AIRI - ASSOCIAZIONE ITALIANA PER LA RICERCA INDUSTRIALE

LE INNOVAZIONI DEL PROSSIMO FUTURO

XI EDIZIONE 2025

MECCATRONICA



Airi
ASSOCIAZIONE ITALIANA PER LA RICERCA INDUSTRIALE
50
1974-2024

AGRA

AIRI - ASSOCIAZIONE ITALIANA PER LA RICERCA INDUSTRIALE

Airi – Associazione Italiana per la Ricerca Industriale, rappresenta da 50 anni un punto di riferimento per il sistema italiano della ricerca industriale.

Dal 1974 opera come associazione senza scopo di lucro con l'obiettivo di sostenere la ricerca, l'innovazione, lo sviluppo tecnologico e il relativo trasferimento di conoscenze e promuove un'innovazione che contemperi il valore economico, il valore ambientale e quello sociale.

Rappresenta e supporta un'ampia rete di soci tra Industrie, PMI, Enti di ricerca pubblici, Università, Organismi di ricerca e Società di consulenza, permettendo lo scambio di esperienze e di buone prassi nella ricerca industriale.

Questa significativa rappresentatività fa di Airi opinion leader e interlocutore autorevole per gli orientamenti tecnologici nelle politiche della ricerca, per l'adeguata gestione e attuazione del sostegno pubblico, e più in generale per la più ampia diffusione della cultura della ricerca industriale italiana.

www.airi.it

LE INNOVAZIONI DEL PROSSIMO FUTURO

XI EDIZIONE

UNA PUBBLICAZIONE DEL GRUPPO DI LAVORO AIRI TECNOLOGIE PRIORITARIE

MECCATRONICA

PARTE 1: PROFILO DI SETTORE
PARTE 2: SCENARI TECNOLOGICI

AIRI - ASSOCIAZIONE ITALIANA PER LA RICERCA INDUSTRIALE

LE INNOVAZIONI DEL PROSSIMO FUTURO

XI edizione Settore: Meccatronica

ISBN 978-88-98935-68-0

copyright © 2025 Airi

Associazione Italiana per la Ricerca Industriale

viale Aventino, 102 00153 Roma tel +39 068848831 e-mail info@airi.it www.airi.it

finito di stampare

nel mese di gennaio 2025

Realizzazione editoriale

Airi

progetto grafico

Goodlab srl (www.goodlab.it)

Edizioni:

Agra Editrice srl, Roma (www.agraeditrice.it)

Disponibile in versione online su

www.airi.it

Attribuzione-Non Commerciale-Non Opere Derivate 4.0
https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/

indice - profilo di settore

PREFAZIONE 9

INTRODUZIONE 10

MEMBRI DEL GRUPPO DI LAVORO 15

IL MANIFATTURIERO AVANZATO 19

MERCATO, IMPATTI SOCIOECONOMICI E SOSTENIBILITÀ 21

ANDAMENTI GENERALI DELLA MANIFATTURA-MECCATRONICA DEL FUTURO 27

INDIRIZZI E TEMI STRATEGICI A MEDIO E LUNGO TERMINE 33

GLI SCENARI TECNOLOGICI 36

indice - scenari tecnologici

1 - INTEGRAZIONE DI COMPONENTI E SISTEMI MECCATRONICI SMART: LOGICHE, SENSORI, ATTUATORI, SISTEMI DI VISIONE 41

2 - MANIFATTURA ADDITIVA: TECNOLOGIE E APPLICAZIONI PER MATERIALI ALTO-RIFLETTENTI 61

3 - MANIFATTURA ADDITIVA: MATERIALI POLIMERICI SOSTENIBILI E MULTIFUNZIONALI 73

4 - MANIFATTURA ADDITIVA: MATERIALI CERAMICI 83

5 - SISTEMI ROBOTICI COLLABORATIVI ED ESOSCHELETRICI 93

6 - SIMULAZIONE DI PRODOTTO E PROCESSO 115

7 - L'INTELLIGENZA ARTIFICIALE DEL MANUFATTURIERO 125

8 - INTERFACCIA UOMO - MACCHINA APPLICAZIONI DI REALTÀ VIRTUALE E REALTÀ ESTESA 137

Prefazione

Da oltre 25 anni, Airi coinvolge manager e ricercatori provenienti da alcune delle principali imprese, centri di ricerca e università Italiane per discutere su quali siano le tecnologie ad alto impatto socioeconomico destinate a trasformare il sistema paese.

Giunto alla XI edizione, il lavoro Airi "Le Innovazioni del Prossimo Futuro" è uno studio di *technology assessment* e *foresight* unico a livello nazionale: un quadro aggiornato degli scenari tecnologici che contribuiranno, nel breve-medio periodo e in maniera trasversale e abilitante, all'innovazione nei principali settori produttivi nazionali.
Dieci settori e 130 scenari tecnologici che fotografano la ricerca industriale italiana, che da sempre ha una significativa vocazione all'esportazione della propria tecnologia nel mondo.
Il presente volume mono grafico è dedicato al settore della meccatronica, a metà del 2025 sarà pubblicato il volume complessivo.

La tecnologia è oggi un fattore determinante per la competitività del sistema paese. L'impegno continuo in Ricerca e Innovazione aiuta le imprese ad adattarsi alle rapide dinamiche del contesto socioeconomico.
Lo studio si propone come una guida per i *decision-maker* di istituzioni, industrie, investitori per anticipare e comprendere quale sarà il nostro futuro tecnologico e gli impatti più significativi attesi su tutta la nostra società.
Molte le tecnologie ad alto impatto identificate nel tempo dalla analisi Airi. Si ricordano ad esempio Internet of Things, Intelligenza Artificiale (settore digitale) e la sensoristica avanzata per l'efficientamento della fabbrica (manifattura avanzata), già presenti nella edizione 2012, e poi diventate sempre più significative in termini di applicazioni e impatti nelle successive analisi (2016, 2020) e con un ruolo determinante in diversi degli scenari tecnologici affrontati dalla presente edizione.

Le scelte di oggi determineranno la posizione del sistema paese nelle diverse catene del valore globali per i prossimi anni (leader o follower). L'obiettivo è stimolare una riflessione puntuale sulle priorità, le risorse, gli strumenti più opportuni per promuovere uno sviluppo sostenibile a livello sociale, ambientale ed economico. Per un futuro tecnologico significativo è necessario lavorare insieme - istituzioni, imprese e ricerca pubblica – per comprendere e condividere gli asset e le risorse su cui investire.

In conclusione, vorrei fare un sentito ringraziamento ai coordinatori di settore, ai numerosi esperti, ai soci e non soci, ed allo staff Airi, che hanno messo a disposizione il loro tempo e le loro competenze. Senza di loro, la loro apertura e le loro intuizioni non sarebbe stato possibile realizzare questo studio.

Andrea Bairati, Presidente Airi

Introduzione

Il Rapporto «Le Innovazioni del prossimo futuro», giunto all'undicesima edizione, riporta a cadenza regolare dal 1995 le previsioni tecnologiche che Airi elabora grazie al contributo delle imprese, degli enti di ricerca, delle istituzioni finanziare associati, in collaborazione con qualificati partner pubblici e privati. È uno studio di *technology assessment* e di f*oresight* che svolge un'analisi di tecnologie e famiglie di tecnologie ad alto impatto socioeconomico su dieci settori produttivi di rilievo per l'economia nazionale. L'analisi di tipo verticale (per settore) viene poi integrata da una valutazione complessiva (orizzontale) delle sinergie, convergenze e trasversalità delle tecnologie selezionate lungo tutti i settori produttivi.

Come nella precedente edizione, pur mantenendo la tradizionale impostazione per settori produttivi, abbiamo diviso il rapporto in due parti: nella prima analizziamo la posizione della ricerca industriale italiana rispetto alla competitività globale e la relazione tra sviluppo tecnologico e sostenibilità; nella seconda illustriamo le azioni e gli investimenti che il nostro sistema industriale sta definendo, anche in collaborazione con gli attori più significativi della ricerca pubblica.

I settori che analizziamo in questa edizione sono dieci: Ambiente e transizione circolare, Costruzioni, Chimica e Materiali, Energia, Farmaceutica, Meccatronica, Microelettronica e semiconduttori, Tecnologie Digitali, Trasporti e Mobilita, Spazio.

Per ogni settore, sono riportati il quadro o profilo generale che lo caratterizza (imprese, mercato, occupazione, tendenze e criticità, impatti socioeconomici, investimenti in R&S) e gli scenari tecnologici (descrizione, motivazioni per lo sviluppo, stato dell'arte, risorse economiche necessarie) sui quali il sistema della ricerca industriale italiana intende concentrare risorse economiche e intellettuali nel breve-medio periodo.

La definizione di tecnologie prioritarie

Le tecnologie prioritarie sono definite come tecnologie ad alto impatto socioeconomico per il tessuto imprenditoriale e l'economia nazionale. Sono tecnologie abilitanti e sistemiche su catene del valore legate a uno o più settori produttivi, caratterizzate da un rilevante impatto rispetto a una o più delle seguenti dimensioni: industriale (investimenti, capacità abilitante), politico ed economico (es. competitività,

lavoro, politiche di investimento), sostenibilità etico, sociale e ambientale, implicazioni legali (es. necessità o capacità di rispondere a sfide e driver normativi).

I criteri di selezione

Abbiamo individuato oltre 130 tecnologie su dieci settori produttivi analizzati , quasi sempre presentate e raggruppate in scenari tecnologici che fungono da famiglia di riferimento o cluster, attraverso i seguenti criteri:

- Impatto politico ed economico
- Impatto industriale
- Innovatività e time to market
- Impatto etico, legale, sociale e ambientale

Il nostro obiettivo è stato di identificare tecnologie e famiglie di tecnologie con un carattere abilitante per una o più catene del valore e sistemi dell'innovazione. L'orizzonte applicativo o di lancio della ricerca che mette a punto la tecnologia è nel breve medio termine (indicativamente 1 -3 anni, anche a seconda delle caratteristiche del settore), pur non trascurando eventuali tecnologie dirompenti con un ciclo di sviluppo più lungo.

Le tecnologie individuate nelle precedenti edizioni sono state utilizzate come uno dei riferimenti iniziali dello studio, riconoscendo il valore che hanno i dati storici nella validità e affidabilità degli studi *foresight* (la presenza di un ambito tecnologico nel corso di più edizioni dello studio, nelle sue diverse declinazioni e livelli di sviluppo, ne conferma l'importanza).

A chi è rivolto lo studio?

La pubblicazione è rivolta a direttori e manager della ricerca pubblici e privati, ricercatori, istituzioni, investitori, *opinion leader*. Il nostro obiettivo è fornire una guida per le strategie e gli investimenti privati e pubblici in ricerca e innovazione e stimolare una riflessione sulle priorità, le risorse, gli strumenti più opportuni per promuovere uno sviluppo sostenibile a livello sociale, ambientale ed economico.

La metodologia

Lo studio è realizzato mediante l'impegno diretto di esperti della rete Airi, soci e non soci, che nel loro insieme hanno competenze approfondite e riconosciute in relazione sia ai settori produttivi sia alle diverse tecnologie trattate.

Le attività iniziano con la scelta dei coordinatori dello studio, indicativamente due per settore, nominati in accordo con il Consiglio Direttivo di Airi. Viene costituito quindi il Board dei coordinatori settoriali, che rappresenta il primo nucleo del Gruppo di Lavoro (GdL) Tecnologie Prioritarie. Il coordinamento del GdL è a cura di Airi.

Prima fase: Gruppo di Lavoro e selezione delle tecnologie

Il Gruppo di Lavoro, composto inizialmente dai coordinatori, svolge una prima analisi delle tecnologie da trattare. Vengono considerate diverse fonti, quali piani strategici di sviluppo a livello industriale e politiche per la ricerca e innovazione europee e nazionali. Come dato storico si utilizza il catalogo delle tecnologie trattate nell'edizione precedente (2020). Il coinvolgimento della compagine associativa permette di raccogliere suggerimenti per definire il nuovo catalogo delle tecnologie e gli esperti da coinvolgere.

Vengono riviste le definizioni, la struttura, i modelli da utilizzare per lo svolgimento dello studio.

I risultati della prima fase sono un primo catalogo di tecnologie suddivise per settore, un elenco di esperti collegati a tali tecnologie e settori, delle linee guida condivise per la preparazione dello studio.

Seconda fase: Elaborazione dei profili di settore e degli scenari tecnologici.

I lavori vengono svolti principalmente a livello settoriale. Sulla base del catalogo di tecnologie selezionate nella prima fase, coordinatori ed esperti di ciascun settore si incontrano ed elaborano una versione sintetica degli scenari tecnologici. Il Board dei coordinatori supervisiona regolarmente il programma di attività e fornisce eventuali suggerimenti sulle scelte prese a livello settoriale. Il processo è iterativo, durante l'analisi è possibile rivedere, eliminare o aggiungere tecnologie ed includere, ove necessario, altri esperti.

Il risultato della seconda fase è una prima versione del profilo di settore e degli scenari tecnologici.

Terza fase: Revisione ed integrazione

Il GdL svolge un'attività di revisione complessiva dal punto di vista sia tecnico-scientifico sia editoriale. L'obiettivo è di arricchire ed integrare i singoli scenari e valutare sovrapposizioni e sinergie tra i diversi settori. Si cerca inoltre, per quanto

possibile data la diversità dei temi affrontati e le diverse esigenze settoriali in termini di granularità e di tempi, di dare uniformità al lavoro nel suo complesso.
Il profilo di settore e gli scenari tecnologici vengono rivisti e finalizzati. Il risultato sono le bozze finali del lavoro. Viene infine svolta una revisione editoriale dei singoli capitoli e preparato l'impaginato finale.
Il processo sopra riportato è indicativo e alcune fasi del lavoro sono svolte in parallelo. I lavori di preparazione dell'intero volume, comprensivo dei dieci settori produttivi, si svolgono in un periodo di circa due anni.
Questa edizione dello studio Airi ha coinvolto oltre 180 esperti, tra coordinatori e membri dei gruppi di lavoro settoriali, che sono riportati nelle prime pagine dei capitoli relativi a ciascuno dei diversi settori.
Per la presente edizione, si è scelto di pubblicare in anteprima alcuni dei settori nella forma di volume monografico.

Le limitazioni dello studio

Il lavoro è il risultato delle competenze e della visione di Airi e degli esperti coinvolti nello studio, che determina la tipologia e ampiezza degli ambiti trattati, tra cui in particolare la scelta dei settori e degli scenari tecnologici.
A titolo di esempio, in questa edizione non viene trattato in maniera approfondita il settore agroalimentare (se non come ricaduta di alcune tecnologie settoriali), che invece è di evidente rilievo per l'economia nazionale.
L'approfondimento dei temi trattati è limitato dalla necessità di contenere sia la lunghezza sia l'impegno richiesti dallo studio, anche considerata la partecipazione a carattere volontario di tutti gli esperti coinvolti.
Sono utilizzati dati provenienti da un numero selezionato e limitato di fonti bibliografiche, sia pubbliche sia provenienti da dati interni delle aziende e centri di ricerca coinvolti, che coprono l'intero spettro dei settori selezionati ma che non si possono considerare esaustive.
I contenuti e le opinioni espresse sui possibili scenari di sviluppo tecnologico per il sistema paese rimangono un esercizio di analisi, deduzione e previsione, come tale soggetto a variabilità ed imprecisioni.

I contenuti

Lo studio analizza una parte rilevante del portafoglio tecnologico del sistema paese. Per ogni settore, viene riportato il quadro o profilo generale che lo caratterizza (imprese, mercato, occupazione, tendenze e criticità, impatti socioeconomici, investimenti in R&S) e gli scenari tecnologici (descrizione, motivazioni per lo sviluppo, stato dell'arte, risorse economiche necessarie) sulle quali il sistema della ricerca industriale italiana intende concentrare risorse economiche ed intellettuali nel breve-medio periodo.

È prevista la pubblicazione delle analisi dei dieci settori sia in forma integrale in due volumi (volume 1, profilo di settore; volume 2, scenari tecnologici), sia in pubblicazioni monografiche (per settore).

Il presente volume rappresenta la pubblicazione settoriale dello studio relativa al settore Meccatronica.

MECCATRONICA

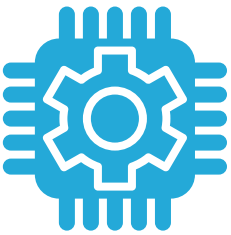
MEMBRI DEL GRUPPO DI LAVORO

COORDINATORI

COSBERG	**Mauro Viscardi**
DIGITAL INNOVATION HUB LOMBARDIA	**Pierluigi Petrali**

ESPERTI

COMSOL	**Daniela Panfiglio**
ENEA	**Giovanni Di Girolamo, Dario Della Sala**
ISTITUTO ITALIANO DI TECNOLOGIA	**Francesca Negrello**
INAIL	**Alberto Ranavolo, Tiwana Varrecchia, Giorgia Chini, Fabio Boccuni**
IUVO	**Nicola Vitiello**
IUVO	**Simona Crea**
NATIVETOWORK	**Luca Ceccarelli**
NVNOVA	**Sabino Sinesi**
PRIMA ADDITIVE	**Gaetano Patrimia**
RINA CONSULTING	**Leonardo Fransesini, Roberto Sorci**
SMILAB	**Fabio Chiesa, Piergiorgio Grassen**
STMICROELECTRONICS	**Donato Di Donato**



SETTORE

MECCATRONICA

PROFILO DI SETTORE

IL MANIFATTURIERO AVANZATO

La manifattura italiana, grazie al suo livello tecnologico e all'intraprendenza delle sue imprese – per la maggior parte PMI – ha assunto un ruolo di primo piano sia nel contesto nazionale che in quello europeo. Questo è il risultato di un bagaglio di esperienze che ha radici profonde nel passato (il tessile, la meccanica di precisione) e di un modello che si è evoluto nel corso degli anni. Tanto che oggi appare imprescindibile il connubio tra manifattura avanzata e meccatronica, espressione delle tecnologie – e delle competenze – di ogni sistema produttivo industriale.

La meccatronica, nella fattispecie, si profila come una combinazione di tecnologie tra loro complementari che stanno alla base dell'automazione intelligente di prodotti, sistemi e processi manifatturieri. In estrema sintesi, si presenta come l'integrarsi di tre macro-discipline, tra loro complementari: la meccanica, l'elettronica e l'informatica. Quest'ultima, in particolare, abbraccia per definizione molte aree di specializzazione, come il controllo di sistemi, l'analisi dei dati, i modelli di Intelligenza Artificiale (IA). Esistono poi zone di sovrapposizione tra le tre discipline, che hanno dato luogo a delle ulteriori sfumature tecnologiche: per esempio, i dispositivi elettromeccanici o i controllori logici di processo (PLC).

Di fatto la meccatronica, se volessimo usare un'espressione anche un po' metaforica e calzante, ha portato all'integrazione di diverse tecnologie per "conferire automazione, controllo e intelligenza al ferro".

La manifattura avanzata italiana si è sviluppata nel solco di innovazioni spiccatamente meccatroniche, facendo emergere uno storico di esperienze e risultati in alcuni contesti tecnologici di rilievo.

Volendo, quindi, declinare il manifatturiero italiano nelle sue traiettorie tecnologiche, oggi potremmo evidenziare le seguenti tecnologie industriali prioritarie fondate sulla meccatronica:

1) Componenti e sistemi meccatronici smart
2) Manifattura additiva
3) Robotica collaborativa
4) Simulazioni Software

5) Interfaccia uomo-macchina
6) Intelligenza Artificiale

Prima di addentrarci nella descrizione degli scenari tecnologici, si intende dare un profilo complessivo del settore della manifattura-meccatronica.

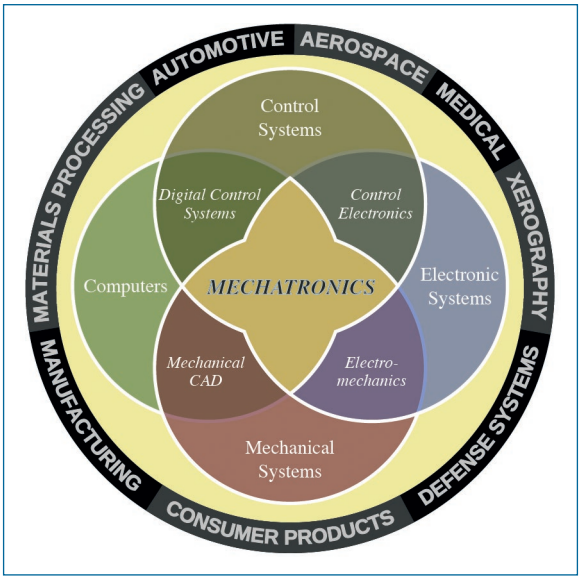


Figura 1: Rappresentazione della meccatronica come multi-disciplina

MERCATO, IMPATTI SOCIOECONOMICI E SOSTENIBILITÀ

Incidenza della manifattura-meccatronica nel contesto nazionale e internazionale

Per dare un quadro completo della manifattura italiana, è utile ricorrere all'autorevole prospettiva del Cluster Fabbrica Intelligente, nato nel 2012 con l'obiettivo di dare una visione strategica, tecnologica e innovativa al comparto produttivo industriale. Nel 2023 il Cluster ha pubblicato la sua seconda "Raodmap della Ricerca e dell'Innovazione", documento che si prende come riferimento nelle analisi a seguire.

A livello europeo, il settore manifatturiero risulta essere il più importante settore dell'economia non finanziaria della classificazione NACE EU-27 in termini di valore aggiunto e persone impiegate, mentre si attesta al secondo posto per fatturato (Figura 2). Nel 2019, il settore ha impiegato il 23% del totale della forza lavoro europea ed ha generato il 29% del valore aggiunto. Nel complesso, più di 30 milioni di persone hanno lavorato nei 2 milioni di imprese manifatturiere generando un fatturato di circa 7.800 miliardi € e un valore aggiunto di quasi 2 miliardi €.

		2019			
	Non Financial Business Economy EU27 (from 2020)	Enterprises	Turnover (M€)	Value Added (M€)	Employees
B	Mining and quarrying	16.932	86.394,3	33.055,3	392.246
C	Manufacturing	2.051.074	7.846.344,2	1.998.858,5	30.158.203
D	Electricity, gas, steam and air-conditioning supply	173.000	1.470.000,0	229.000,0	1.300.000
E	Water supply; sewerage, waste management and remediation activities	77.000	257.000,0	100.000,0	1.560.000
F	Construction	3.413.290	1.702.986,7	548.969,2	12.687.246
G	Wholesale and retail trade	5.718.891	9.028.880,1	1.281.510,7	29.428.945
H	Transportation and storage	1.251.019	1.437.385,3	510.297,6	10.448.964
I	Accommodation and food service activities	1.888.142	593.309,1	252.368,6	10.978.430
J	Information and communication	1.118.646	1.298.469,7	549.679,6	6.341.468

Fonte: Eurostat

Figura 2: Posizionamento del manifatturiero europeo nell'economia non finanziaria - 2019

Il valore aggiunto del settore manifatturiero dei primi 4 Paesi europei rappresenta il 60% del valore totale del manifatturiero europeo, mentre quello dei primi 10 rappresenta l'87%. Negli ultimi 10 anni, il valore aggiunto della industria manifatturiera dei primi 10 Paesi europei è aumentato fino a superare i 1.800 miliardi complessivi e l'Italia, comunque, a giocare un ruolo di primissimo livello nello scenario europeo posizionandosi al secondo posto, dopo la Germania, per valore aggiunto (Figura 3).

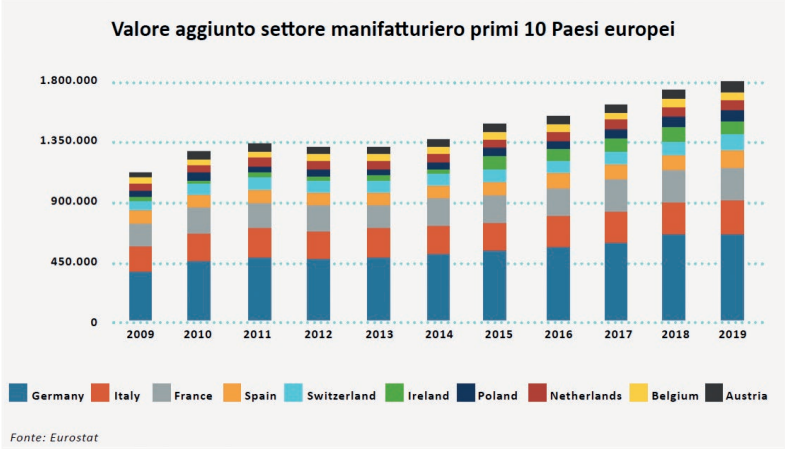


Figura 3: Valore aggiunto (M€) del manifatturiero europeo 2009-2019

Sul fronte globale, l'insorgere della pandemia ha determinato un crollo della manifattura nel primo semestre del 2020, a cui ha fatto seguito un recupero nel corso del secondo semestre. Le posizioni dei vari Paesi confrontate in termini % sulle quote di valore aggiunto manifatturiero globale, mostrano una sostanziale stabilità, con la Cina che copre il 30% e l'Italia che rimane tra i primi 7 Paesi per produzione manifatturiera con un 2,2% (Figure 4 e 5).

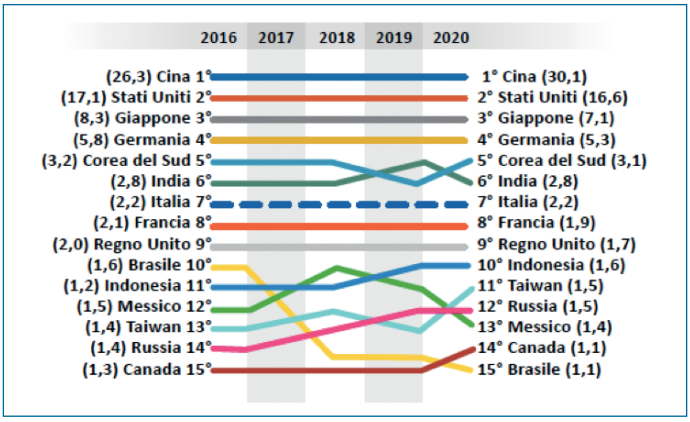


Figura 4: Classifica produttori mondiali (Valore aggiunto in $ correnti)
Fonte: CSC su dati UNIDO, Eurostat, Banca Mondiale e IHS-Market

Countries	2020 Value Added ($) at current prices
China	3.853.826.532.846
United States	2.272.000.000.000
Japan	1.033.602.190.884
Germany	697.292.449.376
Republic of Korea	406.373.281.725
India	383.714.449.103
Italy	280.398.636.543
France	247.025.036.875
Great Britain	239.677.053.149
Indonesia	210.396.303.053

Fonte: UNDATA

Figura 5: Valore aggiunto del settore manifatturiero a prezzi correnti dei primi Paesi a livello mondiale (Dati 2020)

In Italia, nell'ambito del settore manifatturiero ci sono alcuni settori che hanno avuto prestazioni particolarmente brillanti in termini di valore aggiunto e fatturato (Figura 6). In particolare, il settore della produzione delle macchine utensili, dei prodotti in metallo, dell'alimentare e dell'industria della moda rappresentano il 46% del valore aggiunto, il 42% del fatturato e il 41% delle esportazioni (vedere anche Figura 7). Tali settori rappresentano tradizionalmente, insieme all'industria del mobile e del legno, il "Made in Italy", tanto da permettere al nostro Paese di posizionarsi a livello europeo sempre tra i primi Paesi per fatturato e valore aggiunto

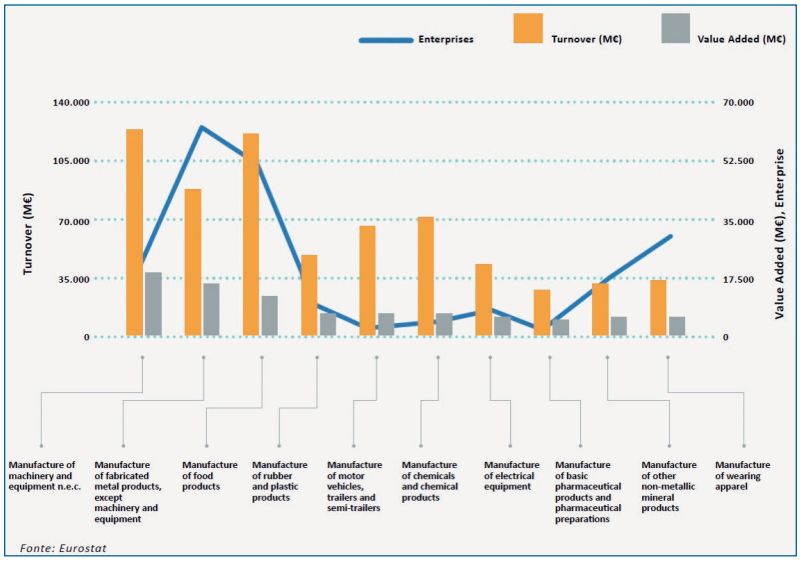


Figura 6: Settori del manifatturiero italiano per fatturato (2019)

Nel corso degli anni, le economie mature hanno perso il loro primato in termini di quote globali della produzione manifatturiera, ma ora si sta disegnando una nuova mappa dei poli manifatturieri mondiali dopo due anni di cambiamenti dovuti alla pandemia e all'impatto provocato dalla crisi ucraina.

La crescita della produzione non è più spinta solo dalla domanda estera, ma

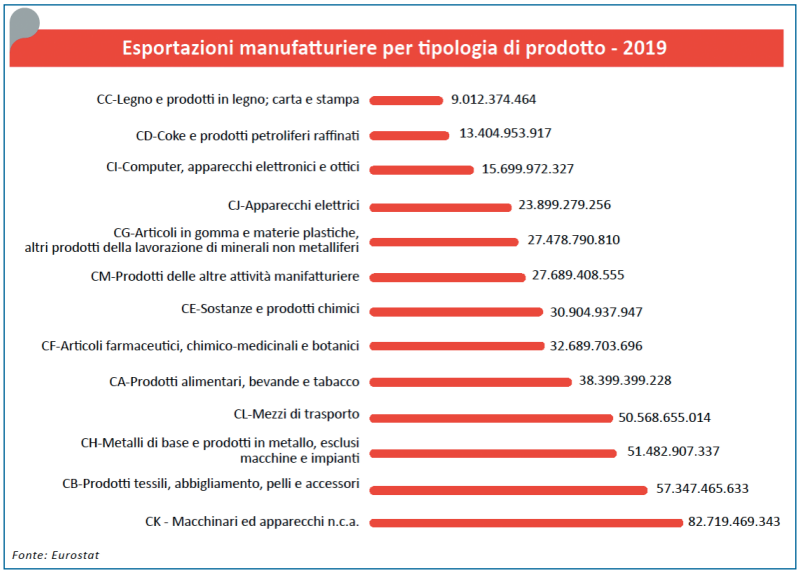


Figura 7: Esportazioni del manifatturiero italiano per fatturato/prodotto (2019)

anche dall'aumento dei consumi interni, stimolato dalle potenzialità della digitalizzazione e dal bisogno di sviluppare modelli di produzione e distribuzione in cui la distanza geografica potrebbe avere ancora un ruolo rilevante.
Un elevato livello di richiesta di nuovi prodotti ha condotto a una evoluzione e ridefinizione dei modelli di produzione, con orizzonti di pianificazione e cicli di vita del prodotto più brevi, riduzione delle dimensioni dei lotti, richiedendo, quindi, un'ottimizzazione dell'uso delle risorse in termini di snellezza, flessibilità, agilità e riconfigurabilità del processo produttivo.

L'uso intensivo delle risorse del Pianeta, le nuove produzioni nei Paesi emergenti e l'accorciamento dei cicli di vita dei prodotti hanno reso gli aspetti ambientali sempre più stringenti e la necessità di implementare l'economia circolare sta facendo emergere importanti opportunità di business a livello globale.

ANDAMENTI GENERALI DELLA MANIFATTURA-MECCATRONICA DEL FUTURO

Per spiegare le ragioni dello sviluppo di alcune specifiche tecnologie meccatroniche prioritarie nell'ambito del manifatturiero industriale, si ritiene opportuno identificare i principali trend che caratterizzeranno questo settore in relazione a diversi fattori di forte impatto strategico, quali le esigenze più distintive del mercato, l'evoluzione dei processi produttivi, il ruolo degli operatori nell'ambiente industriale e, non ultimi, i macro-temi socioeconomici e ambientali.

Per affrontare questa panoramica ad ampio spettro con una visione di prospettiva sul mondo della manifattura, ci viene in soccorso la "Roadmap per la Ricerca e l'innovazione" del Cluster Fabbrica Intelligente (2023), nel cui documento sono messe in rilievo 4 sfide determinanti:

A. La produzione personalizzata
B. La produzione efficiente e resiliente
C. La valorizzazione delle persone nelle fabbriche
D. La Sostenibilità industriale

A seguire, una sintesi delle 4 sfide, estrapolata dal documento citato.

Produzione Personalizzata

Il mercato dei consumatori finali mostra una spiccata tendenza alla forte personalizzazione dei prodotti. I beni di consumo (abbigliamento, calzature, articoli per lo sport, occhiali…), i prodotti del settore medicale (protesi personalizzate in ambito ortopedico, odontoiatrico...) e, in generale, la produzione di beni durevoli (nell'industria del design, automobilistica ed in generale nel manifatturiero) ne sono un esempio.

La personalizzazione presuppone lo sviluppo di sistemi e modelli industriali in grado di riconfigurarsi in tempi ridotti per soddisfare requisiti specifici raccolti dal singolo cliente, e che garantiscano un elevato grado di integrazione con i clienti stessi fino a farli diventare artefici principali della soluzione che desiderano. Non

a caso si fa spesso riferimento a produzioni a "lotto uno". Tali produzioni sfruttano per esempio tecnologie versatili da un punto di vista manifatturiero (quali, ad esempio, manifattura additiva, microlavorazioni, automazioni flessibili, attuazioni elettriche, processi ibridi) e da un punto di vista informatico per la gestione dei dati di progetto (quali, ad esempio, IA, IoT, Big Data).

Produzione efficiente e resiliente

L'efficienza è un indicatore della competitività di un processo produttivo, definibile come la capacità di lavorare a rendimento elevato e – non meno rilevante – in condizioni complesse e variabili. Queste condizioni danno valore, inoltre, alle caratteristiche di resilienza dello stesso processo produttivo.

Tra le principali linee di sviluppo future per delineare produzioni efficienti e resilienti si possono evidenziare:

- Zero difetti. L'efficienza è considerata in termini di riduzione delle non conformità e del loro impatto sul rendimento del sistema di produzione.
- Robustezza/flessibilità. L'efficienza è considerata in termini di capacità di operare in presenza di disturbi, come la variabilità dei materiali e dei pezzi in entrata e le caratteristiche specifiche del materiale (quali, per esempio, anisotropia o bassa rigidità), che sono aspetti particolarmente importanti per diversi tipi di applicazioni.
- Sistemi intelligenti. L'efficienza è considerata in termini di uso ottimizzato delle risorse disponibili (attrezzature, operatore umano, conoscenza).

Saranno quindi sviluppati sistemi produttivi in grado di evolvere nel tempo per adattarsi dinamicamente alle mutevoli condizioni di contesto, determinate dalla turbolenza della domanda, dalla rapidità dei cicli tecnologici, dalle dinamiche della situazione competitiva, ma anche dalle dinamiche causate da cambiamenti

improvvisi, come eventi catastrofici (pandemie). In sintesi, gli ambiti di sviluppo in prospettiva includono:

- Riconfigurabilità: progettazione e controllo di sistemi di produzione riconfigurabili e modulari.
- Componentistica: componenti, sensori e macchine intelligenti per la produzione adattativa ed evolutiva.
- Prestazioni: sistemi per la predizione delle prestazioni e la gestione operativa della produzione e della logistica.
- Ispezioni e analisi dei dati: Smart Inspection & Machine Learning.
- Collaborazione uomo-robot: Human Robot Co-working. L'IA e le tecniche ad essa connesse avranno, inoltre, una significativa influenza nello sviluppo di ciascuna priorità di ricerca.

Valorizzazione delle persone nelle fabbriche

Per i prossimi anni è prevista una crescita esponenziale dei dispositivi IoT collegati, comprese le applicazioni di consumo, industriali e sanitarie con una previsione di mercato tra i $ 4 e gli $ 11 trilioni entro il 2025, di cui circa 1600 miliardi nel settore industriale (fonte McKinsey), rendendo le macchine sempre più pervasive, intelligenti, connesse e dotate di forme di intelligenza distribuita che deve interfacciarsi con gli utilizzatori.

Inoltre, secondo un recente studio di Microsoft/IDC, ci si aspetta che circa l'85% dei lavori si trasformi nei prossimi 3 anni, il 33% dei lavoratori dovrà partecipare ad attività di Re-Skilling, il 26% avrà nuovi ruoli, il 27% dei lavori sarà dato in outsourcing o automatizzato. Anche le competenze, quindi, subiranno dei cambiamenti importanti, dal momento che nella graduatoria delle skill necessarie per usare l'IA emerge la necessità di aumentare quelle tecniche, quelle cognitive, di processo e anche sociali. Le nuove figure professionali del futuro includono, tra le altre, il Data Scientist, il Data Engineer, il Data Analyst e simili.

Nell'ambito del manifatturiero queste tendenze costituiscono un traino fondamentale a progettazione e sviluppo di nuove soluzioni che permettano di valorizzare le persone e le loro competenze, e a contribuire alla loro soddisfazione e benessere. Le fabbriche innovative dovranno essere sempre più inclusive, fortemente orientate al coinvolgimento e alla loro partecipazione delle persone (utenti, operatori, manager). Tali modelli devono avere la persona come elemento centrale che guida e controlla le tecnologie e, in generale, tutte le dimensioni attraverso cui è definita la nuova fabbrica.

Anche lo studio e la sperimentazione di nuove tecnologie per la riduzione dello sforzo fisico possono essere guidati dallo sfruttamento delle potenzialità date da dispositivi indossabili ed esoscheletri, mentre lo sforzo cognitivo potrebbe essere alleggerito fornendo informazioni semplici e intellegibili, profilate secondo i bisogni del lavoratore.

Sostenibilità industriale

Negli ultimi anni la sostenibilità è divenuta tematica centrale nel panorama politico e – per declinazione – in molti settori dell'economia e dell'industria, compreso quello del manifatturiero.

L'aspetto tecnico che ne deriva, se pensiamo al perimetro dei soli processi produttivi, converge con modalità innovative di concepire i nuovi prodotti del futuro, in una ottica di economia circolare, con l'obiettivo di ridurre sensibilmente le emissioni di carbonio e di migliorare l'efficienza energetica, di ridurre e razionalizzare i consumi idrici, di favorire e promuovere il recupero di risorse.

Alla base dell'economia circolare ci sono due tipi di flussi di materiale: biologici, capaci di reinserirsi nella biosfera, e tecnici, destinati ad essere riutilizzati senza entrare in biosfera.
In linea con questa visione, tutte le attività svolte nel sistema industriale, partendo dall'estrazione di materie prime e dalla loro conversione e produzione in prodotti

finiti, devono essere organizzate in modo tale che i rifiuti prodotti da un settore possano, dopo opportune trasformazioni, diventare risorsa o fattore produttivo per altri.
Oltre al recupero dei materiali, molto promettente è anche il recupero delle funzioni del prodotto che permette non solo di recuperare la materia prima, ma anche di non perdere il valore delle attività che sono state spese per trasformare la materia in prodotto.

Questi cambiamenti richiedono l'introduzione di nuovi processi, di nuove macchine e di nuovi sistemi (per esempio il "de-e re-remanufacturing" applicato agli stessi impianti produttivi), creando una profonda rivisitazione della base produttiva nazionale e ponendo anche le basi per l'apertura di nuovi mercati di beni strumentali che vedano il Paese in posizione di leadership.

Per favorire il cambiamento descritto risulta, quindi, necessario:

- Favorire lo sviluppo di un sistema industriale in grado di implementare soluzioni di economia circolare.
- Studiare come la sostenibilità possa cambiare il processo di pianificazione nelle imprese manifatturiere.
- Stabilire quale cambiamento è richiesto a livello di impresa, per consentire miglioramenti nelle performance di sostenibilità.
- Identificare i cambiamenti a livello di sistema necessari per aumentare la sostenibilità industriale.
- Attivare la sperimentazione a livello di impresa con nuovi modelli di business e migliorare la capacità del settore industriale di agire sistematicamente verso l'implementazione dell'economia circolare.

INDIRIZZI E TEMI STRATEGICI A MEDIO E LUNGO TERMINE

La manifattura-meccatronica – come accennato – punta a disegnare le fabbriche del futuro. Il driver alla base di questa trasformazione è la digitalizzazione intesa nella sua accezione più ampia, ovvero come percorso guidato dalle tecnologie digitali e dall'IA finalizzato ad accrescere efficienza, flessibilità ed intelligenza nei processi produttivi, nonché a migliorare le condizioni di lavoro degli operatori in fabbrica. Così intesa, l'introduzione di queste tecnologie nella manifattura ha dato impulso a una ulteriore sfumatura della transizione digitale, propria cioè del contesto manifatturiero quanto di altri ambiti sociali.
In realtà, quando si parla di hardware industriale emerge un secondo tema, ovvero l'impatto dei processi produttivi – in particolare quelli energivori – sulla sostenibilità ambientale. La manifattura meccatronica propone un progresso considerevole anche in questo ambito, perché alcune tecnologie che le sono proprie si sono evolute anche considerando in modo determinante il driver del consumo energetico. È il caso delle attuazioni elettriche a basso assorbimento elettrico che stanno prendendo piede in diversi scenari applicativi, in sostituzione della pneumatica o idraulica dell'uso di modelli di IA per ottimizzare i consumi, per predirne perdite e sprechi. La manifattura così progettata offre un contributo notevole anche alla transizione energetica e ambientale.

L'integrazione delle tecnologie abilitanti nel manifatturiero

Le tecnologie specifiche della manifattura-meccatronica hanno peraltro un collegamento forte con le tecnologie abilitanti, per come definite e utilizzate dalle politiche europee per la ricerca e innovazione (KETs – Key Enabling Technologies). Tra queste ultime – non a caso – è presente la "manifattura avanzata" che rappresenta esattamente, sotto altra denominazione, l'insieme delle tecnologie proprie del manifatturiero. Con l'aggettivo "avanzata" si vogliono, infatti, indicare le evoluzioni – rispetto alle tecnologie tradizionali – guidate dalla meccatronica e dalla digitalizzazione. Gli obiettivi dichiarati dalle KETs sono gli stessi raccolti nel presente documento: creare una nuova dimensione di manifattura, di maggiore efficienza e flessibilità e – allo stesso tempo – fortemente antropocentrica.

L'integrazione di tecnologie con i principi meccatronici può portare a sinergie significative, creando sistemi più intelligenti, autonomi ed efficienti in diversi ambiti industriali. Tra gli sviluppi tecnologici di maggiore rilievo vi sono:

L'**IA**, che può analizzare i dati provenienti dai sensori per identificare modelli, anomalie e potenziali problemi, permettendo un'ottimizzazione in tempo reale dei processi produttivi e una manutenzione predittiva. Inoltre, combinata con la sensoristica, può abilitare lo sviluppo di sistemi meccatronici autonomi in grado di operare in modo indipendente in ambienti complessi.

La **robotica collaborativa**, che integrata con sistemi meccatronici avanzati, può aumentare la produttività, la flessibilità e la qualità del lavoro in svariate attività manifatturiere. Inoltre, la combinazione di robotica collaborativa e meccatronica può favorire lo sviluppo di nuovi prodotti e processi innovativi in settori come la medicina, l'agricoltura e la logistica.

Il settore della meccatronica può abilitare la **manifattura additiva** di geometrie complesse e l'utilizzo di nuovi materiali con proprietà avanzate. La combinazione di stampa 3D e meccatronica può favorire la personalizzazione di massa di prodotti, adattandoli alle esigenze specifiche dei clienti o a specifiche progettuali.

Le applicazioni di **realtà virtuale e realtà estesa** possono fornire agli operatori istruzioni e guide in tempo reale durante l'esecuzione di compiti complessi, migliorando l'efficienza e la sicurezza. L'AR/VR può essere utilizzata per creare ambienti di simulazione realistici per la formazione e l'addestramento degli operatori, riducendo i rischi e i costi.

Il carico di lavoro cognitivo degli operatori può essere monitorato mediante appositi sensori, identificando potenziali situazioni di affaticamento o stress. L'ergonomia cognitiva, integrata con sistemi meccatronici, può favorire l'adattamento

dinamico delle interfacce utente in base alle esigenze cognitive degli operatori. La meccatronica può abilitare lo sviluppo di sistemi di supporto intelligenti che assistono gli operatori in compiti complessi o pericolosi, riducendo l'errore umano.

Le sinergie della manifattura avanzata e della meccatronica con gli altri settori industriali

I sistemi meccatronici, con la loro capacità di integrare diverse discipline, hanno un potenziale enorme per creare sinergie con altri settori, portando innovazione e miglioramenti in una vasta gamma di applicazioni. Ecco alcuni esempi di possibili sinergie in riferimento agli altri settori considerati dallo studio Airi "Le innovazioni del prossimo futuro":

1) Settore digitale:

Internet of Things (IoT): I sistemi meccatronici possono essere integrati con dispositivi IoT per creare reti di sensori e attuatori intelligenti che raccolgono e scambiano dati in tempo reale, abilitando nuove applicazioni in settori come l'industria 4.0, l'agricoltura di precisione e la smart city.

2) Settore della microelettronica:

I progressi nella microelettronica permettono di miniaturizzare i componenti meccatronici, rendendo i sistemi più compatti, leggeri e a basso consumo energetico. Sistemi meccatronici completi possono essere integrati in singoli chip, riducendone di fatto la complessità e, conseguentemente, il costo stesso.

3) Settore agroalimentare:

I componenti e i sistemi meccatronici possono monitorare parametri ambientali come temperatura, umidità e luminosità, permettendo un controllo ottimale delle condizioni di crescita delle colture. Inoltre, possono automatizzare la raccolta e lo smistamento dei prodotti agricoli, riducendo la manodopera e minimizzando i danni ai prodotti.

4) Settore sanitario:

I robot ad alta precisione possono essere utilizzati per eseguire interventi chirur-

gici mininvasivi con maggiore precisione e controllo, riducendo il trauma per i pazienti. Inoltre, sensori miniaturizzati possono essere utilizzati per sviluppare strumenti diagnostici non invasivi per la diagnosi precoce di malattie.

5) Settore ambientale:

Reti di sensori possono essere impiegate per monitorare parametri ambientali come la qualità dell'aria, dell'acqua e del suolo, fornendo dati preziosi per la tutela dell'ambiente. Inoltre, possono essere utilizzati per la produzione di energia rinnovabile da fonti come l'energia solare, eolica e idroelettrica.

6) Settore costruzioni ed edilizia:

Sensori possono essere integrati negli edifici per creare sistemi intelligenti di gestione dell'energia, illuminazione, climatizzazione e sicurezza. Inoltre, possono monitorare la salute strutturale di edifici e ponti, prevenendo incidenti e garantendo la sicurezza pubblica.

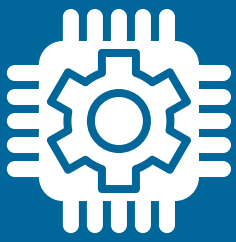
Scenari tecnologici

Il comparto manifatturiero è rappresentato – per definizione – da fabbriche che producono. Gli impianti produttivi ne sono il cuore: un mix tra hardware e software, quindi di tecnologie meccatroniche.

È partendo da questo contesto che sono stati individuati gli scenari tecnologici propri della manifattura-meccatronica. Le tecnologie sono tipicamente integrate nei processi produttivi, ovvero negli impianti che materialmente li eseguono, rendono i processi e gli asset produttivi performanti, flessibili, collaborativi e intelligenti. Sulla scorta di tali criteri – e senza presunzione di essere stati esaustivi sull'argomento – sono quindi stati evidenziati i seguenti scenari tecnologici:

1. **Componenti e sistemi finiti intelligenti:** sono i mattoni – fisici – dell'automazione di un impianto. Logica di controllo (PLC), sensori, attuatori. O sistemi finiti che integrano tutte queste parti tra loro (per esempio, una pressa con processo controllato in quota e forza).
2. **Manifattura additiva:** questa tecnologia merita uno spazio proprio, perché è una modalità piuttosto recente e innovativa di fare produzione, in contrapposizione alla manifattura sottrattiva.

3. Robotica collaborativa: questa tecnologia traccia una evoluzione caratteristica del manifatturiero, fatta di robot (robot collaborativi, avatar, esoscheletri, etc..) profondamente integrati nei processi produttivi, a supporto dell'operatore o dell'impianto stesso.
4. Simulazioni software: questa tecnologia sta assumendo un ruolo determinante nel garantire efficienza e flessibilità ai processi produttivi, nonché le prestazioni desiderate nei prodotti della manifattura. È da questa tecnologia che oggi si parte per garantire preventivamente robustezza e qualità all'intero ciclo produttivo.
5. Intelligenza Artificiale: in ambito industriale si sposa con le simulazioni software, la robotica collaborativa e conferisce intelligenza propria ai componenti e sistemi meccatronici, quindi agli impianti produttivi. Gli algoritmi dell'IA producono auto-analisi, predicono, offrono soluzioni in linguaggio naturale. Tradotto ai minimi termini, distillano Know-How attraverso dati e conoscenze tecniche per agevolare il compito degli operatori nel manifatturiero.
6. Interfaccia uomo-macchina: applicazioni di realtà virtuale e realtà estesa: può apparire come una semplice tecnologica di supporto, in realtà interfacciandosi con buona parte delle precedenti ne permette il pieno sviluppo e ne garantisce la piena efficacia.
Di questa tecnologia fanno parte integrante gli sviluppi dell'ergonomia cognitiva, che si focalizza sull'interazione tra la mente dell'operatore e gli strumenti di lavoro, ottimizzando appunto i processi cognitivi coinvolti nell'esecuzione dei vari compiti.



SETTORE

MECCATRONICA

SCENARI TECNOLOGICI

indice - scenari tecnologici

1 - INTEGRAZIONE DI COMPONENTI E SISTEMI MECCATRONICI SMART: LOGICHE, SENSORI, ATTUATORI, SISTEMI DI VISIONE 41

2 - MANIFATTURA ADDITIVA: TECNOLOGIE E APPLICAZIONI PER MATERIALI ALTO-RIFLETTENTI 61

3 - MANIFATTURA ADDITIVA: MATERIALI POLIMERICI SOSTENIBILI E MULTIFUNZIONALI 73

4 - MANIFATTURA ADDITIVA: MATERIALI CERAMICI 83

5 - SISTEMI ROBOTICI COLLABORATIVI ED ESOSCHELETRICI 93

6 - SIMULAZIONE DI PRODOTTO E PROCESSO 115

7 - L'INTELLIGENZA ARTIFICIALE DEL MANUFATTURIERO 125

8 - INTERFACCIA UOMO - MACCHINA APPLICAZIONI DI REALTÀ VIRTUALE E REALTÀ ESTESA 137

INTEGRAZIONE DI COMPONENTI E SISTEMI MECCATRONICI SMART: LOGICHE, SENSORI, ATTUATORI, SISTEMI DI VISIONE

Per componenti e sistemi meccatronici smart si intendono parti hardware-software di un impianto produttivo che ne garantiscano l'automazione *intelligente*, contribuendo a migliorare il relativo processo manifatturiero in termini di *efficienza, flessibilità, prestazioni, personalizzazione, sostenibilità*. In aggiunta, rendendo l'ambiente produttivo spiccatamente antropocentrico. In sintesi, tali componenti/sistemi sono classificabili – anche se non in modo esaustivo – nelle categorie seguenti:

- **Logica di controllo:** controllori logici programmabili (PLC), per garantire l'automazione industriale secondo i parametri di prestazione attesi.
- **Sensoristica:** sensori analogici e digitali per rilevare un'ampia gamma di parametri (geometrici, cinematici, dinamici).
- **Sistemi di visione:** sia 2D sia 3D, per analisi di superficie, termografiche o di altra natura.
- **Attuazione:** attuatori elettrici, pneumatici, oleodinamici e piezoelettrici, come motori, cilindri e sistemi vibranti.
- **Sistemi finiti per l'automazione industriale:** per processi di trasporto, lavorazione, manipolazione e giunzione meccanica.

Tali componenti/sistemi possono assumere configurazioni e taglie diverse, ma soprattutto in prospettiva saranno sempre più dotati di una propria intelligenza integrata, contribuendo così allo sviluppo di processi produttivi più flessibili e articolati. Trovano applicazione in qualsiasi tipologia – e dimensione – di impianto destinato al settore manifatturiero.

Per dare un quadro di sintesi, si delineano i tratti salienti dell'evoluzione dei componenti e sistemi meccatronici smart:

1. Il ruolo determinante dell'attuazione elettrica per la movimentazione industriale (di qualsiasi natura), a parità di prestazioni produttive in alternativa – se non in sostituzione – di quella pneumatica

e oleodinamica, darà inevitabilmente maggiore impulso alla digitalizzazione dei processi e, dunque, allo sviluppo di un'Intelligenza Artificiale (IA) integrata a prodotti e processi, garantendo soluzioni flessibili e riconfigurabili, oltre che più sostenibili dal punto di vista ambientale.

2. Come conseguenza del punto precedente, l'uso della sensoristica finalizzata a favorire digitalizzazione e intelligenza. Va sottolineato, tuttavia, che qui non si vuole tanto evidenziare l'impiego massivo di sensoristica nei processi produttivi (richiamando una questione di metodo, finalizzato agli scopi preposti) ma, più specificatamente, la qualità e le prestazioni dei sensori del futuro (legando tale aspetto allo scenario tecnologico in sé).

A questi due temi si aggiungono ulteriori elementi sfidanti, che completano il modello classico dell'automazione industriale:

- la logica di controllo programmabile (PLC - Programmable Logic Controller), che, per quanto sia un elemento consolidato del sistema, è destinato a presentare degli sviluppi significativi come modello *as a service* e come strumento a supporto della prototipazione rapida, i cosiddetti *software* e *hardware in the loop*;
- la sensoristica in senso lato, estesa ai Sistemi di Visione, come tecnologia destinata a una forte espansione grazie allo sviluppo dell'hardware e dei modelli di Deep Learning associati;
- più in generale, i componenti e i sistemi finiti meccatronici che integrano le parti sopra citate (attuatori e sensori) a formare un'attrezzatura in grado di rendere automatico (per non dire autonomo) uno specifico processo produttivo industriale.

Motivazione per lo sviluppo

I componenti e sistemi meccatronici permettono alle imprese manufatturiere di aumentare la produttività, la qualità dei prodotti e la flessibilità produttiva, rafforzandone la competitività sul mercato globale.

Il loro sviluppo ha un impatto significativo sulla transizione digitale, ambientale, energetica e sociale, favorita dall'ottimizzazione dei processi produttivi e dalla conseguente riduzione di scarti e sprechi; questo si traduce in una maggiore efficienza energetica, una minore produzione di rifiuti e, quindi, un minor impatto ambientale. Inoltre, questi componenti e sistemi consentono l'adozione di modelli di produzione più sostenibili e circolari, grazie alla capacità di tracciare e monitorare i flussi di materiali e di rendere più efficiente il loro utilizzo.

Considerando inoltre le tematiche sociali, i componenti e i sistemi meccatronici possono creare contesti lavorativi più confortevoli ed ergonomici, sollevando i lavoratori da compiti gravosi e ripetitivi, riducendo il rischio di infortuni e malattie professionali, e facilitando alcune attività, come quelle di manutenzione o di riparazione. Inoltre, questi componenti e sistemi favoriscono l'inserimento nel mondo del lavoro di persone con disabilità, grazie a soluzioni ergonomiche e adattabili.

Infine, è necessario considerare che lo sviluppo di componenti e sistemi meccatronici sempre più innovativi solleverà nuove questioni etiche e legali relative alla responsabilità, alla privacy e alla sicurezza dei dati.

Analisi di mercato

La crescita dei componenti e dei sistemi meccatronici è trainata da diversi fattori, tra cui primariamente l'aumento della domanda di prodotti personalizzati, la necessità di migliorare l'efficienza produttiva e la crescente adozione di tecnologie Industria 4.0 e 5.0.

A livello tecnologico, le tendenze chiave riguardano:

- Miniaturizzazione e integrazione: i componenti meccatronici stanno diventando sempre più piccoli, leggeri e integrati, consentendo una maggiore flessibilità e scalabilità dei sistemi.
- Connettività e IoT: i componenti meccatronici smart sono sempre più connessi tra loro e con sistemi IT di più alto livello, abilitando l'analisi dei dati in tempo reale e il controllo remoto.
- Intelligenza Artificiale e Machine Learning: l'integrazione di IA e ML nei componenti meccatronici permette sistemi di autoapprendimento, autodiagnosi e auto-ottimizzazione.
- Robotica collaborativa: la collaborazione uomo-robot sta diventando sempre più diffusa, con robot che affiancano i lavoratori in compiti complessi e pericolosi. Tale tecnologia sta trovando forte sviluppo grazie ai suoi elementi di base, ovvero proprio agli innovativi componenti meccatronici.

Da un'analisi del settore meccatronico pubblicata nel 2023 dal Sole 24 Ore[1] risultano:
«Oltre 51mila imprese, di cui 32mila sono attive esclusivamente nella produzione di soluzioni meccatroniche, l'1,4% in più rispetto al 2019. Nel 2022 hanno realizzato quasi 320 miliardi di fatturato, con una crescita dell'8,5% rispetto al periodo pre-pandemia, e hanno dato lavoro a oltre 930mila dipendenti, anch'essi aumentati del 3,9% rispetto agli anni pre-Covid».

Sfide strategiche e tecnologiche

I principali trend del prossimo futuro della meccatronica in ambito manifatturiero sono strettamente correlati alla transizione *digitale ed ecologica*: quindi, tecnologie intelligenti e sostenibili che – se parliamo di asset produttivi – si legano in modo naturale sia alla loro dimensione hardware che a quella software.
E che: «La meccatronica italiana cresce molto in termini di vendite verso l'estero,

[1] *https://www.ilsole24ore.com/art/la-meccatronica-cresce-e-investe-sostenibilita-AERFdxkD*

addirittura del 33,5% negli ultimi cinque anni, per un valore che nel 2022 ha raggiunto i 217 miliardi, cioè il 35,3% di tutto l'export italiano nel mondo».

Una prima evoluzione – già in corso – introduce o consolida sviluppi tecnologici significativi dell'hardware di componenti e sistemi, grazie anche a innovazioni nei materiali e nel design meccatronico. Ne beneficeranno i processi di comando e controllo abilitati dalla digitalizzazione integrata nello stesso componente/sistema, oltre a un oggettivo miglioramento della resa energetica, almeno in prima battuta.
Una seconda evoluzione – diretta conseguenza della digitalizzazione come aspetto caratteristico della prima – si contraddistingue per la pervasività dell'IA a un livello ("layer") inferiore rispetto a quello dell'impianto nel suo insieme. Avremo infatti singoli componenti/sistemi dell'impianto dotati di una *loro propria IA*, capace sia di funzionare in maniera autonoma sia di comunicare con quella superiore dell'impianto stesso.

I componenti e i sistemi così evoluti diventeranno il *mattone fondamentale* degli impianti produttivi dislocati in tutte le fabbriche del manifatturiero industriale, che si estende a un vasto numero di settori: dall'automotive all'elettronica e semiconduttori, dalle lavorazioni meccaniche (centri a controllo numerico) alle lavorazioni del legno, dal tessile allo stampaggio di materie plastiche, dall'assemblaggio (per esempio saldature, avvitature, rivettature, pressature) al food, al packaging e all'imbottigliamento, fino al farmaceutico e medicale.

Guardando al solo ambito dei sensori smart, si prevede che il loro mercato raddoppierà entro la fine del decennio[2]. La società di ricerche MarketsandMarkets ha analizzato il settore per tipologia di sensore (temperatura e umidità, pressione, movimento e occupazione), tecnologia (Cmos, Mems) e componenti (microcontrollori, amplificatori, ricetrasmettitori). Secondo il rapporto, nel caso dei sensori smart il mercato volerà nel 2029 a 136,3 miliardi dollari, doppiando nettamente i 61,9 miliardi di dollari attesi nel 2024, per una crescita del 17,1%. Il principale

[2] *Dati MarketsandMarkets 2024- www.researchandmarkets.com/*

motore della crescita sarà l'Industria 4.0., a cui si aggiungeranno le applicazioni nell'ambito del consumer (domanda di dispositivi IoT e di elettronica di consumo, tecnologia wireless per monitorare e controllare i dispositivi di sicurezza). La tecnologia wireless ha aperto nuovi scenari, con una crescente richiesta di tecnologie come Gps, Gprs, wireless Lan e Wap. Questo perché installare sensori con connettività di rete wired è più dispendioso, a causa dei costi aggiuntivi legati a cavi e batterie.
Tra i principali attori del mercato si possono ricordare Analog Devices, Infineon, Texas Instruments, Microchip ed STMicroelectronics.

Stato dell'arte

Va evidenziato il ruolo strategico dell'Italia in questo settore perché, se è vero che i principali player di componenti e sistemi meccatronici avanzati sono prevalentemente grandi aziende oltre confine (Technology Maker), pare più che consolidato il ruolo delle imprese italiane, per quanto di piccole dimensioni, nel proporre applicazioni concrete – e creative – di tali tecnologie, integrate in sistemi automatici di produzione come attrezzature, macchine e impianti.

Logica di controllo programmabile

Nell'ambito industriale, diversi sono i modi attraverso i quali assicurare il controllo dei sistemi automatici. Prevale tuttavia quello della Logica di Controllo Programmabile (PLC), mattone imprescindibile dell'architettura meccatronica dei processi/impianti del manifatturiero avanzato. I principali vantaggi, ormai più che consolidati, riguardano la flessibilità, l'adattabilità, l'affidabilità e la robustezza delle soluzioni e la capacità di gestire sequenze e processi complessi.
Con i moderni software di simulazione e programmazione per PLC sta emergendo la tendenza a creare anche modelli virtuali dei sistemi di controllo, con diverse modalità. In questo ambiente virtuale il principale vantaggio consiste nel testare e ottimizzare il comportamento del sistema in ogni suo aspetto, prima di passare alla realizzazione fisica.
Per sintetizzare, considerando che l'architettura prevede un software di controllo

con il suo hardware per l'automazione (nell'insieme, il sistema PLC) e l'hardware "controllato" (ossia le singole componenti dell'impianto), la virtualizzazione può essere di fatto implementata in due modi: simulando PLC e/o hardware dell'impianto (*Software e Hardware in the Loop*) per garantire una prototipazione rapida (*Virtual Commissioning*) del processo/impianto produttivo, oppure virtualizzando completamente lo stesso software PLC per renderlo indipendente dal suo specifico hardware di controllo e assicurandone la gestione da remoto (*Virtualizzazione del PLC*).

Per testare sistemi di controllo complessi che interagiscono con componenti hardware di impianto, la simulazione virtuale si integra con le tecnologie *in the loop*:

- Simulazione *Software in the loop* (SIL): il software di controllo viene testato in un ambiente virtuale (*Virtual controller*), che simula anche il comportamento dei componenti hardware di impianto e dei segnali di ingresso/uscita (*Digital Plant Model*). Questo permette di identificare – solo a livello puramente virtuale – eventuali problemi di interazione o sincronizzazione tra software e hardware nell'esecuzione dei vari movimenti automatici dell'impianto (attuazioni, sistemi di trasporto, manipolazioni etc..), prima dell'implementazione fisica dell'intero sistema.
- Simulazione *Hardware in the loop* (HIL): in tal caso è presente la parte fisica – reale – di una delle componenti (software o hardware di impianto). Per esempio, il software di controllo si presenta nella sua configurazione reale (*Hardware controller*) e integrato nella simulazione dei componenti hardware di impianto (*Digital Plant Model*). Valgono anche combinazioni diverse, dove l'hardware di impianto può già essere implementato fisicamente (anche su banchi di test) e controllato in tal caso da una simulazione del software, creando così un ambiente di test più realistico. È tuttavia possibile anche un approccio più ibrido, in cui l'hardware di impianto sia in parte reale e in parte virtualizzato. Questa modalità viene principalmente impiegata in caso di valutazione di eventuali modifiche – di forte impatto – sugli impianti produttivi (*Revamping*).

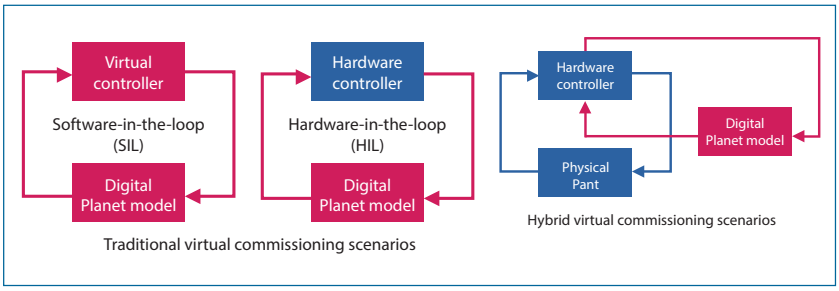


Figura 1: Testing di sistemi di controllo complessi che interagiscono con componenti hardware di impianto, integrazione della simulazione virtuale con le tecnologie in the loop

Altro tema di sviluppo dalla forte connotazione innovativa ed evoluzione futura è la virtualizzazione dei PLC. Il software di controllo del PLC viene eseguito su un computer generico. Questa soluzione permette di separare il software di controllo dall'hardware sottostante (il sistema PLC), offrendo diversi vantaggi:

- Maggiore flessibilità e scalabilità: i PLC virtuali possono essere implementati su qualsiasi computer con prestazioni adeguate, consentendo di utilizzare hardware standard e scalare facilmente le risorse in base alle esigenze.
- Riduzione dei costi: eliminando la necessità di hardware dedicato, la virtualizzazione può ridurre significativamente i costi di investimento e manutenzione.
- Migliore collaborazione e sviluppo: i PLC virtuali possono essere facilmente condivisi tra ingegneri e team, facilitando la collaborazione e lo sviluppo simultaneo di progetti di automazione.
- Semplificazione del test e del debug: i PLC virtuali possono essere testati e debuggati in un ambiente simulato, riducendo la necessità di test sul campo e minimizzando i tempi di fermo (si faccia riferimento ai precedenti concetti SIL e HIL).
- Maggiore accessibilità e portabilità: i PLC virtuali consentono l'accesso da remoto, permettendo un monitoraggio e una gestione svincolata dall'ubicazione dell'hardware.

Integrazione con altri sistemi: i PLC virtuali possono essere facilmente integrati con altri sistemi software, come SCADA (Sistemi di Controllo e Acquisizione Dati) e MES (Sistemi Esecutivi di Produzione), favorendo una maggiore interconnessione e scambio di dati.

In conclusione, questi progressi tecnologici stanno trasformando il panorama della prototipazione rapida, permettendo di creare e testare sistemi di controllo con una velocità, un'efficienza e un'accuratezza mai viste prima. Le aziende che investono in queste tecnologie innovative possono ottenere un vantaggio competitivo significativo, migliorando la qualità dei loro prodotti, riducendo i tempi di sviluppo e ottimizzando i costi.
Tra i principali player di sistemi logici di controllo per l'automazione ricordiamo Gefran, e all'estero ABB, Beckhoff, B&R Automation, Siemens, Bosch, Schneider Electric, Rockwell Automation, Mitsubishi Electric, Phoenix Contact.

Sensori

Il panorama dei sensori nel settore manifatturiero e meccatronico è in continua evoluzione, con lo sviluppo di sensori sempre più intelligenti (elaborazione dei dati direttamente nel sensore), precisi, veloci, wireless (RFID, NFC, Bluetooth, WiFi…), sicuri, auto-apprendenti, miniaturizzati e standardizzati (semplificazione dell'integrazione in reti industriali complesse). Queste innovazioni stanno rivoluzionando il modo in cui raccogliamo e analizziamo i dati nei processi industriali, con un impatto significativo sull'efficienza, la produttività e la qualità.

L'innovazione dei sensori e lo sviluppo sempre più rapido della fusione dei sensori a livello di chip porteranno a:

- Manutenzione predittiva: i sensori intelligenti possono monitorare lo stato di salute di macchine e impianti, prevedendo potenziali guasti e permettendo interventi di manutenzione preventiva, evitando fermi macchina non

pianificati e ottimizzando le risorse.

- Controllo di qualità: sensori ad alta precisione possono monitorare in tempo reale i parametri di produzione, garantendo una qualità costante dei prodotti e identificando precocemente eventuali difetti.
- Ottimizzazione dei processi: l'analisi dei dati raccolti dai sensori permette di ottimizzare i processi produttivi, riducendo scarti e sprechi e aumentando l'efficienza complessiva del sistema.
- Tracciamento della filiera produttiva: sensori RFID e tag NFC permettono di tracciare la movimentazione di merci e componenti all'interno delle filiere produttive e distributive, dall'intero lotto al singolo componente.
- Gestione intelligente del magazzino: sensori intelligenti (es. RFID) monitorano le scorte di materie prime e componenti nei magazzini, ottimizzando il processo di approvvigionamento.
- Miglioramento dell'ergonomia: sensori di postura e movimento possono monitorare la postura degli operatori durante le attività lavorative prevenendo, nel lungo periodo, malattie professionali.
- Miglioramento della sicurezza: sensori di frequenza cardiaca e variabilità della frequenza cardiaca possono monitorare il livello di stress e di fatica degli operatori durante le attività lavorative. Inoltre, sensori di caduta possono rendere tempestivo l'intervento dei soccorsi in caso di incidente.

L'industria manufatturiera guarda con attenzione in particolare al condition monitoring per rilevare le condizioni dei macchinari (vibrazione, temperatura, pressione…), identificando per tempo i cambiamenti che indicano un difetto in via di sviluppo (ovvero manutenzione predittiva). Sensori di vibrazione, pressione, posizione, velocità, proprietà dei fluidi, temperatura e umidità giocano tutti un ruolo critico nelle applicazioni di condition monitoring. Questi saranno la base strutturale per applicazioni di Machine Learning.

Nel mercato dei sensori intelligenti, il segmento dei microcontrollori dovrebbe registrare il tasso di crescita più elevato. I microcontrollori (Mcu) sono componenti cruciali dei sensori intelligenti, in quanto svolgono un ruolo fondamentale per

la loro funzionalità; infatti, forniscono potenza di elaborazione per interpretare i dati del sensore, eseguire calcoli e facilitare la comunicazione con altri dispositivi. Man mano che i sensori diventano più complessi e raccolgono dati più ricchi richiedono maggiore potenza di elaborazione e capacità di controllo offerte dai microcontrollori. Inoltre, con l'espansione dell'Internet delle cose (IoT), si registra una crescente necessità di intelligenza incorporata nei dispositivi, che spinge la domanda di Mcu nei sensori intelligenti.
Infine, i continui progressi della tecnologia Mcu, come la miniaturizzazione, l'efficienza energetica e i miglioramenti delle prestazioni, li rendono ancora più interessanti per le applicazioni dei sensori intelligenti.
Tra i principali player ricordiamo Gefran, Banner, e all'estero Cognex, Keyence, Sick, Honeywell, Siemens, Bosch, Schneider Electric, Rockwell Automation, Omron, Balluff, Pepperl+Fuchs, Vega, Krone.

Sistemi di visione

I Sistemi di Visione (SV) stanno vivendo una fase di rapida evoluzione nel settore dei processi produttivi, caratterizzata da diverse tendenze chiave che ne stanno ampliando le capacità e le applicazioni. Va premesso che l'architettura dei sistemi di visone per le macchine industriali si divide sostanzialmente in due parti: le attrezzature hardware e gli algoritmi software.
Alcuni dei principali trend sono l'integrazione di IA e Deep Learning, e la visione 3D.

L'integrazione di IA e Deep Learning nei Sistemi di Visione li rende più intelligenti e autonomi, permettendo loro di analizzare immagini e video in modo più sofisticato e di estrarre informazioni complesse. Questo si traduce in una maggiore accuratezza nel riconoscimento di oggetti, difetti e anomalie, nonché nella capacità di prendere decisioni autonome in tempo reale.
Applicazioni:

- Controllo qualità avanzato: ispezione di prodotti con difetti minuti e complessi.
  Riconoscimento di oggetti e classificazione: smistamento automatico di

prodotti, identificazione di componenti.
- Monitoraggio del processo produttivo: detection di anomalie e guasti in tempo reale.

Visione 3D e sensori ad alta risoluzione: l'utilizzo di telecamere 3D e sensori ad alta risoluzione permette ai Sistemi di Visione di acquisire informazioni più dettagliate e precise sulla forma, la dimensione e la texture degli oggetti. Questo consente una migliore ricostruzione 3D di scene e oggetti, con applicazioni in ambiti come la robotica e la prototipazione rapida.
Applicazioni:
- Controllo dimensionale e geometrico di prodotti.
- Robotica guidata dalla visione: presa e manipolazione di oggetti complessi.
- Prototipazione rapida di oggetti basati su modelli 3D.

Tra i principali player ricordiamo Gefran, Banner e all'estero Cognex, Keyence, Sick, Honeywell, Siemens, Bosch, Schneider Electric, Rockwell Automation, Omron, Balluff, Pepperl+Fuchs, Vega, Krone.



Figura 2: esempio di sistema di visione per rilevare eventuali anomalie in fase di assemblaggio (cerniere per forni).(Cosberg)

Attuazioni

Diverse industrie si stanno orientando verso soluzioni più elettrificate, richiedendo dispositivi di controllo del movimento maggiormente efficienti e precisi. Ciò sta portando ad un aumento dell'uso degli attuatori elettrici (chiamati anche attuatori elettromeccanici). Utilizzando gli attuatori elettrici al posto dei componenti idraulici o pneumatici, per esempio, si possono ottenere diversi benefici che favoriscono appunti la transizione digitale, tra cui la riduzione del consumo energetico e la migliorata precisione di posizionamento, il controllo del movimento a piena velocità per ottenere una produzione di qualità superiore, tempi di setup più brevi e maggiore flessibilità nel contesto produttivo. Non meno importante il fatto che gli attuatori elettromeccanici siano virtualmente privi di manutenzione, garantendo efficienza del ciclo produttivo in cui sono integrati. Infine, si possono registrare ulteriori vantaggi in termini di sicurezza, come l'eliminazione delle perdite di fluido.

Da non trascurare poi l'impatto ambientale. L'elettrificazione favorisce – come è oggettivamente dimostrato – la riduzione dell'impronta di carbonio. Va inoltre anche considerata l'eliminazione dei rischi di contaminazione da perdite idrauliche, sia dal punto di vista ambientale che per la sicurezza (per esempio in caso di sostituzione di un attuatore idraulico con fluido sotto pressione).

Le evoluzioni future nell'ambito dell'attuazione elettrica sono destinate a colmare il gap a livello prestazionale con quella idraulica e pneumatica: è il caso di alcune applicazioni specifiche dove sono determinanti le forze in gioco, come per esempio la pressione per deformazione di materiali.

Attuatori Lineari Elettrici

Dell'attuazione elettrica come tecnologia per la movimentazione automatica trova uno sviluppo determinante quella lineare, in alternativa a quella più tradizionale rotativa (ossia motori elettrici con statori e rotori lineari, in sostituzione di quelli "storicamente" circolari).

Gli attuatori lineari elettrici convertono l'energia elettrica in movimento lineare

utilizzato per spingere, tirare, sollevare o abbassare carichi pesanti. Questi attuatori sono appunto alimentati da motori elettrici e sono controllati da un'elettronica sofisticata che può essere programmata per eseguire diversi compiti. Sono disponibili in diverse forme e dimensioni e possono essere personalizzati per soddisfare esigenze specifiche delle applicazioni di automazione industriale. Stanno diventando sempre più popolari per le loro prestazioni e affidabilità superiori, dalle applicazioni più semplici a quelle più innovative come AGV e bracci robotici.

Tra i principali player ricordiamo Camozzi, Pneumax e all'estero Siemens, Bosch, Schneider Electric, Rockwell Automation, Festo, SMC, Parker Hannifin, Moog.

Sistemi meccatronici finiti per la manifattura

I sistemi finiti si configurano come assiemi che integrano singoli componenti meccatronici (come quelli precedentemente descritti), governati da una logica di controllo (per esempio PLC) e che siano in grado di svolgere in automatico specifici processo di lavorazione industriale: per esempio – ma non in modo esaustivo – il trasporto, la manipolazione, la saldatura, la pressatura, la foratura, la maschiatura, la tornitura, la fresatura, l'avvitatura, la rivettatura, la dosatura o l'ingrassaggio, Si tratta di soluzione integrate di hardware e software che sfruttano proprio i vantaggi della componentistica meccatronica intelligente e che sono in grado di garantire l'esecuzione del processo in termini di efficienza, controllo, flessibilità e riconfigurazione. Sistemi finiti che saranno sempre più impiegati all'interno di un'architettura di processo o di impianto seguendo la logica Plug&Play, che favorisce installazioni e configurazioni rapide proprie della necessità di produzioni personalizzate e resilienti.

Tra i sistemi finiti merita particolare attenzione il trasporto a lievitazione magnetica, sia per la tecnologia che ne sta alla base che per la crescente integrazione che si stima possa registrare nei prossimi anni nel contesto delle soluzioni automatiche per il trasporto logistico e di processi come l'assemblaggio o il packaging.

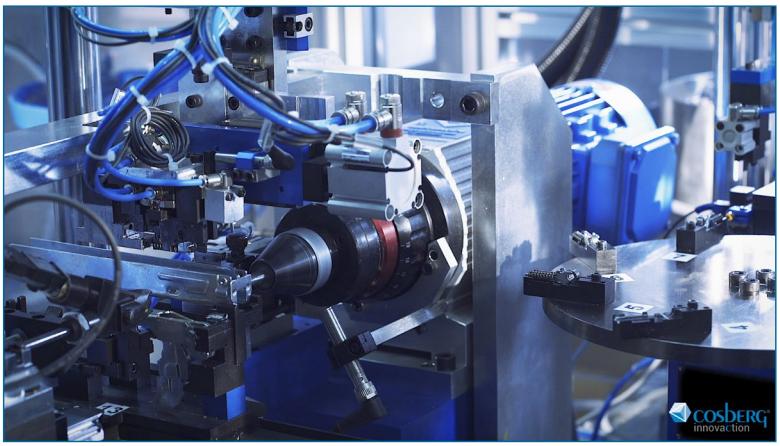


Figura 3: esempio di un modulo meccatronico intelligente di rivettatura controllata (quota e forza). (Cosberg)

Focus Sistemi di Trasporto: la tecnologia della levitazione magnetica

Il trasporto a levitazione magnetica (MAGLEV) è una tecnologia che utilizza la forza magnetica per sospendere e movimentare oggetti senza contatto fisico (2). Nell'automazione industriale, il MAGLEV offre diversi vantaggi rispetto ai tradizionali sistemi di trasporto, tra cui:

- Riduzione dell'attrito e dell'usura: l'assenza di contatto fisico elimina l'attrito e l'usura, prolungando la vita utile dei componenti e riducendo i costi di manutenzione.
- Maggiore precisione e controllo: il posizionamento e la movimentazione degli oggetti possono essere controllati con estrema precisione, favorendo una maggiore efficienza e produttività.
- Maggiore pulizia e igiene: l'assenza di contatto con superfici elimina la contaminazione da polvere e lubrificanti, rendendo il MAGLEV ideale per applicazioni in ambienti asettici o con requisiti igienici elevati.
- Flessibilità e adattabilità: i sistemi MAGLEV possono essere facilmente adattati a diverse configurazioni e layout, soddisfacendo esigenze specifiche di produzione.
- Movimentazione delicata di prodotti: il MAGLEV è ideale per la movimentazione di prodotti fragili o sensibili a urti e vibrazioni.

Tra le diverse applicazioni nell'automazione industriale si segnalano a seguire quelli più significativi:

- Sistemi di assemblaggio: il MAGLEV può essere utilizzato per il trasporto e il posizionamento di componenti con elevata precisione durante i processi di assemblaggio.
- Linee di produzione: il sistema può movimentare materiali e prodotti lungo le linee di produzione in modo efficiente e controllato.
- Sistemi di stoccaggio e recupero: può essere utilizzato per lo stoccaggio e il recupero di prodotti da magazzini automatici.

- Camere bianche e ambienti controllati: Il MAGLEV è adatto per il trasporto di materiali in ambienti asettici o con requisiti igienici elevati.
- Movimentazione di componenti elettronici: la sua delicatezza lo rende ideale per la movimentazione di componenti elettronici sensibili.



Figura 4: Esempio di trasporto a levitazione magnetica (sistema di trasporto MAGLEV Beckhoff)

Architettura meccatronica dell'automazione

Un sistema meccatronico di automazione è composto da diverse componenti interconnesse che lavorano insieme per realizzare un processo di controllo automatico. Di fatto i sistemi finiti sono basati su questo tipo di architettura, che comprende di base i seguenti elementi:

- Sensori e attuatori.
- Nodi e reti di bus di campo: i bus di campo utilizzano diversi protocolli di comunicazione per trasmettere dati tra i dispositivi, come Modbus, Profibus, CAN bus, etc.
- Controllore: responsabile dell'esecuzione del programma di controllo, che può essere implementato utilizzando linguaggi di programmazione specifici per PLC o altri controllori industriali.
- Interfaccia uomo-macchina (HMI): permette all'operatore di monitorare le variabili del processo, di impostare i parametri di controllo e di intervenire manualmente sul sistema se necessario. L'HMI può essere un display touch screen, un pannello con pulsanti e LED, o un software per PC.



Figura 5: Esempio di impianto meccatronico per l'assemblaggio e il collaudo di valvole elettropneumatiche (Cosberg)

Risorse economiche necessarie

L'implementazione di componenti e sistemi meccatronici richiede un investimento significativo da parte delle aziende, con un time to market indicativo di 1-3 anni dall'inizio dell'investimento. Le risorse economiche necessarie variano in base a diversi fattori, tra cui:

- Dimensione e complessità dell'impianto produttivo: impianti più grandi e complessi richiedono ovviamente investimenti maggiori.
- Livello di automazione desiderato: un'automazione più avanzata comporta costi più elevati, mentre un'automazione di tipo semi-automatico (soluzione ancora praticabile laddove l'automazione non è in grado di eseguire alcuni processi di elevata complessità) comporta inevitabilmente un costo più contenuto.
- Disponibilità di competenze: avere già delle competenze interne all'organizzazione riduce i costi rispetto alla necessità di acquisire competenze esterne.

Inoltre, le aziende che desiderano implementare componenti e sistemi meccatronici devono compiere diverse tipologie di investimento:

- Acquisto di hardware e software, includendo per esempio robot, sensori, attuatori, controllori, software di gestione e supervisione.
- Integrazione di nuovi sistemi con i sistemi esistenti e con l'infrastruttura IT dell'azienda (revamping di impianti, upgrade tecnologici).
- Formazione degli operatori all'utilizzo delle nuove tecnologie e all'interazione con i sistemi meccatronici.
- Investimento in ricerca e sviluppo per adattare le tecnologie alle esigenze specifiche dell'azienda e per rimanere all'avanguardia nel settore.
- Consulenza da parte di esperti per la pianificazione, l'implementazione e la gestione dei sistemi meccatronici.

L'implementazione di componenti e sistemi meccatronici rappresenta dunque un investimento per sua natura rilevante per le aziende, ma può portare a significativi benefici in termini di efficienza, flessibilità, prestazioni, personalizzazione, sostenibilità e miglioramento dell'esperienza lavorativa degli operatori.

MANIFATTURA ADDITIVA: TECNOLOGIE E APPLICAZIONI PER MATERIALI ALTO-RIFLETTENTI

L'additive manufacturing (AM) dei metalli, comunemente nota come stampa 3D dei metalli, è una tecnologia che sta rivoluzionando vari settori industriali. Questo processo coinvolge la costruzione di oggetti metallici strato dopo strato, partendo da un modello digitale 3D.

La produzione additiva (AM) è sempre più improntata verso le applicazioni industriali, come dimostrano le buone vendite di macchine AM, tuttavia ci sono ancora diverse sfide che ostacolano un ampio uso economico della tecnologia. La tecnologia di additive manufacturing per il metallo ha raggiunto una maturità ed un'affidabilità tali da renderne possibile l'applicazione nella produzione industriale dei maggiori settori metalmeccanici quali, ad esempio, Aerospaziale, Aeronautico, Automobilistico e Medicale.

L'adozione in ambito industriale, oggi, è limitata ad alcune applicazioni di nicchia ad alto valore aggiunto in quanto il limite principale della tecnologia è rappresentato dalla bassa produttività ed efficienza dei sistemi presenti sul mercato, che si traduce in un elevato costo orario operativo del macchinario.

Ciò incide per circa il 70% sul costo finale del componente, rendendo di fatto poco competitiva l'adozione della tecnologia nella maggior parte dei casi applicativi, soprattutto per il settore dell'automotive, oltre a non garantire dei tempi di realizzazione idonei alle richieste di mercato.

Un altro limite è rappresentato dal volume di lavoro del sistema che non permette, a causa delle dimensioni limitate, sia di effettuare un nesting di un numero di parti sufficiente a raggiungere il numero totale richiesto dal lotto di produzione, vedi grafico seguente, che di processare parti di grandi dimensioni.

Ne consegue che il processo deve diventare più produttivo e sostenibile, affinché le aziende lo possano adottare in modo profittevole.

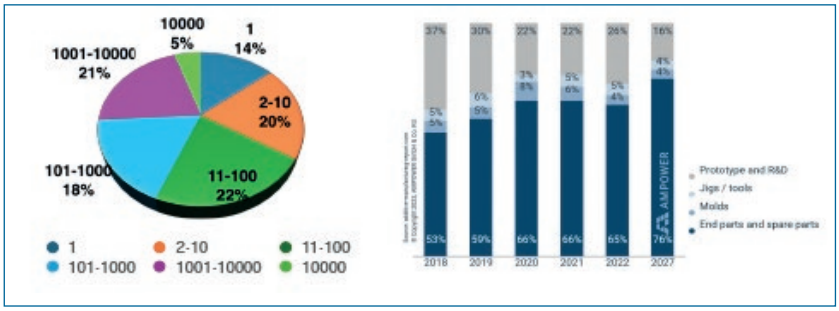


Figura 1: Numero di parti per lotto di produzione annuale realizzate in Additive Manufacturing del metallo (SX) Categoria applicativa di appartenenza dei componenti realizzati in additive manufacturing del metallo fino al 2020 e previsione per il 2025 (DX) – Fonte AMPower Report 2023

Attualmente sono state sviluppate e sono presenti sul mercato diverse tecniche di stampa di materiali metallici.

Ecco una panoramica dello stato dell'arte delle principali tecnologie additive per i metalli:

- Fusione a letto di polvere (Powder Bed Fusion, PBF):
  - o Selective Laser Melting (SLM): Utilizza un laser per fondere e solidificare selettivamente strati di polvere metallica.
  - o Electron Beam Melting (EBM): Utilizza un fascio di elettroni per fondere la polvere metallica.
- Deposizione diretta di energia (Direct Energy Deposition, DED): Utilizza un laser o un fascio di elettroni per fondere il materiale metallico (in polvere o filo) che viene alimentato direttamente nel punto di fusione.
- Binder Jetting: Deposita un legante liquido su uno strato di polvere metallica per formare strati solidi. Successivamente, il pezzo viene sinterizzato in un forno.

- Cold Spray: Particelle metalliche vengono accelerate a velocità supersoniche e spruzzate su un substrato, creando una struttura solida attraverso la deformazione plastica.
- Additive Friction Stir Manufacturing (AFSM): Tecnologia avanzata di produzione additiva che combina i principi della Friction Stir Welding (FSW) con la produzione additiva per costruire componenti metallici strato dopo strato. Questa tecnologia utilizza il calore generato dall'attrito e la deformazione plastica per unire e depositare il materiale.

Ogni tecnologia presenta i suoi vantaggi e svantaggi, e la scelta della tecnologia più adatta dipende dall'applicazione specifica, il settore di applicazione e le normative che regolano l'impiego del componente prodotto.

Motivazione per lo sviluppo

L'Additive Manufacturing (AM) laser rappresenta una tecnologia cruciale per affrontare le sfide tecnologiche contemporanee e accelerare il time to market delle innovazioni. Nel contesto della transizione digitale, l'AM favorisce la personalizzazione e la flessibilità della produzione, con la possibilità di integrare soluzioni di Intelligenza Artificiale e Big Data per ottimizzare i processi. Questo approccio non solo aumenta l'efficienza energetica, ma contribuisce anche alla transizione ambientale, riducendo gli scarti di produzione e l'impatto complessivo grazie all'uso di materiali innovativi e sostenibili. La rilevanza dell'AM si estende alla transizione energetica, supportando la produzione di componenti avanzati per energie rinnovabili e migliorando l'efficienza di materiali utilizzati in settori chiave come l'aeronautica e l'automotive. A livello sociale e degli SDGs, l'AM promuove una manifattura più etica e responsabile, favorendo pratiche di economia circolare e la riduzione delle emissioni di CO_2. Gli indicatori di impatto includono la riduzione quantitativa degli scarti di produzione (fino al 90%), il miglioramento dell'efficienza energetica dei processi (incremento del 30%), l'adozione di materiali ecologici (incremento del 50%), e l'aumento della competitività industriale, misurato dal numero di brevetti e innovazioni commercializzate (incremento del 20%). Qualitativamente, l'AM contribuisce all'innovazione tecnologica, alla

resilienza delle catene di approvvigionamento, e all'implementazione di pratiche sostenibili ed etiche, influenzando positivamente anche il quadro politico e legale, grazie alla promozione di standard e regolamentazioni per una produzione più verde e sostenibile.

Le tecnologie più interessanti e sicuramente più promettenti sono quelle che riguardano le applicazioni additive con tecnologia laser, per cui parliamo di Selective Laser Melting (SLM) e Direct Energy Deposition (DED).

L'uso diffuso della lavorazione laser è cruciale nel guidare una produzione green e sostenibile, perché rappresenta un'alternativa ai processi tradizionali, non più sostenibili dal punto di vista ambientale, e ad alta intensità di energia/carbonio.

I processi laser sono già una realtà importante del panorama manifatturiero: i laser sono intrinsecamente flessibili, mentre i progressi nelle tecnologie delle sorgenti laser hanno portato ad un aumento della loro efficienza di conversione (da energia elettrica a laser).

I vantaggi dell'impiego della lavorazione laser sono da individuarsi nella flessibilità di utilizzo di questa tecnologia e nel risparmio energetico rispetto alle lavorazioni più convenzionali. Negli scorsi due decenni le applicazioni laser hanno conosciuto un vero e proprio boom nel campo della motoristica aereonautica, soprattutto grazie all'introduzione di nuovi materiali e applicazioni, come le leghe di titanio ed alluminio.

In questi ultimi anni si assiste sempre più al consolidamento delle applicazioni laser per l'AM, ma anche alla crescita di mercati emergenti dovuti ai nuovi trend: elettrificazione, space economy e circular economy. Le proprietà di flessibilità della tecnologia laser nel "material processing" si coniugano, inoltre, con i processi di digitalizzazione della fabbrica.

La maggior parte delle applicazioni laser industriali, si basa sull'uso delle sorgenti laser IR comunemente disponibili, il cui coefficiente di assorbimento da parte di materiali metallici (soprattutto rame e alluminio) è molto basso. Questo è attribuito alla loro lunghezza d'onda, il che significa che gli attuali processi basati sul laser sono molto vicini al raggiungimento della soglia massima di efficienza energetica. Inoltre, l'adozione della tecnologia laser da parte delle PMI è limitata, principalmente a causa dell'elevato investimento richiesto dalle macchine focalizzate sulle applicazioni attualmente disponibili sul mercato. Tuttavia, c'è ancora spazio per miglioramenti significativi in termini di efficienza energetica, produttività e qualità del processo, attraverso:

- Aumento dell'efficienza energetica complessiva dei processi laser-based;
- Miglioramento della versatilità delle apparecchiature;
- Aumento della flessibilità della produzione industriale semplificando la riconfigurazione dei processi;
- Migliore efficienza dei processi laser attraverso la raccolta, lo scambio di dati e gli approcci basati sull'IA;
- Riduzione dei difetti di processo tramite approcci correttivi, nella prospettiva di una Produzione a Zero Difetti e in modo da rendere i processi più Affidabili e Robusti;
- Gestione dei dati e connettività.

Indicatori di impatto

Se la crescita annuale dell'AM complessivo si prevede essere del 20%, proiettata a 17,83 miliardi di euro nel 2025, i fornitori di sistemi si aspettano complessivamente un maggior guadagno annuale del 24,4% nei prossimi 5 anni, più dei fornitori di materiali e servizi.

Gli USA rimarranno il più grande mercato AM (metallo, polimeri, servizi e sistemi), mentre per i sistemi AM in metallo sia zona AMER (America Sud, Centrale e del Nord) sia zona EMEA (Europa, Medio Oriente e Africa) sono in crescita. AMER ed

EMEA sono e rimarranno in testa per quanto riguarda il fatturato dei sistemi, mentre l'area APAC (Asia e Pacifico) è in testa per numero di unità vendute.

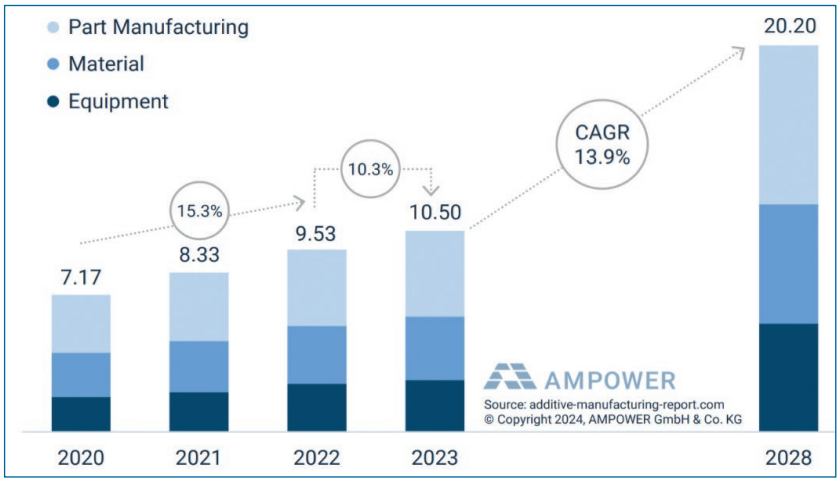


Figura 2: Mercato dell'Additive Manufacturing [EUR Bn]

Per quanto riguarda l'area dei sistemi AM in metallo, nel 2022, il mercato globale della produzione additiva di metalli è stimato in 3.03 miliardi di euro, comprese le vendite di fornitori di sistemi, materiali e parti di produzione. Dopo un anno di crescita solo marginale nel 2020 a causa dell'impatto della COVID-19, la crescita nel 2022 ha raggiunto il 21,1 %, un livello simile all'anno di ripresa del 2021 con 23.2 %. I fornitori prevedono una crescita simile nei prossimi anni con un CAGR (Compounded Average Growth Rate) del 26,1% fino al 2027, appena al di sopra delle previsioni dell'anno precedente. Si prevede che l'industria AM dei metalli genererà un fatturato di quasi 10 miliardi di euro nel 2027.

Stato dell'arte

Nel campo dell'Additive Manufacturing una delle tecnologie laser che si sta dimostrando sempre più valida e interessante è la tecnologia del laser blu, che ha il

potenziale di ridurre drasticamente le perdite di energia, aumentando l'efficienza del processo. Il vantaggio dell'utilizzo di laser con emissione a lunghezze d'onda corte è dato dal maggior assorbimento di alcuni materiali come alluminio, rame, argento e oro, per i quali l'assorbimento a queste lunghezze d'onda è da sette a venti volte maggiore rispetto a quello nell'infrarosso (grafico in fig. 5). Il laser blu, inoltre, porterà ad un processo ad alta efficienza di conversione rispetto all'infrarosso, riducendo il consumo energetico a parità di tipologia di lavorazione rispetto ad un laser IR.

Sul rame, per esempio, il SEC (Specific Energy Consumption) con laser verde è di circa il 15% in meno rispetto al laser IR, questo perché i metalli assorbono meglio nelle lunghezze d'onda corte "e quindi questo" permette la possibilità di aumentare le velocità di processo. Il laser blu, per esempio, è circa il 20% più efficiente rispetto al laser verde.

La tecnologia laser blu sta maturando rapidamente, mostrando semplicità uniche nella conversione da elettrone a fotone e con il potenziale per superare le limitazioni del laser IR, grazie all'impiego di una lunghezza d'onda della luce più corta (360 - 480 nm contro i 1300 - 1700 nm del laser IR910) che consente un maggiore coefficiente di assorbimento del materiale della luce incidente (13 volte meglio assorbita da rame rispetto a IR). La capacità del laser blu di essere assorbito più di dieci volte rispetto ai laser IR consente di eseguire processi con un apporto di energia nominale inferiore. Come risultato della minore energia che passa attraverso la catena ottica, le perdite di energia dovute al riscaldamento delle ottiche vengono drasticamente ridotte, aumentando ulteriormente l'efficienza energetica.

Lo sviluppo di tecnologie laser avanzate, dunque, porterà a un miglioramento dello stato dell'arte per la lavorazione di materiali alto resistenziali ed alto riflettenti, sempre più richiesti e utilizzati per applicazioni nei settori automotive e

aerospace, oil&gas e biomedicale.

Lo sviluppo di diodi laser blu con migliore rapporto prezzo/prestazioni rispetto allo stato attuale apre nuove possibilità, non solo sulla saldatura e il taglio dei metalli altamente riflettenti, ma anche sull'additive manufacturing, su cui oggi risulta molto difficile lo stampaggio utilizzando questa tipologia di polveri metalliche.

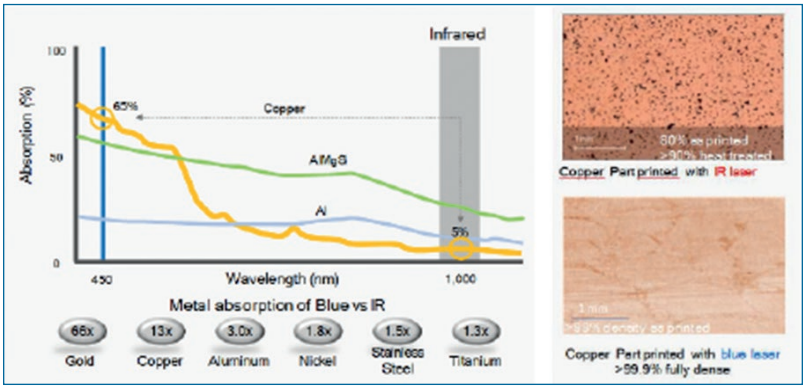


Figura 3: Spettro di assorbimento di diversi metalli con evidenziate le regioni dell'infrarosso tipiche dei laser industriali di alta potenza e del blu.

Facendo l'esempio del rame, materiale di grande interesse per l'elevata conducibilità termica ed elettrica che ne fa il candidato ideale per l'utilizzo, per esempio, in camere di combustione, l'alta riflettanza alla lunghezza d'onda di 1080 nm, comunemente usata dai laser delle stampanti 3D commerciali, fa sì che una frazione considerevole dell'energia fornita dalla sorgente laser venga dispersa e il pool di fusione perda rapidamente il calore a causa dell'elevata conducibilità. L'incapacità di trattenere sufficiente calore causa l'instabilità del pool di fusione, portando a un'ampia varietà di porosità che contribuiscono alla formazione di difettosità nel materiale trattato.
Nell'Additive Manufacturing, quindi, i laser blu consentiranno la produzione di

componenti di alta qualità (es. porosità interna < 2%) e migliori tolleranze, ampliando la gamma di materiali lavorabili con tecnologie laser.

Tabella 1: Laser blu vs. IR

METALLI	FATTORE DI ASSORBIMENTO DEL BLU RISPETTO ALL'IR
Oro	**66X**
Argento	**17X**
Rame	**13X**
Alluminio 1100	**3X**
Nickel	**1.5X**
Acciaio	**1.5X**
Titanio	**1.3X**

Le saldature del rame con laser blu sono estremamente lisce, hanno un'eccellente conducibilità elettrica e mostrano solo pochi spatter sulle aree adiacenti la saldatura. Una saldatura con laser blu, rispetto all'IR, può dunque:

- essere spatter-free & defect-free;
- permettere una penetrazione precisa e replicabile;
- aver un minor impatto termico;
- aumentare la velocità del processo da 2X a 10X;
- risultare, molto versatile ed efficiente con rame e materiali dissimili altrimenti non saldabili con i laser IR.

L'Italia è diventata un hub significativo per la tecnologia di additive manufacturing, con numerosi produttori che offrono soluzioni avanzate nel campo della stampa 3D dei metalli:
Prima Additive, azienda del Gruppo Prima Industrie, si distingue per le sue solu-

zioni basate su tecnologie come il Powder Bed Fusion e il Direct Energy Deposition, utilizzate in settori come l'aerospaziale e l'automobilistico.
Sisma, fondata nel 1961, è un'azienda italiana nota per le sue soluzioni avanzate nel settore industriale. Le loro macchine utilizzano tecnologie come il Selective Laser Melting (SLM) per produrre componenti metallici complessi e di alta qualità.
3D4MEC produce stampanti 3D per metalli, progettate per piccole e medie imprese, e utilizza la tecnologia Powder Bed Fusion per applicazioni industriali.
Industrio, una startup italiana, sviluppa soluzioni innovative che combinano tecnologie additive e subtractive per una varietà di applicazioni industriali e di prototipazione.



Figura 4: Studio di impianti ortopedici leggeri prodotti utilizzando stampa 3D metallica (Università di Oulu, Finlandia)



Figura 5: Fuel nozzle tip prodotto tramite stampa 3D metallica da GE Aviation, attualmente in uso su motori aeronautici CFM Leap (GE Aviation)

Per quanto riguarda la fornitura di servizi, invece, BEAMIT è uno dei principali fornitori europei di servizi di additive manufacturing, e offre una gamma completa di soluzioni che vanno dalla progettazione alla produzione, servendo settori come l'aerospaziale e il medicale. Un'altra azienda italiana che offre servizi di stampa 3D è CRP Technology, che propone servizi di consulenza, sinterizzazione laser selettiva (SLS) e soluzioni di stampa 3D ad alta velocità (HSS). CRP Technology serve settori come l'automotive, l'aerospaziale, il motorsport e l'UAV-UAS. Inoltre, Skorpion Engineering e Prosilas sono altre aziende italiane specializzate nella fornitura di soluzioni di manifattura additiva che servono molti settori, tra cui l'automotive, il medicale, il visual e l'industriale.
Queste aziende dimostrano la versatilità e il potenziale di crescita della tecnologia di additive manufacturing in Italia, coprendo una vasta gamma di settori e applicazioni.

In relazione alle iniziative di Ricerca e Sviluppo nell'ambito della Missione 4 del Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR), focalizzata sull'istruzione e sulla ricerca, è significativo menzionare lo Spoke 6 – "La manifattura additiva come fattore dirompente della Twin Transition" all'interno del progetto MICS (Made in Italy Circolare e Sostenibile) con lo sviluppo di soluzioni innovative per settori chiave del Made in Italy, come la moda, il design e l'automotive, migliorando l'efficienza energetica e la qualità dei prodotti. Questo Spoke è dedicato allo sviluppo e all'integrazione delle tecnologie di Additive Manufacturing (AM) per promuovere una produzione sostenibile e innovativa nei settori industriali italiani. Inoltre, promuovere l'uso di strumenti di progettazione avanzati che ottimizzano l'efficienza energetica e riducono gli sprechi di materiali, e integra soluzioni di IA, Big Data e IoT per migliorare il monitoraggio e il controllo dei processi produttivi, permettendo una produzione "first-time-right" e a zero scarti.

Questa tipologia di collaborazione tra università, centri di ricerca e industrie, crea una rete di competenze e sinergie per accelerare lo sviluppo delle tecnologie AM.

Risorse economiche necessarie

Lo sviluppo dell'additive metallico è un'innovazione radicale. Gli investimenti necessari per lo sviluppo della tecnologia, ossia per la realizzazione di impianti pilota, potrebbe essere quantificato nel range 5-20 Milioni di euro, con un time to market indicativo di 1-3 anni. La realizzazione di singoli progetti o produzioni specifiche potrebbe richiedere singoli investimenti fra 1 e 5 Milioni di euro, in funzione della maturità della tecnologia e dei materiali proposti.

MANIFATTURA ADDITIVA: MATERIALI POLIMERICI SOSTENIBILI E MULTIFUNZIONALI

Quando si parla di Additive Manufacturing di materiali polimerici, ci si riferisce all'uso di polimeri come materiale di base nel processo di fabbricazione additiva. Questo processo può essere applicato a vari stati della materia prima, come filamenti estrusi, resine liquide o polveri. Al momento attuale l'attenzione degli investigatori è particolarmente focalizzata sulle tipologie di materiali polimerici stampabili e, in particolare, su polimeri sostenibili e/o multifunzionali. A tal proposito, i polimeri biodegradabili e/o compostabili, prodotti a partire da risorse naturali e con l'eventuale aggiunta di additivi, sono di interesse per applicazioni nei settori dell'automotive e del packaging. A loro volta, i tecnopolimeri, tal quali o rinforzati con fibra eventualmente da riciclo, sono di interesse per applicazioni nei settori aerospaziale e automotive.

Il processamento di tali categorie di materiali va correlato alle tecnologie di stampa attualmente disponibili sul mercato, partendo dal presupposto che le tecniche basate sull'approccio additivo favoriscono il risparmio delle risorse e la minimizzazione degli scarti (generazione di rifiuti) rispetto alle "classiche" lavorazioni sottrattive. Le tecniche di Additive Manufacturing più comunemente usate includono la Stereolitografia, la Polyjet Technology, la Sinterizzazione Laser Selettiva e il Fused Deposition Modeling. Si riporta di seguito una breve panoramica delle principali caratteristiche di tali tecnologie:

- Stereolitografia (SLA): questa tecnica utilizza un laser UV per solidificare selettivamente una resina fotosensibile liquida, creando l'oggetto 3D strato per strato. La resina non solidificata rimane liquida e può essere riutilizzata. Questa tecnica è nota per la sua alta precisione e per la capacità di creare oggetti con geometrie complesse.
- PolyJet Technology: questa tecnologia funziona depositando piccole gocce di resina fotopolimerica attraverso una testina di stampa, molto simile a quella di una stampante a getto d'inchiostro. Le gocce di resina vengono poi indurite mediante radiazione UV.
  La stampa multi-materiale e policroma è possibile in quanto

il portatestina di stampa presenta numerosi ugelli in grado di spruzzare simultaneamente vari materiali.

- Sinterizzazione Laser Selettiva (SLS): questa tecnologia utilizza un laser ad alta potenza per sinterizzare piccole particelle di polvere di polimero, trasformandole in una struttura solida basata su un modello 3D. Questo processo avviene strato per strato, con il laser che sinterizza la polvere sulla base del modello 3D fornito.
- Fused Deposition Modeling (FDM): questa tecnologia funziona riscaldando e fondendo un filamento termoplastico, che viene poi estruso attraverso un ugello sottile per costruire l'oggetto 3D, strato per strato. L'ugello si muove lungo gli assi X e Y per depositare il materiale, mentre il piatto di stampa si muove lungo l'asse Z.

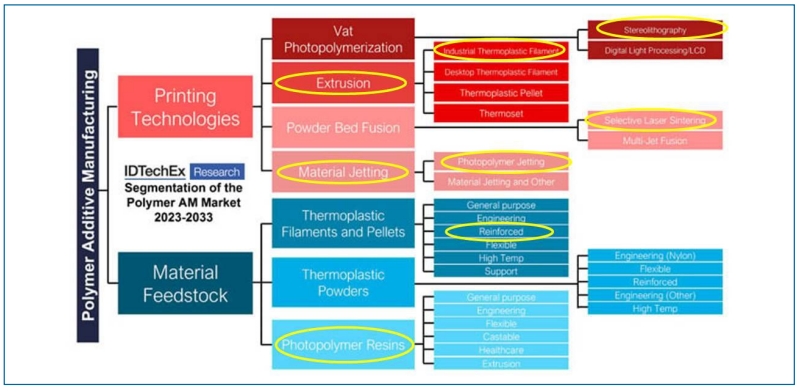


Figura 6: Tecnologie AM e materiali per la realizzazione di componenti polimerici (Fonte: IDTechEx https://www.3dnatives.com/it/stampa-3d-polimeri-160220239/).

La Figura 6 riporta una panoramica delle tecnologie di stampa 3D utilizzate per materiali polimerici.

La tecnologia FDM o FFF (Fused Filament Fabrication) ricopre particolare interesse tra le tecniche AM citate per il processamento dei polimeri.

Questa tecnica ha una vasta diffusione per il costo contenuto delle stampanti 3D, che trovano larga applicazione nel settore casalingo e hobbistico. I materiali principalmente stampati sono PLA e ABS, anche se l'interesse del largo pubblico e la versatilità della tecnica hanno portato allo sviluppo di una vasta gamma di materiali plastici (ASA, PETG, PP, Nylon, ecc.) e compositi, ovvero rinforzati con filler che ne modificano le proprietà (filamenti compositi fibro-rinforzati, elettricamente conduttivi, termicamente conduttivi, ecc.).
La materia prima, sotto forma di granuli (pellet), viene estrusa per realizzare filamenti per la stampa 3D, che servono come materiale di partenza per le stampanti FFF. Esistono anche stampanti 3D che impiegano direttamente pellet ma, a causa del peso degli estrusori, solitamente si tratta di stampanti di grosse dimensioni. La capacità di processare granuli di plastica apre le porte ad interessanti strade di riciclo, ovvero al ri-processamento di plastiche esauste, macinate ed estruse per la realizzazione di nuovi filamenti. Come riportato nella scheda relativa alla tecnologia prioritaria "Microelettronica e semiconduttori", la stampa 3D potrebbe anche essere impiegata per la progettazione e la produzione di package per semiconduttori, in particolare per sensori termici ad infrarossi.

Motivazione per lo sviluppo

Le tecnologie di stampa 3D per materiali plastici sono una solida realtà da alcuni anni e sono certamente destinate ad una sempre più ampia diffusione, grazie alla semplicità di utilizzo e al costo molto contenuto per le stampanti e per le materie prime impiegabili per svariate applicazioni.
L'AM polimerico consente la prototipazione rapida e la realizzazione di geometrie complesse e strutture leggere, con un notevole risparmio di materiale e una riduzione degli scarti di lavorazione, ivi incluso il possibile recupero del materiale.. Grazie alla sua flessibilità si presta alla customizzazione, ovvero alla realizzazione di parti personalizzate in volumi contenuti, spesso su richiesta specifica, facilitando la produzione di parti di ricambio e l'assemblaggio di componenti e dispositivi, a beneficio della loro durata. Consente un setup continuo del processo e dell'asset

produttivo, a costi relativamente contenuti.
Il time-to-market è breve, sebbene vi sia la necessità di ampliare la gamma di materiali stampabili, partendo dalle categorie menzionate nella precedente sezione. La diffusione della tecnologia di stampa 3D di polimeri, in combinazione con l'ampia diffusione di approcci di e-commerce anche per applicazioni industriali, offre interessanti opportunità per sviluppare modelli di business orientati alla personalizzazione/customizzazione dei processi di innovazione e del prodotto finale. Grazie al coinvolgimento dei fornitori di ricerca e sviluppo, dei fornitori di materie prime, di PMI del territorio, degli utilizzatori finali, si può agevolare lo sviluppo della filiera corta e di un concetto di "manifattura urbana", con possibili ricadute anche nel settore artigianale. Si aprono, quindi, nuove opportunità in materia di produzione decentralizzata, come alternativa alla produzione centralizzata, quest'ultima spesso favorita dalla presenza di un'economia di scala, tipica delle produzioni in larga serie che utilizzano tecnologie di manifattura sottrattiva. Di contro, la produzione decentralizzata comporta notevoli vantaggi nelle ridotte tempistiche di produzione e di consegna, minori costi di investimento, minori costi relativi alla logistica, oltre a consentire un design più rispondente alle specifiche richieste dei clienti.
Nonostante sia menzionata da alcuni anni, la produzione personalizzata è tuttora un tipo di produzione ancora in corso di sviluppo, dal momento che è strettamente connessa alla realizzazione di prodotti con funzionalità specifiche, il cui design può essere progettato, gestito e modificato in tempo reale, in stretta collaborazione con il cliente finale. Perché la produzione personalizzata mediante AM possa estendersi alle PMI e alla società, occorrono infrastrutture territoriali atte ad implementare tale concetto, soprattutto nelle fasi di progettazione e validazione, e a garantire la personalizzazione a costi contenuti, attraverso la produzione di pezzi singoli o di piccoli lotti "on demand", anche a semplice scopo dimostrativo.

Indicatori di impatto

Le tecnologie di manifattura additiva godono del vantaggio di possedere un carattere abilitante e trasversale rispetto a vari ambiti applicativi e settori industriali.

Hanno il potenziale di generare un significativo impatto industriale, nuovi investimenti, soprattutto da parte delle PMI, e nuovi posti di lavoro a breve e medio termine, nonché di portare sul mercato prodotti più sostenibili. I maggiori impatti economici si possono preventivare soprattutto nei settori automotive, aeronautico e del packaging.
Secondo una stima effettuata da IDTechEx, riportata nel rapporto "Polymer Additive Manufacturing 2023-2033: Technology and Market Outlook" [2], la stampa 3D di materiali polimerici dovrebbe generare un valore di 21 miliardi di dollari entro il 2033, laddove il fatturato dei materiali polimerici supererà il fatturato dell'hardware, raggiungendo un valore di 15 miliardi di dollari.

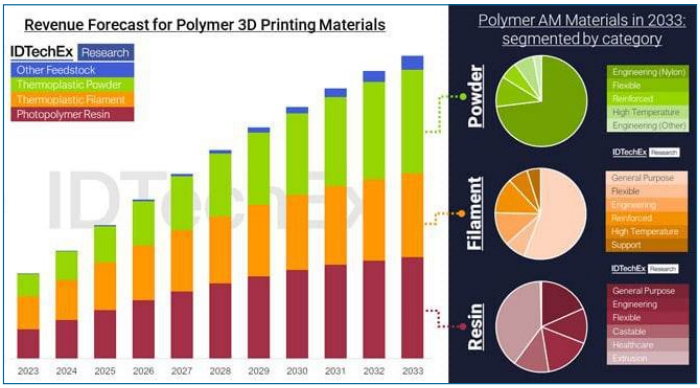


Figura 7: Fatturato del mercato per categoria di materiale (Fonte: IDTechEx https://www.3dnatives.com/it/stampa-3d-polimeri-160220239/).

La sperimentazione di nuove composizioni e componenti multifunzionali può generare impatti a breve termine sulla produzione industriale, incrementando il know-how esistente, e sulle abitudini sociali, anche grazie ad una migliore personalizzazione del prodotto. Notevoli possono essere gli impatti sulle politiche nazionali e locali, sia per quanto attiene la valorizzazione degli scarti di origine naturale (vedi materiali biodegradabili) sia in merito alla sostenibilità e circolarità

dei prodotti, grazie alla valorizzazione di prodotti da riciclo. Molti investimenti dovranno essere dedicati allo studio e validazione di nuove composizioni. Ad esempio, l'impatto dei polimetri biodegradabili e compostabili potrà essere massimizzato anche grazie ad opportune politiche e relative norme che promuovano e impongano la riduzione degli scarti e la transizione verso materiali più circolari e meno impattanti sull'ambiente e sulla salute al termine della loro vita utile. In sintesi, lo sviluppo di nuovi materiali e delle relative tecnologie di processamento di tipo additivo può dare un contributo notevole sia alla transizione digitale che alla transizione ambientale.

Stato dell'arte

Come detto, le due linee principali di sviluppo vertono su polimeri circolari, biodegradabili e/o compostabili, che sostituiscano le comuni plastiche di origine fossile, e su polimeri multifunzionali e ad elevate prestazioni.

Materiali sostenibili e biodegradabili

L'attenzione verso la sostenibilità ambientale ed economica implica significativi sviluppi nel campo del riciclo e del recupero dei materiali plastici, nonché della produzione di materiali più sostenibili e meno impattanti sull'ambiente, sia in fase di produzione, con relativa diminuzione della CO2 necessaria per la loro produzione, sia in fase di gestione del fine vita, quando diventa indispensabile provvedere alla dismissione, alla raccolta e all'eventuale conferimento in discarica dei materiali non più utilizzati.

Grande attenzione è attualmente indirizzata alla produzione di componenti in materiali polimerici biodegradabili o compostabili, derivati da fonti rinnovabili e di origine naturale piuttosto che da fonti fossili, come nel caso del ben noto PLA (acido polilattico), utilizzato soprattutto nel settore degli imballaggi e dell'hobbistica, o di materiali di più recente concezione per i quali non esiste ancora un vero e proprio mercato (PHA, PHB, ecc).

Composti termoplastici biodegradabili possono essere ottenuti rinforzando la

matrice termoplastica di partenza con additivi basati su fibre naturali (ad esempio, cellulosa o lignina) o sottoprodotti di origine agricola, al fine di sostituire gli additivi sintetici e realizzare materiali totalmente biodegradabili e con migliori caratteristiche meccaniche o prestazionali, ad esempio con proprietà di resistenza al fuoco o ai solventi. I materiali di partenza vengono solitamente processati per la realizzazione di filamenti per la stampa 3D. Componenti in materiale biocomposito si prestano, ad esempio, ad applicazioni nel settore del packaging.

Tecnopolimeri multifunzionali e/o ad alte prestazioni

Di particolare interesse è l'applicazione della tecnologia AM per la stampa di tecnopolimeri, quali PEEK, PEI, PA, PP, nylon, tal quali o rinforzati con fibre di vetro (GF) o carbonio (CF). Questi materiali stanno ricevendo un crescente interesse per applicazioni nei settori automotive ed aeronautico. Tuttavia, il processamento di tali tecnopolimeri richiede macchine di nuova generazione, dotate di estrusori e piatti di deposizione ad alta temperatura, più elevata rispetto alle macchine convenzionali, nonché di camere riscaldate per la cristallizzazione controllata dei polimeri. Anche nel caso di siffatti polimeri o dei loro compositi fibro-rinforzati è in crescente aumento la tendenza al riciclo del materiale di partenza attraverso processi di macinazione e ri-estrusione o l'impiego di materiali riciclati.

Nelle figure 8 e 9 si riportano alcuni esempi di componenti (connettore di tenuta e ingranaggio di trasmissione), realizzati da una ditta italiana (APIUM), in materiale composito ottenuto aggiungendo alla matrice in PEEK il 30% di fibre di carbonio, al fine di incrementare le proprietà termiche e meccaniche del materiale base. Le strutture dei canali e delle guide di siffatti componenti possono essere progettate con elevata flessibilità.



Figura 8: Connettore di tenuta stampato mediante AM (Fonte: APIUM)



Figura 9: Ingranaggio di trasmissione stampato mediante AM (Fonte: APIUM).

In ultimo, va menzionata la comparsa sul mercato di sistemi che usano matrici plastiche ad elevato contenuto di filler metallico sinterizzabili. La tecnica, che si inspira alla "metal injection molding" ma senza la necessità di stampi, grazie all'AM, impiega la tecnologia FFF per formare oggetti in 3D da sottoporre poi a processi di debinding/sintering in forni ad atmosfera controllata. Esistono delle case produttrici che hanno sviluppato il loro sistema proprietario materiale/

macchina/processamento. Tuttavia, stanno iniziando a comparire sul mercato filamenti sinterizzabili ad alto contenuto di metallo o ceramico, processabili mediante le normali stampanti FFF. La tecnica, che è ancora in fase di diffusione, offre, con tutti i limiti del caso, il vantaggio di realizzare oggetti densificati con tecnologia AM a costi notevolmente contenuti rispetto alle macchine a letto di polvere (SLM).

In Italia, la stampa 3D polimerica sta guadagnando terreno grazie alla sua flessibilità e alla possibilità di personalizzazione. Secondo diverse ricerche di mercato, le tecnologie additive stanno trovando un ruolo sempre più importante nella produzione industriale. Questo è evidente considerando che la personalizzazione, la differenziazione e la flessibilità di impiego stanno garantendo una sempre maggiore penetrazione in tutte le applicazioni. La stampa 3D polimerica sta vivendo un periodo di rapida crescita e innovazione, con un crescente interesse da parte di vari settori industriali e sempre più aziende stanno adottando questa tecnologia per migliorare i loro processi produttivi. Possiamo, a titolo di esempio, citare gli esempi di Roboze, HB-Technology, APIUM, GIMAX 3D.

All'estero, la stampa 3D polimerica sta vivendo una crescita significativa. Secondo la ricerca di mercato "State of 3D Printing 2021", la stampa 3D di polimeri avrà un valore di 21 miliardi di dollari entro il 2033. Questo è un indicatore del crescente interesse per questa tecnologia in vari settori industriali. Varie startup stanno emergendo con nuovi materiali e processi di stampa più veloci o più efficienti, spingendo il potenziale della produzione additiva di polimeri. Questo dimostra che le aziende stanno investendo in tale tecnologia, cercando di sfruttare al meglio le sue potenzialità. Tra i principali fornitori di stampanti 3D, troviamo attori storici come 3D Systems e Stratasys, che continuano a innovare, così come nuove startup che stanno emergendo con soluzioni innovative.

Nel complesso, il grado di sviluppo è, per diverse applicazioni, già sul livello della produzione industriale. L'attenzione verte sulla formulazione di nuove composizioni, ad esempio per la realizzazione di nuovi filamenti e componenti con caratteristiche prestazionali o di sostenibilità e riciclabilità più elevate rispetto ai materiali commerciali, o con un costo inferiore. In tal caso il TRL è ancora relativamente basso, trattandosi spesso di sperimentazioni a livello di laboratorio, che devono ancora raggiungere un TRL6-8

Risorse economiche necessarie

Le maggiori risorse economiche dovranno essere indirizzate alla realizzazione di impianti per la sintesi di miscele polimeriche, come nel caso dei processi di fermentazione per la sintesi di biopolimeri di origine naturale. Certamente si renderanno indispensabili investimenti su scala regionale che possano agevolare lo sviluppo della filiera corta, in un'ottica di diffusione della produzione personalizzata. Notevoli le connessioni con i maggiori programmi di ricerca europei, come Clean Sky, Horizon Europe (Cluster 4 e Cluster 6), CBE-JU (Circular Bio-based Europe-Joint Undertaking).

Lo sviluppo di AM polimerico si può ad oggi considerare una innovazione di tipo incrementale. Gli investimenti necessari (pubblico e privato) per lo sviluppo della tecnologia, ossia per la realizzazione di impianti pilota, potrebbe essere quantificato nel range 5-20 Milioni di euro, con un time to market indicativo di 1-3 anni. Naturalmente la realizzazione di singoli progetti o produzioni specifiche potrebbe richiedere singoli investimenti sotto 1 M o fra 1 e 5 M, in funzione della maturità della tecnologia e dei materiali proposti (materiali ad elevata performance, sostenibili o da riciclo).

MANIFATTURA ADDITIVA: MATERIALI CERAMICI

La manifattura additiva dei materiali ceramici si trova attualmente ad uno stadio meno avanzato rispetto alle altre categorie di materiali, anche per via delle caratteristiche peculiari di tali materiali, specie in relazione ad applicazioni critiche dove, oltre alla durezza, resistenza termica e all'abrasione, sono richieste buone caratteristiche meccaniche. L'interesse attuale verte sia sulle materie prime sia sui processi utilizzabili. In particolare, le materie prime possono presentarsi sotto forma di sospensioni o di paste. La lista dei materiali stampabili è, tuttavia, ancora limitata.

Come detto, allo stato attuale, le tecnologie di Additive Manufacturing più promettenti per processare materiali ceramici si differenziano principalmente in relazione alla tecnica di stampa e allo stato della materia prima da processare:

- DLP (Digital Light Processing), solitamente impiegata per realizzare componenti in allumina, zirconia, compositi ZTA/ATZ, silice;
- LDM (Liquid Deposition Modeling), tecnica utilizzata con successo per stampare componenti in tialite, zirconia, allumina, carburo di silicio, compositi intermetallici (SiC/MoSi2).

Nel processo DLP il materiale di partenza è costituito da una miscela liquida, uno slurry ceramico fotosensibile, costituito da una resina fotopolimerica ed una polvere ceramica. Miscelando i componenti della resina, gli additivi reologici e la polvere ceramica anidra si ottiene uno slurry stampabile in 3D. Il materiale "verde" stampato deve essere sottoposto ad un trattamento termico di debinding e sintering, al fine di ridurne la porosità ed aumentarne la densità, ottimizzandone in tal modo l'integrità e la resistenza meccanica.

Nel processo LDM, invece, il materiale di partenza è costituito da una pasta ceramica, che viene utilizzata per stampare un componente "verde", successivamente sottoposto a trattamento di debinding e sintering. Le paste ceramiche stampabili sono generalmente costituite da un contenuto solido superiore al 50% ed un

contenuto organico inferiore al 3%. Per poter essere processate devono, inoltre, possedere ben determinate caratteristiche reologiche di viscosità ed elasticità.
Come vedremo nel dettaglio, le potenziali applicazioni possono riguardare vari settori industriali (energia, automotive, aerospazio, biomedicale). Come riportato nella scheda della tecnologia prioritaria "Microelettronica e semiconduttori", la stampa 3D di materiali ceramici potrebbe anche essere utilizzata per realizzare il package di sensori di pressione impermeabili e ad elevate prestazioni.

Motivazione per lo sviluppo

Una più ampia e capillare diffusione delle tecnologie di AM in ambito industriale, coadiuvata da un migliore controllo dei processi ed in concomitanza con lo sviluppo di nuovi materiali ceramici stampabili, consentirà la produzione di componenti ceramici con geometrie e caratteristiche difficilmente ottenibili con le tecniche più diffuse e consolidate, quali ad esempio il processo ceramico convenzionale e lo stampaggio ad iniezione ceramico.
L'impiego dei materiali ceramici avanzati per applicazioni industriali ove siano richieste elevate caratteristiche prestazionali in condizioni di esercizio particolarmente gravose apporta notevoli benefici in termini di:

- Alleggerimento strutturale, grazie all'elevato rapporto resistenza/peso specifico;
- Notevole resistenza termo-meccanica;
- Resistenza ad elevate temperature ed in presenza di fenomeni di corrosione, ossidazione ed usura abrasiva.

L'interesse industriale verte sullo sviluppo di tecniche di stampa 3D a basso costo, che siano competitive rispetto alle tecniche tradizionali, in termini di prototipazione e design, nonché delle relative tempistiche e dei relativi costi di produzione. Il "time-to-market" è essenzialmente legato al grado di sviluppo che le tecnologie di stampa di componenti ceramici raggiungeranno nei prossimi anni, in relazione alle tipologie di materiali processabili, alla tecnica di stampa e al controllo del relativo processo al fine di ottenere componenti privi di difetti, all'affidabilità degli

stessi componenti stampati, in termini di caratteristiche prestazionali alle condizioni di lavoro attese, trattandosi quasi sempre di condizioni critiche in termini di elevate temperature di lavoro e presenza di fenomeni di degradazione derivanti da corrosione, usura o erosione superficiale.

Indicatori di impatto

La tecnologia dell'Additive Manufacturing per la realizzazione di componenti in materiali ceramici avanzati offre interessanti opportunità e potenziali ricadute per gli anni a venire (vedi Figura 10). Il mercato relativo all'Additive Manufacturing nel settore dei materiali ceramici è, infatti, in netta crescita e si estende a diverse categorie di materiali destinati a svariate applicazioni, nei settori aerospaziale, automotive, marino, energetico, elettronico, biomedicale (Tabella 2). Sono già in commercio prodotti in ceramico realizzati mediante tecnologia di Additive Manufacturing, ma spesso si tratta di componenti in piccola serie, talora progettati e realizzati "on-demand", e solitamente caratterizzati da un costo elevato e destinati ad applicazioni di nicchia.

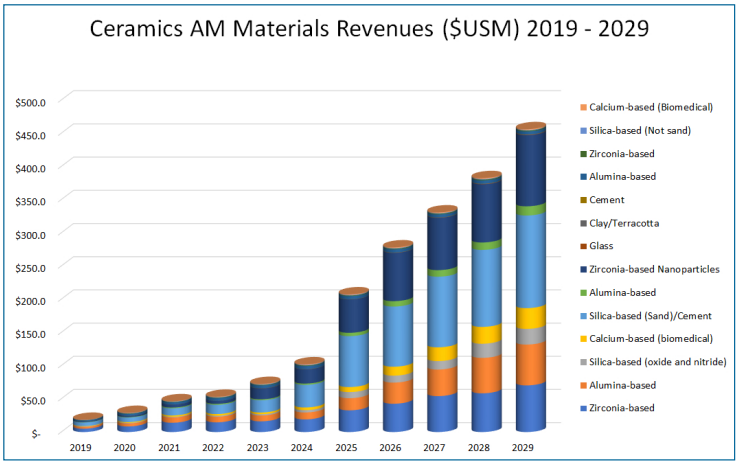


Figura 10: Fatturato dei materiali ceramici prodotti con tecnologia AM (Fonte: https://additivemanufacturingresearch.com/news/ceramics-additive-manufacturing-materials-sales-at-450-million-and-an-overall-3-8-billion-ceramics-am-market-in-2029/).

La sperimentazione di nuove composizioni può generare impatti a medio termine sulla produzione industriale, incrementando radicalmente il know-how esistente. Notevoli possono essere gli impatti sulle politiche nazionali e locali, specialmente con riferimento alla sostenibilità e alla circolarità dei prodotti, grazie alla valorizzazione di prodotti da riciclo. Gli investimenti saranno soprattutto su ricerca di nuove composizioni, nuovi processi e qualificazione dei componenti, viste le peculiarità dei materiali ceramici, cui si richiedono elevati requisiti prestazionali specie quando i relativi componenti sono chiamati a lavorare in condizioni estreme, in presenza di temperature molto elevate, fenomeni corrosivi e abrasivi, che possono mettere a rischio la resistenza e l'integrità strutturale degli stessi.
L'impatto che potrà riguardare il settore industriale è elevato ma non sarà a brevissimo giro, richiedendo un processo di innovazione non incrementale, bensì radicale, specialmente con riferimento alle fasi di progettazione e realizzazione di componenti ceramici per applicazioni in condizioni di impiego particolarmente gravose.

Contesto/Stato dell'arte in Italia e all'estero

La Tabella 2 riporta un elenco di esempi in materia di materiali ceramici stampabili, con riferimento alle relative applicazioni in determinati settori industriali.

Tabella 2: Esempi di settori, applicazioni e materiali ceramici relativi alla tecnologia AM

SETTORE	APPLICAZIONE	MATERIALE
Lavorazioni industriali	Stampi, anime per fonderie, utensili	Silice, quarzo, cementi, sabbia
Biomedico e Dentale	Protesi ossee e dentali, utensili medici	Zirconia, idrossiapatite (HA/HAP), TCP, allumina, carburo di silicio, nitruro di silicio, carburo di boro
Aerospazio e Difesa	Sensori, componenti termici, guarnizioni, componenti di armi, iniettori di carburante, componenti di satelliti, collettori	Zirconia, allumina, carburo di silicio, nitruro di silicio, carburo di boro
Elettronica ed Ottica	Sensori, collettori, componenti di antenne, tubi a raggi X, dispositivi elettromagnetici	Zirconia, allumina, carburo di silicio
Trasporti	Sensori, componenti di propulsori, sistemi idraulici, valvole, tenute, scambiatori, dischi freno, cuscinetti, iniettori	Zirconia, allumina, carburo di silicio
Energia	Parti di navi, componenti di propulsori, microturbine, sistemi idraulici, cuscinetti, valvole, tenute, parti di pompe	Zirconia, allumina, carburo di silicio

Esempi di componenti ceramici stampabili con processo AM includono impianti dentali endossei e corone dentali in zirconia o ZTA/ATZ, ma anche refrattari (silica), protesi dentali e innesti ossei (HA), cuscinetti, gioielli, matrici di estrusione (zirconia), componenti per l'elettronica e valvole (allumina).

La formulazione di nuove paste ceramiche stampabili fornisce interessanti opportunità per futuri sviluppi della tecnologia e di componenti avanzati, ad esempio per applicazioni in ambito energetico. Un esempio scaturisce da un recente caso studio, che ha studiato le caratteristiche della pasta di tialite, materiale che si presta ad essere utilizzato per la realizzazione di bracieri, offrendo la possibilità di realizzare un componente con un design specifico, che con tecniche di fusione in stampo non sarebbe realizzabile, consentendo un incremento della temperatura

operativa, un incremento dell'efficienza di combustione e una riduzione delle emissioni. Un prototipo di crogiolo in tialite (Al2TiO5) per stufa a pellet (Figura 12) è stato realizzato con tecnica LDM (progetto AMCER – Addivite Manufacturing of CERamic components for the sustainability of domestic heating, PoC ENEA 2018). Riguardo ad ulteriori componenti per l'efficientamento energetico, a titolo di esempio, possiamo citare il prototipo del gassificatore ceramico per impianti a biomassa recentemente sviluppato da ENEA (Figura 13), realizzato con tecnica LDM (progetto "1.3 Materiali di frontiere per usi energetici", Piano della Ricerca di Sistema Elettrico PTR 2019-2021).

Il grado di sviluppo di tali componenti raggiunto su scala di laboratorio è dell'ordine di TRL3/TRL4. Per le protesi di corone dentali in porcellana (progetto AMACO) e gli impianti endossei in ZTA (progetto PRODE), realizzati a partire da sospensioni ceramiche fotosensibili, il grado di sviluppo attualmente raggiunto su scala di laboratorio è dell'ordine di TRL3.

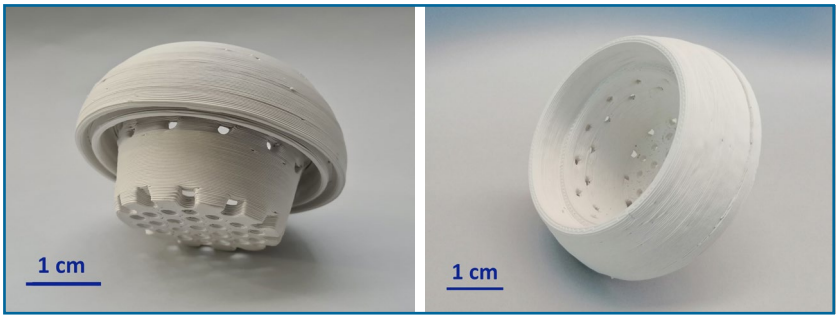


Figura 11: Crogiolo in tialite stampato mediante tecnologia AM (Fonte: ENEA)



Figura 12: Gassificatore in tialite stampato mediante tecnologia AM (Fonte: ENEA).

In Italia l'interesse per la manifattura additiva di componenti ceramici sta progressivamente emergendo e vi sono ricerche e progetti in corso, fra cui quelli sviluppati da ENEA, attualmente impegnata nella formulazione di nuove feedstock ceramiche (slurry e paste), nel controllo dei parametri operativi per la messa a punto dei trattamenti termici di debinding e sintering, forte della consolidata esperienza su svariate tipologie di ceramici avanzati, che permette la valutazione di fattibilità dello sviluppo di componenti su richiesta delle aziende. Proprio la formulazione di nuove paste ceramiche stampabili fornisce interessanti opportunità per futuri sviluppi della tecnologia.

La stampa 3D di materiali ceramici è un campo in rapida evoluzione, con applicazioni che vanno dall'arte all'elettronica, dai settori militari a quelli aerospaziali e biomedicali. In Italia, ci sono realtà industriali e laboratori di ricerca che stanno esplorando le potenzialità di questa tecnologia. Di conseguenza, sul mercato stanno emergendo le prime applicazioni. WASP, ad esempio, è uno dei pionieri

nel campo della stampa 3D di argille e altri materiali fluido-densi. WASP si concentra sullo sviluppo di sistemi di stampa 3D che consentono l'utilizzo di materiali funzionali come l'argilla, il cemento, la porcellana, l'allumina, la zirconia. Anche i volumi di stampa sono molto vari, in relazione ai materiali stampati, arrivando fino ad un volume utile di 1000x1000 mm nel caso dei cementi. Le applicazioni variano dall'artigianato digitale alla stampa 3D medicale, ad esempio nel campo dell'ortopedia, con soluzioni personalizzabili su misura. Un'altra azienda italiana è MyPart s.r.l., fornitore certificato di servizi di Rapid Manufacturing, specializzata nella progettazione e produzione di componenti per l'aeronautica e la meccanica di precisione tramite diverse tecnologie di stampa e diversi materiali, tra cui quelli ceramici.

In Europa sono presenti diverse realtà in grado di offrire prodotti ceramici stampanti in 3D, come Lithoz con sede in Austria e 3DCeram con sede in Francia. Entrambe hanno la possibilità di produrre componenti utili per disparati settori, dal biomedicale all'aerospazio. Un'altra entità rilevante è ExOne, con sedi in Germania, dove sistemi di stampa 3D industriali trasformano materiali granulari, tra cui silice e sabbia ceramica, nonché materiali di recupero come cemento ripolverizzato e pasta di legno, in stampi e anime per fusione di precisione metallica, soluzioni innovative di attrezzaggio rapido o prodotti personalizzati o restauro architettonico.



Figura 13: Componente in ceramico con geometria molto complessa prodotto tramite stampa 3D (Fonte: Lithoz)

Voxeljet è un'altra azienda europea che, tramite processi di binder jetting, è in grado di produrre componenti ceramici a geometrie complesse su piccola e grande scala. Con tale processo è possibile produrre, senza costosi utensili, strutture geometriche complesse con nuove proprietà; ad esempio, strutture ceramiche bioattive, porose e leggere
Altre aziende, come Nanoe, stanno emergendo nella stampa 3D di nanoparticelle di ceramica. In particolare, polveri ceramiche 'tradizionali' vengono rese disponibili per la maggior parte delle stampanti 3D di tipo FDM.

Sempre a livello internazionale, un altro esempio giunge da un gruppo di ricercatori provenienti dall'Istituto di Tecnologia di Karlsruhe (KIT) e dall'Università di Friburgo, che, in un articolo dal titolo "Fused Filament Fabrication of Small Ceramic Components", ha presentato. lo sviluppo di un innovativo materiale ceramico composito e l'implementazione di una nuova serie di processi per migliorare l'efficienza e ridurre i costi della prototipazione rapida di componenti ceramici stampati in 3D. In particolare, è stata analizzata la possibilità di stampare prodotti ceramici tramite l'impiego di innovativi materiali compositi polimerico-ceramico, utilizzabili in stampanti del tipo Fused Filament Fabrication, ottenendo un processo molto economico e flessibile secondo le esigenze di prodotto.

Risorse economiche necessarie

Lo sviluppo dell'additive manufacturing ceramico è un'innovazione radicale che richiede tempi più lunghi rispetto all'AM polimerico ed investimenti sia nella preparazione delle miscele utilizzabili come materie prime per la stampa (paste o slurry), sia nel processamento e nella qualifica dei componenti ceramici. A tal proposito, saranno necessari impianti pilota che consentano di processare la materia prima fino al prodotto finito, con l'interessante opzione di recuperare i materiali a fine vita per la realizzazione di nuovi prodotti.
Gli investimenti necessari (pubblico e privato) per lo sviluppo della tecnologia, ossia per la realizzazione di impianti pilota, con un time to market indicativo di 1-3

anni, potrebbero essere quantificati nel range 5-20Milioni di euro. Naturalmente, la realizzazione di singoli progetti o produzioni specifiche per successiva messa sul mercato dei prodotti potrebbe richiedere singoli investimenti fra 1 e 5 Milioni di euro.

SISTEMI ROBOTICI COLLABORATIVI ED ESOSCHELETRI

Oggi la robotica rappresenta una tecnologia chiave per rafforzare la competitività delle imprese da vari punti di vista: sia per affrontare le sfide sul piano economico-sociale (scarsità di mano d'opera, invecchiamento, costo del lavoro...), sia in termini di qualità e flessibilità della produzione. In particolare, le tecnologie robotiche collaborative sono quel ramo della robotica industriale che si occupa di sviluppare sistemi atti ad affiancare e supportare le attività umane nei processi produttivi, combinando le capacità e flessibilità delle persone alle prestazioni tipiche dei robot (potenza, ripetitività e resistenza), tramite condivisione di spazi, componenti e strumenti di lavoro.

Le tecnologie robotiche collaborative vanno intese come sistemi, di componenti meccatronici, quali ad esempio bracci meccanici ed end-effector dotati di basse inerzie e velocità (o impedenza), sensori (tattili, capacitivi, visivi, LIDAR ecc.), interfacce uomo-robot, e moduli di controllo software, che permettano al robot di interagire fisicamente con le persone o l'ambiente circostante e di adattare il proprio comportamento (traiettorie, velocità e forze) in base ad esse.

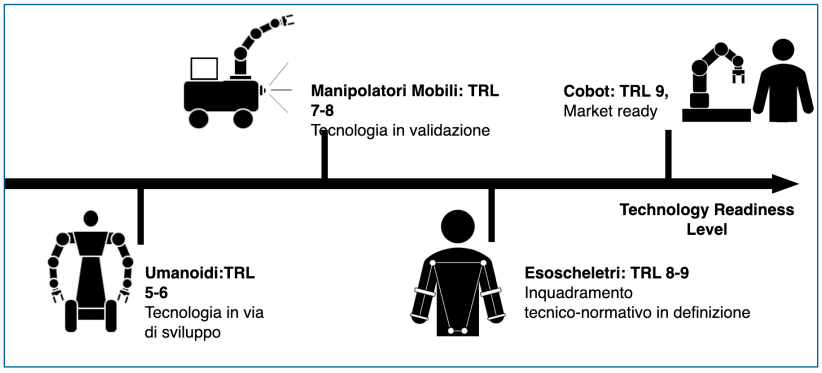


Figura 1: Panoramica delle tecnologie robotiche collaborative in relazione al loro stato di maturità tecnologica (TRL).

La famiglia delle **tecnologie robotiche collaborative** comprende al suo interno diversi sistemi, tra loro complementari, che è possibile classificare in due macro-categorie: i sistemi robotici collaborativi che *affiancano* l'uomo supportandolo nelle sue attività e i sistemi indossabili che quindi assistono la persona agendo

in *simbiosi* con essa. All'interno di queste due macrocategorie è possibile identificare delle ulteriori classi in base alle diverse tipologie di applicazione, challenge tecnologiche e stato di maturità:

1. Sistemi robotici collaborativi:

I robot collaborativi (o cobot) sono sistemi progettati per lavorare e interagire con le persone assistendo in attività gravose dal punto di vista ergonomico. Grazie ai sensori e i controlli di cui sono dotati, i cobot percepiscono l'interazione con l'ambiente esterno e si adattano ad esso. Questi possono essere programmati in modo semplice e intuitivo, per esempio, guidando manualmente l'end-effector nella posizione desiderata, garantendo la sicurezza degli operatori.

Pur essendo una tecnologia relativamente giovane, apparsa sul mercato alla fine degli anni 2000 e normata solamente a partire dal 2016, i cobot si sono affermati in ambito industriale, per il loro uso intuitivo, per le ridotte dimensioni e la sicurezza che riescono a garantire.

Le applicazioni più significative riguardano l'asservimento macchina, il controllo qualità, lavorazioni meccaniche di finitura, il dispensing e l'assemblaggio, la movimentazione materiali e logistica (pallettizzazione). Attività caratterizzate dall'interazione con persone o cose e che non richiedono lead time elevati. In questo senso, i robot collaborativi integrano e non sostituiscono i robot industriali tradizionali, che invece restano la soluzione più efficace per produzioni su grande scala completamente automatizzate, dove per migliorare produttività e redditività sono richieste velocità e precisioni molto elevate.

Occorre sottolineare che i sistemi robotici collaborativi sono un ambito caratterizzato da forte innovazione tecnologica, per cui si ritiene utile dare indicazioni di visione anche sugli sviluppi di sistemi attualmente a TRL <9 riportati in Figura 1, che si stima possano avere un potenziale nel futuro[3]. Un trend recente riguarda l'integrazione tra cobot e robot mobili (AMR[4]), chiamati anche manipolatori mobili (MOMA). Rispetto ai cobot sono dotati di un workspace più esteso e di maggiori gradi di libertà e possono navigare in ambienti complessi e manipolare oggetti coesistendo in maniera sicura con gli operatori umani.

[3] *IFR News "Top 5 Robot Trends 2024", link: https://ifr.org/ifr-press-releases/news/top-5-robot-trends-2024*

[4] *Con AMR si indica un Robot Mobile Autonomo in grado di muoversi nell'ambiente in cui si trova senza la necessità di essere supervisionato da un operatore o senza la necessità di un percorso fisso e prestabilito.*

Questi sistemi, che oggi muovono i primi passi sul mercato, trovano applicazione nelle attività di intralogistica e asservimento macchina, riducendo la necessità di operazioni manuali ripetitive. Essi offrono inoltre uno strumento per sviluppare postazioni di lavoro modulari, che possano essere facilmente riconfigurate per adattarsi alle diverse esigenze, consentendo una interazione più sinergica di macchine ed operatori umani, ed andando quindi incontro alle esigenze del manifatturiero di alta flessibilità e bassi volumi di produzione.
Stiamo assistendo anche a numerosi investimenti per lo sviluppo di umanoidi sia da parte di grandi aziende, sia da parte di start-up.
Caratteristica principale di questi robot è quella di essere "general purpose" e pertanto capaci di eseguire un'ampia gamma di compiti in ambienti creati per gli esseri umani e che quindi possono essere facilmente integrati nei processi o nelle infrastrutture esistenti. Attualmente questi sistemi muovono i primi passi in altri settori, tipicamente hospitality, entertainment ed healthcare. La tecnologia degli umanoidi ha del potenziale anche in ambito industriale ed è attualmente oggetto di numerosi studi di ricerca applicata, ma la loro adozione nel manifatturiero probabilmente richiederà un ulteriore percorso di maturazione.



Figura: Robot Avatar per applicazioni di ispezione e manutenzione di linee di assemblaggio (progetto congiunto JOiiNT LAB e Cosberg).
Il robot rappresenta uno strumento flessibile, che può operare in maniera autonoma e, qualora sia richiesta la competenza di un tecnico specializzato, gli permette di utilizzarlo per intervenire da remoto. (Applicazione vincitrice del Solution Award Mecspe 2023) (Fonte: Istituto Italiano di Tecnologia- JOiiNT LAB https://www.youtube.com/watch?v=qjyfoJ7lVZo)

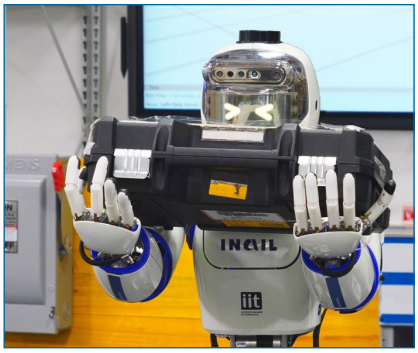


Figura 3: Il robot umanoide ergoCub di Istituto Italiano di Tecnologia - AMI durante il trasporto di un carico pesante. ErgoCub, alto 1.5m peso 55.7 kg con un payload di 10kg, è stato progettato per minimizzare l'effort della coppia uomo-robot durante compiti di sollevamento. (fonte: IIT, https://ergocub.eu/)

2. Sistemi collaborativi indossabili:

Gli **esoscheletri occupazionali** sono dispositivi indossabili progettati per offrire un sostegno ai lavoratori interagendo in modo simbiotico con essi.

È stato recentemente pubblicato il rapporto tecnico UNI/TR 11950:2024[5]: "Sicurezza e salute nell'uso degli esoscheletri occupazionali orientati ad agevolare le attività lavorative", che approfondisce lo stato dell'arte degli esoscheletri occupazionali, definendo di questi dispositivi una terminologia comune, una classificazione, ed esplicitando i campi, i limiti di applicazione e le caratteristiche funzionali e di progettazione e costruzione.

Attualmente gli esoscheletri rappresentano un'alternativa o un complemento ai sistemi robotici collaborativi.

L'interesse delle aziende verso questa tecnologia deriva dalla loro potenzialità di ridurre l'esposizione dei lavoratori a fattori di rischio fisici, legati ad attività manuali, che possono causare disturbi muscoloscheletrici (MSDs).

[5] *Norma disponibile alla pagina UNI: https://store.uni.com/uni-tr-11950-2024*

Il loro uso sul lungo termine permetterebbe di migliorare la produttività del lavoratore, riducendo il tasso di assenteismo sul lavoro per motivi di salute. Oggi la maggior parte degli esoscheletri è progettata per fornire supporto a parti specifiche del corpo, come gli arti superiori e la regione lombare. Invece, è ancora poco esplorata l'applicazione di questa tecnologia ad altre parti del corpo, come ginocchia o polsi.

Le potenziali applicazioni degli esoscheletri occupazionali sono varie e dipendono dalle esigenze specifiche del lavoro.
Inizialmente, l'uso degli esoscheletri è stato esplorato nell'ambito del settore automobilistico, dove, nonostante l'ampio utilizzo di robot per molte operazioni di saldatura, verniciatura e assemblaggio, sono previste ancora diverse attività manuali, in particolare nelle fasi finali della catena di montaggio.

Il montaggio degli interni dell'auto, il posizionamento di sottofondi, porte, finestre o rifiniture e la sigillatura delle porte, implicano il mantenimento di posture scomode durante azioni ad alta precisione, eseguite a ritmi elevati.

Oltre al settore automobilistico, l'uso degli esoscheletri è stato considerato anche in altri contesti manifatturieri, nonché in ambiti non manifatturieri come logistica, costruzione, agricoltura e healthcare. Nel settore logistico, gli esoscheletri trovano applicazione principalmente nel sollevamento e nel trasporto di merci pesanti durante le operazioni di magazzino e movimentazione dei materiali.

Nel settore della costruzione, gli esoscheletri assistono i lavoratori durante attività quali il sollevamento di materiali pesanti, l'installazione di componenti strutturali e il mantenimento di posture ergonomiche durante lavori prolungati.
Nell'agricoltura, gli esoscheletri supportano i lavoratori durante la raccolta e la manipolazione dei raccolti, riducendo lo sforzo fisico richiesto e migliorando l'ergonomia delle attività agricole.

Infine, nel campo healthcare, gli esoscheletri sono utilizzati per aiutare il personale sanitario nel sollevamento e nel trasporto dei pazienti.



Figura 4: COMAU MATE-XB per il supporto delle attività di movimentazione manuale dei carichi e MATE- XT a supporto di attività di verniciatura (fonte: COMAU)

Motivazioni per lo sviluppo

La situazione socioeconomica degli ultimi anni è caratterizzata da forti incertezze per le aziende per molti aspetti: dalle conseguenze prodotte dalla pandemia, dall'instabilità politica, dalle difficoltà di approvvigionamento dei materiali, dalla variabilità del costo dell'energia.

In questo contesto in cui si stanno delineando nuovi equilibri economici e geopolitici, le tecnologie robotiche collaborative possono offrire uno strumento con cui il settore manifatturiero europeo e quindi italiano, può rimanere competitivo su scala mondiale, garantendo uno sviluppo sociale, economico e ambientale sostenibile.

Dal punto di vista socioeconomico, le tecnologie robotiche collaborative, facilitando compiti fisicamente impegnativi, supportano la salute, il benessere e la produttività dei lavoratori.

Rappresentano un investimento nel capitale umano: promuovono l'inclusione lavorativa di persone con diverse capacità fisiche e migliorano la qualità della

vita degli individui. Inoltre, il calo demografico, che nei prossimi decenni avrà un significativo impatto sull'innalzamento dell'età media e sulla riduzione della forza lavoro europea, rende più urgente la necessità di affrontare concretamente questi temi.

Nonostante il recente avanzamento tecnologico in ambiente occupazionale, una significativa percentuale di lavoratori è ancora esposta al rischio di disturbi muscoloscheletrici (MSD), che interessano principalmente gli arti superiori e la regione lombare. Vi è infatti ancora una elevata percentuale di lavoratori che esegue attività di movimentazione manuale dei carichi con particolare riferimento al sollevamento di carichi pesanti e ad attività ripetitive o che presuppongono il mantenimento di posture fisse e incongrue.

Secondo il rapporto dell'EU-OSHA per l'anno 2019, la proporzione di lavoratori nell'UE-28 che lamentano dolori muscolari a spalle, collo e/o arti superiori era pari al 41% nel 2010 e ha mostrato una crescita fino al 43% nel 2015[7].

In Italia, delle 60643 malattie professionali denunciate all'INAIL nel 2022 (con un incremento del 9,86% rispetto al 2021), 42550 (circa il 70%) sono malattie del sistema osteomuscolare e del tessuto connettivo[8] . Di queste, la quasi totalità (38326) sono disturbi dei tessuti molli dell'arto superiore e dorsopatie.

L'impatto economico di tali disturbi è notevole, con costi che incidono sull'economia dei paesi dell'Unione Europea fino a miliardi di euro annui, rappresentando una perdita tra l'1-2% del PIL. Questi costi si riferiscono a elementi del processo di cura (come prevenzione, diagnosi, terapia, riabilitazione), pagamenti di indennizzo e spese legali. Oltre a questi costi "diretti", che gravano principalmente sui sistemi sanitari, esiste una vasta gamma di costi "indiretti" di perdita di produttività, imposti alle aziende, che includono: formazione e reclutamento di dipendenti sostitutivi, indagine sugli incidenti, riparazione di attrezzature danneggiate e costi associati ad una minore motivazione dei dipendenti ed a fenomeni di assenteismo.

Le tecnologie robotiche collaborative rappresentano un'avanguardia innovativa

[6] *Flor-Unda, O.; Casa, B.; Fuentes, M.; Solorzano, S.; Narvaez-Espinoza, F.; Acosta-Vargas, P. , "Exoskeletons: Contribution to Occupational Health and Safety". Bioengineering 2023, 10, 1039. https://doi.org/10.3390/ bioengineering10091039.*

[7] *Norma EU-OSHA 1019. Peters, M. and Wischniewski, S.*

[8] *Si veda https://www.inail.it/cs/internet/attivita/dati-e-statistiche/banca--dati-statistica.html*

non solo nel settore socioeconomico, ma anche in ambiti più ampi come la transizione digitale, ambientale ed energetica.

In primo luogo, sotto l'aspetto della transizione digitale, i sistemi robotici collaborativi (indossabili e non) sono esempi tangibili di come la tecnologia possa essere integrata nel mondo del lavoro per ottimizzare le prestazioni e la sicurezza. Attraverso l'uso di sensori avanzati, algoritmi di apprendimento automatico e interfacce uomo-macchina intuitive, i sistemi collaborativi dimostrano il potenziale della digitalizzazione e dell'automazione per migliorare il benessere dei lavoratori, aumentare la flessibilità dei processi produttivi, favorire la tracciabilità dei prodotti e la garanzia di determinati standard qualitativi.

Inoltre, la loro efficacia nel prevenire infortuni riduce la necessità di interventi medici e trattamenti che, a loro volta, hanno un impatto sul sistema sociosanitario.
Sul fronte energetico, l'integrazione di esoscheletri nei settori ad alta intensità energetica può ottimizzare l'uso della forza lavoro, riducendo la dipendenza da macchinari pesanti e dispendiosi in termini energetici. Questo si traduce in un'efficienza energetica migliorata e in un passo avanti verso la realizzazione di processi industriali sostenibili.

Rispetto agli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile (SGDs), l'introduzione di tecnologie robotiche collaborative si colloca perfettamente all'interno degli sforzi volti a promuovere un'industria innovativa e infrastrutture resilienti (SDG 9), a garantire modelli sostenibili di consumo e produzione (SDG 12) e a sostenere il lavoro dignitoso e la crescita economica (SDG 8).
Nonostante il potenziale delle tecnologie collaborative e l'interesse crescente che suscitano in vari settori di applicazione, per il loro utilizzo sistematico vi sono ancora molte sfide tecniche da affrontare e limiti applicativi da analizzare.

Innovare non significa solo introdurre nuove tecnologie, ma anche nuove com-

petenze e know-how. Pertanto, l'investimento in soluzioni robotiche non riguarda solo i costi dell'hardware ma coinvolge anche per utilizzarle efficacemente in azienda, i costi di formazione del personale. Questo aspetto è centrale per le PMI che, caratterizzate spesso da una produzione flessibile, potrebbero trarre i benefici maggiori dall'uso di queste tecnologie, ma faticano a reperire personale fortemente specializzato.

Attualmente esistono diverse iniziative e start-up che promuovono lo sviluppo industriale di interfacce uomo-robot avanzate e di metodologie di programmazione no-coding. Su questo fronte è opportuno favorire la sinergia con le altre tecnologie prioritarie, in particolare con l'IA, la cui capacità di raccogliere dati ed utilizzarli in una logica di autoapprendimento macchina unita al Natural Language Processing (NLP), può rappresentare un fattore abilitante per l'accesso alle tecnologie robotiche, in quanto offre uno strumento per interfacciarsi con esse senza necessità di specifiche competenze di programmazione.

Dal punto di vista tecnico le soluzioni robotiche, e in particolare quelle collaborative, richiedono l'integrazione di diversi componenti (ad esempio manipolatore, end-effector, sensori di sicurezza ed interfaccia uomo) e generalmente sono sviluppate all'interno del framework di un costruttore, o sono integrazioni di componenti multi-brand realizzate ad hoc per una specifica applicazione, questo ne limita la flessibilità ed interoperabilità oltre a rappresentare un vincolo all'accesso e alla raccolta dei dati da parte dell'utilizzatore finale.

La spinta verso sistemi robotici flessibili e riconfigurabili in funzione delle esigenze di una produzione sempre più orientata al cliente, richiede lo sviluppo di sensori e componenti intelligenti, capaci di calcolo edge ed interconnessi al "sistema fabbrica" secondo un approccio plug-and-play. Questo approccio permetterebbe di integrare in modo semplice e trasparente nuovi dispositivi e sensori secondo una logica modulare, aumentando non solo la capacità percettiva e computazionale

[9] *Ranavolo, A.; Ajoudani, A.; Cherubini, A.; Bianchi, M.; Fritzsche, L.; Iavicoli, S.; Sartori, M.; Silvetti, A.; Vanderborght, B.; Varrecchia, T.; et al. The Sensor-Based Biomechanical Risk Assessment at the Base of the Need for Revising of Standards for Human Ergonomics. Sensors 2020, 20, 5750. https://doi.org/10.3390/s20205750*

del sistema robotico ma anche la flessibilità e riconfigurabilità dell'intera architettura robotica, oltre all'integrazione della stessa con l'intero impianto produttivo.

Valutazione del rischio

Un altro tema di particolare interesse è quello della valutazione del rischio da sovraccarico biomeccanico in attività di movimentazione manuale dei carichi eseguite con l'ausilio di cobot, esoscheletri e umanoidi. Queste tecnologie stanno ampliando la percentuale di lavorazioni non classificabili dal punto di vista del rischio. Infatti, al momento i metodi di valutazione elencati negli standard internazionali di ergonomia della serie ISO 11228 non ne prevedevano il loro utilizzo e una recentissima revisione della ISO 11228-1 esclude esplicitamente la possibilità di effettuare la valutazione del rischio da sovraccarico biomeccanico in attività eseguite con il supporto degli esoscheletri occupazionali.

Le tecnologie assistive indossabili possono, soprattutto nel medio-lungo periodo, presentare dei limiti applicativi, come descritto accuratamente all'interno di due documenti EU-OSHA (2019 e 2020). Possono: aumentare il rischio di caduta andando a modificare la posizione del centro di massa, incrementare la richiesta cardiovascolare ed il dispendio metabolico/energetico, implicare problematiche ortopediche e dermatologiche dei distretti interessati dall'azione delle forze esterne, alterare gli scambi termici con l'ambiente, aumentare il rischio di collisione con altre macchine presenti nell'ambiente lavorativo, implicare effetti di stigmatizzazione dei lavoratori che ne fanno uso, comportare esigenze specifiche di igienizzazione e sanificazione e immagazzinamento.

Questi limiti applicativi potranno essere del tutto superati sia attraverso nuovi sviluppi tecnici, sia agendo sull'organizzazione del lavoro. A questo scopo INAIL ha istituito un gruppo di lavoro sul tema degli esoscheletri occupazionali con la finalità di monitorare la letteratura scientifica e i riferimenti normativi e fornire a tutte le parti interessate informazioni utili.

Dal punto di vista tecnico queste criticità si traducono in requisiti progettuali che mirano allo sviluppo di dispositivi che siano leggeri, ergonomici ed affidabili. Ciò implica superare ostacoli legati alla creazione di sistemi di attuazione che possano adattarsi dinamicamente ai movimenti del corpo umano senza limitarli. Per integrare in modo efficace questi dispositivi nell'ambiente lavorativo e ridurre la resistenza dei lavoratori al loro uso, è necessario che gli esoscheletri siano veloci da indossare e intuitivi da utilizzare.

Sebbene settori come la logistica e l'industria manifatturiera abbiano compiuto progressi significativi nell'integrazione degli esoscheletri occupazionali, queste tecnologie stanno ancora muovendo i primi passi verso un'adozione su larga scala.Pertanto, oltre agli aspetti tecnici, anche aspetti implementativi devono essere considerati.
Un fattore che ostacola l'implementazione è la diversità di percezione dei costi, come il costo iniziale e le perdite di produttività dovute alla necessaria formazione, e dei benefici, quali il miglioramento della salute occupazionale dei lavoratori e l'incremento della produttività derivante dalla riduzione della fatica e degli infortuni.

Questa diversità porta a opinioni contrastanti tra gli stakeholder su come gli esoscheletri possano supportare i loro specifici interessi e obiettivi. Queste sfide, che spaziano dall'ingegneria meccanica all'ergonomia e alla biomeccanica, hanno un impatto significativo sul time-to-market per diverse ragioni: rallentamenti nella fase di ricerca e sviluppo nel tentativo di affrontare sfide tecniche, il processo di test e validazione per garantire l'efficacia degli esoscheletri, e le iterazioni del prodotto per risolvere sfide nel design possono ritardare il lancio del prodotto sul mercato. Inoltre, l'integrazione nell'ambiente lavorativo esistente e l'accettazione degli utenti richiedono una pianificazione e coordinazione approfondite, ulteriormente influenzando il time-to-market.

In conclusione, le tecnologie robotiche collaborative, seppur in alcuni ambiti richiedano ulteriore sviluppo e studi, possono rappresentare uno strumento attraverso il quale affrontare alcune sfide pressanti della nostra epoca. La loro integrazione nei vari settori industriali può accelerare il progresso verso una società più sostenibile, efficiente e inclusiva.

Stato dell'arte

1. Sistemi Robotici Collaborativi

Oggi il mercato dei robot industriali interessa circa 553.052 installazioni di robot industriali nelle fabbriche di tutto il mondo, con un tasso globale di crescita del 5% su base annua (IFR 2023)[11]. Confrontando i dati sulle unità di robot tradizionali e dei cobot venduti su scala mondiale, si riscontra la crescita costante delle vendite dei collaborativi, che negli ultimi anni ha visto notevoli incrementi, e che si prevede continuerà anche nel prossimo triennio. Questa crescita è legata da un lato all'offerta sempre più ampia di modelli di cobot e di applicazioni collaborative da parte di produttori ed integratori[10]; dall'altro alla scarsità di manodopera ed alla crescente richiesta di automazione che ne consegue.

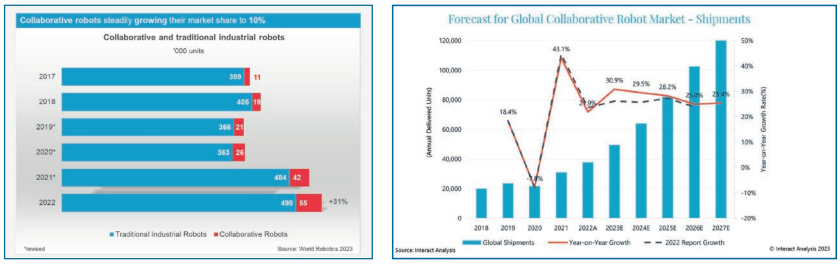


Figura 5: A sinistra distribuzione robot collaborativi e robot tradizionali(IFR 2023[11]). A destra previsione vendite dei robot collaborativi(Interact 2023[10]).

[10] Un integratore di sistemi robotici o un integratore robotico (robotic system integrator) è un'azienda specializzata nello sviluppo e nell'implementazione di soluzioni specializzate di automazione robotica. Queste aziende sono responsabili della progettazione, installazione, programmazione e manutenzione di sistemi robotici per automatizzare i processi di produzione.

[11] Un International Federation of Robotics "World Robotics 2023 Report: Asia ahead of Europe and the Americas". Disponibile al link: https://ifr.org/ifr-press-releases/news/world-robotics-2023-report-asia-ahead-of-europe-and-the-americas

[12] Interact Analysis 2023. Disponibile al link https://interactanalysis.com/insight/can-the-collaborative-robot-market-experience-a-second-growth-surge-in-the-post-pandemic-era/

Attualmente sono disponibili sul mercato diversi modelli di cobot, adatti a coprire le esigenze delle diverse applicazioni. Le principali caratteristiche sono riportate di seguito:

- Numero di assi: generalmente 6, in alcuni casi 7 gradi di libertà;
- Catena cinematica manipolatori: generalmente seriale, in alcuni casi presente un polso sferico;
- Sbraccio: 500mm – 1800mm.; Payload: 0.1kg – 50kg; Precisione: generalmente compresa tra 0.1-0.5mm.
- Sicurezza e sensoristica onboard: occorre distinguere tra sistemi dotati di cella di carico a estensimetri in tutti gli assi che offrono prestazioni generalmente superiori rispetto quelli che stimano la coppia sulla base delle letture di corrente ai giunti e che per questa ragione integrano un sensore di forza e coppia a 6 assi all'end-effector.
- Interfaccia programmazione: teach pendant, in alcuni casi disponibili web app.

Generalmente i cobot sono parte integrante di sistemi più complessi che definiscono una specifica applicazione collaborativa, per cui oltre alle caratteristiche riportate di sopra occorre tenere in considerazione la possibilità di interfacciamento hardware per esempio con sensoristica esterna (tipicamente sistemi di visione camere o lidar), end-effector, basi mobili e software quali ad esempio algoritmi di pianificazione, navigazione o riconoscimento immagini.

I MOMA (mobile manipulators) costituiscono un esempio di integrazione di uno o più cobot su una base mobile. I MOMA hanno la possibilità di muoversi nello spazio e questo estende il loro raggio di azione, per es. li rende capaci di manipolare oggetti in varie stazioni anche lontane tra loro. Inoltre, le basi mobili tipicamente hanno una capacità di carico maggiore rispetto ai cobot. Pur essendo apparsi solo di recente sul mercato, è possibile trovare in commercio soluzioni sia per indoor che per outdoor equipaggiate con i relativi sensori per la navigazione

autonoma. Il vincolo principale sul carico movimentabile durante una presa è rappresentato dalla capacità del manipolatore, mentre tipicamente la base mobile ha un payload di diverse centinaia di chili.

I robot umanoidi oggi sono una tecnologia in via di sviluppo, tuttavia gli ingenti investimenti, la disponibilità di componenti a costi inferiori rispetto al passato (attuatori, sensori, batterie…) e i recenti sviluppi nell'IA potrebbero nei prossimi 10 anni rendere questa tecnologia molto diffusa. Si prevede che il mercato potrebbe raggiungere qualche decina di miliardi.

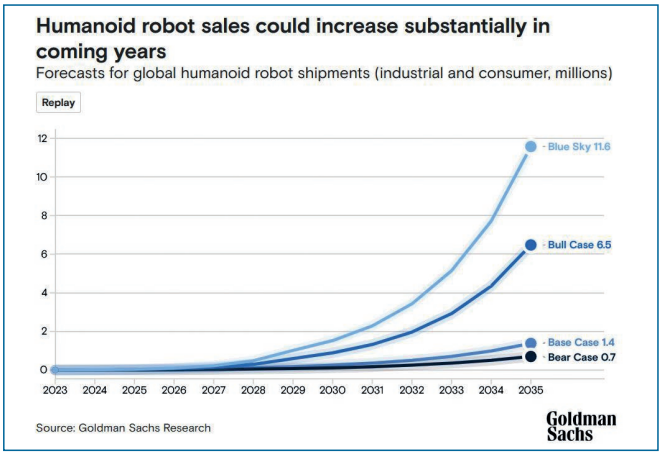


Figura 6: Previsione di mercato per i robot umanoidi nei prossimi 10 anni (Goldman Sachs 2024[13])

Dal punto di vista normativo lo stato di maturità per i diversi sistemi robotici collaborativi è direttamente correlato al loro TRL.

Conseguentemente per i cobot esiste un articolato corpo normativo che ne definisce le specifiche (ISO/TS 15066:2016), i requisiti di sicurezza (EN ISO 10218:2012), similmente avviene per le basi mobili (UNI EN ISO 3691-4:2020). Se per i MOMA è possibile far riferimento ai precedenti ambiti normativi, per i robot umanoidi in

[13] *Goldman Sachs Analysis 2024, "The global market for humanoid robots could reach $38 billion by 2035".*
Disponibile al link: https://www.goldmansachs.com/intelligence/pages/the-global-market-for-robots-could-reach-38-billion-by-2035.html

ambito industriale il quadro normativo è ancora incompleto, mentre sono in via di sviluppo le norme relative alle prestazioni e requisiti di sicurezza per i robot di servizio (ISO ISO 18646 e ISO/CD 13482).

Di seguito si riporta un elenco delle principali aziende, suddiviso per tipologia di sistemi ed area geografica, partendo dalle aziende italiane,
Robot collaborativi: Comau (Italia); Automationware (Italia); ABB Robotics (Global, Svizzera); Staubli International AG. (Svizzera); Kuka Robotics (Global, Germania); Bosch Rexroth AG (Germania); Agile Robots, Franka Emika (Germania); Igus (Germania); Schneider Electric (Francia); Fanuc Corporation (Global, Giappone); Omron (Global, Giappone); Yaskawa America, Inc.- Motoman Robotics Div. (Global, Giappone); Mitsubishi Electric (Global, Giappone); Denso (Giappone); Doosan Robotics (Corea); Dobot (Cina); Han's Robot (Cina); AUBO (Cina); TechMan Robot Inc. (Taiwan); JAKA Robotics Limited (Malesia); Rethink robotics (USA); Universal Robots (USA); Kinova Robotics (Canada)

Manipolatori Mobili: Comau (Italia); Scaglia Indeva S.p. A. (Italia); Automationware (Italia); Omron (Global, Giappone); Kuka Robotics (Global, Germania);Robotnik (Spagna); Pal Robotics (Spagna); Clearpath Robotics (Canada); Boston Dynamics – società acquisita da Hyundai Motor Company (Global, Corea)

Umanoidi: Oversonic (Italia); Boston Dynamics – società acquisita da Hyundai Motor Company (Global, Corea); Toyota (Global, Giappone); Agility Robotics (USA); Apptronik (USA); Tesla (USA); Open AI (USA); United Robotic Group Gmbh (Germania); Pal Robotics (Spagna); Pollen Robotics (Francia).

2.Sistemi collaborativi indossabili

La produzione di esoscheletri occupazionali è un settore in rapida crescita, mirato a migliorare il benessere dei lavoratori e ridurre il rischio di infortuni. L'industria logistica si posiziona in primo piano come settore in forte espansione in tema

di implementazione di tecnologie esoscheletriche. Quest'area ha registrato una valutazione di mercato di 3,42 miliardi di euro nel 2020, con proiezioni che indicano un raddoppio a 6,57 miliardi di euro entro il 2026, evidenziando un tasso di crescita annuo composto (CAGR) d'll'11,54% per il periodo 2021-2026.
Attualmente esistono in commercio diversi modelli di esoscheletri progettati per rispondere a specifiche esigenze operative. La classificazione di questi dispositivi innovativi si basa su due criteri principali: il tipo di attuazione e la struttura cinematica.

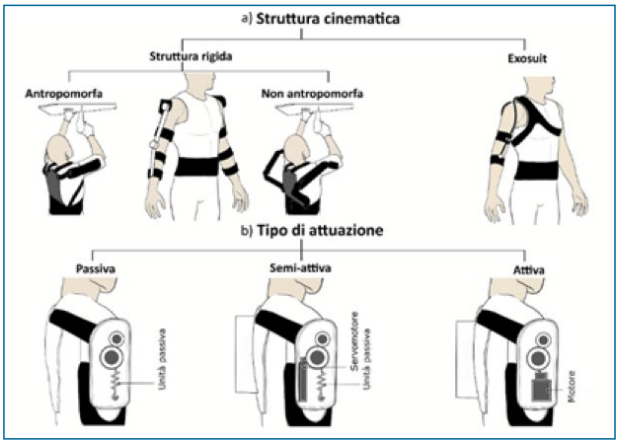


Figura 7: Illustrazione di esoscheletri occupazionali per arto superiore.
Classificazione sulla base della struttura cinematica (a) e tipologia di attuazione (b). Relativamente alla cinematica, i dispositivi a struttura rigida possono essere classificati in dispositivi antropomorfi e non antropomorfi, mentre gli exosuit non presentano una struttura cinematica. Le tipologie di attuazione includono sistemi passivi, semi-attivi e attivi. Nell'immagine le tipologie attuazione sono rappresentate per un dispositivo antropomorfo (fonte: Crea et al. 2021[14]).

Il primo aspetto riguarda la modalità con cui l'esoscheletro fornisce supporto al lavoratore, influenzando la scelta della fonte di energia e del meccanismo di assistenza. Dal punto di vista dell'attuazione, gli esoscheletri si distinguono in tre categorie principali:

[14] *Crea, Simona, et al. "Occupational exoskeletons: A roadmap toward large-scale adoption. Methodology and challenges of bringing exoskeletons to workplaces." Wearable Technologies 2 (2021).*

- **esoscheletri passivi:** questi dispositivi non utilizzano motori o batterie. Sono progettati con meccanismi passivi quali molle, ingranaggi e smorzatori. Il loro obiettivo è ridurre lo sforzo muscolare, ottimizzare il comfort e l'efficienza dell'utente, minimizzando al contempo il peso complessivo del dispositivo e la necessità di manutenzione;
- **esoscheletri attivi:** a differenza dei loro omologhi passivi, gli esoscheletri attivi sono dotati di motori elettrici o sistemi pneumatici/idraulici. Questi dispositivi richiedono una fonte di energia esterna, come batterie, per funzionare. Sebbene più versatili in ambiente operativo, richiedono una gestione attenta dell'energia e una manutenzione più frequente.
- **esoscheletri semi-attivi:** rappresentano un equilibrio tra gli altri due tipi, combinano elementi attivi e passivi. Sono governati da algoritmi intelligenti che adattano dinamicamente il livello di assistenza alle necessità dell'utente, offrendo un supporto su misura che può variare in base all'attività svolta.

La struttura cinematica degli esoscheletri si differenzia ulteriormente in configurazioni rigide e soft.

- **Gli esoscheletri con struttura rigida** hanno una struttura fisica rigida che può essere antropomorfa, cioè che imita la struttura delle articolazioni umane, o non antropomorfa, senza una corrispondenza diretta con le articolazioni umane.
- **Gli esoscheletri con struttura soft (exosuit)** non presentano una struttura cinematica definita. Sono dispositivi simili a indumenti che assistono i movimenti attraverso cavi e tessuti che agiscono in parallelo ai muscoli e ai tendini, fornendo un supporto flessibile e più naturale.

Sebbene gli esoscheletri occupazionali vengano commercializzati, restano ancora un prodotto in fase di sviluppo ed il quadro normativo di riferimento è ancora incompleto. A questo proposito nel 2020 è stato istituito un gruppo di lavoro con l'obiettivo di delineare la normazione relativa ai dispositivi indossabili. La clas-

sificazione proposta per gli esoscheletri occupazionali è oggetto di un recente technical report (UNI1611109) che fotografa l'attuale scenario.

Inoltre, in merito alle criticità associate alla valutazione del rischio da sovraccarico biomeccanico, la letteratura scientifica, una monografia INAIL[15] e una pre-norma in ambito cen-cenlec (CWA 17938:2023) individuano approcci strumentali e in tempo reale per la stima accurata e precisa del livello di rischio. Questi metodi innovativi fanno uso di reti di sensori indossabili o markerless, di indici specifici che correlano le variabili che generano il danno durante le attività di movimentazione manuale dei carichi e di algoritmi di analisi che fanno uso di tecniche di IA come, ad esempio, le reti neurali artificiali.

L'utilizzo di algoritmi di "machine learning" e "deep learning" in ambito occupazionale dovrà rispettare gli obblighi indicati nel'AI ACT, legge del Parlamento europeo sull'intelligenza artificiale, entrata in vigore nel 2024 con l'obiettivo di proteggere i diritti fondamentali, la democrazia, lo Stato di diritto e la sostenibilità ambientale dai sistemi di IA ad alto rischio, promuovendo nel contempo l'innovazione e assicurando all'Europa un ruolo guida nel settore. Il regolamento stabilisce obblighi per l'IA sulla base dei possibili rischi e del livello d'impatto
Di seguito, un elenco dettagliato delle principali aziende produttrici di esoscheletri, suddiviso per area geografica:

In Italia IUVO e Comau (Gruppo Fiat): forniscono esoscheletri per il supporto a spalle e schiena.; Robosuits S.r.L. è specializzata in esoscheletri completamente attivi per gli arti inferiori, destinati agli operatori industriali.

Nel resto dell'Europa si possono citare: Auxivo (Zürich, Svizzera); Ergosantè (Anduze, Francia); Exhauss (Rhône-Alpes, Francia); German Bionic (Bayern, Germania); Laevo B.V. (Delft, Paesi Bassi); Noonee AG (Zürich, Svizzera); Ottobock (Duderstadt, Germania); Skelex (Rotterdam, Paesi Bassi) ed a livello internazionale:; Crimson Dynamics (Dalian, Cina); Cyberdyne (Tsukuba, Giappone); Ekso Bionics (Richmond,

[15] *Ranavolo A, Chini G, Draicchio F, Varrecchia T., "La valutazione strumentale e in tempo reale del rischio da sovraccarico biomeccanico", Collana Salute e Sicurezza, Tipolitografia Inail - Milano, novembre 2023, ISBN 978-88-7484-821-8*

California, USA); Innophys (Tokyo, Giappone); Levitate Technologies (San Diego, California, USA)

Risorse economiche necessarie

Si riportano di seguito alcune valutazioni riguardo ai costi necessari sia per lo sviluppo sia per l'implementazione di sistemi robotici collaborativi ed esoscheletri, ed infine alcune note sui programmi di incentivo e finanziamento disponibili per le imprese.

Investimenti in ricerca e sviluppo

Per promuovere ulteriori sviluppi nell'ambito delle tecnologie robotiche collaborative e rafforzare la competitività del settore è essenziale supportare le attività di ricerca sia fondamentale che applicata, favorendo la sinergia con le altre tecnologie prioritarie.

A titolo di esempio si riportano gli investimenti dedicati alla ricerca e innovazione nell'ambito del manifatturiero avanzato nel quadriennio 2014-2018, che si configurano complessivamente a livello regionale, nazionale ed europeo in 602 milioni di Euro[16] . Riguardo le attività strategiche di medio-lungo termine, sottolineiamo la necessità di fare sinergia con i piani di ricerca e sviluppo EU, per attrarre e concentrare le risorse sui temi strategici.
Oltre al supporto alle attività di ricerca occorre favorire gli investimenti in start-up innovative affinché i più recenti e promettenti sviluppi possano arrivare sul mercato.

A questo scopo si stima che l'investimento necessario per sviluppare un prodotto commerciale, per un team di ingegneria che abbia un'esperienza consolidata, possa aggirarsi in un range di 2 - 10 Mln€ (la dimensione del range è determinata dalla complessità del sistema robotico e dalla variabilità tra dispositivi completamente passivi o motorizzati per gli esoscheletri). In questa cifra rientrano le voci relative ai costi di ingegneria, prototipazione del dispositivo, design for manufacturing, definizione dei processi di produzione, allestimento della linea di pro-

[16] *Regione Lombardia, S3 - SMART SPECIALISATION STRATEGY 2021-2027,*
link: https://www.s3.regione.lombardia.it/wps/portal/site/s3/DettaglioRedazionale/strategia/strategia

duzione e definizione di una strategia di go-to-market, fino al lancio del prodotto.

Costi di implementazione

1. Sistemi Robotici Collaborativi

Introdurre un'applicazione di robotica collaborativa in azienda, richiede lo sviluppo di una postazione o cella robotizzata dotata di tutti i componenti necessari al suo funzionamento, inclusi gli organi terminali e i sistemi di controllo e di sicurezza. Il costo di una cella robotizzata può variare fortemente in base al numero di cobot, tipologia di end-effector (o tool) e sensori utilizzati.

Al fine di fornire una stima dei costi di implementazione della tecnologia, si considerano due esempi applicativi. Il primo riguarda lo sviluppo di una postazione collaborativa per attività di pick and place, composta da un singolo cobot, un sistema di presa, un sensore di visione e un'unità di controllo. Il costo complessivo dell'hardware si stima intorno ai 35-75k€ a cui vanno aggiunti i costi di integrazione on-top. Il range dipende dal modello di cobot utilizzato e dalla sensoristica richiesta, tra cui le caratteristiche del sistema di visione scelto (per es. 2D o 3D).

Il secondo esempio riguarda un manipolatore mobile per attività di intralogistica, dotato di una base mobile, un cobot, un sistema di presa e relativa sensorizzazione. Il costo complessivo dell'hardware si stima intorno ai 70-140k€. Anche in questo caso il range dipende dal modello di cobot e base mobile e dalla sensoristica richiesta dall'applicazione. Il costo di integrazione di questi sistemi varia fortemente dalla tecnologia utilizzata per la navigazione del robot mobile, specialmente qualora richieda modifiche alle infrastrutture esistenti (per esempio installazione di nastro magnetico o filo induttivo sotto il pavimento). In quest'ultimo caso, ogni eventuale modifica futura risulterà particolarmente onerosa.

2. Sistemi collaborativi indossabili - Esoscheletri Occupazionali

Secondo il quadro normativo attuale, per l'implementazione di tali sistemi in un

contesto industriale, in mancanza di dati di letteratura sull'efficacia, accettabilità ed utilizzabilità del sistema scelto, è suggerito di condurre una sperimentazione pilota.

Si dovrebbe quindi avviare un utilizzo monitorato mediante la definizione di un protocollo sperimentale, condiviso tra tutti gli stakeholders (operatori, RLS, responsabile di produzione, datore di lavoro, medico competente, RSPP, manager dei dipartimenti di risorse umane e H&S). Attraverso questo meccanismo è possibile collezionare dati sull'effettiva utilizzabilità/usabilità, oltre che sull'efficacia nelle particolari postazioni identificate come target. Ad oggi, in letteratura sono presenti studi di questo tipo per un numero crescente di ambiti applicativi, quali la logistica, i servizi di pulizia industriale, la grande distribuzione, l'automotive, il sistema portuale: in questi studi sono solitamente coinvolti tra 10 e 20 operatori.

Il costo per uno studio di questo tipo, assumendo che l'azienda voglia acquistare i dispositivi esoscheletrici da utilizzare all'interno dello studio, e voglia avere un periodo di sperimentazione che sia di qualche settimana per ciascuno degli operatori, si stima in un investimento che può variare dai 70 ai 100 k€, costo che può crescere fino a circa 150 k€ se il periodo di osservazione dovesse crescere fino a 12-18 mesi. La principale voce di costo (oltre l'acquisto dei dispositivi) è senza dubbio lo sforzo bioingegneristico per la redazione del protocollo, la richiesta di revisione dello studio ad un Comitato Etico e la raccolta e l'elaborazione dei dati.

Negli ambiti applicativi in cui invece sono già disponibili dati a supporto dell'introduzione degli esoscheletri occupazionali, i costi di implementazione sono molto inferiori rispetto allo sviluppo dello studio pilota e principalmente riguardano l'acquisto dei dispositivi e il training per gli operatori.

Incentivi e programmi di finanziamento

Per i sistemi robotici collaborativi, negli ultimi anni sono stati promossi incentivi per diversi milioni di euro, a supporto delle attività di innovazione in ambito in-

dustriale, per l'investimento in beni strumentali, materiali e immateriali, funzionali alla trasformazione tecnologica e digitale dei processi produttivi delle aziende situate sul territorio italiano. Ne sono un esempio il credito di imposta[17] e i bandi nazionali o regionali[18].

Attualmente, invece, per l'utilizzo degli esoscheletri occupazionali non sono presenti incentivi fiscali a supporto, come ad esempio un credito di imposta e/o la riduzione del premio assicurativo che le aziende corrispondono ad INAIL. Un eventuale sostegno finanziario e la tendenza generale del mercato ad abbattere i costi di sviluppo dell'hardware, potrebbe permettere la diffusione degli esoscheletri, con conseguenti benefici per i lavoratori soggetti a rischio di disturbi muscoloscheletrici.

[17] *Ministero delle Imprese e del Made in Italy (www.mimit.gov.it): Credito di imposta per investimenti in beni strumentali 4.0; Credito di imposta per ricerca & sviluppo, innovazione tecnologica, design e ideazione estetica*

[18] *Regione Lombardia e Unione Camere Lombarde (www.unioncamerelombardia.it), Bando SI4.0; Camera di commercio Bergamo (www.bg.camcom.it), Bando Voucher Digitali I4.0*

SIMULAZIONE DI PRODOTTO E PROCESSO

Il termine *simulazione* ha diverse declinazioni, e a livello tecnico e ingegneristico può coprire ampie casistiche.
La definizione generale di simulazione, presa da un'enciclopedia o da un comune dizionario, rivela una molteplicità di potenzialità che possono essere di notevole aiuto nell'innovazione e nell'ottimizzazione dei processi industriali. La simulazione viene definita come la «riproduzione in un ambiente controllato di un sistema o di parti di esso. La simulazione può essere fatta in diversi modi: costruendo un modello fisico in scala del sistema in esame (per es., modelli di aerei in gallerie del vento per analizzare il comportamento aerodinamico; modelli di robot per verificarne le funzionalità; modelli di strutture per verificarne le deformazioni sotto sforzo e i carichi di rottura); costruendo un ambiente operativo simile a quello reale in cui operatori umani svolgono le loro funzioni in modo il più possibile simile a come farebbero nella realtà (spesso per addestramento o per studiare le possibili conseguenze; per es., simulatori di volo per l'addestramento dei piloti; esercitazioni antincendio, anti-terremoto, ecc.); costruendo un modello logico-matematico del sistema in esame analizzabile con un elaboratore. Quest'ultima è la forma di simulazione più comune»[19].

Nelle schede precedenti sono stati affrontati temi riguardanti componenti meccatronici, sensoristica, *additive manufacturing* e robotica, tutte aree dove la simulazione può trovare la sua dimensione di aiuto alla progettazione. Comprendere il comportamento di un sensore prima della sua produzione, prevedere il risultato finale di una produzione additiva, oppure ottimizzare la forma di un componente di un esoscheletro sono tutti esempi che possiamo facilmente trovare nell'utilizzare la simulazione quotidianamente nelle nostre industrie.

[19] *Enciclopedia Treccani, definizione di "simulazione".*

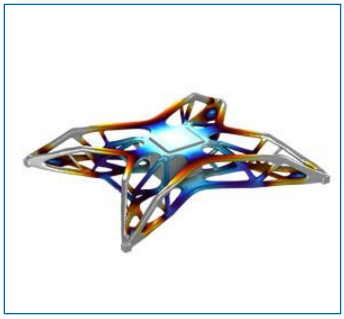


Figura 1: Simulazione di ottimizzazione topologica della struttura principale di un drone. La forma ricavata dalla simulazione è complessa e riproducibile tramite additive manufacturing (fonte: COMSOL)

La simulazione lega quindi intrinsecamente l'operatore all'uso di strumenti e tecnologie (ad es. pc, cluster o cloud) da cui trarre vantaggio nel proprio lavoro quotidiano, per esempio per ricavare risultati in ambito progettuale oppure fare valutazioni sulle condizioni di sicurezza o intervenire sulle operazioni da effettuare di routine. Ci troviamo quindi di fronte a un binomio uomo-macchina, in questa situazione, e dobbiamo tenere in considerazione che la correttezza dei risultati e delle scelte progettuali è sempre in carico al capitale umano, ferma restando la correttezza del modello matematico utilizzato per la riproduzione del comportamento di un sistema o di una parte di esso.

Motivazione per lo sviluppo

Simulazione e test sperimentali

Nel corso degli anni la simulazione ha introdotto un cambiamento di grande portata nelle scienze e nella tecnica, costruendo un nuovo paradigma nelle procedure di progettazione. Classicamente il connubio teoria-esperimento ha caratterizzato la progettazione, ma l'introduzione di tecnologie avanzate e simulazione sta trasformando questo dualismo in un trittico formato da teoria, sperimentazione e simulazione. Oggi, a parte qualche rara eccezione, gran parte delle attività sperimentali nelle scienze e nella progettazione ingegneristica, come anche delle valutazioni delle prestazioni nei sistemi complessi, è svolta con l'ausilio

di simulatori. Purtroppo, la valenza di queste tecnologie talvolta è ancora oggetto di dubbi, a causa dei problemi di corrispondenza tra comportamenti simulati e quelli effettivamente riscontrati nella realtà. La soluzione virtuale e l'intangibilità immediata del risultato sono spesso un ostacolo all'adozione della simulazione in molti reparti di ricerca e sviluppo nelle aziende italiane, ma le crescenti esperienze positive di molte realtà sul territorio nazionale e internazionale stanno via via vincendo l'inerzia di un approccio tradizionale legato alla metodologia del *trial and error*. Non è da sottovalutare anche l'apporto delle università, che in molti casi hanno incluso nei propri percorsi di studi una formazione specifica per questi strumenti, destinata a preparare tecnici e specialisti all'uso di tecnologie avanzate.

Naturalmente la fase sperimentale non deve essere abbandonata, ma la simulazione può aiutare a circoscrivere gli esperimenti e a ridurre il numero di prototipi allo stretto necessario.

Tipologie di simulazione

Come citato nell'introduzione, esistono diverse tipologie di simulazione a seconda dei vari aspetti delle necessità di valutazione, innovazione e ottimizzazione. Nell'ambito più specifico della progettazione, il quadro generale attuale porta all'identificazione delle seguenti tipologie di simulazione:

- Di processo e di produzione.
- Di componenti del processo.
- Di prodotto.

Gli approcci numerici alla base di ognuna di queste tipologie possono differire l'uno dall'altro e avere caratteristiche distintive in base all'obiettivo della simulazione stessa. È indubbio che non possa esistere una tecnologia univoca per tutte le problematiche progettuali da affrontare, ma i vantaggi che derivano dall'utilizzo di queste soluzioni sono assolutamente trasversali; ne sono un esempio

la riduzione del time to market e degli scarti di produzione, l'ottimizzazione dei cicli produttivi, la validazione dei componenti prima che vadano in esercizio, la comprensione del comportamento di un prodotto fin dalle prime fasi della sua ideazione e progettazione.

Anche la tipologia di rappresentazione di singoli componenti in esame gioca un ruolo fondamentale nell'utilizzo di questi strumenti. Quando si parla di un processo produttivo completo (ad es. un processo chimico-farmaceutico, un impianto di raffinazione…) non è possibile simulare i componenti come oggetti reali tridimensionali (in quanto le risorse computazionali non ci permetterebbero una discretizzazione specifica di questo dettaglio per tutti sistemi), ma è possibile descrivere il loro comportamento tramite elementi discreti o analogie algebriche. Un valore aggiunto alla progettazione sarebbe rappresentato dall'integrazione e interazione tra le diverse metodologie di simulazione, che permetterebbe una descrizione ancora più affidabile di tutti gli aspetti relativi ai problemi che quotidianamente le aziende e i loro tecnici si trovano ad affrontare.

Conseguenza di quanto appena riportato è la tendenza a concentrare l'attenzione su alcuni aspetti specifici e puntuali, e la necessità di esaminare un problema complesso in sotto-problemi più risolvibili con le attuali tecnologie. Tipico esempio di tale approccio si può ritrovare nella progettazione di sistemi per l'elettrificazione, come le batterie, che comprendono diversi fenomeni tra loro collegati ma spesso su dimensioni spaziali e temporali di scale molto diverse. L'elettrochimica di una cella di una batteria avviene a livello ionico, mentre il comportamento termico (per evitare il cosiddetto *thermal runaway*; 17) lo si può apprezzare nella scala del continuo. Altra problematica che spesso si deve affrontare risiede nella specificità dei materiali e nel loro assemblaggio, in quanto i produttori difficilmente condividono tali informazioni per ragioni di confidenzialità. Il progettista di un sistema di raffreddamento per pacco batterie, o dell'elettronica di controllo, si trova quindi a dover simulare i componenti con molti punti interrogativi, doven-

do tuttavia soddisfare le necessità del cliente finale. In questo caso, le simulazioni possono adottare approcci misti, parametri concentrati e analisi puntuali, per poter analizzare nel miglior modo possibile un sistema comunque complesso.

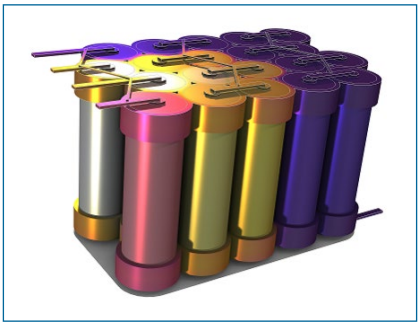


Figura 2: Simulazione di thermal runaway di un pacco batterie (image courtesy of COMSOL)

L'ottimizzazione rappresenta un obiettivo comune che tutte le tipologie di simulazione si prefiggono. La comprensione di processi e comportamenti dei singoli prodotti è una finalità ormai assodata per i simulatori, ma la possibilità di ottimizzare un prodotto in modo efficiente è ancora oggetto di studio e di implementazione sia in ambito scientifico che di sviluppo. Anche il confronto con la variabilità delle condizioni reali è un aspetto da tenere in considerazione: solutori appropriati di quantificazione dell'incertezza possono essere utilizzati nella simulazione per riuscire a capire il peso di alcuni parametri rispetto ai risultati. Queste analisi possono essere generalmente incluse in un concetto più ampio di sensibilità, in quanto il set di condizioni di ingresso può essere (anche) vasto; capire quali combinazioni impattano maggiormente sui risultati può essere fondamentale per una migliore gestione del progetto e di enorme aiuto anche in fase attuativa, poiché permette di eliminare fallimenti e imprevisti inattesi.
Un'altra evoluzione della simulazione negli anni è rappresentata da algoritmi e solutori adattativi, che permettono di affinare gli schemi di calcolo laddove i risultati devono essere più precisi e i gradienti hanno cambiamenti maggiori.

L'adattabilità dipende naturalmente dalla tipologia di simulazione e dal fine per cui essa è utilizzata (ad es., simulazioni di processo e di produzione con algoritmi a parametri concentrati potrebbero non essere adatte a tali schemi numerici).

Vantaggi dell'uso della simulazione

I vantaggi derivanti dall'uso di queste tecnologie sono molteplici, e molte sono le esperienze positive che le aziende e i centri di ricerca quotidianamente condividono nel panorama scientifico. Generalizzando i possibili benefici rispetto a temi di attuale interesse mondiale, si può dire che la simulazione offra notevoli vantaggi in termini di sostenibilità economica e ambientale.

Per quanto riguarda la sostenibilità economica, la simulazione permette una generale riduzione in fase di prototipazione, ma anche lo studio e l'analisi di geometrie ottimizzate riproducibili con prototipazione rapida. Naturalmente un investimento iniziale è necessario, in termini sia economici che di formazione del personale, ma esso è ampiamente ripagato dai risultati concreti ottenuti con queste tecnologie.

Efficienza dei processi e riduzione degli scarti si traducono in sostenibilità ambientale. Processi ottimizzati infatti permettono la riduzione di passaggi intermedi non necessari o la riduzione del tempo ciclo, il che porta a notevoli vantaggi secondari, come per esempio la riduzione del consumo di energia, tema molto delicato che ha coinvolto anche il nostro paese negli ultimi anni. La riduzione degli scarti determina un minor impatto ambientale non solo perché si consuma meno materiale, ma anche perché tale passaggio può essere visto in ottica di riciclo di materiali già processati e utilizzati per altre applicazioni, dopo opportune verifiche fatte proprio tramite le simulazioni (le proprietà dei materiali, infatti, rappresentano parte dei parametri di ingresso citati in precedenza).

Molti altri aspetti positivi possono derivare dall'uso della simulazione (ad es. la valorizzazione del capitale umano) ma si è ritenuto opportuno concentrare l'at-

tenzione sulle tematiche macroscopiche di maggiore attualità.

Stato dell'arte

Futuro della simulazione

La simulazione affronta quotidianamente sfide per migliorarsi e fornire agli utenti soluzioni sempre più robuste, efficienti e che possano coprire sempre più scenari. Il suo processo di evoluzione è attento alle innovazioni nel campo scientifico e tecnologico tanto quanto alle esigenze dei tecnici. Negli ultimi anni hanno fatto il loro ingresso nel panorama tecnico tecnologie e concetti come IA, Machine Learning e Digital Twin (18).

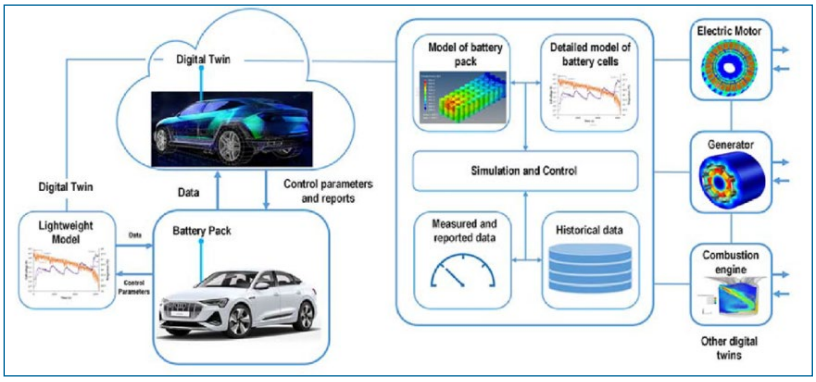


Figura 3: Schema di un possibile Digital Twin per controllo del sistema di elettrificazione in un'autovettura[20]

Sebbene in ambito scientifico si ritenga opportuno unificare alcune terminologie e chiarire organicamente alcune definizioni, in modo da operare il più possibile in un territorio comune, esistono già alcuni esempi – e talvolta sperimentazioni – dell'uso della simulazione con le tecnologie appena citate. Esempi di Machine Learning si ritrovano in alcuni processi di ottimizzazione di geometrie complesse di componenti come i motori elettrici, che vengono progettati con l'ausilio di tale tecnologia per avere campi elettromagnetici distribuiti in modo ottimale e performante.

[19] *F. Naseri, S. Gil, C. Barbu, E. Cetkin, G. Yarimca, A.C. Jensen, P.G. Larsen, C. Gomes, Digital twin of electric vehicle battery systems: Comprehensive review of the use cases, requirements, and platforms, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 179, 2023, ISSN 1364-0321, https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113280.*

L'innovazione tecnologica dell'hardware e dei microchip, in accoppiamento con i progressi di apprendimento dell'IA, porterà sicuramente notevoli ulteriori vantaggi ai simulatori, ricordando tuttavia che molte delle decisioni finali sui risultati dei progetti saranno in carico ai tecnici e ingegneri delle nostre organizzazioni.

Risorse economiche necessarie

Abbiamo già riportato le difficoltà, che talvolta si incontrano nel panorama industriale e di ricerca, riguardanti l'adozione di tecnologie avanzate come la simulazione. Se dovessimo però fare un'analisi più dettagliata a livello economico delle risorse necessarie per questa tecnologia, reputata prioritaria per i suoi notevoli vantaggi, dovremmo concentrare la nostra attenzione su due aspetti:

1. Costo delle soluzioni software: esistono diversi software di simulazione, e il loro costo può variare anche di molto a seconda delle offerte delle singole case produttrici. Possiamo affermare da stime di mercato che il costo dei prodotti può variare da qualche migliaio di euro (per prodotti perlopiù di capacità di simulazione limitate) a decine di migliaia (per prodotti con capacità già più complete), fino a centinaia di migliaia di euro.

   Le tipologie di licenza sono, anche in questo caso, abbastanza varie, ma generalmente si trovano sul mercato modalità di licenza a noleggio e licenze perpetue. Le offerte commerciali poi si completano con canoni di manutenzione annui (soprattutto per licenze perpetue e consistenti in costi inferiori all'acquisto ex-novo) che garantiscono aggiornamenti dei software e supporto tecnico. I diversi produttori poi offrono nel loro portfolio diverse soluzioni e tecnologie a seconda delle problematiche da affrontare.

   Il costo del software generalmente può essere incluso in bandi per fondi e, ad oggi, nelle agevolazioni riguardanti l'innovazione e l'ottimizzazione della ricerca e sviluppo.

2. Costo del personale: tale voce risulta talvolta il vero nodo e collo di bottiglia nell'adozione di queste soluzioni, non tanto per quel che riguarda l'identificazione della giusta risorsa, bensì più che altro per il percorso a medio-lungo termine che si intraprende. Identificare la giusta risorsa con un'adeguata formazione può accelerare notevolmente il raggiungimento dei risultati attesi dall'introduzione della simulazione nella propria filiera progettuale, ma non sempre è facile. Come già citato in precedenza, molti percorsi universitari hanno introdotto negli ultimi anni corsi ad hoc dedicati alla simulazione; quindi, risulterà sempre più comune che nuove risorse che si affacciano al mercato del lavoro abbiano già competenze in tal senso.
   Si sottolinea comunque che le case produttrici di software offrono corsi di formazione che possono risultare molto efficaci per rendere gli utenti indipendenti, con curve di apprendimento che stanno diventando sempre più veloci.

Gli aspetti appena citati sono da considerare come fattori economici di diretto impatto, ma non dobbiamo dimenticare gli aspetti secondari che l'adozione o meno di queste soluzioni possono portare o talvolta nascondere: per esempio, competitività sul medio e lungo termine, riduzione dei tempi di progettazione e di immissione sul mercato di nuovi prodotti, ottimizzazione della fase di prototipazione. Considerare tutti i fattori, anche secondari, contribuisce anche a promuovere una cultura seria di valutazione del ritorno dell'investimento, che spesso è sacrificata.

L'INTELLIGENZA ARTIFICIALE NEL MANIFATTURIERO

In qualità di potenziale motore chiave dello sviluppo economico e dell'innovazione, l'IA svolgerà un ruolo significativo in molti settori, e la manifattura è tra quelli che si prevede saranno maggiormente colpiti.
L'High-Level Expert Group on Artificial Intelligence della Commissione Europea ha fornito un prezioso contributo per questo settore, sottolineando l'importanza di una definizione completa e accurata dell'IA:
«I sistemi di intelligenza artificiale sono sistemi software (e possibilmente anche hardware) progettati dagli esseri umani che, dato un obiettivo complesso, agiscono nella dimensione fisica o digitale percependo il loro ambiente attraverso l'acquisizione di dati, interpretando i dati raccolti strutturati o non strutturati, ragionando sulla conoscenza o elaborando le informazioni derivate da questi dati e decidendo la migliore azione (o le migliori azioni) da intraprendere per raggiungere l'obiettivo prefissato. I sistemi di IA possono utilizzare regole simboliche o apprendere un modello numerico e possono anche adattare il loro comportamento analizzando come l'ambiente è influenzato dalle loro azioni precedenti».
Considerando la definizione sopra riportata, è possibile identificare quattro caratteristiche comuni e ricorrenti proprie delle funzionalità dell'IA in qualsiasi contesto applicativo:

1. Percezione dell'ambiente e della complessità del mondo reale;
2. Elaborazione delle informazioni: raccolta e interpretazione degli input;
3. Processo decisionale, incluso ragionamento, apprendimento e intraprendere azioni;
4. Raggiungimento di obiettivi predefiniti.

Si rimanda al volume Airi "Le Innovazioni per il prossimo futuro: settore tecnologie digitali" per una panoramica più ampia in merito alla IA applicata nei diversi contesti industriali. In questo contributo vogliamo concentrarci sull'IA applicata al settore del manifatturiero.

Motivazione per lo sviluppo

Lo sviluppo della IA costituisce un traino determinante per diversi settori industriali, come per diverse tecnologie che – proprio grazie alla IA – trovano il loro naturale completamento in applicazioni evolute e autonome. L'IA sta producendo un forte impatto trasversale sulla maggior parte delle tecnologie a uso industriale: è il caso della robotica, delle simulazioni software, dell'interfaccia Uomo-Macchina o degli impianti industriali nella loro globalità.
Qui si intende analizzare il ruolo dell'IA nell'ambito del manifatturiero industriale, nonché il suo contributo nelle transizioni digitale ed ecologica definite nelle linee di intervento caratteristiche del settore: la produzione personalizzata, efficiente e resiliente, la valorizzazione delle persone nelle fabbriche e la sostenibilità industriale.

Analisi di mercato

Negli ultimi anni, l'IA è cresciuta rapidamente e ha suscitato molte aspettative, interessi e applicazioni. Il potenziale valore annuale complessivo della sola IA nel settore dei macchinari e della meccatronica supera i 90 miliardi di dollari, in continua crescita (CAGR 32,5% nel periodo 2023-2033). (figura 1)

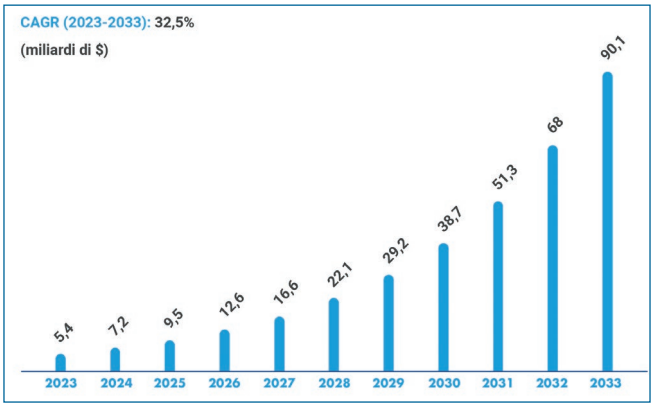


Figura 1: Previsioni 2023-2033 del mercato globale dell'IA nel settore dei macchinari/meccatronica
Fonte: position paper da "Il futuro della meccatronica; l'IA e l'importanza strategica del dato", Stati generali della meccatronica, Confindustria Bergamo e Intellimech (gennaio 2025), dato elaborato dal report originale "AI in Industrial Machinery Market: Enhancing Productivity with AI-driven Machinery" Market.us (2024)

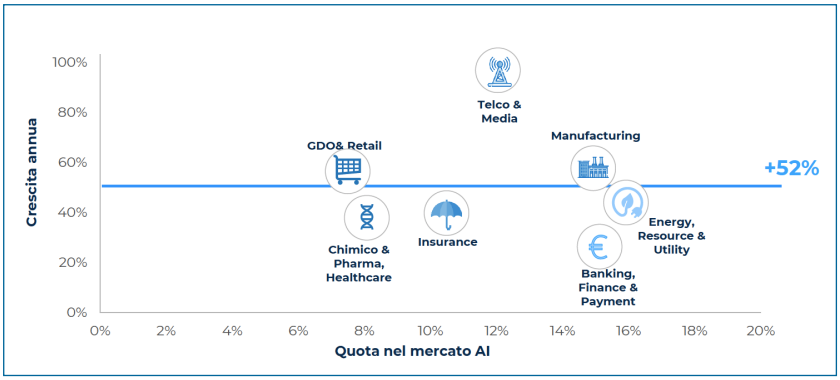


Figura 2: I principali settori del mercato della IA in Italia

Da un'analisi puntuale dell'IA in Italia, emerge che il settore del manifatturiero sia tra quelli che assorbe una consistente quota di mercato (intorno al 15%) e con un tasso di crescita annuale tra i più sostenuti (+52%), secondo solo a quello delle Telecomunicazioni e dei Media (figura 2).

I produttori di sistemi e impianti produttivi per il manifatturiero utilizzano infatti l'IA per migliorare le prestazioni delle apparecchiature, ridurre i tempi di inattività, aumentare la quantità di prodotti e migliorarne la qualità. Questo perché l'industria manifatturiera sta diventando sempre più sensibile ai costi, e i clienti richiedono una qualità superiore.

Inoltre, l'introduzione sempre più pervasiva dell'IA nel settore manifatturiero avrà importanti implicazioni per le persone che lavorano nelle fabbriche, con l'emergere di nuovi ruoli e competenze. Cambierà quindi lo stesso mercato del lavoro, con le competenze di base (ad esempio, matematica, STEM, digitale e dati) e le competenze fondamentali della manifattura sempre più accompagnate da specializzazioni relative all'IA.

[21] *Per un approfondimento sul tema delle competenze STEM per l'IA, si veda il "Working paper Airi: Nuove Competenze della Ricerca e Innovazione Industriale per l'Intelligenza Artificiale" (Nov 2024). Disponibile su www.airi.it*

Politiche Italiane

Il Ministero dello Sviluppo Economico (MISE) ha pubblicato nel 2020 il documento "Strategia Nazionale per l'Intelligenza Artificiale", che ha costituito la base per la definizione del programma italiano all'interno del Piano Coordinato Europeo.
La Strategia Nazionale per l'Intelligenza Artificiale ha come obiettivo prioritario quello di accelerare la trasformazione digitale del sistema produttivo attraverso l'adozione di soluzioni di IA. Quest'obiettivo deve superare gli ostacoli organizzativi e culturali prima ancora di affrontare quelli tecnologici, con particolare attenzione alle piccole aziende e a quelle attive nei contesti geografici più periferici e svantaggiati.
Lo Stato, inoltre, dovrà garantire che tutti abbiano l'opportunità di informarsi e aumentare le proprie competenze sull'IA senza costi proibitivi, almeno per la conoscenza di base. A questo proposito, la Strategia suggerisce di introdurre l'IA nei percorsi di studio ITS e nei corsi di laurea e post-laurea universitari, in modo che vengano formati professionisti sull'IA e sulle tecnologie correlate al momento dell'ingresso nel mercato del lavoro, soprattutto con un orientamento specifico al settore del manifatturiero-meccatronica.

Sfide strategiche e tecnologiche

In relazione allo specifico contesto del manifatturiero, ovvero a tutto ciò che attiene l'ecosistema produttivo industriale, è possibile definire – con una visione di alto livello – tre priorità di Ricerca e Innovazione per l'IA:

- **Umano al centro:** l'IA coprirà un ruolo cruciale nel supportare e valorizzare gli operatori nelle fabbriche, in compiti anche molto complessi, migliorando per esempio la sicurezza e l'ergonomia sul posto di lavoro da un lato, e consentendo una maggiore personalizzazione dei prodotti e servizi dall'altro.
- **Progettazione e utilizzo di prodotti/macchine/sistemi intelligenti:** l'IA può essere utilizzata per sviluppare prodotti e sistemi più intelligenti e autonomi (sistemi cyber-fisici, come già accennato), che possono per esempio adattarsi alle mutevoli esigenze degli utenti e della produzione, ottimizzandone le prestazioni.

Previsione/pianificazione snella e resiliente: l'IA può essere utilizzata per analizzare grandi quantità di dati e generare previsioni accurate, che possono aiutare le aziende a migliorare la pianificazione della produzione, la gestione delle scorte e della catena del valore. O, su un altro fronte, per configurare i processi e gli impianti produttivi, o agevolarne la manutenzione attraverso analisi predittive.

Barriere per l'Intelligenza Artificiale

Nonostante le enormi potenzialità, alcune significative barriere stanno ancora impedendo alle aziende manifatturiere di adottare l'IA, come la mancanza di dati accurati, l'incertezza su come implementare soluzioni di IA per risolvere sfide specifiche, un'insufficiente forza lavoro con adeguate competenze digitali e la mancanza di interoperabilità tra le apparecchiature e il sistema informativo per supportare le applicazioni di IA. Tuttavia, un ostacolo ancora più significativo all'adozione di questa classe di tecnologie sarà la progettazione e l'implementazione di approcci affidabili (per rinforzare la fiducia verso le risposte fornite dall'IA, a tutti i livelli – decisionali e operativi).

Man mano che le tecnologie di IA avanzano vanno parallelamente prese in considerazione alcune questioni legali, che avranno un impatto significativo anche nell'ambito del manifatturiero:

- **Regolamenti sull'IA:** a seconda del settore e dell'applicazione, potrebbero esserci normative specifiche che regolano l'uso dell'IA.
- **Direttiva Macchine:** l'integrazione dell'IA nei macchinari può avere implicazioni per la sicurezza dei macchinari stessi.
- **Privacy e protezione dei dati:** l'uso dell'IA spesso implica la raccolta e l'elaborazione di grandi quantità di dati. Ciò solleva preoccupazioni sulla privacy dei dati e sulla conformità ai regolamenti, come quello generale sulla protezione dei dati (GDPR).

- **Proprietà intellettuale e know-how:** i contenuti e le invenzioni generate dall'IA possono sollevare domande su chi detiene i diritti di proprietà intellettuale.
- **Cybersecurity:** l'utilizzo dell'IA nella Cybersecurity è diventato essenziale. Poiché la maggior parte degli attacchi informatici può sfruttare le tecnologie di IA, anche la rilevazione delle minacce, la risposta agli incidenti e la protezione delle infrastrutture critiche e dei dati sensibili possono trarne vantaggio.
- **Responsabilità:** determinare la responsabilità in incidenti o errori legati all'IA può essere complesso, poiché sorgono domande su chi debba esserne ritenuto responsabile (lo sviluppatore dell'IA, il fornitore, o entrambe le parti).

Stato dell'arte

L'IA in Italia

Il ruolo dell'IA nel manifatturiero italiano può essere sintetizzato nelle seguenti applicazioni industriali, che richiedono di base un'integrazione con altre tecnologie a formare sistemi produttivi o entità *cyber-fisiche* a supporto della produzione:

- **Controllo qualità:** L'IA viene utilizzata per analizzare immagini e dati di sensori allo scopo di identificare difetti nei prodotti in modo rapido e preciso, migliorando la qualità e riducendo gli scarti. Questo ramo dell'IA applicato ai sistemi di visione è sostanzialmente associato alle tecniche di Deep Learning di autoapprendimento basato su reti neurali.
- **Manutenzione predittiva:** L'IA può analizzare i dati delle macchine per prevenire usure, guasti e derive, permettendo di programmare interventi di manutenzione preventiva, evitando così fermi macchina non pianificati e ottimizzando l'utilizzo delle risorse (manutenzione opportunistica). In questo caso si ricorre a tecniche di Machine Learning, anch'esse capaci di auto-apprendere e di identificare il corretto pattern decisionale.
- **Ottimizzazione della supply chain:** L'IA può ottimizzare la pianificazione della produzione, la gestione degli inventari e la logistica, aumentando l'efficienza e riducendo i costi della supply chain. In tal caso prevalgono algoritmi matematici

di ottimizzazione, capaci di bilanciare costi e benefici e di individuare la decisione più adeguata.

• **Robotica collaborativa:** I robot collaborativi, controllati dall'IA, possono lavorare fianco a fianco con gli operatori umani in modo sicuro e produttivo, svolgendo compiti ripetitivi o pericolosi.

• **Personalizzazione di prodotto:** L'IA è uno strumento potente per creare prodotti personalizzati in base alle esigenze specifiche dei clienti. Di fatto i processi di design – soprattutto quelli destinati alla cura di aspetti ergonomici o estetici – saranno fortemente accelerati dall'uso dell'IA.

• **Condivisione della conoscenza:** nasceranno o cresceranno soluzioni di IA per rendere fruibile e interagire con basi di conoscenza in continua evoluzione (Knowledge Base). Conoscenza sotto forma di immagini, video, testi, audio sempre più integrati e a disposizione dei processi interni e dei clienti. E, ancora, la conoscenza degli esperti di settore: quella di un progettista o di un manutentore, patrimonio dell'azienda da condividere con i colleghi junior, distillata attraverso sistemi di IA generativa nelle forme più fruibili (si veda anche il punto successivo).

• **Analisi e creazione di testi, immagini e codici:** L'IA generativa sarà sempre più integrata nei processi o nelle attività lavorative di ogni giorno. Dalla scrittura delle mail e dei manuali alla generazione di immagini per il marketing, idee per il design, codici per lo sviluppo o chat per l'assistenza agli operatori. Quest'ultimo fronte sta prendendo piede nelle vesti di possibile "assistente virtuale" per condurre processi o impianti produttivi, o per prestare servizi post-vendita.

Va tuttavia fatta una considerazione di fondo, che va oltre l'eterogeneità delle applicazioni di IA in ambito industriale. Se da un lato queste ultime sono rappresentabili come una costellazione di algoritmi programmati a risolvere problemi specifici e ben definiti – dallo scheduling della produzione alla macchina che si diagnostica, fino al controllo qualità – dall'altro si andrà progressivamente verso sistemi sempre più critici e complessi, che richiederanno la necessità della trustworthy AI, ovvero dell'insieme di tecniche e metodi per produrre algoritmi cui riporre una fiducia crescente, solida. Si tratta di soluzioni che riescono a spiegarci

come, perché e con che grado di incertezza prendono le proprie decisioni.

I benefici dell'IA in Italia

I benefici dell'adozione dell'IA nel manifatturiero italiano sono sostanzialmente identificabili nei seguenti:

- **Aumento della produttività:** L'automazione di compiti ripetitivi e l'ottimizzazione dei processi possono aumentare significativamente la produttività.
- **Riduzione dei costi:** La riduzione degli scarti, la manutenzione predittiva e l'ottimizzazione della supply chain possono portare a una significativa riduzione dei costi.
- **Miglioramento della qualità:** L'IA può aiutare a garantire una qualità costante dei prodotti e a ridurre i difetti.
- **Maggiore flessibilità:** L'IA può rendere le aziende manifatturiere più flessibili e adattabili alle mutevoli esigenze del mercato.
- **Sviluppo di nuovi prodotti e servizi:** L'IA può essere utilizzata per sviluppare nuovi prodotti e servizi innovativi.

Le sfide legate all'IA nel manifatturiero

Nonostante i potenziali benefici, ci sono tuttavia alcune sfide da affrontare per l'adozione diffusa dell'IA nel manifatturiero italiano. Qui se ne delineano alcune, di maggiore rilevanza:

- **Costo della tecnologia:** L'implementazione di soluzioni IA può essere costosa, soprattutto per le piccole e medie imprese. Appare strategico avere già affrontato in precedenza un percorso di digitalizzazione per avere a portata di mano i dati e il Know-How che possono diventare oggetto del ragionamento di una possibile IA.
- **Mancanza di competenze:** È ormai consolidata la carenza di competenze in materia di IA nel mercato del lavoro italiano, che richiede un maggiore investimento nella formazione e nell'educazione.
- **Problemi di sicurezza informatica:** L'utilizzo di dati sensibili nell'IA solleva preoccupazioni in materia di sicurezza informatica, che devono essere adeguatamente

affrontate.

• **Cambiamenti organizzativi:** L'adozione dell'IA può richiedere cambiamenti significativi nell'organizzazione del lavoro e nella cultura aziendale, che potrebbero incontrare resistenza da parte di alcuni dipendenti.

Gli investimenti in IA

Gli investimenti nell'IA in Italia nei prossimi anni sono destinati a crescere in modo significativo. Diverse stime e proiezioni indicano un forte incremento degli investimenti sia da parte delle aziende private che delle istituzioni pubbliche.
I fattori che spingono questa crescita sono sintetizzabili nei seguenti:

• **Consapevolezza del valore:** A livello di manifattura, la IA è oggi un tassello fondamentale per la riduzione dei costi di processo, la progettazione e lo sviluppo di nuovi modelli di business. Sempre più aziende e istituzioni si rendono conto del potenziale dell'IA per migliorare la competitività, l'efficienza e l'innovazione.

• **Incentivi governativi:** Il governo italiano sta introducendo diverse iniziative per incentivare la ricerca e lo sviluppo nell'ambito dell'IA, attraverso finanziamenti, agevolazioni fiscali e creazione di ecosistemi innovativi.

• **Disponibilità di dati:** La crescente disponibilità di dati, grazie alla digitalizzazione e all'Internet delle cose (industria 4.0), rappresenta un elemento fondamentale per lo sviluppo di applicazioni di IA.

• **Talento:** Il sistema formativo italiano sta investendo nella formazione di figure professionali specializzate nell'IA, creando un bacino di talenti sempre più ampio.

Fornire cifre precise sugli investimenti nell'IA in Italia nei prossimi anni – sempre nell'ambito del manifatturiero avanzato – può risultare complesso, in quanto dipende da numerosi fattori, tra cui l'andamento economico generale, le politiche governative e le decisioni delle imprese.

Tuttavia, possiamo fare alcune considerazioni:

• **Tendenza al rialzo:** È chiaro che la tendenza è verso un aumento significativo

degli investimenti. Numerosi studi e report sottolineano il potenziale dell'IA e la necessità di investire in questa tecnologia per rimanere competitivi a livello globale.

- **Confronto con altri Paesi:** L'Italia, sebbene abbia un buon potenziale, parte da una posizione leggermente svantaggiata rispetto ad altri Paesi europei come la Francia e la Germania, che hanno investito di più in questo settore negli ultimi anni.
- **Fonti di finanziamento:** Gli investimenti nell'IA provengono da diverse fonti:
  Governo: Il Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR) prevede ingenti investimenti in digitalizzazione e innovazione, di cui una parte sarà destinata all'IA.
  Unione Europea: L'UE ha stanziato fondi significativi per sostenere la ricerca e lo sviluppo nell'ambito dell'IA.
  Aziende private: Sempre più aziende italiane e multinazionali stanno investendo in progetti di IA, sia internamente che attraverso partnership con startup e centri di ricerca.
  Venture capital: Il mercato del venture capital italiano sta mostrando un crescente interesse per le startup che operano nel settore dell'IA.
- **Ecosistema dell'Innovazione:** Oggi l'accesso a fonti di finanziamento (governative o europee) e a competenze specialistiche è divenuto più agevole grazie all'ecosistema dell'innovazione che caratterizza il manifatturiero italiano: dai Cluster tecnologici (quello della Fabbrica Intelligente per la manifattura) ai Competence Center, sono numerose le realtà che promuovono la cultura dell'innovazione e supportano il percorso di crescita delle aziende, in particolare le PMI.

Risorse economiche necessarie

Le dimensioni degli investimenti in progetti di IA variano ovviamente in funzione dalle scale in gioco, determinate in gran parte sia dalle dimensioni aziendali che dagli obiettivi e dalle aree interessate (marketing e vendite, progettazione, operations). A titolo di esempio, non esaustivo, si elencano 3 possibili casi applicativi, il cui ordine di investimenti rimane rigorosamente orientativo:

• **Manutenzione predittiva su impianti produttivi:** si fa riferimento all'applicazione di modelli di Machine Learning per predire l'usura di un componente o il verificarsi di un guasto. Ciò richiede di equipaggiare l'impianto di sensoristica adeguata, di raccogliere i dati e di selezionare il modello di IA più idoneo, a cui poi far seguire una fase di Deployment con l'analisi dei risultati e della relativa robustezza. L'ordine di grandezza di un progetto di questa portata, applicato su uno specifico componente o sistema dell'impianto produttivo, può orientativamente variare tra i 30 mila euro e i 50 mila euro.

• **Sistemi di visione artificiale:** si tratta di un'area molto ampia, dove gli investimenti in hardware specialistico ricoprono un ruolo – e un peso – non indifferente. Vanno poi considerati l'integrazione dell'hardware nel processo o nell'impianto, lo sviluppo software della soluzione, la selezione del modello di IA, l'autoapprendimento (supervisionato, più semplice, o non supervisionato, più complesso). Gli investimenti in questo contesto possono variare dai 50 mila euro agli 80 mila euro.

• **IA Generativa per la Gestione dei Processi:** un altro caso molto interessante, e che sta facendo scuola in molti contesti industriali, è l'introduzione di modelli di IA Generativa per distillare il Know-How aziendale rendendolo disponibile in forma di ChatBot a tutti gli utenti del processo, che sia la progettazione, la produzione o l'assistenza tecnica. La sfida prevede la formalizzazione del Know-How, oggi in versione multimodale (testi, immagini, video) e, parallelamente, l'addestramento dell'IA Generativa che acquisisce gli input per supportare l'utente fornendo risposte alle sue domande. I modelli di IA Generativa presenti sul mercato sono già preconfigurati per lo scopo; tuttavia, gli investimenti complessivi del progetto devono tener conto della fase di test della soluzione, dell'affinamento e dell'interazione uomo-macchina. Per un singolo processo, quindi per un a tipologia di Know-How ben definita, gli investimenti necessari non possono essere inferiori ai 50 mila euro.

INTERFACCIA UOMO-MACCHINA: APPLICAZIONI DI REALTÀ VIRTUALE E REALTÀ ESTESA

Le tecnologie di realtà alternative, come Realtà Virtuale (VR), Realtà Estesa (XR) e Realtà Aumentata (AR), hanno avuto un notevole sviluppo negli ultimi anni; esse permettono di digitalizzare asset esistenti o ancora in progettazione, simularne il comportamento e collegare flussi informativi alla versione digitale dell'asset, permettendo l'interazione dell'utente grazie a dei visori che possono essere immersivi o basati sullo schermo dei cellulari. La Realtà Virtuale sostituisce con un mondo sintetico quella reale, mentre la Realtà Aumentata collega informazioni digitali alla realtà. Una ulteriore definizione che sta entrando nel settore è la cosiddetta Realtà Mista, che si pone fra le precedenti "integrando" elementi del mondo reale a elementi digitali. Per una descrizione più dettagliata di queste tecnologie si rimanda al volume Airi "Le Innovazioni per il prossimo futuro: settore tecnologie digitali".

Applicazioni della Realtà Aumentata

La possibilità di sovrapporre contenuti informativi alla percezione naturale del mondo reale abilita una serie di vantaggi per gli operatori del mondo manifatturiero.

Una macchina complessa produce una notevole mole di dati relativi al suo funzionamento: tipicamente questi dati sono convogliati in un sistema di visualizzazione e monitoraggio legati a una stazione di interazione locale (HMI, SCADA) e/o remota (Sinottici). Gli operatori che devono usare questi dati per prendere decisioni sia sulle attività di routine (regolazioni, manutenzioni preventive…) o straordinarie (analisi di problemi, riparazioni…) sono quindi costretti a interagire con un sistema di intermediazione che permetta di identificare lo stato di funzionamento di un determinato componente o sottosistema (pressioni e temperature di esercizio, rumori, vibrazioni, gradi di usura...) avendo una tacita conoscenza della topologia e della funzionalità della macchina in esame, e con un conseguente ritardo nell'interpretazione del dato.

Un sistema che, invece, sia in grado di visualizzare una certa quantità di informazioni sovrapponendoli alla situazione reale permette di risolvere parzialmente i problemi succitati.

La conoscenza implicita della macchina da parte degli operatori può essere sostenuta dalla sovrapposizione sia dei disegni tecnici e di modelli 3D delle parti interne, sia delle procedure operative, sia dalle informazioni relative a specifiche di funzionamento, tolleranze o parametri di controllo (Figura). Inoltre, lo stato attuale dei componenti (se conosciuto tramite opportuna integrazione di reti di sensori sui componenti) può essere velocemente e senza dubbi interpretativi visualizzato nelle forme più opportune, per facilitare il processo decisionale dell'operatore.

I campi di applicazione possono essere vari:
- **Monitoraggio macchine:** visualizzazione in tempo reale dei parametri di funzionamento e di stato.
- **Monitoraggio magazzini:** visualizzazione in tempo reale dei dati relativi ai colli presenti nelle locazioni come codice, quantità, tempo di ingresso etc.
- **Monitoraggio sistemi produttivi** (ad es. linee di assemblaggio): visualizzazione della commessa in corso, degli indicatori di qualità, produttività etc.
- **Manutenzione ordinaria e straordinaria:** visualizzazione delle sedi critiche di impiantio, delle procedute operative, dei modelli 3D, delle checklist di sicurezza etc.
- **Training:** esecuzione di passi operativi (Standard Operating Procedures) su modelli virtuali.
- **Remote Commissioning:** operazioni di controllo, regolazione e collaudo di impianti senza la necessità per gli esperti di essere presenti sul posto fisico.
- **Remote Maintenance:** guida delle attività di manutenzione da parte di un esperto remoto rispetto all'impianto in oggetto.
- **Remote Control:** controllo dell'impianto (soprattutto se in movimento, es.: AGV, carrelli, braccia robotiche) da parte di un operatore remotizzato.



Figura 1 : Esempio di applicazione di AR applicata alla manutenzione. L'applicazione sovrappone all'immagine reale le informazioni relative alle zone di intervento (Fonte: Forbes)

Applicazioni della Realtà Virtuale

Il passaggio da AR a VR si ottiene quando la parte reale del sistema viene completamente sostituita da un gemello digitale. Quest'operazione di virtualizzazione totale permette agli operatori (progettisti, manutentori, decision-maker) di interagire con una macchina o un sistema complesso con molto anticipo rispetto alla sua realizzazione e quindi: identificare varie tipologie di problemi (ingombri, facilità di utilizzo, accesso alle parti); prendere pratica ed affinare le procedure operative e manutentive; validare idee ed aspetti progettuali. Tutto questo può avvenire interagendo con il modello virtuale e quindi con largo anticipo rispetto ai vari stadi della messa in opera (realizzazione, collaudo per sottosistemi, commissioning, collaudo, ramp-up)

Tipicamente, l'uso di VR in ambiente industriale viene realizzato tramite soluzioni immersive in cui l'operatore viene isolato dalla realtà visiva tramite opportuni meccanismi (visori e sensori di posizione o di movimento) che permettono allo stesso di interagire col sistema in modo virtuale (Figura).

Le possibili applicazioni spaziano:

1) **Verifica di ingombri e d'interazione ergonomica:** verificare che il posizionamento delle parti della macchina siano facilmente raggiungi bili e in condizione di sicurezza, validare la facilità di utilizzo rispetto a movimenti del corpo.

2) **Verifica movimentazioni fisiche e logiche di funzionamento:** validare che le parti in movimento della macchina non impattino fisicamente e seguano la sequenza logica ottimale.

3) **Collaudo virtuale (Virtual Commissioning):** verifica che tutte le componenti dell'impianto che sono state oggetto di specifica di collaudo rispettino tali specifiche soprattutto per quello che riguarda l'interazione uomo macchina e lgi aspetti di sicurezza ed ergonomia.

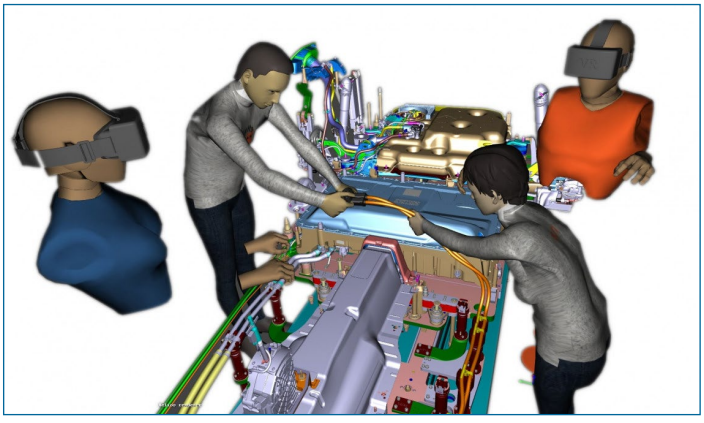


Figura 2 : Un esempio di VR applicata al Virtual Commissioning: la sequenza di lavoro, gli ingombri e le distanze sono testate in virtuale (Fonte: ESI Group)

Motivazione per lo sviluppo

Nonostante esistano già numerosi esempi applicativi, la pervasività e l'accessibilità delle tecnologie di AR/VR in campo manifatturiero nelle aree sopra descritte necessita di ulteriori sforzi di ricerca e sviluppo.

Gli aspetti tecnologici alla radice delle tecnologie considerate (riconoscimento di immagine e di contesto, generazione dell'informazione aumentata e sovrapposizione della stessa alla realtà, generazione e gestione degli ambienti totalmente virtuali) sono maturi a sufficienza: i singoli componenti sono a Technology Readiness level (TRL) 8-9. L'integrazione degli stessi in un utilizzo pratico, robusto e facilmente reperibile sul mercato, necessita però di alcuni passi di ulteriore evoluzione, tutti riconducibili a una generale considerazione di applicabilità su vasta scala in ambiente industriale:

- **Definizioni di standard di interfaccia e trasferimento dati.** Questo permetterebbe la facile integrazione di dispositivi e sistemi riducendo la necessità di personalizzazioni e sviluppi specifici caso per caso, permettendo una più ampia fascia di scelta, una diminuzione dei costi di investimento e operativi ed una velocizzazione dei tempi di integrazione.
- **Verifica degli impatti psicologici**, fisiologici e sociali nell'ampio e continuo utilizzo: l'utilizzo continuativo (a tendere sulle 8 ore) di sistemi AR/VR sulla condizione psicofisica degli operatori e sulla loro accettazione dal lato sociale non è ancora stata validata scientificamente.
- **Dimostrazione generalizzata di ritorno sugli investimenti:** il ritorno economico di queste attività è ancora dimostrato caso per caso, solo quando avremo degli studi che validino la economicità delle soluzioni in campo più generale avremo un incremento della fiducia negli investimenti.
- **Aumento della ergonomia generale:** attualmente i dispositivi indossabili sono ancora abbastanza invasivi o richiedono l'utilizzo di due mani. Una generale riduzione di pesi, ingombri e un aumento della facilità di utilizzo sono indispensabili affinché VR ed AR possano avere una forte penetrazione in ambiente industriale.
- **Incremento della facilità di programmazione ed implementazione:** sistemi di programmazione facilitata (es. No-code) ed automazione delle procedure di configurazione permetteranno di sviluppare velocemente applicazioni in autonomia da parte delle funzioni aziendali meno orientate alle tecnologie IT (produzione, manutenzione, ingegneria industriale)
- **Aumento della robustezza e affidabilità in ambienti harsh** attualmente i di-

spositivi per uso consumer non sono studiati per l'ambiente industriale (adatti quindi ad un utilizzo in ambiente gravoso e per lunghi periodi) e ne limitano affidabilità e usabilità.

Rilevanza

Si può pensare che l'applicazione pervasiva di tecnologie AR e VR nel manifatturiero avanzato fornisca un contributo importante soprattutto per quanto riguarda gli aspetti della centralità dell'uomo, che è uno dei temi forti dell'Industria 5.0. Come spesso accade, traslare un'applicazione tecnologica da un campo a quelli adiacenti è già un indicatore della sua efficacia e della raggiunta maturità tecnologica. Per quanto riguarda l'AR, un precursore è sicuramente stato il campo aerospaziale: l'interazione tra uomo e machina (aviogetto o elicottero) è stata migliorata grazie all'AR, incrementando la reattività e la capacità di processare un'elevata quantità di dati senza dover perdere tempo con l'interpretazione e contestualizzazione del dato, aumentando quindi velocità ed efficacia della decisione. Anche la tecnologia dei droni è un buon esempio in cui la remotizzazione delle operazioni ha permesso l'impiego di intelligenza umana in situazioni pericolose o semplicemente impossibili.

Anche per quello che riguarda la VR il campo aerospaziale è stato un precursore: pensiamo a quante ore di volo a basso costo sono state rese possibili grazie a simulatori sempre più realistici. Gli stessi processi, con gli stessi impatti potenziali, sono trasferibili nell'ambito manifatturiero ogni volta che si renda necessario incrementare o remotizzare la capacità, la velocità e l'efficacia decisionale, o quando si voglia ridurre le ore di training o i rischi e i costi derivanti dall'operare in un contesto puramente reale.

Quindi, utilizzare AR e VR nei processi decisionali porterà, oltre a un incremento delle capacità dell'uomo interagente con la macchina, a una riduzione di tempi, costi e rischi, in pieno allineamento con gli obiettivi della transizione digitale, ambientale ed energetica.

Stato dell'arte

Due sono i principali motori di sviluppo: le interfacce fisiche e l'applicazione vera e propria.

Le interfacce fisiche possono consistere in:

- **Smartphone o tablet:** gli strumenti utilizzati sono tipicamente gli stessi disponibili nel mercato consumer o tutt'al più, delle versioni "rugged" quindi corazzate e rese più robuste dal punto di vista fisico (resistenze ad urti, impermeabili a vario grado IP etc.) ma molto più costose. Dal punto di vista software non ci sono particolari accortezze e tali dispositivi vengono offerti con i tipici sistemi operativi standard (Android, Microsoft; IOS più raro)



Fig 3: Esempio di Tablet Industriale. Fonte: Juniper Systems.

- **Proiettori 2D:** I proiettori permettono la visualizzazione delle immagini virtuali sulla realtà da aumentare, tipicamente utilizzati per stazioni di addestramento.
- **Dispositivi Wearables di varia natura:** sia dispositivi che proiettano le immagini in ambiente chiuso per applicazione VR, che proiettano l'immagine in ambiente aperto e adattabili a vari accessori come ad esempio elmetti, occhiali etc.



Figura 4: Visore per AR da applicare alla fronte

Italia ed Europa hanno poca influenza su uno sviluppo particolare dei dispositivi essendo i principali attori collocati in paesi extra UE come Stai Uniti, Cina, Taiwan. Recuperare terreno in questo campo significa essenzialmente riportare in Europa tutte le tecnologie di base in ambito personal computing: i dispositivi visti sopra sono essenzialmente dei portable computers standard opportunamente integrati a tecnologie ottiche.

L'applicazione vera e propria è basata su tecnologie di IA per il riconoscimento della realtà e della sua ricostruzione (VR) o arricchimento (AR). Tipicamente, le aziende leader nei prodotti CAD offrono anche soluzioni di simulazione VR, mentre le aziende leader nel monitoraggio impianti e IoT offrono soluzioni di AR. La sempre più ampia disponibilità di software open per costruire applicazioni specifiche di AR e VR in campo industriale dovrebbe ulteriormente favorire la riduzione dei costi associati allo sviluppo di applicazioni specifiche.

La vera barriera all'utilizzo massivo di queste applicazioni è legata non agli aspetti puramente tecnologici, quanto all'accettazione della diversa modalità di interfaccia uomo-macchina richiesta agli operatori. Il supporto di progetti di ricerca applicata specialmente in formato Pubblico Privato potrebbe aiutare ad aumentare i casi d'uso disponibili come esempio per trasferimenti tecnologici nonché

sperimentare nuove forme di utilizzo, procedure di formazione e approcci di ***change management*** da parte delle aziende.

Risorse economiche necessarie

Dal punto di vista dei costi, la disponibilità di dispositivi a basso costo dovrebbe favorire una più ampia diffusione, o quantomeno aumentare la redditività degli investimenti in fase sperimentale. Purtroppo, la differenza di prezzo tra dispositivi e consumer (range 500€ - 1000€ per un Tablet) e industriali (1500€-3000€ per un equivalente dispositivo rugged) non aiuta ancora la completa accettazione per applicazioni diffuse e robuste nelle aziende manifatturiere.

Se è vero che il costo delle applicazioni dipendono oggi essenzialmente dalle interfacce fisiche, lo sviluppo di Tablet e proiettori sono indipendenti dalle applicazioni di AR. Mentre tutto ciò che diventa indossabile, specialmente smart glasses e loro declinazioni, sono fortemente dipendenti dalle applicazioni. Quindi monitorare il mercato delle tecnologie wearable può dare un'indicazione indiretta della evoluzione delle applicazioni AR e VR. Come sottolinea il rapporto ANITEC-Assinform, *Il Digitale in Italia 2024*[22], tale mercato è in costante crescita, spinto dallo sviluppo di dispositivi indossabili per l'ambito della salute. Uno degli andamenti osservati è proprio l'introduzione nei Wearable di funzionalità AR e VR per lo sviluppo di applicazioni in ambiti quali il gaming, la formazione professionale e la manutenzione industriale.

[22] https://www.anitec-assinform.it/pubblicazioni/il-digitale-in-italia/il-digitale-in-italia.kl

SOCI AIRI >

SOCI SOSTENITORI

BRACCO
CNR - CONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE
MAPEI
PIRELLI

ORGANIZZAZIONI DI IMPRESE

FARMINDUSTRIA
FEDERCHIMICA
UNIONCAMERE

ISTITUTI FINANZIARI

INTESA SANPAOLO

ENTI PUBBLICI DI RICERCA E UNIVERSITÀ

AREA SCIENCE PARK
CENTRO NAST
CSGI
ENEA
INAIL
POLITECNICO DI TORINO - CHILAB
SCUOLA NORMALE SUPERIORE DI PISA
UNIVERSITÀ DI PISA

INDUSTRIE E CENTRI DI RICERCA

BAIC AGRO ITALIA
BIOTECNOMED
BYRON'S HOLDING
BRACCO IMAGING
BREMBO
CAMOZZI AUTOMATION
CENTRO RICERCHE FIAT
CEREAL DOCKS
CERTIMAC
CONSORZIO ITALBIOTEC
CRSLAGHI
CETMA
CIRA
COLOROBBIA CONSULTING
COMSOL
DIASORIN
DOMPÉ
ECOR INTERNATIONAL
ELETTRA SINCROTRONE TRIESTE
E.M.A
ERICSSON TELECOMUNICAZIONI
FINCANTIERI
FONDAZIONE CAVALIERI OTTOLENGHI
FONDAZIONE BRUNO KESSLER
FONDAZIONE PIEMONTE INNOVA
GEWISS
GIUSTO FARAVELLI
INNOVHUB STAZIONI SPERIMENTALI PER L'INDUSTRIA
IVECO
LFOUNDRY
MECCANO
MEMC ELECTRONIC MATERIALS - GLOBALWAFERS COMPANY

**Situazione soci aggiornata a dicembre 2024*

MENARINI SILICON BIOSYSTEMS
METTLER TOLEDO
PIRELLI TYRE
PROGEST
SAES GETTERS
SAIPEM
SMILAB
SPEA
STMICROELECTRONICS
TECNOALIMENTI SOCIETA CONSORTILE PER AZIONI
THALES ALENIA SPACE ITALIA
TODARO INDUSTRY
TXT E-TECH

START UP INNOVATIVE

AIENG
ARCHA SRL
ASSING
COSBERG
ECOR INTERNATIONAL
ENERTECH SOLUTION
EPSILON
IUVO
JONIX
KLASTER
MARITIME TECHNOLOGY CLUSTER FVG
NATIVE TO WEAR
NEXT TECHNOLOGY TECNOTESSILE SRL
NICHE SRL
NVNOVA
PLASTICA ALFA
SULTAN
TECHNETIC ITALIA

SOCIETÀ DI CONSULENZA

AYMING ITALIA
BUGNION
FI GROUP ITALIA
FINSERVICE
LUNATI & MAZZONI
SERVICE GROUP R&D
STUDIO PROMOZIONI
STUDIO TRIBUTARIO E SOCIETARIO DELOITTE
TINEXTA INNOVATION HUB

Airi promuove la ricerca industriale e l'innovazione tecnologica in Italia e in Europa.
Previsioni tecnologiche, policy, networking e tecnologie emergenti.

Scopri di più su www.airi.it

Airi
ASSOCIAZIONE ITALIANA PER LA RICERCA INDUSTRIALE
50
1974 2024





















Isbn 978-88-98935-68-0