

TESI | Territori
Economie
Società
Istituzioni

paper

16
2024

**Intelligenza artificiale human centered
e sostenibile nell'Industria 5.0:
sfide e prospettive**
*Human centered and sustainable
artificial intelligence in Industry 5.0:
challenges and perspectives*

di Barbara Martini, Denise Bellisario
e Paola Coletti



CENTRO STUDI DELLE
CAMERE DI COMMERCIO
GUGLIELMO TAGLIACARNE



Università telematica delle
Camere di Commercio Italiane

TESI | Territori
Economie
Società
Istituzioni

paper

**Intelligenza artificiale human centered e sostenibile
nell'Industria 5.0: sfide e prospettive**
*Human centered and sustainable artificial intelligence in
Industry 5.0: challenges and perspectives*

di Barbara Martini, Denise Bellisario e Paola Coletti

16
2024



CENTRO STUDI DELLE
CAMERE DI COMMERCIO
GUGLIELMO TAGLIACARNE



Università telematica delle
Camere di Commercio Italiane

Intelligenza artificiale human centered e sostenibile nell'Industria 5.0: sfide e prospettive

di Barbara Martini*, Denise Bellisario** e Paola Coletti***

Sommario

L'obiettivo di questo position paper è individuare le maggiori sfide da investigare legate all'approccio di Intelligenza Artificiale Human-Centered (HCAI) in ambito Industria 5.0 ed Economia Circolare. L'ambizione è quella di aprire un filone di ricerca che aggregi competenze multidisciplinari ed interdisciplinari per promuovere approcci sistemici che incoraggino la collaborazione e l'interazione tra discipline differenti, sia a livello ingegneristico-tecnologico che nel campo delle scienze sociali, coniugando, ad esempio, l'approccio dell'analisi delle politiche pubbliche con le discipline statistiche, informatiche e ingegneristiche, con le relative e specifiche problematiche giuridiche che nascono dall'applicazione di nuove tecnologie.

La proposta di questo lavoro preliminare è quello d'individuare e discutere un ambito di lavoro e di studio idoneo a tale interazione. Tale ambito è stato individuato, nello specifico, all'interno dell'Additive Manufacturing (AM) in chiave Industria 5.0. L'Additive Manufacturing, come tecnologia innovativa in fase evolutiva, diventa una piattaforma d'interconnessione tra diversi livelli di applicazione ed integrazione dei concetti di HCAI e allo stesso tempo di verifica degli stessi. In tale contesto due ambiti prospettici a impatto applicativo dell'HCAI sono quelli della supply chain AM oriented e della customizzazione in ambito AM.

* Barbara Martini, Facoltà di Scienze Tecnologiche e dell'Innovazione, Universitas Mercatorum, Roma, Italia, e-mail: barbara.martini@unimercatorum.it.

** Denise Bellisario, Facoltà di Scienze Tecnologiche e dell'Innovazione, Universitas Mercatorum, Roma, Italia, e-mail: denise.bellisario@unimercatorum.it (corresponding author).

***Paola Coletti, Facoltà di Scienze della Società e della Comunicazione, Universitas Mercatorum, Roma, Italia, email: paola.coletti@unimercatorum.it.

Human centered and sustainable artificial intelligence in Industry 5.0: challenges and perspectives

Abstract

The aim of this position paper is to identify a specific focus and the major challenges to be investigated related to the Human-Centered Artificial Intelligence (HCAI) approach in the field of Industry 5.0 and Circular Economy. To support this objective there is the study and a first step towards the opening of a line of research that aggregates multidisciplinary and interdisciplinary skills to promote systemic approaches that encourage the collaboration and interaction between different disciplines. Those interactions are open both at the level of engineering and technology and in the field of social sciences, combining, for example, the approach of public policy analysis with statistics, computer science and engineering, with the related and specific legal problems that arise from the application of new technologies. The proposal and vision of this preliminary work is to identify and discuss a suitable field for such interaction. This field has been identified, specifically, within the Additive Manufacturing (AM) in the context of Industry 5.0. The Additive Manufacturing (AM), as an innovative and in progress technology, becomes an ideal platform for interconnection between different levels of application and integration of HCAI concepts and at the same time to be able to prove them. In this context, two prospective areas with a high application impact of HCAI are those of AM-oriented supply chain and product customization in the AM field enabled by a plethora of recently emerging technologies such as Internet of Things, cloud and edge computing and next generation networks 5G.

Parole chiave: Human Centered intelligenza artificiale, Industria 5.0, tecnologie abilitanti, produzione additiva, customizzazione, regolamentazione, politiche pubbliche

Keywords: Human Centered Artificial Intelligence, Industry 5.0, Enabling Technologies, Additive Manufacturing, customization, regulation, public policy

1. Introduzione

L'Intelligenza Artificiale (IA) è un'area di studio che si concentra sulla creazione di sistemi o macchine in grado di eseguire attività che richiedono intelligenza umana. Queste attività comprendo-

no l'apprendimento automatico, risoluzione di problemi, riconoscimento di modelli, linguaggio naturale e molto altro. In generale, l'IA mira a sviluppare sistemi che possono simulare alcune delle capacità umane di apprendimento e ragionamento, come ad esempio, la percezione visiva, il

riconoscimento delle voci, la scelta e la traduzione linguistica per eseguire compiti specifici in modo autonomo o semiautonomo. John McCarthy ha specificamente descritto l'Intelligenza Artificiale (IA) come competenza scientifica e tecnologica per lo sviluppo di programmatori di computer intelligenti.[1] L'apprendimento automatico o machine learning (ML) e l'apprendimento profondo o deep learning (DP) sono due dei metodi di intelligenza artificiale più comunemente utilizzati [2]. Questi modelli si basano sui dati e vengono utilizzati per elaborare modelli predittivi da parte di individui, aziende e organizzazioni governative. Tuttavia, sono attualmente in fase di sviluppo metodi di apprendimento automatizzato in grado di gestire la complessità e l'imprevedibilità delle informazioni nei diversi settori industriali come ad esempio il food, il biomedicale, l'aerospaziale ecc.[3] A livello industriale, ciò ha comportato lo sviluppo di approcci avanzati di *cognitive computing* e *deep learning* per applicazioni automatizzate di ispezione visiva, rilevamento dei guasti e manutenzione nei sistemi di fabbricazione. Gli approcci di DP vengono utilizzati attivamente nei sistemi di produttivi dalla *supply chain* ai programmi di produzione. Tutte le filiere ormai sono soggette a percorsi di alta qualità e sicurezza che garantiscono la massima trasparenza e questo è applicabile a molteplici settori [4] anche nel campo delle politiche pubbliche e delle pubbliche amministrazioni.

A questo proposito, l'IA aiuta a tenere sotto controllo i diversi processi nella loro interezza e, non solo a sostituire l'uomo nelle operazioni più

rischiose, ma anche a supportarlo, mettendolo al centro -secondo uno specifico approccio sviluppato che è quello *Human Centered*- nella gestione e nell'ottimizzazione dei processi e delle logiche correlate ai diversi ambiti. Tantissimi sono gli esempi citabili, tra cui: Apple, Google e Microsoft stanno adottando approcci incentrati sull'uomo durante la creazione di software di intelligenza artificiale [7]; Mercedes Benz che ha sostituito i robot standard con cobot basati sull'intelligenza artificiale, permettendo di produrre auto personalizzate con maggiore efficienza [5]; IBM Watson ha proposto un sistema che potrebbe raccomandare trattamenti contro il cancro che sono 99% delle volte in linea con le raccomandazioni del medico. [6] Questo rende sempre più centrale la necessità di un punto di vista multidisciplinare che permetta a settori e ruoli differenti di comunicare e mettere in luce aspetti positivi e prospettive diverse dell'utilizzo dell'IA.

1.1 lo stato dell'arte: impieghi recenti dell'IA: l'HCAI

L'approccio "Human-Centered AI" o "IA centrata sull'essere umano" si riferisce a un modello di sviluppo e implementazione dell'intelligenza artificiale che pone al centro le esigenze, i valori e le prospettive umane. In sostanza, si tratta di un approccio all'interno del campo dell'IA che si concentra sul **coinvolgimento delle persone** con l'inclusione attiva degli utenti, degli stakeholder e degli esperti del settore nell'intero ciclo di sviluppo dell'IA, dalle fasi di progettazione e sviluppo fino alla sua implementazione pratica. In tal modo, ci

si pone come obiettivo quello di comprendere e integrare le prospettive umane nel processo decisionale e di creazione dei sistemi IA. La **facilitazione dell'interazione uomo-macchina** mira a creare sistemi AI che siano intuitivi, comprensibili e facilmente utilizzabili dagli esseri umani, riducendo la distanza e migliorando l'interazione tra le persone e la tecnologia. La finalità ultima dell'AI centrata sull'essere umano è migliorare la vita delle persone, ad esempio, attraverso soluzioni che aumentino l'efficienza, l'accessibilità ai servizi, la sicurezza, la salute e la qualità della vita in generale. Anche il tema dell'**etica e della trasparenza** è cruciale nella HCAI: l'IA centrata sull'essere umano pone un'enfasi particolare sull'etica, sulla responsabilità e sulla trasparenza nell'uso dei sistemi IA. L'obiettivo è garantire che gli algoritmi siano sviluppati e utilizzati in modo responsabile, rispettando i valori umani, evitando discriminazioni, e rendendo trasparenti i processi decisionali dell'IA. In sintesi, l'IA centrata sull'essere umano pone al centro l'essere umano, i suoi valori, e le sue esigenze, promuovendo l'adozione di tecnologie AI in modo etico, responsabile e vantaggioso per l'umanità.

Queste considerazioni nascono dalla constatazione che l'IA ha avuto molti fallimenti come il chatbot di Facebook che potrebbe rispondere correttamente solo al 30% dei suoi servizi Messenger e il chatbot IA di Microsoft che ha "imparato" insulti razzisti in un giorno sulla base della lettura dei feed di Twitter. [8,9] Sebbene questi sistemi avrebbero potuto soddisfare tutti i requisiti funzionali e gli obiettivi tecnici, il risultato non rifletteva però le

esigenze 'centrate' sull'uomo richieste dagli utenti. Ad esempio, un obiettivo tecnico per costruire un sistema di riconoscimento facciale veloce potrebbe essere facilmente raggiungibile. Tuttavia, il sistema risultante potrebbe ancora discriminare il colore o la razza degli utenti. [10] Questi aspetti incentrati sull'uomo dovrebbero essere affrontati insieme agli obiettivi tecnici [11]. Nel contesto dell'IA, gli approcci incentrati sull'uomo includono come obiettivi, tra gli altri, fornire una migliore esperienza utente, una maggiore chiarezza e fruibilità delle informazioni, equità, fiducia, riduzione dei pregiudizi e costruzione di un'IA responsabile. [12-14] Tuttavia, il software di IA di oggi manca di questi aspetti centrati sull'uomo ed è necessario ricercare soluzioni di IA appropriate prima di includerle nei sistemi software.

In particolare, nel settore industriale e manifatturiero l'IA offre un enorme potenziale di sviluppo in termini di efficienza, sostenibilità e competitività e un approccio di IA incentrata sull'uomo è fondamentale per garantire che le tecnologie e i sistemi ingegneristici siano sicure, etiche e utili per le persone coinvolte. Nel settore industriale-manifatturiero è auspicabile un profondo cambiamento di prospettiva. Inizialmente, l'adozione dell'AI si è concentrata sull'aspetto ingegneristico, informatico e statistico, in cui l'attenzione era rivolta principalmente alla gestione e all'analisi dei dati per migliorare i processi produttivi. Le aziende manifatturiere raccolgono enormi quantità di dati non strutturati da diverse fonti, come: sensori nelle macchine, linee di produzione, sistemi di esecuzione della produ-

zione, sistemi di pianificazione delle risorse aziendali, sistemi al di fuori della produzione (feedback dei clienti, catena di approvvigionamento). L'analisi di questi dati crea un vantaggio competitivo e genera nuovi prodotti e servizi. La possibilità di analizzare e strutturare correttamente i dati raccolti e ricavarne del valore tramite IA e tecniche di ML/DP è, quindi, una sfida per l'industria mondiale ma anche per l'economia globale. I paesi di tutto il mondo stanno implementando strategie e iniziative per tenere il passo con il cambiamento grazie al rapido sviluppo dell'innovazione e alla digitalizzazione della produzione. [15] Tuttavia, la nostra revisione in ambito di letteratura recente ha rilevato che la maggior parte dei sistemi software di IA manca di approcci incentrati sull'uomo durante la scrittura e la modellazione dei requisiti ingegneristici; ad esempio, ha evidenziato che molte delle iniziative si concentrano principalmente su alcuni aspetti per includere l'etica, la fiducia e la chiarezza, ma mancano gli aspetti incentrati sull'uomo adottati dall'industria, o come dovrebbero essere affrontati. La centralità porta ad elaborare e processare requisiti dei sistemi basati su AI in modo nuovo e approfondito per indirizzare la human-centered: si evidenzia, infatti, come ci siano dei requisiti ingegneristici dell'IA che sollevano un certo numero di problematiche con le quali risulta difficile interfacciarsi, come riporre piena fiducia nella capacità delle soluzioni dell'IA, ovvero la difficoltà nello specificare i diversi requisiti perché troppo vaghi, o le limitazioni delle tecniche esistenti per gestire i requisiti di IA, così come l'emergere di nuovi tipi di requisiti,

come dati, chiarezza, trasparenza, conformità, difficoltà nel comprendere la fattibilità dei modelli di IA.

L'IA nell'industria manifatturiera non deve riguardare solo l'ottimizzazione dei processi, ma anche la creazione di ambienti di lavoro sicuri ed etici, la considerazione delle questioni di privacy e sicurezza dei dati, e il coinvolgimento attivo degli operatori e dei lavoratori nelle decisioni legate all'AI. Per questo motivo oltre ad aspetti ingegneristico, informatico e statistico occorre affrontare la questione anche da un punto di vista giuridico, sociale ed economico con opportune politiche e legislative appropriate a supporto di una nuova visione.

D'altra parte, un altro campo di applicazione dell'IA è il settore pubblico che rappresenta il più grande mercato per le soluzioni di IA nei paesi in via di sviluppo: la governance dell'IA diventa importante soprattutto oggi che l'open government e la digitalizzazione dei servizi pubblici si radicano. [16] L'IA nel settore pubblico si applica ad esempio, alle decisioni in materia di appalti pubblici, la cui spesa rappresenta fino al 50% del PIL nella maggior parte dei casi Paesi in via di sviluppo. Pertanto, gli appalti pubblici sono essenzialmente un ponte critico per l'adozione delle tecnologie di IA da parte del settore pubblico. [17,18] Tuttavia, i governi dei paesi in via di sviluppo hanno deboli meccanismi normativi e di governance per incentivare gli sviluppatori di soluzioni e gli utenti dell'IA per adottare innovazioni di IA incentrate sull'uomo che proteggano gli utenti da abusi, divisioni sociali e soppressione del governo.

2. HCAI nell'Industria 5.0 e l'influenza delle tecnologie abilitanti

La Commissione Europea propone una visione di Industria 5.0, dove il benessere e il progresso tecnologico sono considerati congiuntamente in ottica sostenibilità con particolare attenzione alla centralità umana. [19] La rivoluzione industriale 5.0 richiede l'intervento di sistemi più sofisticati come Network Sensor Data Interoperability, Cobot e altri sistemi intelligenti. [20] In questo contesto occorre consolidare la conoscenza sull'interazione uomo-tecnologia per eliminare la discrepanza tra la produzione ed esigenze della società. L'IA non è una fredda sostituzione della manodopera, ma un'opportunità di trasformazione e di crescita. [21]

In questa direzione, HCAI sostiene un approccio incentrato sull'uomo nella realizzazione della visione di Industria 5.0 per creare dei sistemi IA che aumentino le capacità umane più che sostituirle e per garantire una maggiore inclusività in linea con uno sviluppo sostenibile. [22,23] Mentre diversi lavori in letteratura mostrano esempi di sistemi IA con impatto sostanziale sulle attività umane, c'è un consenso unanime nella necessità di affrontare tutte le implicazioni sociali di questa tecnologia e di come IA può essere messa al servizio di obiettivi sociali con il benessere del lavoratore posto al centro del processo di produzione [24-30] con un focus su interazione uomo-macchina che in un contesto di Industria 5.0 interconnette

l'intelligenza umana con la precisione e l'efficienza delle macchine che utilizzano l'intelligenza artificiale nella produzione industriale. L'Industria 5.0 viene, infatti, sviluppata come mezzo per superare le sfide affrontate dall'industria 4.0 promuovendo la centralità umana e soddisfacendo i bisogni della società.

2.1 Il ruolo europeo e il traino dell'Industria 5.0 sull'HCAI

L'Europa ha assunto un ruolo guida nelle transizioni verde e digitale, e ciò implica che i lavoratori, le regioni e le società si trovino ad affrontare trasformazioni estremamente rapide che, se da un lato, creano opportunità per uno sviluppo tecnologico e sociale inclusivo, dall'altro comportando anche il rischio di un aumento di disuguaglianze. La richiesta che viene dalla Commissione Europea è di concentrare gli sforzi per promuovere la centralità umana in IA come opportunità di trasformazione e di crescita al fine di concorrere al raggiungimento degli obiettivi del programma "Digital Decade"¹ che ha l'ambizione di guidare la trasformazione digitale dell'Europa entro il 2030. [31]

L'HCAI nella Industria 5.0, infatti, è un nuovo approccio teso ad utilizzare i sistemi di Intelligenza Artificiale con un'attenzione sull'importanza della collaborazione e interazione tra le macchine intelligenti e gli operatori umani. Tale approccio è in grado di imparare dagli input umani e si basa su principi collaborativi che oltre alla

1 Europe's Digital Decade: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/europe-fit-digital-age/europes-digital-decade-digital-targets-2030_en

tecnologia fanno uso di conoscenze derivanti dalle scienze umane (dall'etica alle discipline sul comportamento) affinché la collaborazione e la sinergia tra uomo e IA possa svilupparsi in un contesto di crescente fiducia. Alcuni esempi includono, fra gli altri, macchine e i processi progettati considerando le esigenze, le abilità e le preferenze degli operatori umani e apprendendo dai loro comportamenti: le macchine assistono e supportano gli operatori umani, migliorando la produttività e la sicurezza sul luogo di lavoro; macchine che imparano continuamente dalle interazioni umane, adattandosi alle esigenze in evoluzione degli operatori e dell'ambiente di lavoro [32].

Nel documento "policy brief" sull'Industria 5.0 l'UE non solo va a definire che cosa è l'Industria 5.0 ma anche le politiche da mettere in atto per supportarne lo sviluppo. Nello stesso documento l'UE sancisce i tre assi attorno ai quali si sviluppa l'Industria 5.0 e che sono la human-centricity, la sostenibilità e la resilienza. [31]. In particolare, l'UE sancisce l'importanza di mettere in primo piano la ricerca e l'innovazione come motori per la transizione verso Industria 5.0. Ora più che mai, ritiene che sia importante investire per superare le sfide economiche poste dalla crisi del coronavirus, e per stabilire una "nuova normalità" con un'industria europea più competitiva, più sostenibile e più verde. Il ruolo della UE è quello di guidare questa nuova ondata di innovazione. Istanze più che condivisibili che sono alla base anche del programma Next Generation EU e di Horizon Europe.

Questa trasformazione a livello industriale richiede una nuova figura di imprenditore. L'imprenditore del futuro sarà una persona sensibile e orientata all'innovazione, in grado di individuare nuove opportunità di business sostenibili e di attenzione alla natura, e di essere parte attiva all'interno di un ecosistema di industrie e soggetti pubblici e privati per essere parte di un modello di cooperazione al fine di realizzare buone pratiche di economia circolare.

2.2 Le fabbriche smart e il ruolo dell'HCAI

L'industria 5.0 ha l'ambizione di rilanciare la presenza della forza lavoro umana nelle fabbriche, dove uomo e macchina lavorerebbero insieme per aumentare l'efficienza del processo sfruttando appieno le capacità intellettuali e la creatività umana attraverso la loro integrazione con gli attuali sistemi intelligenti. L'Industria 5.0 include l'interoperabilità dei dati dei sensori di rete con nuove funzionalità aggiunte. Alcuni di queste, sono Smart Additive Manufacturing, Predictive maintenance, Hyper customisation in the Industry, Cyber-Physical Cognitive systems e l'introduzione di Collaborative Robots. Nelle fabbriche smart ispirate dalla moderna industria manifatturiera, l'uso dell'IA facilita l'acquisizione di decisioni tempestive basate sia su dati in tempo reale che storici, con un coinvolgimento umano minimo. [32]

Per affrontare queste sfide è necessario che l'IA sia debitamente compresa, accettata ed integrata, risolvendo anche le questioni legate alla sicurezza

dei dati, e se tali sfide saranno effettivamente superate, si aiuteranno le organizzazioni a far crescere l'Industria 5.0. Ciò aumenterà anche la fiducia nell'automazione e aiuterà i lavoratori a svolgere il loro lavoro insieme ai robot. Una migliore automazione che consideri il comportamento umano e le esigenze umane aiuterà a migliorare la produttività degli esseri umani e contribuirà a fornire un lavoro significativo agli esseri umani stessi. Pertanto, l'Industria 5.0 offre l'opportunità per condurre ricerche, in particolare nella sicurezza e integrazione dei dati, considerata la sfida più significativa quando le cose sono integrate con Internet, spesso indicato come Industrial Internet of Things (IIoT).

Oltre all'interazione uomo-macchina personalizzata, nuovi processi produttivi e industriali potenziati dall'interazione con l'IA e l'IoT sono sicuramente rappresentati dalla fabbricazione additiva. La cosiddetta **Additive Manufacturing (AM)** è una tecnica smart che rientra tra le fondamentali della quarta, ma anche della quinta rivoluzione industriale. L'intelligenza artificiale e l'apprendimento automatico stanno diventando sempre più parte integrante della crescita e dell'applicabilità dell'AM. Le potenzialità di tale tecnologia di fabbricazione sono ad ora alla base di una rivoluzione scientifica e tecnologica. La logica di fabbricazione viene rivoluzionata così come il ruolo umano e l'interazione uomo-macchina. Questo non si limita alla vera e propria fase di produzione, ma anche alle fasi pre e post produttive; con una complessa rivoluzione della catena di approvvigionamento dell'AM, così come

lo sviluppo di nuovi materiali, il perfezionamento delle macchine, la progettazione delle parti e l'ottimizzazione del flusso di lavoro. Con l'aumento dell'interazione uomo-macchina, il lavoro futuro può anche essere fatto per sviluppare un controllo intelligente affinando gli attuali algoritmi di riconoscimento dei modelli.

Allo stesso modo in [33] gli autori hanno riassunto i potenziali vantaggi dell'architettura di collaborazione dell'Industria 5.0 incentrata sull'uomo: miglioramento della collaborazione, miglioramento del processo decisionale, design orientato all'utente, flessibilità, innovazione continua. Individuando allo stesso tempo anche le criticità già in parte citate come: complessità tecnologica, necessità di formazione e adattamento, implicazioni finanziarie, rischio di ridondanza tecnologica [33].

I valori fondamentali dell'Industria 5.0, tra cui la centralità dell'uomo, la sostenibilità e la resilienza, hanno stimolato discussioni formali e scientifiche sull'argomento. La produzione intelligente incentrata sull'uomo (Human Centered Smart Manufacturing - HSM), infatti, sfrutta appieno la flessibilità umana, la precisione delle macchine e le tecnologie informatiche di nuova generazione per costruire un sistema di produzione super intelligente, sostenibile e resiliente. Al giorno d'oggi, sono state condotte ricerche approfondite sul concetto, l'architettura, le tecnologie abilitanti e le applicazioni della produzione intelligente. Tuttavia, la ricerca sull'HSM è relativamente carente, ma sta iniziando a guadagnare rapidamente terreno.

In tale ottica, ad esempio in [34] gli autori hanno riepilogato le limitazioni, le barriere e le sfide dei principali delle tecnologie abilitanti e l'applicazione dell'HSM in base ai due aspetti seguenti: da un lato, hanno identificato tre promettenti tecnologie dell'Industria 4.0, come blockchain e IIoT, fusione umano-cibernetica basata su DT e AR, e supporto decisionale intelligente assistito da dati e dalla conoscenza, che possono continuare a supportare la costruzione e il funzionamento dell'HSM; dall'altra parte permangono le sfide legate alla sicurezza dei dati nella rete IIoT, l'efficienza della collaborazione in ambito HCPS (Human Centric Production Service) e l'incertezza dei modelli nel processo decisionale [34]

2.3 Casi d'uso/Casi pratici di utilizzo di HCAI

Casi d'uso di HCAI in ambito Smart Manufacturing possono abbracciare sia la fase di progettazione, produzione e manutenzione di impianti di produzione al fine di ottimizzare ciascuna fase mettendo al centro le esigenze, le prospettive e il coinvolgimento degli operatori umani nelle decisioni e nei processi.

- La **fase di progettazione** può beneficiare di una incrementata capacità di decisione e base di conoscenza costruita su dati raccolti in tempo reale, dati storici raccolti e memorizzati nel tempo nonché maggiori possibilità di raccolta requisiti sul sistema alla base del processo produttivo [35] [36]. L'obiettivo finale è di tradurre in modo iterativo le esigenze del cliente in soluzioni
- La **fase di produzione** può beneficiare del ruolo dell'intelligenza artificiale al fine di ottimizzare le interazioni tra umani e macchine nel contesto della produzione industriale. In questo ambito sistemi di produzione principalmente basati su dati e conoscenze, come sistemi blockchain-IIoT, deep learning, knowledge reasoning e tecnologie di visualizzazione (dashbo-

pratiche e applicabili. Ad esempio, nel caso si debba progettare un processo di produzione per la fabbricazione di componenti automobilistici secondo un approccio HCAI guidato dai dati, la fase di raccolta dei requisiti può beneficiare di predizioni fatte sui bisogni dei clienti e di formalizzazione dei requisiti grazie a tecniche di data mining e uso di Transformers [37], mentre le attività di progettazione può essere agevolata da tecniche di AI e tecniche avanzata di gestione dei dati per analizzare i dati raccolti e identificare pattern, anomalie e opportunità di ottimizzazione nel processo di produzione, rilevando inefficienze nei movimenti degli operatori o suggerire modifiche ai parametri di produzione per migliorare la qualità. Inoltre si possono utilizzare modelli di simulazione basati sull'IA per valutare le modifiche proposte al processo di produzione prima di implementarle effettivamente e prevederne eventuali impatti negativi sulle prestazioni o sulla sicurezza del lavoratore.

ard), consentono di monitorare in tempo reale il flusso di produzione e raccogliere dati su prestazioni, tempi di ciclo e qualità del prodotto [38][39]. Questi dati vengono analizzati utilizzando tecniche di deep learning e ragionamento conoscitivo per identificare pattern e tendenze significative e prendere decisioni rapide e informate. Ad esempio, l'analisi dei dati potrebbe rivelare che una particolare configurazione di macchine e tempi di ciclo ottimizzati può migliorare significativamente l'efficienza produttiva andando al contempo ad assicurare migliori condizioni o alleggerimento di carico dei lavoratori [40]. Inoltre i lavoratori possono beneficiare di una percezione più più dettagliata e informata dell'ambiente di lavoro e del contesto circostante di produzione attraverso tecnologie di intelligenza artificiale, come la digital twin (DT) e la realtà aumentata (AR), migliorando la loro capacità di prendere decisioni e di adattarsi alle condizioni in evoluzione. Ad esempio, i lavoratori possono indossare dispositivi AR che forniscono informazioni in tempo reale sui dettagli del processo di produzione, come istruzioni di montaggio sovrapposti al pezzo che stanno assemblando, specifiche tecniche e avvisi di sicurezza. Allo stesso tempo, i robot collaborativi dotati di sensori avanzati e capacità di apprendimento automatico possono rilevare lo stato emo-

tivo, fisico, mentale e i bias cognitivi dei lavoratori per fare aggiustamenti adattativi e massimizzare la protezione del benessere e dei diritti fondamentali dei lavoratori [41]. In termini di sicurezza sui luoghi di lavoro, ciò potrebbe avere interessanti risvolti: nel caso si rilevi che un lavoratore sia soggetto a stress o deficit legati ad un recupero compensativo, il robot può adattare il proprio ritmo di lavoro per evitare sovraccarichi o rischi di incidenti [42].

- La **fase di manutenzione** può trarre vantaggio dall'approccio HCAI, focalizzandosi sulla collaborazione tra operatori umani e macchine intelligenti (robot) per la manutenzione dei macchinari. Nella pianificazione intelligente, tecnici di manutenzione, operatori di macchine e ingegneri collaborano, supportati dall'IA che li assiste nelle decisioni e ottimizza le attività di manutenzione secondo le esigenze umane. Le macchine intelligenti possono svolgere compiti complessi o in ambienti pericolosi, mentre i tecnici gestiscono compiti più flessibili [43]. Inoltre, possono essere sviluppati sistemi di realtà aumentata (AR) che forniscono istruzioni dettagliate e visualizzazioni virtuali per guidare gli operatori attraverso procedure di manutenzione complesse direttamente sul campo, rendendo più semplice compiere tali manutenzioni in modo più preciso e soprattutto sicuro. L'AI può alimentare i

sistemi AR con informazioni aggiornate e pertinenti, migliorando l'efficienza e la precisione delle attività di manutenzione svolte dagli operatori [44][45]. I sistemi intelligenti sono progettati per essere trasparenti, interpretabili e facili da usare per gli operatori umani. Soprattutto, per rendere più efficace e sicura la collaborazione uomo-macchina è necessario sistemi che si adattino ai bisogni, preferenze e alle esigenze individuali degli operatori, come ad esempio battito cardiaco, scopo dell'operazione e livello di esperienza [46].

In ambito Additive Manufacturing si è assistito ad una crescente domanda di prodotti e dispositivi orientati al benessere dell'uomo, ad esempio i prodotti biomedicali per ortopedia, sport e odontoiatria, dato il significativo livello di personalizzazione richiesto dal processo di fabbricazione e al contempo un'elevata qualità e competitività dei costi. L'uso di AI può permettere di superare le sfide per la customizzazione del processo di fabbricazione additiva [47] [48] integrando sistemi AI/ML in fase di progettazione, produzione e valutazione del processo e del prodotto. Abilitare l'IA nella fase di progettazione del prodotto offre una soluzione promettente per considerare una varietà di variabili di progettazione e le loro complesse interazioni nella progettazione e quindi raggiungere le prestazioni desiderate in produzione. Inoltre, con l'integrazione dell'IA nelle fasi di fabbricazione e valutazione della AM, il processo di fabbricazione dei prodotti

personalizzati centrati sull'essere umano può essere ottimizzato, e le prestazioni di qualità possono essere valutate in modo completo ed efficiente. Molte sono ancora le sfide aperte nel includere AI nei processi di fabbricazione additiva in particolar modo nel controllo di qualità consentendo una produzione più efficiente, precisa e affidabile dei prodotti [49], in particolare nell'ambito della (1) predizione della qualità: utilizzando algoritmi di machine learning, è possibile predire caratteristiche critiche della qualità come difetti, deviazioni geometriche e condizioni di processo in maniera predittiva prima che si verifichino effettivamente durante la produzione; (2) compensazione prescrittiva e correzione: l'IA può essere impiegata per compensare automaticamente eventuali difetti o deviazioni durante la fabbricazione, garantendo che il prodotto finale soddisfi gli standard di qualità richiesti [50] [51].

3 Sfide e prospettive dell'HCAI per l'AM

Lo sviluppo di un'offerta customizzata

Sebbene l'AM abbia fornito opportunità senza precedenti nello sviluppo di prodotti incentrati sull'uomo, ossia customizzabili, in particolare, nelle applicazioni mediche, ci sono ancora molte sfide pratiche che ne limitano un'adozione più ampia, soprattutto in tre principali aree di produzione industriale, vale a dire la garanzia della qualità, l'ottimizzazione del design e la personalizzazione. **L'assicurazione della qualità** è un passaggio fondamentale della produzione industriale, ad esempio

nel garantire le prestazioni delle linee di produzione, così come per l'ottimizzazione di diversi materiali e design. I sistemi basati sull'intelligenza artificiale possono analizzare i dati provenienti dai sensori IoT all'interno del processo AM per identificare anomalie o difetti e per correggere rapidamente i parametri o ristampare le parti difettose. Nell'ottimizzazione della progettazione, l'intelligenza artificiale può potenziare l'AM nel processo di progettazione. In particolare, gli algoritmi di IA possono analizzare grandi quantità di dati per stabilire e regolare i fattori che incidono maggiormente sulla progettazione e sul design. Il processo AM può, quindi, eseguire facilmente progetti migliorati che raccolgono le specifiche esatte del progetto. Inoltre, l'intelligenza artificiale combinata con l'AM consente ai produttori di creare prodotti personalizzati, in particolare, gli algoritmi di IA possono analizzare i dati e le preferenze dei clienti per creare design personalizzati, che può essere facilmente implementato, e stampato in 3D da sistemi AM. Le sfide persistenti e le prospettive di ricerca imminenti in queste aree AM sono principalmente: lo sviluppo di metodi avanzati di IA orientati all'AM per gestire i dati con elevata eterogeneità e dimensionalità, ma bassa disponibilità; l'uso completo della conoscenza fisica dei metodi di IA per applicazioni AM personalizzate, garantendo al contempo la sicurezza dei processi e la privacy dei dati, e l'interazione uomo-macchina che mira all'integrazione degli esseri umani nei processi di progettazione, fabbricazione e controllo qualità, attraverso l'uso dell'IA interpretabile, la società uomo-macchina potenziata dall'IOT, AR/VR, ecc.

Un elemento fondamentale e di rilievo per abilitare la produzione intelligente e connessa attraverso l'implementazione di sensori e IA è rappresentato dal dispiegamento delle reti 5G/6G ideali per implementazioni massicce di IoT. Queste reti offrono connettività ad alta velocità, bassa latenza e affidabilità, elementi essenziali per garantire l'integrazione ottimale delle tecnologie di IA nel contesto della produzione additiva basata sui dati.

Parallelamente, assicurano un preciso controllo dei sistemi critici, la tutela della sicurezza dei dati, l'automazione e regolazioni in tempo reale, nonché una collaborazione uomo-macchina efficiente che richiedono comunicazioni a bassa latenza. Ad esempio, i robot e i macchinari guidati dall'intelligenza artificiale possono lavorare in collaborazione con i lavoratori umani, con il 5G/6G che garantisce che la comunicazione tra queste entità sia quasi istantanea. Ancora più importante, le reti 5G/6G sono dotate di un potente paradigma che è l'*edge intelligence*, ovvero una forma di intelligenza distribuita della rete costruita in modo cooperativo attraverso dati IoT, comunicazioni wireless, capacità computazionale periferica (edge computing) e intelligenza artificiale. L'edge computing (in aggiunta al classico cloud computing) negli ambienti di produzione sono fondamentali per (i) consentire una sinergia tra utenti, dispositivi personali, infrastrutture di rete e "things" come cobot, macchinari, ecc.; (ii) fornire le capacità computazionali per eseguire artefatti di IA necessari per decisioni basate sui dati e processi di controllo.

Le principali sfide da indirizzare in questo ambito includono:

- **Affidabilità e sicurezza della rete:** le reti abilitate dalla comunicazione 5G/6G devono essere protette e altamente configurabili per soddisfare i requisiti AM. Ad esempio, le reti 5G e 6G utilizzano ampiamente la virtualizzazione e la programmabilità della rete. Questa programmabilità ha un costo, ovvero la centralizzazione del controllo della rete. Se da un lato c'è il vantaggio che il controllo della rete e del traffico avviene attraverso una unica entità, dall'altra lo svantaggio di questo approccio è rappresentato dalla presenza di un "singolo punto di vulnerabilità" che può avere un impatto in termini di disponibilità della rete, che è una preoccupazione critica nella rete AM. Se un controller ha un malfunzionamento, questo può riflettersi sull'intera infrastruttura, portando a un blackout di comunicazione. Inoltre in una infrastruttura virtualizzata, occorre unificare e sincronizzare i sistemi di sicurezza e accesso sia alle risorse virtuali di rete (collegamenti), che cloud (server, macchine virtuali, container) e di immagazzinamento dati (dischi) per evitare intrusioni malevoli.
- **Integrazione dell'edge computing:** l'intelligenza artificiale e l'AM richiedono un'elevata attività di elaborazione dei dati. Sebbene questa attività possa essere eseguita utilizzando tecnologie di cloud

computing, la larghezza di banda necessaria per inviare i dati al cloud pubblico o privato non è trascurabile. Per ovviare a questo problema, i nodi di pre-elaborazione possono essere posizionati ai margini della rete. L'integrazione di questi nodi periferici e l'impatto che possono avere sulle funzionalità di rete, come la latenza e la sicurezza, è una sfida aperta.

- **Latenza deterministica:** Le reti 5G/6G e le reti programmabili possono introdurre alcune latenze. Ad esempio, i pacchetti che transitano all'interno di una rete devono essere elaborati da un'entità programmata per prendere decisioni sul traffico. Il percorso tra gli switch e l'entità programmata può essere la fonte di latenze impreviste, che possono generare alcune perdite di sincronizzazioni nelle applicazioni di AM. D'altra parte la collaborazione uomo-macchina efficiente, sicura e in tempo-reale richiede comunicazioni non solo a bassa latenza ma anche pressoché deterministica ovvero un ritardo nel trasferimento dati che segue un modello prevedibile e costante e che quindi può essere previsto in base a fattori noti o condizioni specifiche all'interno di un sistema. La garanzia di una latenza bassa e deterministica richiede l'implementazione di tecnologie e architetture di rete specifiche ed è ancora una sfida aperta in ambito industriale.

Nuovo approccio proposto

Un possibile approccio per superare le sfide dell'AM di cui si è discusso nel paper è quello di promuovere la personalizzazione dell'AM nel settore industriale con l'ottimizzazione dei sensori IoT connessi attraverso reti ad alte prestazioni e ritardi contenuti al fine di migliorare l'interazione tra il cliente e la finalizzazione del pezzo, sia a partire dalla fase di progettazione che in fase di produzione. In particolare, a livello di rete 5G/6G l'approccio proposto consiste nell'impiego di tecnologie di virtualizzazione e protocolli di sincronizzazione e reti a bassa latenza, anche tramite integrazione con reti Industrial Ethernet per sfruttare al meglio le loro rispettive caratteristiche. Ad esempio, per garantire la sicurezza, è possibile utilizzare una soluzione di monitoraggio e registrazione distribuita dei dati di produzione e stato di funzionamento delle macchine. Inoltre si può considerare di impiegare una tecnologia di virtualizzazione software, come i micro-container o le macchine virtuali, opportunamente dispiegati nei nodi di *edge computing* per garantire le prestazioni di bassa latenza. Infine si potrebbe utilizzare una opportuna integrazione di reti Industrial Ethernet e reti 5G, la prima per le applicazioni fisse e cablate con protocolli "time-sensitive" ovvero attenti alla schedulazione rapida e tempestiva dei pacchetti dei dati rimuovendo le caratteristiche non deterministiche della comunicazione, le seconde per applicazioni mobili e comunicazioni senza fili in tempo reale che richiedono tempi di risposta precisi, come il controllo di macchinari e robo-

tica avanzata. Inoltre, per migliorare l'integrazione dei nodi periferici con le reti ad alta velocità è possibile utilizzare un approccio di *Intent-based Networking*, cioè un approccio avanzato per la configurazione e la gestione dell'infrastruttura che si basa sulla definizione degli obiettivi desiderati e delle intenzioni dell'utente, piuttosto che sulla configurazione manuale dei singoli dispositivi di rete. Questo può essere arricchito grazie all'uso dell'intelligenza artificiale per affrontare la profilazione dell'utente al fine di migliorare l'interazione tecnica utente-rete in ottica *human-centered*. Inoltre, gli intenti di sicurezza dei dati possono anche essere progettati per un supporto efficace ma semplificato per la sicurezza della rete. Allo stesso modo, l'uso della tecnologia Blockchain può essere senza dubbio utile per innalzare il livello di sicurezza crittografica e immutabilità dei dati nonché il controllo di accesso ai dati. Ciò è fondamentale per proteggere i dati sensibili relativi alla produzione e alla proprietà intellettuale da accessi non autorizzati o modifiche fraudolente che possano compromettere sia sistemi informatici che di produzione con possibile problemi di sicurezza informatica che dei lavoratori.

La necessità di un Governo 5.0

Oltre alle sfide tecnologiche sopra menzionate, un'altra area di indagine dovrebbe essere dedicata agli studi e alle sfide a livello politico e sociale, in particolare per quanto riguarda migliorare la sicurezza e la salute nei luoghi di lavoro, in particolare nel settore manifatturiero.

L'Industria 5.0 ha bisogno del Governo 5.0. Si rileva una notevole discrepanza nei cambiamenti tra le imprese e il settore pubblico. L'incertezza, l'instabilità e il rapido aggiornamento delle tecnologie richiedono che il settore pubblico reagisca con un'agilità strategica. Così come le aziende riescono a realizzare una trasformazione sistemica in tempi brevi, così il settore pubblico deve predisporre strumenti decisionali adeguati e in maniera tempestiva. Data la complessità e la portata della rivoluzione prodotta dall'IA, è diventata cruciale stabilire normative e linee guida per governare l'uso dell'IA. Questo coinvolge questioni come l'etica nell'IA, la trasparenza dei modelli, la responsabilità legale, la protezione della privacy e la sicurezza. In tal senso, potrebbe essere necessario stabilire standard e protocolli per la valutazione e la certificazione dell'IA al fine di garantire la conformità con regole etiche, normative e di sicurezza.

Al fine di aumentare l'impatto delle soluzioni proposte, gli sforzi dovrebbero essere rivolti a garantire una maggiore attenzione alla regolazione del settore che non può basarsi su strumenti obsoleti e poco flessibili nella scusa della tradizione "command and control", con uno Stato regolatore che impone limiti rigidi dettati dalla normazione.

Nuovi strumenti sono associati a una migliore qualità della regolamentazione, come la regolamentazione adattiva e sperimentale e gli spazi di sperimentazione normativa. In tal senso, la regolamentazione dovrebbe puntare a migliorare il modo in cui l'IA può essere utilizzata per servire obiettivi sociali (ad esempio, impatto ambienta-

le, ambiente di lavoro sano) con il benessere dei lavoratori che viene posto al centro del processo di produzione. Ovvero, la IA è oggi usata anche per regolamentare e migliorare i controlli da parte del governo sulle imprese, concentrandosi sulla loro capacità di prevenire o mitigare il rischio di incidenti dei lavoratori.

4. Conclusioni

Lo scenario di riferimento per questo studio risulta, quindi, quello dello Human-Centered Artificial Intelligence (HCAI) centrato nell'area industriale/produttiva in linea con il concetto di Industria 5.0. In particolare, ci si rivolge all'ambiente della produzione additiva basata sui dati cercando di porre al centro dell'attenzione e degli sforzi il benessere dei lavoratori e degli utenti attraverso la personalizzazione dei prodotti, l'integrazione dell'essere umano nel processo di produzione e di controllo della qualità e il miglioramento della qualità delle regolamentazioni in tale ambito.

All'interno delle tecnologie chiave per ottenere una produzione personalizzata e di alta qualità, l'*Additive Manufacturing (AM)* svolge un ruolo fondamentale nei contesti industriali moderni, soprattutto quando combinato con sistemi IoT e IA al fine di perseguire una produzione intelligente avanzata in linea con il concetto di HCAI verso gli scenari dell'Industria 5.0. Insieme, le tecnologie IoT e IA combinate con l'AM possono rimo-

dellare la produzione tradizionale in un processo più agile, incentrato sull'uomo e basato sui dati. In effetti, l'IoT può svolgere un ruolo cruciale e fungere da infrastruttura di dati che migliora i processi di AM promuovendo una qualità superiore, una riduzione degli sprechi di materiale e una produzione rapida e sicura nei processi AM. D'altra parte, i sistemi intelligenti possono supportare gli esseri umani per migliorare l'esperienza dell'utente e garantire il benessere dei lavoratori nel settore manifatturiero. Un elemento chiave e significativo per consentire la produzione intelligente e connessa abilitata dai sistemi IoT e IA è il contributo delle reti 5G/6G. Le reti 5G/6G forniscono la connettività ad alta velocità, a bassa latenza e l'affidabilità essenziali per la perfetta integrazione delle tecnologie di IA per la produzione additiva basata sui dati, garantendo al contempo un controllo preciso dei sistemi critici, la sicurezza dei dati, l'automazione e la regolazione in tempo reale e l'efficienza collaborazione.

Molti sono gli scenari di applicazione dell'approccio presentato, nello specifico, sono stati individuati dei focus specifici che esemplificano e sono oggetto di ulteriori approfondimenti.

Il primo focus riguarda **l'applicazione nel settore della logistica e della supply chain** che già sono fortemente cambiati dall'approccio produttivo AM ed in cui i sistemi HCAI possono cambiare totalmente l'approccio e il tipo di lavoro umano in tali flussi di approvvigionamento. Un secondo focus riguarda l'ottimizzazione e soprattutto la **customizzazione dei processi di AM** ri-

volti al *bioprinting* sia in ambito biomedicale che in ambito food. Parallelamente occorre indirizzare delle sfide specifiche che richiedono attività di ricerca avanzata sia nel campo dell'AM sia delle **tecnologie abilitanti delle reti 5G/6G e edge computing**. Inoltre, queste sfide si riflettono nelle corrispondenti sfide della rete 5G/6G per garantire la trasmissione dei dati ad alta disponibilità e bassa latenza e il calcolo massivo di dati richiesto dall'automazione spinta e dagli algoritmi di intelligenza artificiale.

Quest'ultimo in particolare richiede capacità computazionali per sostenere processi di controllo automatizzato basato sul processamento tempestivo di grosse mole di dati. Per cui occorre proporre soluzioni per l'affidabilità e la sicurezza delle reti, latenza minima e deterministica, integrazione rete ed *edge computing*.

In questo contesto il dispiegamento di reti private 5G può offrire opportunità interessanti offrendo soluzioni avanzate per affrontare le sfide e migliorare l'efficienza operativa. Le reti private 5G consentono copertura radio dedicata, utilizzo mirato e garantito delle risorse di rete finalizzato al servizio radio offerto, possibilità di utilizzare le infrastrutture cloud del cliente per realizzare un'architettura edge (vicino all'utente) efficace all'interno di un'installazione di produzione o di un impianto manifatturiero specifico. Queste reti private 5G sono indipendenti dalle reti pubbliche e sono create per soddisfare le esigenze specifiche e le sfide delle applicazioni manifatturiere avanzate che rappresentano il più diffuso ambito di interesse.

Riducendo al minimo il ritardo nella comunicazione tra dispositivi e sistemi, le reti private 5G consentono la sincronizzazione ottimale di macchinari, robot e processi produttivi. Inoltre le reti private 5G facilitano l'implementazione dell'edge computing direttamente all'interno dell'ambiente manifatturiero. Questo consente di elaborare e analizzare i dati in loco, riducendo ulteriormente la latenza e supportando applicazioni avanzate come il controllo di macchinari in tempo reale e l'ottimizzazione delle operazioni. Infine, le reti private 5G forniscono la connettività affidabile necessaria per l'automazione avanzata e l'impiego diffuso di robotica industriale. La comunicazione senza ritardi consente il controllo preciso e coordinato di robot e sistemi automatizzati, migliorando l'efficienza e la qualità delle operazioni.

Infine, il ruolo delle istituzioni pubbliche, la loro capacità di reagire alle sfide derivanti dall'innovazione rappresenta un punto di snodo focale per garantire agli attori privati un ambiente regolativo adattivo e non vessatorio in grado di rispondere alle esigenze dettate dallo sviluppo dell'IA, così come la definizione di standard e protocolli per la valutazione e la certificazione dell'IA al fine di garantire la conformità con regole etiche, normative e di sicurezza.

Ringraziamenti

Questo studio interdisciplinare è stato finanziato sul Progetto di ateneo "HUMAN centered and SUSTAINABLE artificial INTELLIGENCE in INDUSTRY 5.0 era" finanziato da Universitas Mercatorum.

Bibliografia

- [1] Kumar Y., Kaur K., Singh G., Machine, (2020) Learning aspects and its applications towards different research areas: International Conference on Computation, Automation and Knowledge Management (ICCAKM), pp. 150–156.
- [2] Goodfellow I., Bengio Y., Courville A., (2016) Deep Learning, *MIT Press*
- [3] Negi A., Rajesh K., (2019) A review of AI and ML applications for computing systems, 9th International Conference on Emerging Trends in Engineering and Technology - Signal and Information Processing (ICETET-SIP-19), pp. 1–6
- [4] Hebbar N., (2020) Freshness of food detection using IoT and machine learning, International Conference on Emerging Trends in Information Technology and Engineering (ic-ETITE), pp. 1–3
- [5] Wilson H.J., Daugherty P.R., (2018) Collaborative intelligence: humans and AI are joining forces *Harv. Bus. Rev.*, 96 (4) , pp. 114-123
- [6] Jiang F., Jiang Y., Zhi H., Dong Y., Li H., Ma S., Wang Y., Dong Q., Shen H., Wang Y., (2017) Artificial intelligence in healthcare: past, present and future *Stroke Vasc. Neurol.*, 2 (4), pp. 230-243
- [7] Microsoft V. (2022) Guidelines for human-AI interaction
- [8] Andrew Orłowski F. (2017) Facebook Scales Back AI Flagship After Chatbots Hit 70% F-AI-Lure Rate *The Register*
- [9] Price R.(2016) Microsoft is deleting its AI chatbot’s incredibly racist tweets *Bus. Insider*
- [10] Maguire M. (2001) Methods to support human-centred design *Int. J. Hum.-Comput. Stud.*, 55 (4), pp. 587-634
- [11] Whittle J. (2019) Is your software valueless? *IEEE Softw.*, 36 (3), pp. 112-115
- [12] Amershi S., Cakmak M., Knox W.B., Kulesza T. (2014) Power to the people: The role of humans in interactive machine learning *Ai Mag.*, 35 (4), pp. 105-120
- [13] Miller T., Howe P., Sonenberg L. (2017) Explainable AI: Beware of inmates running the asylum or: How I learnt to stop worrying and love the social and behavioural sciences *IJCAI 2017 Workshop on Explainable Artificial Intelligence (XAI)*, pp. 36-42
- [14] Dignum V. (2017) Responsible artificial intelligence: designing AI for human values
- [15] Zeba G., Dabić M., Čičak M., Daim T., Yalcin H., (2021) Technology mining: Artificial intelligence in manufacturing, *Technological Forecasting and Social Change*, Volume 171, 120971,
- [16] Hao, K. (2019). The future of AI research is in Africa. *MIT tech. review*
- [17] Naudé, W., Dimitri, N. (2021). Public Procurement and Innovation for Human-Centered Artificial Intelligence, *IZA Discussion Paper No. 14021*, Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=3762891> or

- <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3762891>
- [18] UK Gov. report (2020). Guidelines for AI procurement. Retrieved from: <https://www.gov.uk/government/publications/guidelines-for-ai-procurement>
- [19] Breque M., De Nul L. Petridis A., (2021) Industry 5.0: Towards a sustainable, human-centric and resilient European industry, Retrieved from: https://research-and-innovation.ec.europa.eu/knowledge-publications-tools-and-data/publications/all-publications/industry-50-towards-sustainable-human-centric-and-resilient-european-industry_en
- [20] Nahavandi S.(2019) Industry 5.0—A human-centric solution, *Sustainability*, 11 (16), p. 4371
- [21] Leng J., Sha W., Wang B., Zheng P., Zhuang C., Liu Q., Wuest T., Mourtzis D., Wang L. (2022) Industry 5.0: Prospect and retrospect *J. Manuf. Syst.*, 65 , pp. 279-295
- [22] Shneiderman B., (2020) Human-Centered Artificial Intelligence: Reliable, Safe & Trustworthy, *International Journal of Human-Computer Interaction* 36, 6: 495–504
- [23] Mhlanga, D. Human-Centered Artificial Intelligence: The Superlative Approach to Achieve Sustainable Development Goals in the Fourth Industrial Revolution. *Sustainability* 2022, 14, 7804.
- [24] Guoguang Rong, Arnaldo Mendez, Elie Bou Assi, Bo Zhao, Mohamad Sawan, Artificial Intelligence in Healthcare: Review and Prediction Case Studies, *Engineering*, Volume 6, Issue 3, 2020, Pages 291-301, ISSN 2095-8099, <https://doi.org/10.1016/j.eng.2019.08.015>
- [25] Gangwani, D., Gangwani, P. (2021). Applications of Machine Learning and Artificial Intelligence in Intelligent Transportation System: A Review. In *Applications of Artificial Intelligence and Machine Learning. Lecture Notes in Electrical Engineering*, vol 778. Springer, Singapore
- [26] R. S. Peres, X. Jia, J. Lee, K. Sun, A. W. Colombo and J. Barata, “Industrial Artificial Intelligence in Industry 4.0 - Systematic Review, Challenges and Outlook,” in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 220121-220139, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3042874
- [27] Goralski, M.A.; Tan, T.K. Artificial intelligence and sustainable development. *Int. J. Manag. Educ.* 2020, 18, 100330
- [28] Di Vaio, A.; Palladino, R.; Hassan, R.; Escobar, O. Artificial intelligence and business models in the sustainable development goals perspective: A systematic literature review. *J. Bus. Res.* 2020, 121, 283–314.
- [29] Truby, J. (2020) Governing artificial intelligence to benefit the UN sustainable development goals. *Sustain. Dev.*, 28, 946–959
- [30] Vinuesa R. Azizpour H. Leite I. Balaam M. Dignum V. Domisch S. Felländer A. Langhans S.D. Tegmark M. Fuso Nerini F. (2020) The role of artificial intelligence in achieving the Sustainable Development Goals. *Nat. Commun.* 11, 23

- [31] Renda A., Schwaag Serger S., Tataj D., Morlet A., Isaksson D., Martins F., Giovannini E. (2022) Industry 5.0, a transformative vision for europe: governing systemic transformations towards a sustainable industry Eur. Comm. Dir. Gen. Res. Innov.
- [32] P.K.R. Maddikunta, Q.V. Pham, N. Prabadevi, K. Deepa, T.R. Dev, R. Gadekallu, M.L. Ruby, Industry 5.0: a survey on enabling technologies and potential applications, *J. Ind. Information Integration* 26 (2022), <https://doi.org/10.1016/j.jii.2021.100257>.
- [33] Tóth A., Nagy L., Kennedy R., Bohuš B., Abonyi J., Ruppert T., (2023) The human-centric Industry 5.0 collaboration architecture, *MethodsX*, Volume 11, 102260, ISSN 2215-0161,
- [34] Zhang C., Wang Z., Zhou G., Chang F., Ma D., Jing Y., Cheng W., Ding K., Zhao D., (2023) Towards new-generation human-centric smart manufacturing in Industry 5.0: A systematic review, *Advanced Engineering Informatics*, Volume 57, 102121, ISSN 1474-0346
- [35] Y. Feng, Y. Zhao, H. Zheng, Z. Li, J. Tan, Data-driven product design toward intelligent manufacturing: a review, *Int. J. Adv. Rob. Syst.* 17 (2020), 1729881420911257.
- [36] Q. Liu, K. Wang, Y. Li, C. Chen, W. Li, A novel function-structure concept network construction and analysis method for a smart product design system, *Adv. Eng. Inf.* 51 (2022), <https://doi.org/10.1016/j.aei.2021.101502>.
- [37] Y. Wang, X. Li, Mining product reviews for needs-based product configurator design: a transfer learning-based approach, *IEEE Trans. Ind. Inf.* 17 (2020) 6192–6199.
- Y. Wang, X. Li, D. Mo, Knowledge-empowered multitask learning to address the semantic gap between customer needs and design specifications, *IEEE Trans. Ind. Inf.* 17 (2021) 8397–8405, <https://doi.org/10.1109/tii.2021.3067141>.
- [38] L. Bai, M. Hu, M. Liu, J. Wang, BPIIoT: a light-weighted blockchain-based platform for industrial IoT, *IEEE Access* 7 (2019) 58381–58393, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2914223>
- [39] P. Rannertshauser, M. Kessler, J.C. Arlinghaus, Human-centricity in the design of production planning and control systems: a first approach towards Industry 5.0, *IFAC-PapersOnLine* 55 (2022) 2641–2646, <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.10.108>
- [40] P.K. Wan, T.L. Leirmo, Human-centric zero-defect manufacturing: state-of-the-art review, perspectives, and challenges, *Comput. Ind.* 144 (2023), <https://doi.org/10.1016/j.compind.2022.103792>
- [41] M. Kessler, J.C. Arlinghaus, A framework for human-centered production planning and control in smart manufacturing, *J.*

- Manuf. Syst. 65 (2022) 220–232, <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.09.013>.
- [42] C. Li, P. Zheng, S. Li, Y. Pang, C.K.M. Lee, AR-assisted digital twin-enabled robot collaborative manufacturing system with human-in-the-loop, *Rob. Comput. Integr. Manuf.* 76 (2022), 102321, <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2022.102321>
- [43] S. Wellsandt, K. Klein, K. Hribernik, M. Lewandowski, A. Bousdekis, G. Mentzas, K.D. Thoben, Hybrid-augmented intelligence in predictive maintenance with digital intelligent assistants, *Annu. Rev. Control.* 53 (2022) 382–390, <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2022.04.001>.
- [44] L. Wang, D. Tang, C. Liu, Q. Nie, Z. Wang, L. Zhang, An augmented reality assisted prognostics and health management system based on deep learning for IoT-enabled manufacturing, *Sensors* (2022), <https://doi.org/10.3390/s22176472>.
- [45] M. Eswaran, A.K. Gulivindala, A.K. Inku-lu, M. Bahubalendruni, Augmented reality-based guidance in product assembly and maintenance/ repair perspective: a state of the art review on challenges and opportunities, *Expert Syst. Appl.* 213 (2023), <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.118983>.
- [46] C.Y. Siew, S.K. Ong, A.Y.C. Nee, Improving maintenance efficiency and safety through a human-centric approach, *Adv. Manuf.* 9 (2021) 104–114, <https://doi.org/10.1007/s40436-020-00334-x>.
- [47] L. Wang, D. Tang, C. Liu, Q. Nie, Z. Wang, L. Zhang, An augmented reality assisted prognostics and health management system based on deep learning for IoT-enabled manufacturing, *Sensors* (2022), <https://doi.org/10.3390/s22176472>.
- [48] M. Eswaran, A.K. Gulivindala, A.K. Inku-lu, M. Bahubalendruni, Augmented reality-based guidance in product assembly and maintenance/ repair perspective: a state of the art review on challenges and opportunities, *Expert Syst. Appl.* 213 (2023), <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.118983>.
- [49] Chenang Liu, Wenmeng Tian, Chen Kan, When AI meets additive manufacturing: Challenges and emerging opportunities for human-centered products development, *Journal of Manufacturing Systems*, Volume 64, 2022, Pages 648-656, ISSN 0278-6125, <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.04.010>
- [50] Xia C, et al. Modelling and prediction of surface roughness in wire arc additive manufacturing using machine learning. *J Intell Manuf* 2021:1–16
- [51] Wang, Y., C. Ruiz, Q. Huang. Extended fabrication-aware convolution learning framework for predicting 3D shape deformation in additive manufacturing. In: proceedings of the IEEE seventeenth international conference on automation science and engineering (CASE). IEEE; 2021.

