centralizzati e proprietari	←	Ecosistema di ricerca e sviluppo	→	Ecosistemi distribuiti e interoperabili | Filiere aperte e integrate
Automazione sostitutiva	←	Rapporto uomo-macchina	→	Potenziamento umano/Augmentation | Co-evoluzione e adattamento reciproco
Ricerca reattiva e dispersiva orientata da hype tecnologico e pressione competitiva	←	Ricerca & Innovazione	→	Ricerca focalizzata | Prospettiva anticipativa sulla ricerca
Controllo regolatorio e limitazione preventiva	←	Gestione del rischio	→	Innovazione responsabile e sperimentazione governata | Fiducia, trasparenza e responsabilità condivisa | Enablement di potere decisionale
Bene commerciale guidato dal mercato | Ottimizzazione di efficienza e performance	←	Visione di fondo/Ruolo della tecnologia	→	Infrastruttura di interesse collettivo | Valorizzazione di relazione, qualità e benessere
Accesso selettivo e stratificato	←	Equità socio-tecnologica	→	Accesso inclusivo e distribuzione equa dei benefici

Tabella 1 – Incertezze critiche che possono influenzare il futuro della robotica

9 Per "assetto socio-tecnico" si intende l'insieme delle condizioni istituzionali, industriali, regolatorie e organizzative che orientano lo sviluppo e la diffusione della robotica: l'ecosistema di ricerca e innovazione, il controllo delle piattaforme, gli standard prevalenti, l'organizzazione delle filiere, i modelli di investimento e governance e le modalità di distribuzione di accesso, responsabilità e benefici.

Per ciascuno scenario[10] vengono descritti il contesto di riferimento ("Cosa evoca"), i principali *driver* del cambiamento e gli effetti attesi nelle tre dimensioni chiave considerate nel presente brief (lavoro, cura e fiducia/accettazione sociale). A queste si affianca una quarta dimensione, il clima, introdotta per evidenziare il ruolo della robotica intelligente come tecnologia abilitante per la transizione ecologica e la sostenibilità. Nessuno di questi futuri è predeterminato: ciascuno prende forma attraverso decisioni distribuite nel tempo, quali scelte di ricerca, modelli industriali, assetti regolatori, investimenti e atteggiamenti culturali verso il rischio e l'innovazione. Poiché la robotica è ancora in una fase di maturazione incompleta, gli scenari futuri restano aperti, politicamente contendibili e orientabili dalle scelte compiute oggi.

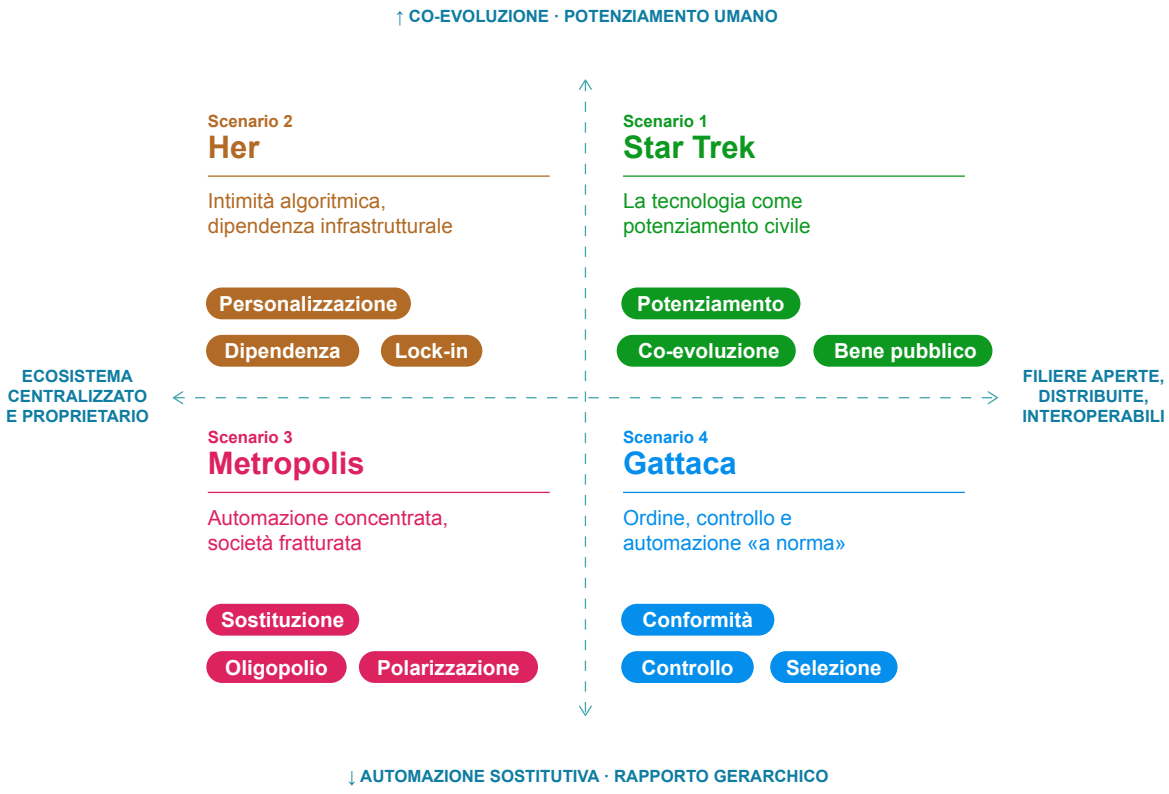


Figura 1 – Elaborazione di quattro possibili scenari per il futuro della robotica intelligente

Scenario 1 — *Star Trek*: la tecnologia come potenziamento civile

Dimensione	Star Trek
Ecosistema di sviluppo	Ecosistemi aperti e interoperabili lungo l'intera catena tecnologica | Standard aperti, modularità hardware/software
Rapporto uomo–macchina	Co-evoluzione
Ricerca & Innovazione	Programmi continui e mission-oriented, con ambiti R&I "curiosity driven"
Gestione del rischio	Rischio esplorato e governato | Governance anticipatoria
Visione di fondo/Ruolo della tecnologia	Tecnologia come infrastruttura civile abilitante| Strategie pubbliche su IA/robotica come infrastruttura | Bene pubblico con accountability
Equità socio-tecnologica	Accesso ampio e progressivo | Distribuzione diffusa dei benefici | Inclusione attiva e riduzione delle disuguaglianze

10 Come comunemente avviene negli esercizi di *foresight*, i nomi degli scenari hanno una funzione evocativa e servono unicamente a facilitarne l'identificazione e la discussione.

Cosa evoca - Nell'immaginario di *Star Trek*, la tecnologia non sostituisce l'essere umano né lo rende marginale: lo emancipa. È invisibile quando serve, ma potentissima quando conta. Non è un gadget, è un'infrastruttura di civiltà. In questo scenario, robotica e IA sono progettate come **beni pubblici abilitanti**: aumentano capacità fisiche e cognitive, sostengono lavoro, cura e resilienza e rafforzano la capacità collettiva di decidere. L'umano resta al centro per capacità di azione. Il rischio sperimentale non viene evitato, ma assunto e governato; i benefici sono distribuiti in modo ampio e progressivo, rafforzando inclusione e capacità collettive.

Driver del cambiamento - L'Europa trasforma l'eccellenza scientifica in piattaforme socio-tecniche aperte. La ricerca si sposta da iniziative frammentate, eccessivamente condizionate da vincoli non tecnologici, a traiettorie focalizzate, cumulative e continue. Il quadro regolatorio privilegia trasparenza e accountability, mantenendo spazi strutturati di sperimentazione e riducendo i lock-in tecnologici.

La co-evoluzione diventa principio guida: la robotica si afferma come infrastruttura civile capace di potenziare l'umano e sostenere transizioni sistemiche in ambiti chiave come lavoro, cura e clima.

Effetti a medio-lungo termine - Diffusione ampia e progressiva dei benefici.

- **Lavoro:** ruoli aumentati, crescita della manutenzione avanzata, logistica complessa e nuove professioni nell'interazione uomo–robot (HRI);
- **cura:** robotica integrata come supporto, senza riduzione della relazione; maggiore accessibilità grazie allo scaling delle soluzioni tecnologiche;
- **fiducia, responsabilità e accettazione sociale**: elevata accettazione sociale della robotica, sostenuta da trasparenza, prevedibilità e chiara attribuzione delle responsabilità. La tecnologia è percepita come strumento di potenziamento dell'essere umano e di interesse collettivo;
- **clima:** la robotica e l'IA diventano infrastrutture abilitanti per la transizione climatica, supportando adattamento e mitigazione.

Scenario 2 — *Her*: intimità algoritmica, dipendenza infrastrutturale

Dimensione	Her
Ecosistema di sviluppo	Piattaforme chiuse | Lock-in, costi di riconversione
Rapporto uomo–macchina	Co-evoluzione asimmetrica
Ricerca & Innovazione	Innovazione guidata da adozione
Gestione del rischio	Regolazione reattiva | Interventi post-crisi
Visione di fondo/Ruolo della tecnologia	Servizio personalizzato e pervasivo | Centralità UX individuale | Tecnologia come bene privato
Equità socio-tecnologica	Accesso condizionato da piattaforme e reddito | Benefici diseguali ma diffusi | Dipendenza infrastrutturale e asimmetrie crescenti

Cosa evoca - *Her* racconta una relazione pervasiva e rassicurante con un sistema intelligente in cui però l'agency si sposta lentamente, senza conflitto, verso l'infrastruttura che rende possibile quella relazione. La tecnologia potenzia l'individuo sul piano emotivo, cognitivo e operativo, ma all'interno di piattaforme proprietarie. La robotica diventa un servizio continuo e personalizzato, facile da adottare e difficile da sostituire. La dipendenza non è coercitiva: è comoda, invisibile, normalizzata. La questione centrale non è l'efficacia, ma chi controlla funzioni, dati e traiettorie di sviluppo.

Driver di cambiamento - L'innovazione è veloce, opaca e guidata prevalentemente da player esterni, con successo misurato soprattutto in termini di adozione e fidelizzazione. Pochi attori globali controllano le piattaforme e si diffonde il modello Robot-as-a-Service (RaaS). L'Europa assume soprattutto il ruolo di utilizzatore di infrastrutture progettate e governate altrove, con margini limitati su standard, architetture e condizioni di utilizzo.

L'adozione accelera perché le soluzioni rispondono a bisogni urgenti in sanità, welfare e assistenza, ma l'accesso è disarmonico e fortemente condizionato dal reddito. Il potenziamento individuale cresce mentre si riduce la consapevolezza collettiva delle scelte; aumentano dipendenza extra-UE e lock-in tecnologici.

Effetti a medio-lungo termine - I benefici si concentrano su chi ha accesso alle piattaforme, generando nuove disuguaglianze e rischi legati a dipendenze tecnologiche e deleghe implicite dei ruoli di cura.

- **Lavoro:** potenziamento selettivo legato all'accesso alle piattaforme, con l'emergere di nuove asimmetrie e forme di dipendenza infrastrutturale;
- **cura:** diffusione di companion e assistenza *embodied*; ridefinizione implicita di ciò che viene considerato "cura accettabile";
- **fiducia, responsabilità e accettazione sociale:** elevata accettazione sociale della robotica, guidata dalla qualità dell'esperienza d'uso più che da trasparenza e accountability. La fiducia si concentra nelle piattaforme, mentre responsabilità e controllo risultano progressivamente meno visibili;
- **clima:** applicazioni robotiche e IA contribuiscono in modo mirato all'efficienza e alla gestione delle emergenze, ma restano vincolate a piattaforme dominate da un unico fornitore.

Scenario 3 — *Metropolis*: automazione concentrata, società fratturata

Dimensione	Metropolis
Ecosistema di sviluppo	Oligopolio tecnologico | Bassa interoperabilità, forte concentrazione di capitale e controllo
Rapporto uomo–macchina	Gerarchico
Ricerca & Innovazione	Dispersa e hype-driven | Scarsa continuità | Fuga di talenti e dipendenza esterna
Gestione del rischio	Reattiva e securitaria, orientata al contenimento dei conflitti
Visione di fondo/Ruolo della tecnologia	Macchina come padrone: efficienza e controllo come obiettivi primari
Equità socio-tecnologica	Accesso fortemente diseguale | Concentrazione dei benefici | Esclusione esplicita e polarizzazione sociale

Cosa evoca - *Metropolis* è l'archetipo della città-macchina: automazione spettacolare in superficie, lavoro sostitutivo e fratture sociali profonde sotto. È lo scenario distopico "classico": umanoidi e automazione avanzata prosperano, ma solo per pochi. L'efficienza cresce, l'accesso no. Il lavoro viene sostituito più che riprogettato, la cura si riduce a servizi minimi automatizzati e il conflitto sociale aumenta. La tecnologia non manca: manca la capacità collettiva di governarla, mentre benefici e controllo si concentrano e le disuguaglianze si amplificano.

Driver di cambiamento - *Hype* tecnologico, centralizzazione industriale e assenza di massa critica europea portano a dipendenza strutturale e polarizzazione. Grandi attori oligopolistici controllano piattaforme, dati e infrastrutture, con bassa interoperabilità e poco spazio per alternative. La robotica è adottata soprattutto per massimizzare l'efficienza e sostituire lavoro umano in logistica, sicurezza e industria.

Il quadro regolatorio è debole o reattivo e la gestione del rischio avviene ex post, spesso in chiave securitaria; crescono dual use, sorveglianza e controllo centralizzato dei dati. L'essere umano assume un ruolo residuale, con perdita di agency economica e sociale. Aumentano sfiducia istituzionale, tensioni sociali e risposte securitarie; l'innovazione continua, ma senza legittimità né inclusione.

Effetti a medio-lungo termine - La robotica amplifica disuguaglianze economiche e sociali, alimentando tensioni e conflitti. L'autonomia strategica europea è bassa: la dipendenza tecnologica si combina con frammentazione politica e istituzionale.

- **Lavoro**: sostituzione netta del lavoro umano; svuotamento dei ruoli professionali e aumento del conflitto sociale;
- **cura:** eccellenza tecnologica per pochi; per la maggioranza, "cura minima" automatizzata, standardizzata e diseguale;
- **fiducia, responsabilità e accettazione sociale:** bassa accettazione sociale della robotica, percepita come fattore di esclusione e controllo. La sfiducia nelle istituzioni e nelle tecnologie aumenta, alimentata dalla scarsa trasparenza e dall'opacità nell'attribuzione delle responsabilità;
- **clima:** utilizzo selettivo della robotica per protezione di asset strategici e infrastrutture critiche; assenza di una transizione sistemica.

Scenario 4 — *Gattaca*: ordine, controllo e automazione "a norma"

Dimensione	Gattaca
Ecosistema di sviluppo	Infrastrutture governate ma rigide; conformità come criterio guida | Innovazione prudente, con sandbox limitate
Rapporto uomo–macchina	Umano come garante di conformità | Standard stringenti | Co-evoluzione limitata
Ricerca & Innovazione	Incrementale e prudente, con spazi ridotti per curiosity-driven R&I
Gestione del rischio	Riduzione di rischio e incertezza tramite controllo ex ante, con pericoli di paralisi
Visione di fondo/Ruolo della tecnologia	Sistema regolato e certificabile, orientato alla stabilità più che alla trasformazione
Equità socio-tecnologica	Accesso selettivo e standardizzato | Inclusione condizionata | Discriminazione incorporata e normalizzata

Cosa evoca - Gattaca evoca un mondo ordinato, efficiente e perfettamente regolato. I sistemi funzionano, le regole sono chiare e l'incertezza è ridotta al minimo, ma si restringono lo spazio per l'imprevisto, l'apprendimento e l'eccezione umana. La sicurezza aumenta mentre si riduce la co-evoluzione tra umano e macchina. L'equità socio-tecnologica è solo apparente: l'accesso è strutturalmente selettivo e basato su criteri tecnici che producono esclusione sistemica.

Drivers di cambiamento - L'Europa privilegia stabilità, controllo e prevedibilità. Le infrastrutture tecnologiche si fondano su standard stringenti, conformità e controllo ex ante; la gestione del rischio punta a prevenire e ridurre l'incertezza, anche rallentando l'innovazione. Ricerca e innovazione procedono in modo incrementale, con spazi di sperimentazione limitati e sandbox fortemente regolati. Il quadro è coerente e stabile, ma poco adattivo: l'innovazione è ammessa solo se prevedibile e certificabile. L'essere umano resta "nel loop" come requisito formale di supervisione e compliance, più che come soggetto che apprende e co-evolve. La robotica viene adottata soprattutto in contesti altamente regolati, come infrastrutture critiche e sanità: aumenta la sicurezza, ma si indeboliscono apprendimento sistemico e capacità trasformativa.

Effetti a medio-lungo termine - Stabilità elevata e conflittualità contenuta, ma basso entusiasmo collettivo. L'autonomia strategica europea rimane intermedia: solida sul piano normativo e della conformità, più debole su quello della capacità trasformativa e adattiva.

- **Lavoro:** prevalgono ruoli di supervisione, controllo e validazione;
- **cura:** adozione della robotica in contesti fortemente controllati e standardizzati; servizi sicuri e affidabili, ma tendenzialmente impersonali;
- **fiducia, responsabilità e accettazione sociale:** elevata accettazione sociale della robotica nei contesti regolati, sostenuta da standard rigorosi e chiara attribuzione delle responsabilità. La fiducia si fonda sulla conformità normativa più che sulla capacità della tecnologia di evolvere e adattarsi;
- **clima:** utilizzo della robotica per il monitoraggio e la gestione di infrastrutture ambientali critiche; benefici limitati dall'approccio conservativo.

Visione

Letti insieme, i quattro scenari non descrivono alternative nette, ma tensioni da governare. *Metropolis* rappresenta il rischio più evidente: un'automazione concentrata che svuota il lavoro di senso e distribuisce i benefici in modo diseguale. Eppure, questa traiettoria mostra anche una capacità da non scartare: scalare e implementare rapidamente le soluzioni, cruciale quando le trasformazioni devono avvenire in tempi stretti.

Gattaca mostra l'altra faccia della medaglia. Qui il problema non è l'eccesso di velocità, ma un controllo fine a sé stesso, che irrigidisce l'innovazione, limita l'apprendimento e crea barriere strutturali all'accesso. Allo stesso tempo, ricorda il valore di affidabilità, sicurezza e responsabilità formale, elementi indispensabili quando la robotica intelligente entra nelle infrastrutture critiche e nella vita quotidiana.

Con *Her* emerge una dinamica più sottile. La dipendenza infrastrutturale dalle piattaforme proprietarie riduce la capacità di scelta collettiva e sposta l'agency altrove, spesso in modo invisibile. Ma Her intercetta anche qualcosa che gli altri scenari faticano a garantire: qualità dell'interazione, accessibilità diffusa e un'adozione che avviene perché la tecnologia risponde davvero a bisogni percepiti, non solo a requisiti normativi o industriali.

Star Trek, infine, non è un punto di arrivo automatico, ma una direzione che comporta dei rischi, primo fra tutti l'idealizzazione. Il suo valore sta nella capacità di tenere insieme ciò che gli altri scenari separano: tecnologia, istituzioni e benessere collettivo. Non una promessa utopica, ma un equilibrio da costruire nel tempo, integrando scala, affidabilità, accessibilità e *agency* umana.

Dimensione	Metropolis - Automazione concentrata	Gattaca - Ordine e controllo	Star Trek - Potenziamento civile	Her - Dipendenza infrastrutturale
Idea di progresso	Crescita produttiva	Stabilità e prevedibilità	Benessere collettivo e capacità condivise	Comodità individuale
Finalità della robotica intelligente	Sostituire il lavoro umano	Ridurre rischio e incertezza	Potenziare capacità umane	Accompagnare e assistere
Ruolo dell'essere umano	Residuale, sorveglianza	Supervisione formale	Attivo, aumentato, co-decisore	Utente dipendente
Rapporto uomo–macchina	Gerarchico	Procedurale	Co-evolutivo	Accogliente ma asimmetrico
Modello di ecosistema	Oligopolio chiuso	Infrastrutture governate ma rigide	Piattaforme aperte e interoperabili	Piattaforme proprietarie
Criterio di successo	Efficienza	Conformità	Impatto sociale + performance	Adozione e retention
Accesso ai benefici	Fortemente diseguale	Selettivo	Ampio e progressivo	Dipendente dal reddito
Immaginario dominante	La macchina come padrone	Il sistema come giudice	La tecnologia come bene pubblico	La tecnologia come compagno
Modello economico / distribuzione del valore	Controllo industriale Esclusione economica	Opportunità condizionate Valore regolato	Valore distribuito Economia pubblica	Servizi proprietari Piattaforme dominanti
Sostenibilità ambientale	Risorse intensive Degrado ambientale	Ottimizzazione controllata Sostenibilità regolata	Transizione sostenibile Economia circolare	Rebound sistemico del consumo energetico
Resilienza e sicurezza sistemica	Centralizzazione estrema Fragilità sistemica	Bassa adattabilità Stabilità controllata	Filiere robuste Elevata adattabilità	Filiere concentrate Vulnerabilità sistemica
Etica e diritti	Agency ridotta ed opaca Diritti limitati	Trasparenza formale Diritti differenziati	Alta agency Diritti estesi	Agency delegata Diritti mediati

Tabella 2 – I quattro scenari a confronto per stimolare una visione d'insieme

In questa prospettiva, la visione non consiste nello scegliere uno scenario, ma nel riconoscere quali elementi trattenere, trasformare o evitare. Il futuro della robotica sarà il risultato di scelte cumulative, non di un singolo modello ideale. Poiché non è ancora un'infrastruttura diffusa, gli scenari restano configurazioni anticipatorie aperte e influenzabili dalle decisioni di oggi.

Orientamenti di policy

Robotica intelligente come infrastruttura civile europea

La robotica intelligente è ancora in una fase di sviluppo aperta: non pienamente matura né stabilizzata, ma già capace di incidere su lavoro, cura, servizi e infrastrutture critiche. Questa combinazione di potenziale applicativo e traiettorie ancora in evoluzione rende il momento attuale particolarmente rilevante per l'azione pubblica.

Il futuro della robotica non dipende solo dal progresso tecnico, ma dalle scelte istituzionali, regolatorie e di investimento che ne orienteranno l'integrazione sociale. Va quindi considerata non come una tecnologia settoriale, ma come un'infrastruttura socio-tecnica di lungo periodo, potenzialmente integrata in maniera profonda con l'infrastruttura in senso ampio (IoT, servizi, ecc.), con implicazioni paragonabili a quelle dell'energia, della sanità o della mobilità.

Occorre inoltre superare le logiche di ritorno a breve termine: la robotica comprende tecnologie profonde e infrastrutturali, con **cicli lunghi di sviluppo e diffusione** spesso misurabili in decenni. I ritorni economici sono quindi progressivi, perché dipendono non solo dalla maturità tecnica ma anche da integrazione nei contesti produttivi e sociali, adattamento organizzativo, validazione, standardizzazione e costruzione di mercati e filiere. Sono perciò difficilmente compatibili con modelli di ROI (*return on investment*) tradizionali, centrati su orizzonti brevi e ritorni finanziari direttamente misurabili. Politiche e investimenti devono adottare approcci pazienti e strategici, riconoscendo un valore inizialmente più sistemico e trasformativo che finanziario.

Dall'analisi degli scenari emerge una direzione desiderabile per l'azione pubblica: una robotica come infrastruttura civile europea, capace di rafforzare l'*agency* umana, sostenere lavoro e cura, garantire accesso equo e consolidare l'autonomia strategica, evitando dipendenze sistemiche, marginalizzazione del lavoro umano e controllo sterile. Più che un modello ideale, è una traiettoria che coniuga innovazione, interoperabilità, sperimentazione governata, tutela dei diritti e ampia distribuzione dei benefici.

In questo panorama diventa centrale garantire equità nell'accesso alla tecnologia e nella tutela dei diritti, affinché la robotica non produca nuove esclusioni ma rafforzi capacità e opportunità diffuse. Il successo della robotica intelligente non si misura quindi solo da quanto funzionano meglio le macchine, ma da quanto la società funziona meglio grazie a esse.

1. Orientare la ricerca verso traiettorie cumulative e ad alto impatto

È necessario riequilibrare l'architettura della ricerca europea con programmi, criteri di valutazione e strumenti di finanziamento coerenti con obiettivi tecnologici di lungo periodo, riducendo la frammentazione progettuale e garantendo continuità agli investimenti. La sfida non riguarda solo le risorse, ma la capacità dell'ecosistema di ricerca e innovazione di sostenere lo sviluppo tecnologico e tradurlo in applicazioni reali. La valutazione dovrebbe riconoscere la natura cumulativa e ciclica di queste tecnologie, premiando accumulo di capacità, continuità delle linee di ricerca e traduzione in sistemi operativi. Spazi di sperimentazione protetta sono essenziali per l'apprendimento sul campo e una gestione informata del rischio.

2. Trattare la robotica intelligente come infrastruttura strategica

Standard aperti, interoperabilità e filiere tecnologiche robuste, capaci di sostenere cicli evolutivi lunghi, dovrebbero diventare condizioni strutturali del sostegno pubblico. Piattaforme europee condivise — hardware, software e dati — sono una leva per evitare lock-in tecnologici e dipendenze sistemiche. Il procurement pubblico può inoltre orientare strategicamente lo sviluppo, non solo fungere da meccanismo di acquisto.

3. Integrare il lavoro umano come criterio di progettazione

Le politiche per la robotica intelligente dovrebbero includere obiettivi espliciti di benessere, apprendimento e agency umana, promuovendo soluzioni inclusive by design. Ciò implica investimenti nella formazione per ruoli aumentati, strumenti di anticipazione delle transizioni occupazionali e metriche di successo che vadano oltre la produttività, includendo qualità del lavoro, co-evoluzione e sostenibilità sociale.

4. Governare il rischio come componente dell'innovazione

La regolazione dovrebbe distinguere tra rischi da evitare e rischi da governare, affinché la cautela non si trasformi in paralisi. Una governance efficace non elimina il rischio, ma lo rende trasparente, monitorabile e reversibile, preservando spazi per apprendimento sul campo e adattamento progressivo.

In questo contesto, diventa cruciale anche una cultura tecnologica matura, capace di riconoscere e valutare il potenziale dual use delle tecnologie *embodied* senza ridurlo a un tabù. Non si tratta di negarne l'ambivalenza ma di sviluppare capacità istituzionali e sociali per pesarne gli usi, orientarne le applicazioni e prevenire derive senza rinunciare all'innovazione.

5. Competitività globale e scelta di civiltà

Infine, l'orientamento della robotica va letto nel contesto della competizione globale, in cui modelli cinesi e USA ad alta integrazione tra ricerca, industria e capitale mostrano una forte propensione al rischio. Per l'Europa, il pericolo non è tanto tecnologico quanto strategico: perdere capacità di scelta, diventando utilizzatrice di ecosistemi non domestici.

La visione emersa dal confronto tra gli scenari suggerisce che sostenere una robotica coerente con valori europei non significa perseguire un modello ideale, ma costruire un equilibrio tra competitività, **governance, inclusione e responsabilità**. È in questo spazio di scelte e responsabilità che il sogno dell'intelligenza incarnata si rivela per ciò che è: non solo innovazione tecnica, ma scelta politica, etica e culturale.

Referenze

[1] Autor, D. H. (2015). Why are there still so many jobs? The history and future of workplace automation. *Journal of Economic Perspectives*, 29(3), 3–30. doi: 10.1257/jep.29.3.3.

[2] OECD. (2023). OECD *Employment Outlook 2023: Artificial Intelligence and the Labour Market*. OECD Publishing. doi: 10.1787/08785bba-en.

[3] E. Brynjolfsson, D. Li, and L. R. Raymond, "Generative AI at work," *Quarterly Journal of Economics*, vol. 140, no. 2, pp. 889–942, 2025, doi: 10.1093/qje/qjae044.

[4] Glawe, F., Schmeckel, T., Brauner, P., & Ziefle, M. (2026). Human autonomy and sense of agency in human–robot interaction: A systematic literature review. International Journal of Social Robotics, 18, Article 64. doi: 10.1007/s12369-026-01402-1.

[5] Winfield, A. F. T., & Jirotka, M. (2018). Ethical governance is essential to building trust in robotics and artificial intelligence systems. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 376(2133), Article 20180085. doi: 10.1098/rsta.2018.0085.

[6] Stilgoe, J., Owen, R., & Macnaghten, P. (2013). Developing a framework for responsible innovation. Research Policy, 42(9), 1568–1580. doi: 10.1016/j.respol.2013.05.008.

[7] Börjeson, L., Höjer, M., Dreborg, K.-H., Ekvall, T., & Finnveden, G. (2006). Scenario types and techniques: Towards a user's guide. Futures, 38(7), 723–739. doi: 10.1016/j.futures.2005.12.002.

Autrici e Autori

Giorgio Metta, Direttore Scientifico IIT
Arash Ajoudani, Principal Investigator dell'Unità di ricerca Human-Robot Interfaces and Interaction di IIT (HRI2 – IIT).
Valentina Malcotti, Head of Content, ISINNOVA
Giovanna Giuffrè, Senior Researcher, ISINNOVA

Si ringrazia Marta Lorenzini, Senior Technician nell'unità HRI2, per il prezioso contributo alla realizzazione del presente *Future brief*.

Questo *Future brief* è stato realizzato da IIT – Istituto Italiano di Tecnologia e ISINNOVA – Istituto di Studi per l'Innovazione. La responsabilità del documento è esclusivamente delle autrici e degli autori.

Citazione

Metta, G., Ajoudani, A., Malcotti, V., Giuffrè, G. (2026). *Robotica intelligente ed embodied AI: scenari, rischi e responsabilità verso il 2050*. *Future brief*, Ecosistema Futuro & ASVIS.

Per maggiori informazioni sulla collana dei *Future brief* si può visitare www.ecosistemafuturo.it .
Ecosistema Futuro è un'iniziativa promossa dall'Alleanza Italiana per lo Sviluppo Sostenibile ETS (ASviS).

Comitato editoriale

Andrea Ricci (editor-in-chief), Flavia Belladonna, Maddalena Campioni, Carlo Carraro, Luca De Biase, Enrico Giovannini, Luca Miggiano.

Si ringrazia Elita Viola per la revisione editoriale e Thyper Srl per il soggetto grafico.

ECOSISTEMA FUTURO | ASviS ALLEANZA ITALIANA PER LO SVILUPPO SOSTENIBILE