

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

Facoltà di Ingegneria

Dipartimento di Tecnica e Gestione dei Sistemi Industriali

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Gestionale

Tesi di Laurea

APPLICAZIONE DELL'INDUSTRIA 4.0 NELLA MANUTENZIONE DEGLI IMPIANTI INDUSTRIALI

Relatrice: Prof.ssa Martina Calzavara

Candidato: Stefano Vigato, 1216816

Anno Accademico 2021/2022

INDICE

SOMMARIO	4
L'INDUSTRIA 4.0	5
1.1 Dal motore a vapore all'Industria 4.0	5
1.2 Design principles	6
1.3 Tecnologie abilitanti	8
1.4 RAMI 4.0 - Reference Architecture Model for Industrie 4.0	11
1.5 Sistemi CPS e Smart Factories	13
1.6 Dall'industria 4.0 all'industria 5.0	16
LA MANUTENZIONE NELL'INDUSTRIA 4.0	19
2.1 Premessa: Componenti riparabili e componenti non riparabili	19
2.2 Premessa: KPI – Key performance indicators	19
2.2.1 OEE – Overall Equipment Effectiveness.	19
2.2.2 Time to Failure (TTF), Time to Repair (TTR), Mean Time to Failure (MTTF) e Mean time to Repair (MTTR)	20
2.3 Cenni sulla manutenzione	21
2.4 Politiche manutentive	22
2.5 La manutenzione Predittiva e la Manutenzione 4.0	23
2.6 TPM – Total Productive Maintenance	26
APPLICAZIONE DELL' INDUSTRIA 4.0 NELLA MANUTENZIONE DEGLI IMPIANTI INDUSTRIALI: LA REALTA' AUMENTATA	29
3.1 La realtà aumentata	29
3.2 Augmented Reality: Key Technologies	30

3.2.1 Intelligent Display technology	30
3.2.2 3D Registration, marked- based and markerless technology	31
3.2.3 Intelligent Interaction Technology	32
3.3 Authoring, Context – Awareness e Interaction – Analysis	32
3.4 Applicazioni di Realtà Aumentata nella manutenzione	34
3.4.1 “Augmented reality on large screen for interactive maintenance instructions” (Fiorentino et al. 2013)	34
3.4.2 Il progetto W-Artemys nella linea di imbottigliamento di Parmalat	37
3.4.3 “Probing an intelligent predictive maintenance approach with deep learning and augmented reality for machine tools in IoT-enabled manufacturing” (Liu et al. 2022)	40
CONCLUSIONI	47
BIBLIOGRAFIA	49
SITOGRAFIA	56

SOMMARIO

L'elaborato seguente si pone l'obiettivo di approfondire il tema dell'Industria 4.0 nel settore della manutenzione, con un focus particolare sulle applicazioni di realtà aumentata.

Nel primo capitolo si indagheranno gli aspetti fondamentali della quarta rivoluzione industriale, i suoi principi cardine e le tecnologie che ne fanno parte. Si analizzerà poi l'architettura di riferimento nell'implementazione dell'Industria 4.0 all'interno dell'impresa, e successivamente si studierà il modello delle Smart Factories, ossia fabbriche dotate di sistemi "intelligenti" in grado di prendere decisioni in autonomia. Infine, si introdurrà il tema della quinta rivoluzione industriale, un processo value-driven che punta a ridisegnare l'assetto delle imprese del futuro al fine di renderle resilienti, umano-centriche e sostenibili a partire dalle innovazioni tecnologiche introdotte dall'Industria 4.0.

Nel secondo capitolo si introdurrà il tema della manutenzione. La manutenzione rappresenta oggi un fattore determinante per la sopravvivenza di un'impresa. Si andrà quindi a studiare l'evoluzione delle politiche manutentive (correttiva, preventiva e predittiva) nel tempo fino alla nascita della manutenzione 4.0, approccio alla manutenzione fortemente innovativo che attraverso le tecnologie appartenenti all'Industria 4.0 ha reso più semplice ed efficace la pianificazione e lo svolgimento degli interventi manutentivi. Si discuterà anche il tema del Total Productive Maintenance, filosofia manageriale di origine giapponese che punta a rendere la manutenzione parte imprescindibile delle attività aziendali.

In conclusione, nel terzo capitolo si approfondirà la realtà aumentata, una delle tecnologie 4.0 tra le più promettenti in ambito manutentivo. Dopo una breve presentazione delle caratteristiche principali della tecnologia, si andranno a valutare i vari dispositivi utilizzati, gli aspetti base del funzionamento e le aree di ricerca. Infine sono proposti tre casi di laboratorio per studiare l'applicazione della realtà aumentata in campo industriale.

CAPITOLO 1

L'INDUSTRIA 4.0

1.1 Dal motore a vapore all'Industria 4.0

Dalla fine del 1700 il mondo industriale ha vissuto uno sviluppo costante e impetuoso, durante il quale nuove tecnologie nascono ed evolvono fino a lasciare il posto a quelle successive (Bigliardi et al. 2020). Questo periodo, caratterizzato dal susseguirsi di invenzioni e scoperte, può essere diviso in tre segmenti temporali diversi, che vengono comunemente definite rivoluzioni industriali (Figura 1). La prima, da collocarsi in Inghilterra nel XVIII secolo, è segnata dall'introduzione del motore a vapore e dall'aumento della produttività grazie alla produzione meccanizzata. (Industrial Revolution - From Industry 1.0 to Industry 4.0; Philbeck, Davis. 2018; Bigliardi et al.2020). Le conseguenze del cambio di paradigma nel lavoro nelle fabbriche furono sì tecnologiche ma soprattutto sociali, dal momento che questo ridisegnò i modelli economici, sociali, urbanistici e politici. Le prime scoperte e innovazioni tecnologiche stimolarono il diffondersi dell'idea che la scienza avrebbe guidato il progresso e migliorato la qualità della vita degli esseri umani. (Philbeck, Davis, 2018) È verso la fine del 1800 che inizia la seconda rivoluzione industriale, trainata dalla scoperta dell'elettricità e dall'invenzione del motore a combustione. Dal punto di vista industriale e dell'organizzazione del lavoro nasce la catena di montaggio, che permise di sostenere una produzione di massa a costi minori. Sempre durante la seconda rivoluzione industriale si svilupparono l'industria alimentare, chimica, petrolifera e dell'acciaio, e una prima forma di telefono (Carvalho, Cazarini, 2020). La terza rivoluzione industriale caratterizza in modo netto il contesto post-bellico della seconda metà del 1900. È il periodo della crescita di importanza del settore terziario e dei servizi, anche detto terziarizzazione, e di un impiego sempre meno intensivo della forza lavoro umana nell'industria a favore dell'automazione (Terza Rivoluzione Industriale - Wikipedia). Accanto alla scoperta dell'energia nucleare e dello sviluppo sempre più evidente dei mezzi di trasporto, avviene un passaggio fondamentale che getterà le basi per la rivoluzione industriale che viviamo oggi: l'evoluzione dell'informatica e delle telecomunicazioni. Infine, nel 2011, alla fiera di Hannover in Germania, viene utilizzato il termine "Industrie 4.0" durante la presentazione di un progetto

per l’ammodernamento del sistema produttivo tedesco al fine di renderlo più competitivo (Bigliardi et al.2020, Burns et al. 2019). Da lì deriva “Industria 4.0”, espressione che oggi identifica la quarta rivoluzione industriale. Il termine viene inizialmente utilizzato come sinonimo dei Cyber-Physical Systems (CPS) ossia sistemi dotati di una componente meccanica e una software che permette loro di raccogliere, analizzare, elaborare e comunicare dati provenienti dal sistema produttivo in tempo reale e agire di conseguenza (Vogel – Heuser, Hess. 2016). I CPS rappresentano la combinazione delle nuove tecnologie abilitanti, quali ad esempio i robot collaborativi, l’Industrial Internet of Things (IIoT), la realtà aumentata, le simulazioni ecc. In conclusione, Industria 4.0 oggi identifica anche un processo di innovazione guidato dalla digitalizzazione che ha portato non solo un forte cambiamento nella produzione e una nuova attenzione verso la sostenibilità (Habib, Chimson, 2019), ma anche modellato le competenze richieste alla prossima generazione di lavoratori, aprendo un ampio orizzonte di sfide industriali, tecniche e sociali (Zolotová et al. 2020).

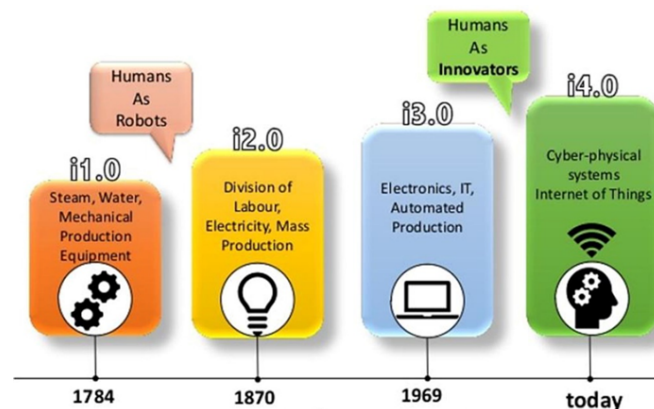


Figura 1.1 Le rivoluzioni Industriali (Afolalu et al.2021)

1.2 Design principles

L’Industria 4.0 ha come obiettivo quello di creare un ambiente “intelligente” dove oggetti interconnessi scambiano informazioni e reagiscono agli stimoli prendendo decisioni senza che l’operatore umano ne ricopra parte attiva (Marr, What is Industry 4.0? Here’s A Super Easy Explanation for Anyone, 2018). Alla base delle applicazioni di Industria 4.0 risiedono una serie di concetti fondamentali, quali interoperabilità, virtualizzazione, decentralizzazione, real-time capability, modularità e la service-orientation. (Carvalho, Cazarini, 2020). Con

interoperabilità si intende la possibilità di comunicare tra macchina-macchina e uomo-macchina attraverso piattaforme di scambio di informazioni (Dikhanbayeva et al. 2020). Per descrivere meglio il significato di interoperabilità, è proposta la definizione data dall'Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE): l'interoperabilità è “the ability of two more systems or component to exchange information and to use the information that has been exchanged” (Burns et al. 2019). Quindi per interoperabilità si intende non solo il semplice scambio di dati, ma anche la comprensione di questi. Al fine di favorire lo sviluppo di sistemi interoperabili nelle smart factories, in diversi stati sono stati proposti dei modelli, chiamati Reference Architecture (ad esempio il “Reference Architecture Model for Industry 4.0” in Germania, “Standard Landscape for Smart Manufacturing Systems” in America, “National Smart Manufacturing Standards Architecture Construction Guidance” in Cina) che rappresentano delle guide per la costruzione di sistemi intelligenti. (Burns et al. 2019). All'interoperabilità si aggiunge la virtualizzazione, che consiste nell'implementazione del Digital Twin, un “modello digitale” di fabbrica, dei prodotti e dei macchinari che viene definito grazie al flusso di dati proveniente dagli stessi. (Martins et al. 2019). Le informazioni vengono poi elaborate per la creazione in tempo reale della controparte virtuale degli attori del processo produttivo (Carvalho, Cazarini, 2020), con molti vantaggi annessi: possibilità di eseguire simulazioni e analisi what-if, migliore capacità di prevedere i guasti e di conseguenza maggiore produttività, efficienza e minori costi. (Segovia, Alfaro, 2022). Come già anticipato, è necessario quindi elaborare i dati in modo simultaneo per avere un sistema autonomo, in grado di monitorare i processi produttivi e di attuare i corretti cambiamenti al variare delle condizioni ambientali. Si parla quindi di real-time capability di una smart factory come di ciò che rende possibile l'analisi, l'interpretazione, lo smistamento e la risposta agli stimoli in modo immediato (Dikhanbayeva et al. 2020). Al fine di favorire reattività e flessibilità alle variazioni nei processi, un'altra caratteristica fondamentale dell'industria 4.0 è la decentralizzazione, poiché favorisce l'integrazione verticale e orizzontale (Habib, Chimson, 2019). Questa si muove a due livelli: sia per quanto riguarda i macchinari che per gli operatori. Nel primo caso, si tratta di delegare ai CPS lo svolgimento delle azioni, di modo che intervengano in modo autonomo senza l'ausilio dell'operatore. Nel secondo, decentralizzare significa coinvolgere maggiormente gli operatori, assegnando loro una certa indipendenza nelle decisioni e coinvolgendo i livelli superiori in caso di eccezioni o obiettivi in conflitto. (Carvalho, Cazarini, 2020; Sharma et al. 2021). Altro principio fondamentale è la modularità. Risulta sempre più importante che i prodotti incontrino le

necessità e le specifiche dei clienti. L'industria 4.0 cerca di risolvere il problema della varietà attraverso l'introduzione di sistemi di produzione riconfigurabili, dove i processi produttivi sono costituiti da singoli "moduli" che possono essere rapidamente riorganizzati sulla base del prodotto necessario. La modularità non fa solo parte del processo produttivo, ma anche del prodotto stesso. Anche il design dei prodotti deve avere dei moduli: un numero di configurazioni maggiori permetterà di avere un output di maggiore qualità con costi di assemblaggio minori. (Gupta, 2018). Infine, la service-orientation. Clienti e fornitori possono creare partnership di maggior valore sulla base delle esigenze dei clienti stessi. Grazie all'Internet of Things si delineano quindi nuove value proposition, dal momento che non è più la produzione a generare valore, ma le informazioni che si hanno sul prodotto e sul suo reale utilizzo. (What Is Servitization And How Can It Help Your Business?, 2022). Al fine di spiegare meglio in che cosa consiste la servitizzazione, Frank et al. (2019) offrono una classificazione dei servizi sulla base della loro relazione con il prodotto. Identificano una prima categoria, chiamata "Smoothing Services", che racchiude quei servizi che rappresentano un "plus" rispetto al prodotto in sé, senza interferire con le sue funzionalità, come la manutenzione e il training. La seconda categoria sono gli "Adapting Services", che permettono di armonizzare le funzionalità del prodotto con le necessità del cliente, customizzando il suo funzionamento. L'ultima categoria è quella dei "Substituting Services", dove il servizio sostituisce la vendita del prodotto. (Frank et al. 2019). Questo approccio apre le porte a nuovi modelli di business come il pay-per-use, il pay-per-availability e il pay-per-result. (Servitization 4.0: cos'è e il ruolo delle tecnologie, 2022). Tutto ciò è permesso dall'Internet of Services e dalla Service Oriented Architecture (SOA). (Habib, Chimson, 2019)

1.3 Tecnologie abilitanti

L'industria 4.0 viene definita oggi una rivoluzione technology-driven (Breque et al. 2021), cioè guidata dall'introduzione di tecnologie con capacità innovative sulle quali sono modellati i servizi e prodotti proposti (Rosenzweig, 2015.). L'innovazione portata dall'industria 4.0 comprende una serie di tecnologie abilitanti tra loro, tra le quali:

- *Additive manufacturing (AM)*: comprende diversi tipi di tecnologie diverse. In generale, si contrappone alla produzione sottrattiva, poiché è in grado di depositare il

materiale in posizioni specifiche: si riescono ad ottenere così oggetti di geometrie e forme innovative. L'AM garantisce una produzione di maggior qualità, nonché la riduzione degli sprechi. Permette di lavorare diversi materiali, tra cui metalli, materiali a memoria di forma, ma anche materiali speciali (alimentari, cemento, materiale tessile). Diverse sono le sfide aperte, tra cui la scalabilità, l'applicazione per grandi produzioni, la qualità della superficie e della microstruttura, e il miglioramento delle qualità fisiche dei materiali. (Dilberoglu et al. 2017)

- *Augmented reality*: la realtà aumentata rappresenta l'interfaccia ideale di comunicazione tra l'operatore e i macchinari. Attraverso i visori, le informazioni vengono proiettate e sovrapposte all'ambiente lavorativo, rendendone la comprensione più intuitiva e migliorando la capacità decisionale dei tecnici. Al momento viene applicata in molti settori diversi quali il training degli operatori meno esperti, la manutenzione, la logistica nei magazzini, nell'assemblaggio, nelle simulazioni, nel controllo qualità, nella pianificazione delle traiettorie dei robot negli impianti, nel production management e nella definizione del layout delle facilities. (Baroroh et al. 2021)
- *Simulazioni*: la simulazione consente di studiare il comportamento dinamico dei sistemi fisici attraverso la rappresentazione virtuale, astratta e semplificata degli stessi. Consentono di tagliare i tempi e i costi per la realizzazione dei modelli e di eseguire test più rapidi in sicurezza. Inoltre, permettono una visualizzazione del comportamento del sistema nel tempo attraverso le animazioni. Al momento, la costruzione di modelli virtuali richiede competenze molto specifiche e importanti investimenti, nonché un tempo di realizzazione piuttosto elevato. (de Paula Ferreira et al. 2020)
- *Internet of Things (IoT)*: alla base dell'interconnessione tra sistemi fisici e software troviamo l'IoT. Questa tecnologia permette infatti la trasmissione di informazioni in tempo reale tra i dispositivi connessi attraverso sensori, attuatori, e la tecnologia RFID. (Bigliardi et al. 2020)
- *Big Data e Analytics*: con Big Data si intendono quei dataset la cui enorme dimensione e varietà rendono complessa se non impossibile l'analisi con gli strumenti tradizionali. Altra caratteristica dei Big Data è la necessità di elaborarli in tempo reale al fine di poterne trarre il valore massimo. (Souza et al. How to Get Started with Big Data, 2013). Nell'analisi di queste banche dati, una pratica molto diffusa è quella di

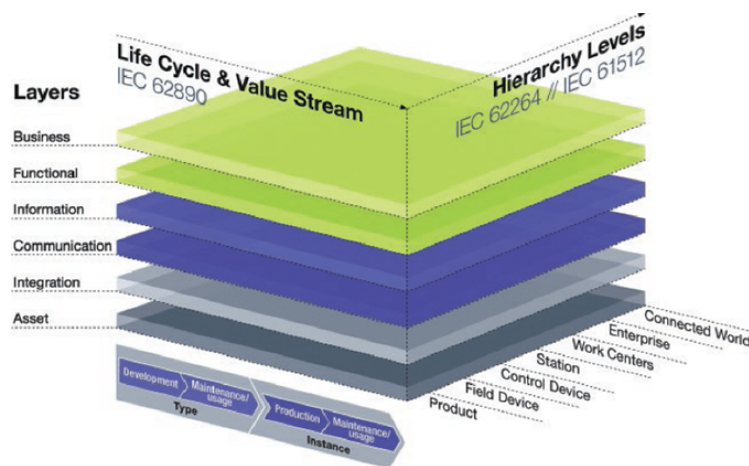
applicare algoritmi di machine learning per riconoscere dei pattern o delle correlazioni tra le diverse informazioni. (Chithrai Mani, How Is Big Data Analytics Using Machine Learning?, 2020)

- *Cloud Computing*: permette la distribuzione di servizi di vario genere (potenza di calcolo, software, database, spazio di archiviazione) tramite la rete internet. Inoltre, essendo la tecnologia cloud distribuita tramite la rete internet, è in grado di fornire servizi on-demand, quindi in qualsiasi momento e ad alta velocità. (What is cloud computing?)
- *Artificial Intelligence*: McKinsey definisce l'intelligenza artificiale come “the ability of a machine to perform cognitive functions we associate with human minds, such as perceiving, reasoning, learning, interacting with the environment, problem solving, and even exercising creativity”. (An executive’s guide to AI, 2020). In ambito industriale, attraverso i suoi algoritmi l'AI rende possibile l'intelligent manufacturing, dove le macchine sono dotate di abilità cognitive che permettono loro di adattarsi in autonomia al variare delle condizioni ambientali. Tutto ciò ha grossi vantaggi: migliore efficienza, produttività e qualità. (Yang et al. 2021) L'intelligenza artificiale è utilizzata in vari settori, ad esempio nel controllo qualità, nella manutenzione predittiva, nel forecasting, nel supply chain management e nel purchasing. (Kehayov et al. 2022)
- *System Integration*: l'industria 4.0 sarà in grado di superare le barriere tra cliente e fornitore, ma anche all'interno della stessa azienda tra mercato, team, ruoli. Questo permetterà la creazione di un unico grande organismo interconnesso dai sistemi informativi, con grande integrazione orizzontale e verticale, andando a generare relazioni in grado di portare valore lungo tutta la supply chain. (Bigliardi et al. 2020)
- *Cybersecurity*: in uno spazio digitalizzato e connesso alla rete, un attacco alle infrastrutture sensibili potrebbe avere grosse ripercussioni sulla produzione. I Cyber-Physical Systems e gli Industrial Control Systems (ICS) sembrano essere quelli più esposti a questo pericolo. Il rischio è che i dati scambiati possano essere rubati, manomessi, che il flusso di questi si interrompa o che la produzione subisca delle battute di arresto. È vitale per le imprese di domani dotarsi di sistemi di cybersecurity sufficientemente avanzati. (Corallo et al. 2020)
- *Advanced Robots*: si tratta di operatori meccanici dotati di manipolatori antropomorfi che permettono di ottenere stazioni di lavoro quasi completamente autonome ad

elevata produttività e sicurezza. Gli Advanced Robots impiegano diverse tecnologie già citate, tra cui applicazioni di intelligenza artificiale, Cloud e IoT per ottenere capacità motorie e cognitive (Karnik et al. 2022)

1.4 RAMI 4.0 - Reference Architecture Model for Industrie 4.0

Come visto in precedenza, le Reference Architecture Model rappresentano un punto di partenza per garantire l'interoperabilità all'interno delle smart factories. Una mappa utile per l'implementazione delle tecnologie abilitanti venne proposta da ZVEI, BITKOM e VDMA, aziende tedesche tra le prime sostenitrici del progetto. Il modello nasce con l'obiettivo di facilitare e ampliare l'adozione dell'industria 4.0.



*Figura 1.2 Reference Architecture Model Industrie 4.0
(Platform Industrie 4.0)*

<https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/EN/Downloads/Publikation/rami40-an-introduction.html>

Il modello, denominato Reference Architecture Model Industrie 4.0 (RAMI) rappresenta una guida nel processo di introduzione delle tecnologie digitali dell'industria 4.0 in un'azienda. A grandi linee, esso permette di descrivere un asset (oggetto fisico e non) seguendo tre dimensioni principali così da poter definire il modo in cui esso interagisce e si integra nel sistema. Notiamo che verticalmente il modello presenta diversi livelli, rappresentazione tipica del mondo ICT dove i sistemi sono organizzati su diversi piani. I diversi layers permettono di rappresentare virtualmente nel modello tecnologie e sistemi anche complessi, secondo le sue

caratteristiche commerciali, funzionali, gli aspetti l'interoperabilità, come vengono scambiati e utilizzati i dati raccolti e come l'asset si integra sia sul network che nel mondo fisico (Il background tecnologico e normativo di Industria 4.0, 2018; Reference Architectural Model Industrie 4.0 (RAMI 4.0) - An Introduction, 2018) Per una spiegazione più chiara, in figura 1.4 viene proposta la descrizione di un servo-attuatore attraverso RAMI 4.0.

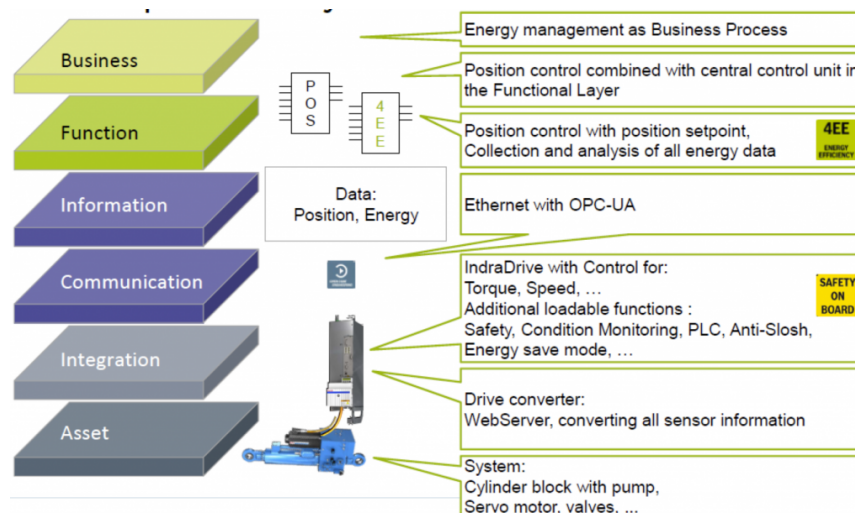


Figura 1.3 Descrizione di un servo-attuatore attraverso i layers (Il background tecnologico e normativo di Industria 4.0, 2018)

Un'altra dimensione di particolare importanza è quella definita "Life cycle & Value Stream". Ispirato alla norma IEC 62890, su questo piano, vengono utilizzate le informazioni relative al prodotto per definirne il ciclo di vita. Viene effettuata una distinzione nel ciclo di vita del prodotto: esso è definito "tipo" prima della produzione e "istanza" dopo questa. Con "prodotto tipo" si fa riferimento alle caratteristiche generali di un determinato asset. Il "tipo" nasce come idea, e lo resta durante tutto il periodo di sviluppo e testing, fino a definire un "general type". Ottenuto il modello generale questo viene avviato alla produzione, dove diventa "istanza" corrispondente a quel tipo, cioè viene caratterizzato da alcune informazioni non più comuni a quell'asset ma proprie di quell'istanza, come i dati di produzione, il numero di serie, ecc. Ad ogni istanza corrisponde uno specifico ciclo di vita. Per lo stesso processo passa anche il cliente, il quale riceve un "tipo" di macchinario che diventa "istanza" una volta avviato al lavoro all'interno di un nuovo sistema. Infine, l'ultima dimensione viene denominata "Hierarchy". Questa dimensione va a definire le diverse macroattività delle facilities o delle fabbriche. Partendo dallo standard internazionale per i sistemi IT aziendali e

i sistemi di controllo (IEC 62264 e IEC 61512) aggiunge loro altri due campi, quali “connected world”, “field device” and “product”: questo perché l’industria 4.0 permette l’interazione non solo tra diversi sistemi appartenenti alla stessa facility, ma anche all’esterno dell’impresa e lo stesso prodotto può rimanere connesso alla rete e trasferire informazioni. Il RAMI 4.0 favorisce la standardizzazione e la collaborazione interaziendale ma anche quella verticale, all’interno della stessa enterprise. Inoltre, nonostante il modello abbia come base i CPS, il contributo umano nel value stream è ancora molto importante, e supporta una visione end-to-end del prodotto e dei processi. Per queste ragioni, il RAMI 4.0 rappresenta un modello di riferimento nella classificazione dei sistemi ICT. (Mourtzis et al. 2019; Hankel et al. 2015)

1.5 Sistemi CPS e Smart Factories

L’ambiente digitalizzato dell’industria 4.0 è spesso descritto come un sistema di CPS interconnessi, provvisti di abilità di decision-making in tempo reale. Un CPS può essere descritto da due componenti principali, che rappresentano delle capacità cognitive: la connettività, per ricevere e scambiare i dati, e la capacità di elaborare gli stessi. Nello specifico, viene proposta da Lee et al. (2015) una descrizione del funzionamento dei CPS su 5 livelli, chiamata 5C architecture: comprende connection, conversion, cyber, cognition, configuration.

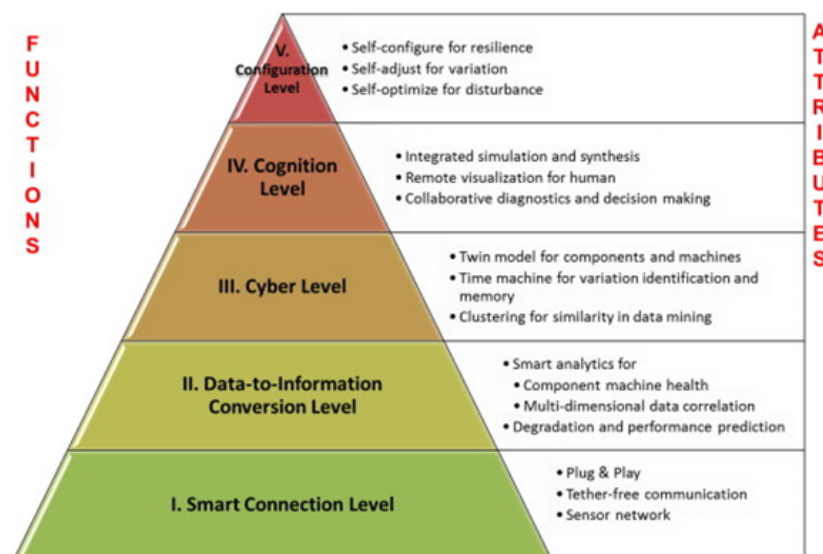


Figura 1.4. 5C Architecture (Lee et al. 2015)

Questa classificazione descrive i 5 passi per l'implementazione di un CPS. Al primo livello troviamo l'acquisizione dei dati attraverso sensori, ma possono provenire anche dall'ERP, dal MES o raccolti manualmente dall'operatore. I dati raccolti hanno due caratteristiche: la grande dimensione e la grande varietà. Al secondo livello vengono quindi applicate metodologie per estrapolare tendenze, pattern e informazioni utili sul funzionamento e sullo stato di usura dell'attrezzatura. Al terzo livello, cyber level, viene dedotto il futuro funzionamento del macchinario, attraverso il confronto dei dati recenti e storici di un CPS con quelli di altri sistemi CPS simili. Successivamente, le informazioni vengono illustrate visivamente (es. attraverso grafici) al personale specializzato, il quale, sulla base dei dati e delle analisi, potrà decidere il macchinario più critico su cui intervenire. Infine, nell'ultimo livello, il sistema si configura sulla base degli input ricevuti dall'esterno. Avviene una pura attività di supervisione della macchina, che in autonomia si configura riportando i parametri nella norma al fine di mantenere la produzione attuale. (Lee et al. 2015) Il processo è riassunto in figura 1.5.

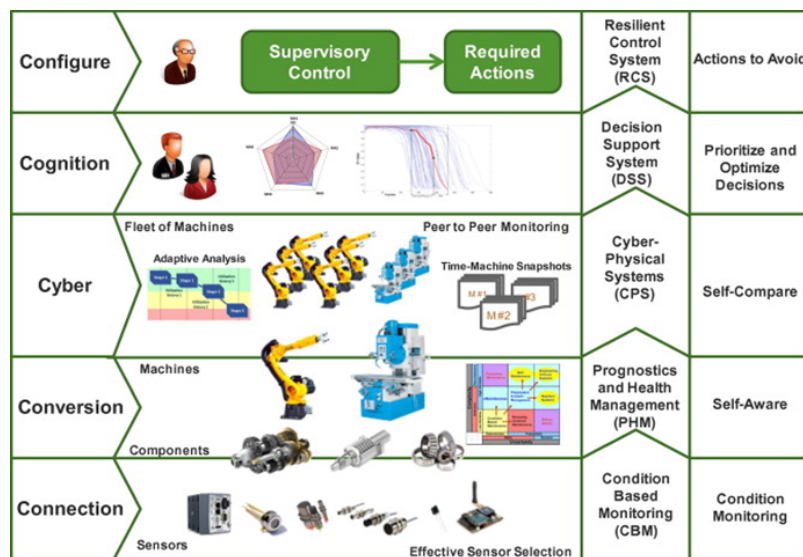


Figura 1.5: 5C Architecture (Lee et al. 2015)

L'applicazione delle tecnologie abilitanti e, più in generale, dei sistemi CPS all'interno del processo produttivo porta a definire un nuovo modello di facility che viene denominato Smart Factory (Figura 1.6). È ormai nel gergo comune l'idea di fabbrica intelligente, un tipo di facility che rappresenta la realizzazione dei concetti associati all'Industria 4.0. Sebbene non esista una definizione univoca di Smart Factory, una possibile definizione suggerita da

Radziwon et al. (2014) è la seguente: “*A Smart Factory is a manufacturing solution that provides such flexible and adaptive production processes that will solve problems arising on a production facility with dynamic and rapidly changing boundary conditions in a world of increasing complexity. This special solution could on the one hand be related to automation, understood as a combination of software, hardware and/or mechanics, which should lead to optimization of manufacturing resulting in reduction of unnecessary labour and waste of resource. On the other hand, it could be seen in a perspective of collaboration between different industrial and nonindustrial partners, where the smartness comes from forming a dynamic organization*”. (Radziwon et al.2014) Si tratta quindi di un modello che fa della automazione, flessibilità e collaborazione tra software e componenti fisici suoi punti di forza, con lo scopo di ottimizzare gli output e ridurre l’impiego delle risorse. Inoltre, l’orizzonte non è solo interno ma anche esterno alla singola facility, la cui digitalizzazione può portare valore a tutta la filiera. L’integrazione, quindi, non avviene solo in direzione verticale, bensì anche in quella orizzontale inter-organizzativa. L’evoluzione nello shop floor avviene anche nelle competenze e nelle mansioni di chi lavora con i macchinari stessi. Accanto alle applicazioni di Industria 4.0 nasce l’Operatore 4.0, in grado di supervisionare le attività svolte dalle macchine immerso in un ambiente di assistenti virtuali, Big Data e robot. (Zolotová et al. 2020). Al fine di creare un’interfaccia di contatto tra uomo e macchine, di fondamentale importanza sarà la realtà aumentata, che vedremo nel dettaglio nel terzo capitolo.

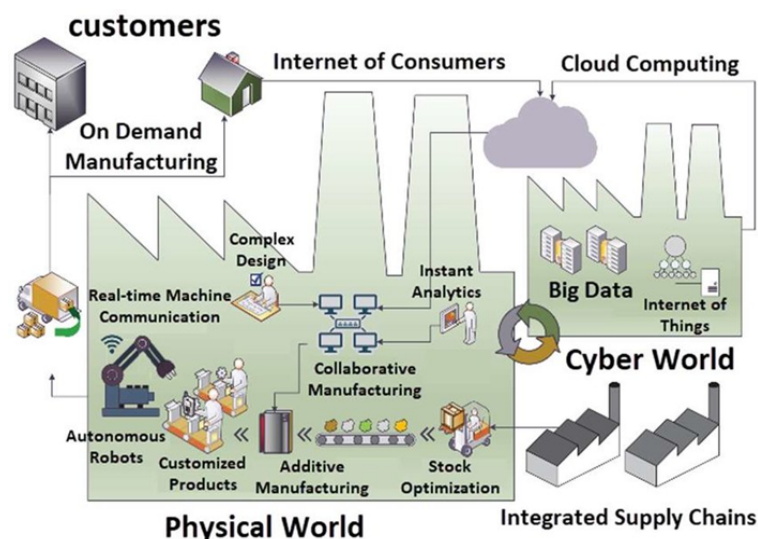


Figura 1.6: La Smart Factory (Dilberoglu et al. 2017)

1.6 Dall'industria 4.0 all'industria 5.0

Oggi, produttività ed efficienza sono il primo punto sulle agende dei manager. Per raggiungere gli obiettivi di profitto si è fatto largo uso dell'automazione, talvolta non considerando l'impatto che questo ha sulla forza lavoro umana e sull'ambiente. Negli ultimi anni, complici una rinnovata sensibilità riguardo ai temi del benessere dei lavoratori e della sostenibilità, è emersa la necessità di creare un modello su misura per l'essere umano, in grado di garantire un posto di lavoro sicuro, stimolante, e in linea con i desideri personali di chi vi partecipa. Nel 2015, 193 paesi appartenenti all'ONU firmano un accordo definendo 16 obiettivi comuni finalizzati a garantire un futuro migliore al pianeta Terra e ai suoi abitanti. I termini e i contenuti dell'accordo spaziano dall'educazione alla lotta al cambiamento climatico, dalla necessità di ridurre i consumi alla parità di genere, dalla possibilità di avere per tutti energia pulita alla lotta alla povertà. Vengono così definiti i Sustainable Developments Goals (SDGs) e inseriti nell' Agenda 2030, roadmap per l'applicazione dei termini dell'accordo. (Nazioni Unite, Obiettivi per lo sviluppo sostenibile). Nasce quindi la necessità di una rifocalizzazione del sistema: per rispettare i limiti naturali del pianeta e le persone che ne fanno parte diventa fondamentale spostare il focus dal profitto ed efficienza all'uomo, dal "business as usual" a serie politiche di sostenibilità universalmente condivise. Nel 2021, la Commissione Europea introduce l'idea di Industria 5.0, una quinta rivoluzione industriale, a differenza della quarta non sarà più technology-driven (Xu et al. 2021) (mossa dallo sviluppo tecnologico) ma value-driven. L'industria 5.0 sottolinea l'importanza sociale e ambientale dell'attività delle imprese e la capacità delle organizzazioni di influenzare il benessere dei cittadini. Partendo da questo presupposto, la quinta rivoluzione industriale indica tre caratteristiche imprescindibili per le imprese del futuro: esse dovranno essere umano-centriche, sostenibili e resilienti (figura 1.7). Per resilienza si intende la capacità di reagire in tempi di crisi economiche, geopolitiche o climatiche, sviluppando modelli di business flessibili e adattabili. Questo vale in particolare per il settore della sicurezza e quello sanitario. La sostenibilità sarà declinata nella pratica attraverso una maggiore attenzione al riciclo, al risparmio energetico e ad una riduzione degli sprechi. Infine, il centro nevralgico delle aziende saranno i lavoratori, attorno ai quali saranno modellate le tecnologie. (Breque et al. 2021)



Figura 1.7: Core Principles of Industry 5.0 (Breque et al. 2021)

In un impianto umano-centrico, come suggerito dal termine, la presenza umana con i suoi limiti, la sua sensibilità, le sue competenze e aspirazioni sarà il perno attorno al quale saranno ridisegnate le tecnologie circostanti. Sarà importante definire quali sono le necessità dell'operatore del futuro, e a tal proposito la ricerca di Lu et al. (2022) suggerisce una rivisitazione della piramide dei bisogni di Maslow in chiave industriale, definendo la “Industrial Human Need Pyramid”, descritta nella figura 1.8.

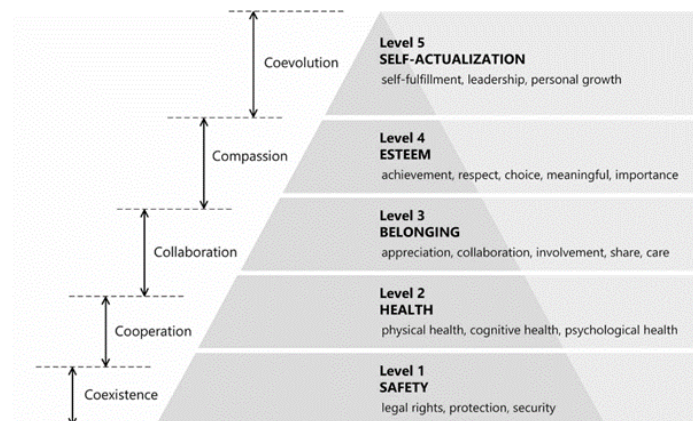


Figura 1.8: Industrial Human Need Pyramid (Lu et al. 2022)

Il modello, inoltre, evidenzia il tipo di rapporto che ha da instaurarsi tra uomo e macchina al fine di soddisfare una certa necessità. L'obiettivo dell'Industria 5.0 supera la coesistenza tra uomini e macchine per puntare alla coevoluzione, dove l'operatore umano e la sua

controparte meccanica migliorano nelle loro attività imparando reciprocamente dall'esperienza dell'altro. Al fine di realizzare una reale integrazione uomo-macchina, i macchinari dovranno essere dotati di tecnologie in grado di comprendere e soddisfare le necessità fisiche, cognitive e psicologiche degli esseri umani. (Lu et al. 2022). Dal punto di vista produttivo, l'obiettivo sarà raggiungere la personalizzazione dei sistemi produttivi sulle necessità dei lavoratori, passando nel frattempo dai CPS agli Human-CPS (HCPS) e Human Digital Twins, sistemi dove la fusione tra uomo e digitale sarà facilitata da tecnologie di interfaccia sempre più mature (realtà aumentata, digital twin e Big Data) e dall'intelligenza artificiale.(Huang et al.2022). Sempre più comuni saranno i cobot, ai quali verranno delegati i compiti a basso valore aggiunto, lasciando agli operatori tasks per le quali saranno richieste creatività e capacità decisionale, promuovendo il job enrichment. (Prassida, Asfari, 2022). Nonostante si pensi che buona parte delle tecnologie abilitanti dell'industria 4.0 ricopriranno un ruolo fondamentale anche nell'industria 5.0, saranno comunque necessari maggiori investimenti nello sviluppo di prodotti innovativi sempre più sostenibili, ispirati alla natura e dotati di un design adatto al riciclo, nella produzione e stoccaggio di energia elettrica e in generale nell'efficienza energetica (Xu et al. 2021). Una presenza più forte di automazione all'interno dell'impianto amplificherà il problema della disoccupazione, dal momento che i lavori più usuranti e saranno automatizzati, e renderà una skill necessaria la flessibilità e la capacità di acquisire nuove competenze (Huang et al.2022; Xu et al. 2021). È chiaro quindi che il futuro impone sfide dalle quali le imprese, per la loro responsabilità sociale ed economica verso lo sviluppo, non possono tirarsi indietro. L'Agenda 2030 e la realizzazione degli SDGs richiedono sì un passo avanti in ambito tecnologico, ma soprattutto un'evoluzione culturale, riportando l'uomo al centro del progresso.

CAPITOLO 2

LA MANUTENZIONE NELL'INDUSTRIA 4.0

2.1 Premessa: Componenti riparabili e componenti non riparabili

Generalmente esistono due tipi di componenti: i componenti non riparabili e i componenti riparabili. I componenti non riparabili sono caratterizzati da un solo ciclo di vita, in quanto al momento del guasto questi vengono rottamati. Al contrario, ai componenti riparabili sono associati più cicli di funzionamento: le loro funzioni vengono ripristinate tramite la manutenzione (Manzini, Regattieri, 2008). In questo capitolo si farà riferimento principalmente ai secondi.

2.2 Premessa: KPI – Key performance indicators

Nella maggior parte delle aziende il personale coinvolto nelle operations e nella manutenzione è circa il 30 %. (Jain, A., et al 2014). La manutenzione rappresenta una voce di costo non indifferente, in quanto oscilla in un range che va dal 15 al 40% dei costi delle operations (Han, Yang, 2006). Per questa ragione, nell'ottimizzazione della manutenzione le organizzazioni hanno intravisto la possibilità di mantenere la competitività e generare nuovi profitti. (Jain, A., et al 2014). Al fine di garantire un miglioramento continuo, diversi strumenti vengono impiegati nella valutazione dell'efficienza delle attività manutentive, denominati Key Performance Indicators. Di seguito alcuni tra i più diffusi.

2.2.1 OEE – Overall Equipment Effectiveness.

L'OEE è un indice di prestazione che serve a individuare e quantificare le maggiori perdite di produzione di un impianto e di monitorare l'efficienza dei processi produttivi. Si calcola attraverso il prodotto di tre fattori, denominati A, Pe e Q, rispettivamente Availability, Performance e Quality. L'Availability monitora le perdite per guasti e quelle per set-up/regolazioni. Il fattore Performance quantifica l'efficienza delle prestazioni, considerando anche le microfermate (non dovuti a guasti/set-up e non facilmente ricavabili) e

le perdite di velocità. Infine, il fattore Quality tiene conto delle perdite per difetti, riparazioni e quelle all'avviamento.

$$A = \frac{\text{Running Time}}{\text{Available Time}}$$

Running Time = tempo impiegato nella produzione

Available Time = Tempo totale – non dedicato alla produzione

$$Pe = \frac{\text{Real Production}}{\text{Theoretical Production}}$$

Real Production = Produzione Effettiva

Theoretical Production = produzione attesa che avrei nel caso il macchinario operasse alla velocità attesa

$$A = \frac{\text{Good Products}}{\text{Real Production}}$$

Good Products = produzione conforme alle specifiche

Real Production = produzione effettiva

$$OEE = A \times Pe \times Q$$

È espresso in percentuale (%), esprime quanto tempo è impiegato per produrre pezzi di qualità. Il valore ideale è 100%.

2.2.2 Time to Failure (TTF), Time to Repair (TTR), Mean Time to Failure (MTTF) e Mean time to Repair (MTTR)

Durante la vita dei componenti riparabili vengono rilevati altri fattori importanti, tra cui il Time to Failure (periodo che intercorre tra due guasti) e il Time To Repair (periodo che intercorre tra il guasto e la ripresa delle operazioni della macchina). Il TTF e il TTR sono rilevati per ogni guasto e per ogni riparazione. Da questi si derivano altri KPI utili, quali il Mean Time to Failure (MTTF):

$$MTTF = \frac{\Sigma TTF}{N}$$

$$MTTR = \frac{\Sigma TTR}{N}$$

Dove N è il numero di guasti. MTTF e MTTR sono impiegati nel calcolo del Mean Time Between Failures (MTBF) e dell'availability (A). (Manzini, Regattieri, 2008)

$$A = \frac{MTTF}{MTTF+MTTR}$$

$$MTBF = MTTF + MTTR$$

2.3 Cenni sulla manutenzione

La manutenzione, stando alla definizione data dalla normativa UNI E 13306, rappresenta “la combinazione di tutte le azioni tecniche, amministrative e gestionali previste durante il ciclo di vita di un'entità destinate a mantenerla o a riportarla in uno stato in cui possa eseguire le funzioni previste, ossia quelle per cui era stata progettata.” (normativa UNI E 13306). Il compito di organizzare e supervisionare gli interventi manutentivi negli impianti industriali è affidato all'ingegneria di manutenzione, la funzione aziendale di riferimento per questo tipo di attività. L'ingegneria di manutenzione per sua natura è trasversale, dovendosi occupare della manutenzione di tutti gli asset produttivi, e si occupa di:

- Aumentare la disponibilità degli impianti
- Ridurre i tempi di fermo impianto
- Aumentare la sicurezza degli operatori
- Garantire una produzione di qualità

È chiaro quindi che la manutenzione ha un ruolo fondamentale nella riduzione degli sprechi e, di conseguenza dei costi, avendo un impatto sia in termini economici che in termini di sostenibilità e funzione etico-sociale. Ridurre i costi di manutenzione massimizzando l'OEE

rappresenta una sfida fondamentale per garantire la competitività dell'impresa (Manzini, Regattieri, 2008).

2.4 Politiche manutentive

Lo sviluppo di tecniche manutentive in grado di intervenire in modo mirato e preciso con il fine di utilizzare al massimo l'utensile senza imbattersi in costi superflui è oggetto di discussione da lungo tempo. Nel corso degli anni, in particolare durante il 1900, sono andate sviluppandosi diversi tipi di politiche manutentive sempre più evolute.

- Manutenzione correttiva o a guasto. La manutenzione correttiva o a guasto è una politica di manutenzione di prima generazione, sviluppatasi attorno agli anni '30 del 1900. È la più semplice, dal momento che l'intervento di riparazione avviene al verificarsi del guasto e pertanto non richiede interventi di verifica dello stato di salute dei macchinari; allo stesso tempo è la più costosa, in quanto si incorre in tempi di fermo impianto più lunghi, con grosse ripercussioni in termini di produttività (Manzini, Regattieri, 2008).
- Manutenzione preventiva a età costante. La seconda generazione di politiche manutentive riguarda la manutenzione a età costante. Con questo approccio gli interventi vengono pianificati a intervalli regolari a prescindere dallo stato di usura del componente. L'obiettivo è quello di prevenire la rottura del componente (Manzini, Regattieri, 2008).
- Manutenzione preventiva. Le tipologie di manutenzione preventiva di terza generazione sono due: la manutenzione statistica e quella ispettiva (o su condizione). Nel primo caso, la politica manutentiva si basa sulla teoria dell'affidabilità nel tentativo di valutare la vita utile dei componenti. Al contrario la manutenzione ispettiva prevede un'ispezione al fine di verificare lo stato del componente (Manzini, Regattieri, 2008).
- Manutenzione predittiva. La manutenzione predittiva ha lo scopo di prevenire i guasti stimando lo stato di usura del macchinario sulla base di alcuni parametri correlati ad esso. Questa politica manutentiva si lega ad alcune applicazioni dell'Industria 4.0, come si vedrà più approfonditamente nella prossima sezione (Manzini, Regattieri, 2008).

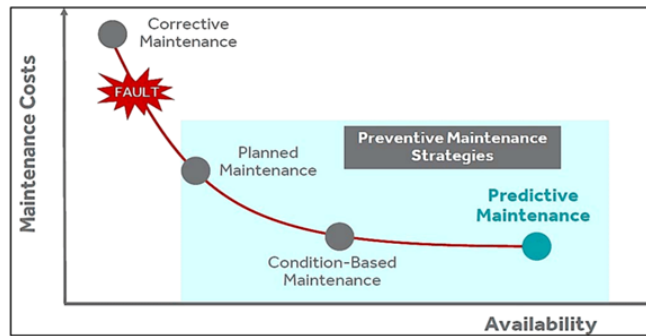


Fig. 2.1 Le strategie più recenti seguono un approccio “preventivo”. Esse permettono una maggiore availability dei macchinari (Oudah et al. 2022, p.4278)

2.5 La manutenzione Predittiva e la Manutenzione 4.0

Dalla prima alla terza generazione, le politiche manutentive si sono spostate progressivamente da un approccio “reattivo” ad uno “preventivo” ossia con l’obiettivo di agire prima che il guasto si verifichi. Un primo tentativo è avvenuto con la manutenzione preventiva di tipo statistico e su ispezione. Un possibile limite all’implementazione di questi metodi è rappresentato dalle competenze necessarie per l’applicazione: nel caso della manutenzione statistica serve una discreta conoscenza matematica e della statistica appunto, mentre nel caso della valutazione tramite ispezione è necessaria una profonda conoscenza del macchinario e delle sue componenti. (Oudah et al. 2022, p.4288) Inoltre, alta è la probabilità di intervenire troppo frequentemente o troppo poco, incorrendo in quest’ultimo caso in guasti non previsti. (Munirathinam, Ramadoss (2014), p.893).

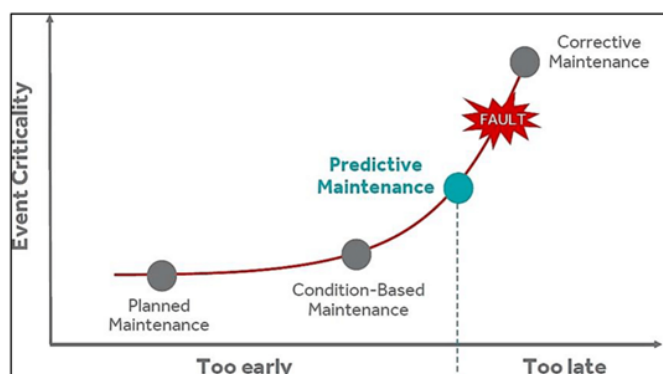


Fig. 2.2 La manutenzione predittiva permette di intervenire al momento opportuno evitando i guasti senza sovra mantenere i macchinari (Oudah et al. 2022, p.4280)

Accanto a questi metodi, si è sviluppata una quarta generazione di pratiche manutentive, detta manutenzione predittiva, che tramite il monitoraggio dei macchinari attraverso i dati si pone l'obiettivo di prevedere la restante vita utile e di programmare al momento più opportuno gli interventi manutentivi, massimizzando il TTF. A questa metodologia sono correlati molti benefici, tra cui una maggiore produttività, una migliore organizzazione del lavoro, la massimizzazione dell'utilizzo dei macchinari, una migliore gestione delle scorte e una maggiore sicurezza. (Ouadah et al. 2022). La piena comprensione dei processi a partire da banche dati di enormi dimensioni, eterogenei e non analizzabili con gli strumenti tradizionali ha reso necessario e naturale il legame tra industria 4.0 e manutenzione, dal momento che questo nuovo paradigma tecnologico fa del data-mining uno dei suoi principi fondanti. Tecnologie come l'IIoT, il Cloud e l'intelligenza artificiale (e in particolare il machine learning) consentono di raccogliere, conservare e elaborare dati andando a ricavare pattern utili a effettuare una prognosi del macchinario (Ouadah et al. 2022). I dati raccolti fanno riferimento a diversi parametri critici. I più noti sono l'analisi delle vibrazioni del macchinario, la temperatura (l'analisi termografica permette di intervenire prima che il guasto si verifichi, in quanto un malfunzionamento di un pezzo porta molto spesso ad un innalzamento localizzato della temperatura), il rumore, il liquido lubrificante (in particolare viene analizzata la presenza di determinate particelle per stimare lo stato di deterioramento del componente), e i test tramite gli ultrasuoni (Ouadah et al. 2022). Attraverso l'industria 4.0, la funzione manutenzione e la produzione, spesso in conflitto a causa di obiettivi discordanti, possono allinearsi con maggior facilità, poiché l'applicazione delle tecnologie 4.0 favorisce l'affidabilità senza trascurare la qualità del prodotto. (Lamban et al. 2022). Questo ha chiaramente un valore anche economico: uno studio di Aleksandr Korchagin et al. (2022) afferma che la manutenzione 4.0 diminuirà gli interventi non previsti del 50% rispetto alle politiche precedenti, impattando sui costi di poco più della metà (circa il 60-70% dei costi sostenuti precedentemente). (Korchagin et al. 2022). La manutenzione predittiva è anche la politica manutentiva che garantisce un OEE maggiore rispetto alle altre, compreso tra 80 e 90%. (Poòr et al. 2019). L'implementazione della manutenzione predittiva è funzionale al raggiungimento degli obiettivi economici delle organizzazioni, ma riserva anche delle difficoltà. La raccolta e l'elaborazione in tempo reale di dati eterogenei e l'integrazione tra manutenzione e produzione rappresentano gli ostacoli maggiori. (Lamban et al. 2022).

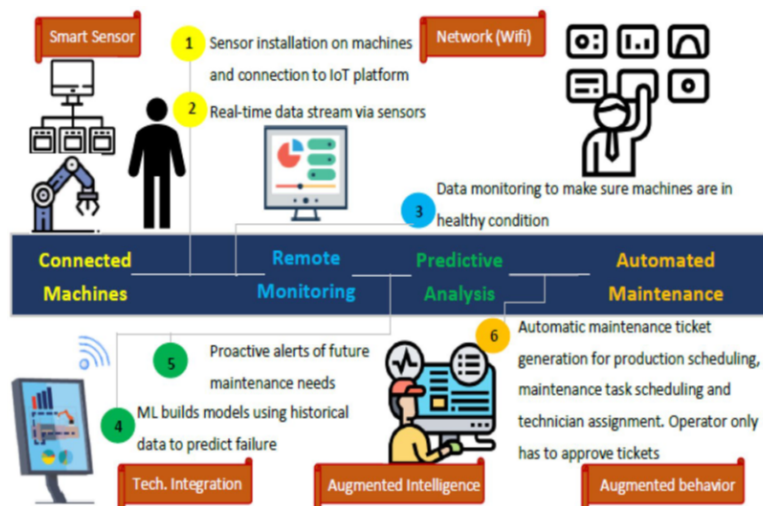


Fig. 2.3 Schema della Manutenzione predittiva. (Oudah et al. 2022)

Korchagin afferma anche che un passo fondamentale nella manutenzione 4.0 consiste nell'introduzione di un Asset Performance Management (APM) su più livelli che supporta il sistema di gestione della manutenzione e dei vari asset. A seguito dell'introduzione dell'APM, definisce i vantaggi della M4.0 in 5 punti:

- Human resources optimization: vengono eliminate le azioni ridondanti e non necessarie, potendo quindi decidere quanti operatori impiegare nella manutenzione.
- Improving reliability and safety: l'IoT permette la valutazione real-time delle condizioni dei macchinari. Diventa così più facile prevedere i guasti e le successive ripercussioni sulla produzione.
- Optimization of warehouse stock: la possibilità di possedere dati relativi all'utilizzo di uno specifico macchinario, l'andamento dell'intensità di utilizzo, il tipo di macchinario ecc. può essere utile nel definire quali pezzi di ricambio conviene tenere a magazzino e quali no, in modo da avere sempre ciò che serve a portata di mano.
- Accurate budget planning: la disponibilità di dati di utilizzo dei macchinari facilita l'attività di budgeting, dal momento che permette di prevedere con precisione quando sarà necessario intervenire sull'impianto.
- Investment planning: risulta più facile allocare il capitale, programmare gli investimenti sulla base degli obiettivi aziendali di breve e lungo termine. (Korchagin et al. (2022), p. 1525)

2.6 TPM – Total Productive Maintenance

La Total Productive Maintenance (TPM) nasce in Giappone alla fine degli anni '60 (Ireland, Dale, 2001). Essa è ispirata ai concetti del lean manufacturing, un modo di operare sempre di matrice giapponese che punta ad eliminare ogni tipo di spreco al fine di garantire un maggior valore al cliente. (Yamamoto et al. 2019). La filosofia proposta dalla TPM è caratterizzata principalmente dalla sua natura trasversale, che punta a sensibilizzare all'importanza della manutenzione tutti i lavoratori ad ogni livello e ad ogni dipartimento, ottenendo così due obiettivi distinti: la soddisfazione dei dipendenti e la massimizzazione dell'efficienza e della qualità, misurati solitamente attraverso l'OEE (Tortorella et al. 2021). Non solo: la TPM promuove la divisione in piccoli gruppi lavorativi dotati di una certa autonomia e stimola il miglioramento continuo. I vantaggi della TPM sono molteplici. Oltre ad un aumento dell'efficienza che può arrivare a raddoppiare (Jain et al. 2014), può ridurre i costi di produzione fino al 30%. Inoltre, la corretta applicazione della TPM riduce gli incidenti, aumenta la soddisfazione dei clienti, migliora la qualità e la compattezza dei prodotti. Alla TPM sono correlati anche dei benefici indiretti, in quanto un coinvolgimento trasversale dei dipendenti nelle attività di manutenzione induce ad un maggior senso di partecipazione e soddisfazione, maggior appartenenza alla realtà aziendale e maggior consapevolezza riguardo l'organizzazione e le sue componenti. (Jain et al. 2014). La TPM si basa su 8 pilastri: Autonomous maintenance, focused improvement, planned maintenance, quality maintenance, education and training, office TPM, development management e safety, health and environment, come rappresentato in Figura 2.4.

- *Autonomous maintenance*: rappresenta il concetto più importante della TPM. Attraverso un maggior coinvolgimento, l'operatore percepirà il macchinario come di sua proprietà. In questo modo, sarà motivato a eseguire day-by-day le operazioni di manutenzione ordinaria (pulizia, lubrificazione, ispezioni visuali, ecc.) lasciando al reparto manutenzione gli interventi più complessi. (Singh et al. 2013, p. 595)
- *Focused improvement (FI) (si può trovare anche come Focused Maintenance o Individual Improvements)*: a questo livello, agli operatori è richiesto di migliorare nell'analisi dei guasti. Il FI riunisce gli addetti in team di lavoro e impone che vengano utilizzate alcune tecniche per comprendere meglio le perdite e eliminare il

guasto, come la tecnica why-why o la performance measurement analysis (Chaurey et al. 2021).

- *Planned maintenance*: il terzo pilastro della TPM ha l'obiettivo di portare il sistema ad avere zero difetti (Chaurey et al. 2021) attraverso l'applicazione di pratiche proattive. Per farlo vengono pianificati, lungo il ciclo di vita del macchinario, una serie di interventi seguendo la manutenzione preventiva, predittiva e time-based. In questo modo aumenta l'affidabilità e la disponibilità, al contempo migliorando la manutenibilità. (Singh et al. 2013)
- *Quality maintenance*: una volta comprese le ragioni che portano ad una produzione non conforme alle specifiche, le 4M (machine, manpower, materials and methods) vengono organizzate al fine di raggiungere gli zero difetti. (Chaurey et al. 2021, p.8). In questo modo sono ridimensionati i costi delle lavorazioni aggiuntive e del controllo qualità migliorando la soddisfazione complessiva del cliente. (Chaurey et al. 2021, p.8)
- *Office TPM*: tutte le azioni di miglioramento e riduzione dei costi devono essere fortemente sostenute dal management, che deve promuovere il coordinamento tra le aree funzionali e operare per rimuovere gli ostacoli alla realizzazione della TPM. (Chaurey et al. 2021, p.8).
- *Education and training*: per realizzare quello che i giapponesi chiamano kaizen, cioè il miglioramento continuo, è necessario che gli addetti ai lavori fondano i loro obiettivi e ambizioni con quelli dell'impresa. È importante quindi che gli operatori siano incentivati all'aggiornamento delle proprie skills, anche attraverso programmi di valutazione periodica. Un ambiente stimolante, orientato all'innovazione sia a livello di management che tecnologico può creare la giusta atmosfera per permettere ai dipendenti di esprimere il loro completo potenziale. (Chaurey et al. 2021, p.9)
- *Safety, health and environment*. Stabilire e mantenere determinati standard di benessere dei dipendenti (fisico e psicologico) sicurezza e sostenibilità ambientale permette di ridurre gli incidenti e di contenere l'impronta ecologica dell'impresa, riducendo i costi di contenimento e migliorando l'immagine dell'azienda presso il cliente. (Chaurey et al. 2021, p.9)
- *Development Management*: prevede l'applicazione del metodo 5S negli spazi di lavoro, l'applicazione delle conoscenze dedotte dai sistemi esistenti sui nuovi sistemi, iniziative per il miglioramento dell'attività manutentiva. (Tortorella et al. 2021)

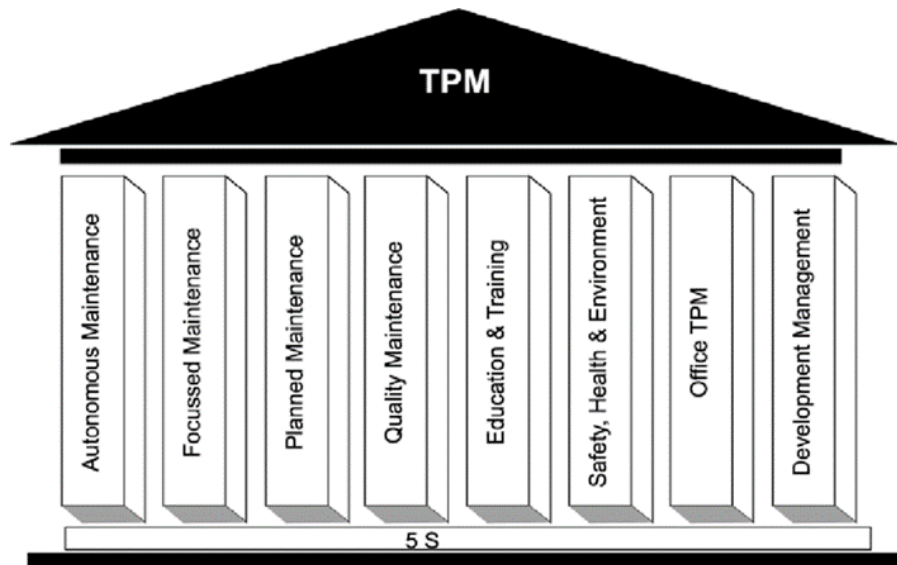


Fig. 2.4 Gli 8 pilastri del Total Productive Maintenance (Singh et al. 2013)

Un primo passo verso l'implementazione della TPM è il metodo 5S. (Singh et al. 2013). Sempre di matrice giapponese, 5S parte dal presupposto che il modo migliore per evidenziare un problema sia avere un ambiente di lavoro pulito e ordinato. (Singh et al. 2013). Le 5S corrispondono a:

- SEIRI (selezionare/eliminare l'inutile) a partire da una postazione di lavoro disordinata, il primo passo è quello di svuotare il piano di lavoro per definire ciò che non è funzionale alle azioni da svolgere.
- SEITON (sistemare/organizzare): gli oggetti vengono poi riposizionati sulla postazione in una posizione adatta, univoca e in quantità adeguata in modo che gli attrezzi siano reperibili nel posto giusto al momento giusto.
- SEISO (spazzare pulire); le macchine e le postazioni di lavoro vengono pulite per facilitare ispezioni e prevenzione dei guasti. La conseguenza è il miglioramento dell'efficacia e dell'efficienza.
- SEIKETSU (standardizzare): vengono definite pratiche e standard così che siapiù facile mantenere la postazione nelle condizioni desiderate. Questo approccio migliora l'attività di prevenzione dei guasti.
- SHITSUKE (sviluppare autodisciplina / mantenere) le pratiche definite vengono condivise con gli altri operatori, in modo che tutta l'organizzazione possa applicare criteri comuni nel proprio ambiente di lavoro.

CAPITOLO 3

APPLICAZIONE DELL'INDUSTRIA 4.0 NELLA MANUTENZIONE DEGLI IMPIANTI INDUSTRIALI: LA REALTÀ AUMENTATA

3.1 La realtà aumentata

Nel precedente capitolo si è evidenziato come la manutenzione rappresenti oggi un'attività fondamentale per la sopravvivenza di un'impresa. L'attività di manutenzione ha ripercussioni in ambito sociale, economico e ambientale. Una tecnologia in grado di aiutare gli operatori nelle attività di manutenzione è ritenuta di vitale importanza: se da una parte lo sviluppo tecnologico ha permesso alle imprese di migliorare in efficienza e in produttività, dall'altra ha aumentato la complessità degli strumenti utilizzati, e di conseguenza anche le attività di manutenzione si sono fatte più difficili da eseguire. (Zhu et al. 2014). Molte difficoltà sorgono anche quando, per evitare di attendere l'intervento di un tecnico specializzato, la manutenzione viene effettuata da personale non preparato adeguatamente. Un potenziale problema è rappresentato anche dalle disattenzioni degli operatori, che pur avendo le competenze adatte possono incorrere in errori. (Re, Bordegoni, 2014). Tra tutte le tecnologie introdotte dalla quarta rivoluzione industriale, la realtà aumentata sembra essere lo strumento in grado di superare questi ostacoli fornendo le indicazioni necessarie al momento giusto (Zhu et al. 2013). La realtà aumentata è definita da Fernandez del Amo et al. (2018) come *“a set of human - computer interaction techniques that enriches user's real-world experience by embedding contextualized information into user's space in coexistence with real-world objects”* (Fernandez del Amo et al. 2018). L'augmented reality (AR) si differenzia dalla realtà virtuale poiché l'ambiente in cui operatore e computer interagiscono è reale, mentre nella realtà virtuale esso è una simulazione di un ambiente reale. Di fatto la realtà aumentata permette di sovrapporre ad un ambiente reale delle informazioni virtuali attraverso una tecnologia immersiva, andando a creare quella che molti definiscono Mixed Reality (Bottani, Vignali, 2019, Eschen et al. 2018). L'interazione in tempo reale e la tridimensionalità degli oggetti virtuali in relazione allo spazio reale sono altre due caratteristiche fondamentali di

questa tecnologia (Quandt et al. 2020). Alla realtà aumentata sono correlati anche diversi benefici. Come segnalato da de Souza Cardoso et al. (2020), generalmente si ha una diminuzione del tempo di esecuzione dei compiti, una migliore flessibilità e una migliore qualità. Al contempo, una migliore learnability permette di diminuire il lavoro mentale degli operatori, ottenendo così un maggior benessere all'interno dell'impresa. Infine, si è notato un miglioramento delle condizioni di sicurezza, in particolare laddove si operi collaborando con i robots. (de Souza Cardoso et al. 2020).

3.2 Augmented Reality: Key Technologies

Nell'implementazione della Realtà Aumentata vengono impiegati diversi strumenti. In particolare, sono evidenziate 3 key technologies per la realtà aumentata, quali gli Intelligent Display Technology, 3D Registration Technology e Intelligent Interaction Technology (Chen Y. et al. 2019).

3.2.1 Intelligent Display technology

La vista rappresenta lo strumento di interazione più intuitivo tra ambiente e essere umano. Gli strumenti che utilizzano la vista per arricchire l'ambiente reale di informazioni virtuali sono vari. Palmarini et al. (2018) ne riporta alcuni, tra i quali quali Head Mounted Display, gli Hand Held Display, Desktop PC, proiettori e sensori di vario genere (Palmarini et al. 2018):

- Head Mounted Display (HMD): il device viene indossato sulla testa dell'operatore tramite un paio di occhiali o tramite un casco/elmetto. Può essere utilizzato senza particolari preparazioni, permette di eseguire le operazioni seguendo le istruzioni proiettate in real time dalle lenti sullo spazio circostante. Questo strumento garantisce la possibilità di muoversi nello spazio liberamente senza avere le mani occupate a supporto di uno schermo (Baroroh et al. 2021). Agli HMD sono associate anche diverse problematiche: una bassa qualità delle immagini e delle animazioni, che talvolta possono essere distorte (Palmarini et al. 2018) e una non perfetta sovrapposizione dei contenuti agli oggetti fisici può causare affaticamento della vista dell'operatore. (Baroroh et al (2021); Palmarini et al. (2018); de Souza Cardoso, (2020)). Inoltre, i contenuti, se non presentati all'occhio dell'operatore nella maniera

corretta, potrebbero rappresentare distrazioni per gli utenti e di conseguenza porterebbero all'insorgere di incidenti (Ariansyah et al. 2022).

- Hand Held Display (HHD): si serve di display quali tablet e smartphone per aggiungere all'oggetto fisico i componenti virtuali. Da un lato, gli HHDs sono gli strumenti più diffusi, in quanto sono quelli che garantiscono maggiore flessibilità, ma dall'altro sono scomodi per gli operatori della manutenzione, poiché non permettono loro di avere entrambe le mani libere durante gli interventi, con aumento del tempo impiegato nelle operazioni e un maggior carico di lavoro (Baroroh et al. 2021).
- Desktop PC: sono utilizzati in vari ambiti, tra cui la manutenzione da remoto, la prototipazione, per le attività di manutenzione eseguite staticamente su una postazione di lavoro e nella gestione dei contenuti virtuali. Vengono utilizzati congiuntamente con delle telecamere in grado di riprendere l'ambiente di lavoro. (Palmarini et al. 2018).
- Proiettori: un esempio evidente del loro utilizzo è spiegato nel caso studio di Fiorentino et al. (2013) riportato più avanti.
- Dispositivi aptici: vengono impiegati soprattutto nella raccolta dei dati durante le operazioni al fine di migliorare il rapporto tra lavoratore e oggetti virtuali. (Palmarini et al. 2018).
- Sensori di varia natura: il loro utilizzo dipende dalla particolare applicazione.

3.2.2 3D Registration, marked- based and markerless technology

La 3D registration è la tecnica che permette di inserire nel mondo reale gli oggetti virtuali. Al fine di rendere al meglio le informazioni all'utente vengono presi in considerazione diversi dati, tra cui la posizione e la direzione della telecamera dell'intelligent device. Solo avendo una cognizione chiara delle coordinate dell'utente si possono unire nel modo più accurato gli oggetti virtuali con la realtà. Il contenuto virtuale, successivamente, viene posizionato nell'ambiente reale con precisione (Chen et al. 2019). Nello studio dei problemi di registration, vengono utilizzate varie tecniche che possono essere divise in tecnologie di tracking marker-based e markerless. (Lee et al. 2020). La prima utilizza dei "marker", che possono essere un'immagine 2D o degli oggetti con una particolare forma, i quali attivano la proiezione degli oggetti aumentati (funzionano da *trigger*). In figura 3.1 si vede come i marcatori permettano di fornire un feedback negativo durante il processo di assemblaggio. I

marker possono essere anche oggetti realmente esistenti nell'ambiente. Dall'altra parte troviamo la tecnologia markerless, che calcola e acquisisce le misure dello spazio circostante utilizzando vari tipi di sensori e strumenti (es. GPS, RFID). (Cheng et al. 2017). Altri introducono un'ulteriore classificazione, dividendo i metodi di tracking tra quelli sensor-based, raggruppando tutti i meccanismi di tracking che utilizzano sensori ottici, magnetici, acustici e inerziali, e i vision-based, che sono appunto i metodi marker-based e marker-less citati poco sopra. (Ashwini et al. 2020).

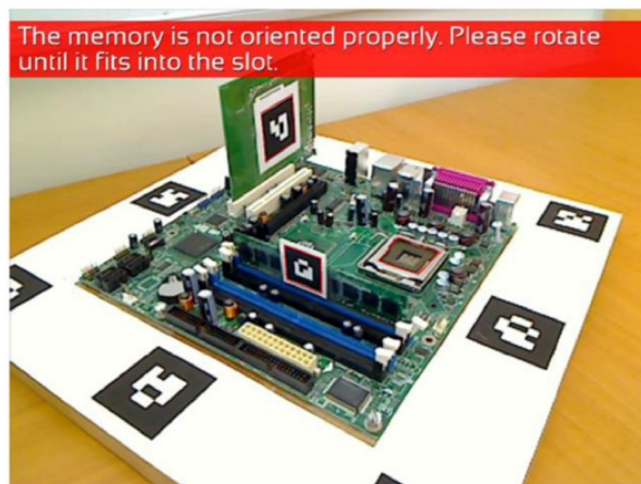


Figura 3.1 Un feedback negative viene fornito tramite marcatori (Palmarini et al. 2018)

(https://ars.els-cdn.com/content/image/1-s2.0-S0736584517300686-gr8_lrg.jpg)

3.2.3 Intelligent Interaction Technology

Si tratta di tutte quelle tecnologie che, oltre alla visualizzazione degli oggetti virtuali, permettono un'interazione con essi. L'interazione avviene a seguito di azioni: a determinate istruzioni, l'oggetto virtuale restituisce un feedback. (Chen et al. 2019).

3.3 Authoring, Context – Awareness e Interaction – Analysis

Fernandez del Amo et al. (2018) definiscono l'AR come una “knowledge transfer technology”, cioè in grado di trasferire informazioni associate ad un contesto specifico da un sistema ad un altro. Palmarini et al. (2017) nello studio di 30 primary studies definiscono quattro attività manutentive dove l'AR viene applicata maggiormente: esse sono

dis/assemblaggio, riparazione, ispezione/diagnosi e il training (Palmarini et al. 2018). Durante queste operazioni è necessario recapitare le informazioni corrette nel posto giusto, nel formato più funzionale e nel momento adatto. Questo è lo scopo di due tecniche software che vengono impiegate nella definizione del funzionamento della realtà aumentata, ossia l'authoring e la context-awareness . Authoring e Context-awareness rappresentano anche due campi di ricerca fondamentali per la completa implementazione della realtà aumentata nella manutenzione. (Fernandez del Amo, Erkoyuncu et al. 2018). L'authoring fa riferimento alla creazione e l'esposizione delle informazioni al manutentore. L'obiettivo è quello di rendere il passaggio delle informazioni il più semplice possibile evitando ulteriori costi, il che significa fornire ad un operatore senza conoscenze di programmazione tutti gli strumenti utili e utilizzabili per il trasferimento della conoscenza. Questo nella pratica si declina nella creazione di utilizzo di Graphical User Interface di facile comprensione, o di applicazioni disegnate sul tipo di fruitore o sul luogo di utilizzo. Un altro ostacolo da superare è rappresentato dalla visualizzazione delle informazioni. Infatti, l'utilizzo delle animazioni sembra essere il modo migliore per presentare i dati agli operatori. Il modo in cui le animazioni sono presentate ai manutentori è un altro fattore importante, poiché diversi interventi potrebbero richiedere diverse tecniche. Dell' authoring fanno parte la creazione delle animazioni e anche la scelta sui possibili modi di interagire con esse, e di conseguenza i dati necessari da raccogliere. (Fernandez del Amo, Erkoyuncu, Roy, Wilding et al. 2018). In generale, l'Authoring gioca un ruolo centrale nel knowledge transfer in quanto la correttezza e la chiarezza degli elementi computerizzati determina la corretta trasmissione delle informazioni. (Fernandez del Amo, 2018). Altra caratteristica ricercata è la context-awareness, che corrisponde alla capacità di un sistema di fornire informazioni e servizi secondo le condizioni di lavoro specifiche del tecnico. Infatti, al fine di realizzare un sistema context-aware serve raccogliere dati dell'utente, in modo da offrire le informazioni in linea con le sue necessità, ma anche dell'ambiente, dai macchinari, così da offrire una visione della situazione più ampia in tempo reale. (Fernandez del Amo, Erkoyuncu, Roy, Wilding 2018). Infine, un'altra area di ricerca è l'interaction - analysis, che, seguendo la definizione proposta da Fernandez del amo et al. (2018), è l'insieme di “software tools, methods or techniques that analyse the status of interaction between the user and the augmented content to provide relevant feedback and/or improve the interaction itself” (Fernandez del Amo et al. 2018). Al fine di migliorare l'efficienza nella risoluzione del compito, vanno analizzate le interazioni che riguardano la raccolta dati (automatica o manuale) e l'analisi in sé, che a sua

volta può essere fatta dall'operatore o direttamente dagli strumenti. (Fernandez del Amo et al. 2018)

3.4 Applicazioni di Realtà Aumentata nella manutenzione

Nella sezione corrente si andranno a presentare alcuni casi di applicazione della realtà aumentata nella manutenzione.

3.4.1 “Augmented reality on large screen for interactive maintenance instructions” (Fiorentino et al. 2013)

Fiorentino et al. (2013) propongono un'applicazione sperimentale di realtà aumentata per la manutenzione di un motore Honda CBR 600. L'obiettivo dell'esperimento era dimostrare il potenziale della realtà aumentata nel ridurre il tempo necessario per compiere le azioni e nel migliorare l'accuratezza riducendo gli errori. Per l'esperimento sono stati coinvolti 14 ragazzi volontari del Politecnico di Bari con diverse competenze nella manutenzione di moto. Nessuno di questi era familiare con la realtà aumentata. Per l'esperimento viene utilizzato un sistema marker-based con dei marcatori di diverse dimensioni (quattro di 40mm vengono posizionati nella zona inerente al motore e uno di 140 mm sul banco degli attrezzi), tre fotocamere (una fissa sul motore, l'altra fissa sugli attrezzi, e una terza mobile fissata sul petto del partecipante) e un proiettore retro-SGVA attraverso il quale mostrare le indicazioni aumentate.

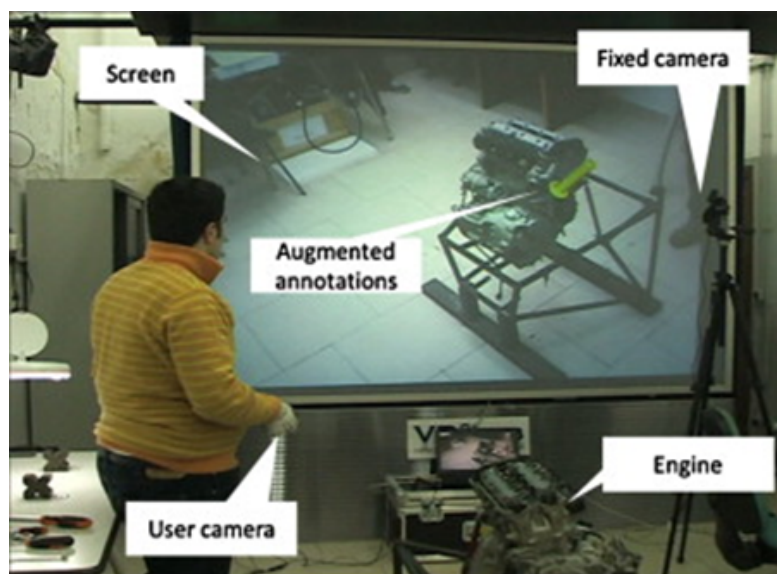


Figura 3.2 Il proiettore aiuta l'operatore nella risoluzione delle operazioni

Le istruzioni fornite si dividevano in indicazioni audio, contenuti 2D (le istruzioni prese dai manuali proiettate sotto forma di testo) e 3D, che potevano essere strumenti, ma anche frecce ecc. articolate in vari tipi di animazioni. Un esempio è evidente in figura 3.3 . Infine, si è proceduto con la registrazione degli oggetti tridimensionali nell'ambiente, al fine di avere la migliore sovrapposizione di questi con le parti del motore interessate. (fig. 3.4).

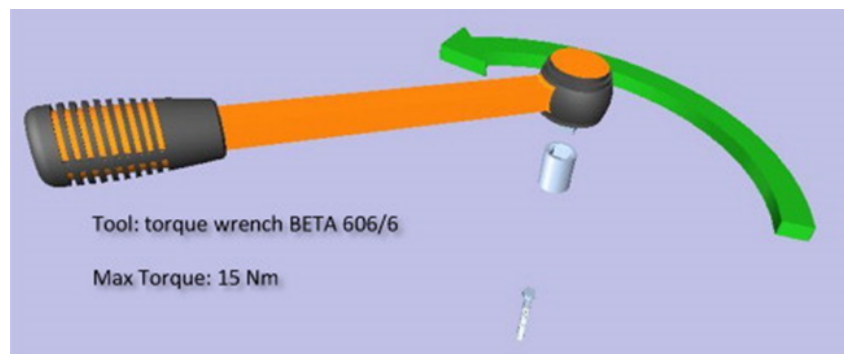


Figura 3.3 Animazione proposta per aiutare gli operatori negli interventi. Si nota che è indicato sia il modello dell'utensile che il verso di rotazione.

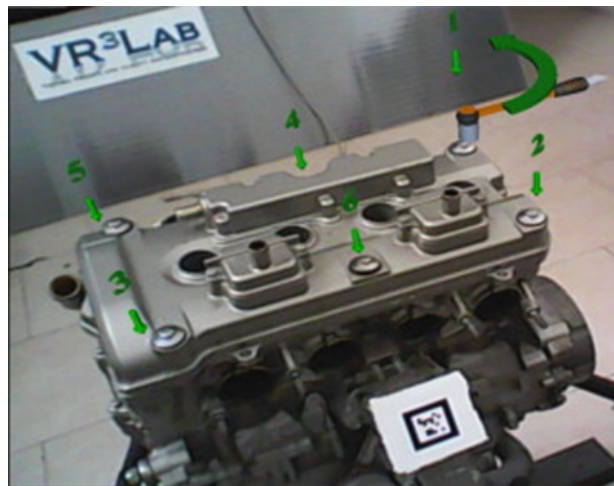


Figura 3.4 Le annotazioni "aumentate" vengono posizionate sul motore tramite la registrazione.

Ai partecipanti fu chiesto di eseguire 4 azioni: l'identificazione di uno strumento tra un set di questi, lo svitamento di bulloni secondo un particolare sequenza, e infine la valutazione e

rimozione di un supporto albero a camme. Durante l'esecuzione si sono considerate alcune variabili dipendenti e indipendenti. Tra le dipendenti troviamo il tempo di esecuzione e la percentuale di errori (*error rate*), mentre tra le indipendenti si annoverano le modalità in cui vengono fornite le istruzioni e il tipo di azione da compiere. Inoltre, al termine dell'esecuzione viene sottoposto ai partecipanti un questionario al fine di valutare l'usabilità, il livello di soddisfazione e la facilità di comprensione delle istruzioni fornite, sia su carta che aumentate, con un punteggio che andava da 1 (difficile) a 5 (facile). Dopo aver applicato le opportune analisi statistiche, vengono analizzati i risultati per le variabili dipendenti. Dai dati raccolti, si nota che le istruzioni fornite attraverso la realtà aumentata hanno ottenuto punteggi maggiori di quelli su carta per tutte e tre le aree dell'indagine qualitativa, con una media di 4 per la soluzione aumentata rispetto a 2.5 per quella su carta. Per quanto riguarda le variabili dipendenti (tempo e tasso di errore), i risultati sono a favore dell'Augmented Mode:

- Tempo impiegato: se le informazioni sono fornite attraverso la realtà aumentata, mediamente il partecipante ci impiega il 38% di tempo in meno ad eseguire l'azione desiderata. Nello specifico, i secondi impiegati nella selezione dello strumento (task 1) sono il 59,2% in meno, il 22,4% in meno per la rimozione della testa dei cilindri (task 2), il 69,5% in meno nell'identificazione del supporto albero a camme esausto (task 3) e il 35,5% in meno nella sua rimozione (task 4).
- Error rate: la riduzione del tasso di errori con le indicazioni aumentate è del 92,4%. Per il task 1 il miglioramento è del 90%, per il task 2 non ci sono stati errori nell'augmented mode mentre nell'altra modalità si è riscontrato un tasso di errore del 9,3%. Anche nell'identificazione del supporto albero a camme non sono stati riscontrati errori rispetto ad un 3,6% nel caso di indicazioni su carta, e infine si è riscontrato un miglioramento dell'87,5% nel task 4.

In conclusione, l'applicazione di realtà aumentata è stata lo strumento più gradito in termini di facilità d'uso, soddisfazione e intuitività. Inoltre, nel confronto con la sua controparte fisica/cartacea, ha permesso un netto miglioramento nel tempo di esecuzione delle operazioni che nel tasso di errori. (Fiorentino et al. 2014)

3.4.2 Il progetto W-Artemys nella linea di imbottigliamento di Parmalat

La prima applicazione sperimentale è quella proposta da Bottani et al. (2021). Si è scelto di presentare questo caso per tre ragioni: questo caso, infatti, consentiva di valutare l'usabilità di una tecnologia di Mixed Reality in un ambiente reale come la linea di imbottigliamento. Non solo, ma poneva una tecnologia nuova come gli HMD (in questo caso sono le Microsoft HoloLens) in relazione ad una molto più conosciuta e diffusa, come gli smartphone, evidenziando come la percezione delle nuove tecnologie, almeno inizialmente, sia peggiore rispetto a quelle già più comuni e conosciute. Infine, il caso ha evidenziato come più tecnologie si possono fondere tra loro. L'esperimento, in collaborazione con l'Università della Calabria e CAL-TEK S.r.l prevedeva la valutazione dell'usabilità da parte degli operatori di un sistema di allarme nel caso di guasti in una linea di imbottigliamento della Parmalat. Il sistema fa riferimento al progetto fondato dall'Istituto nazionale Assicurazione Infortuni sul Lavoro (INAIL) chiamato W-Artemys, che punta a introdurre elementi di realtà aumentata per aumentare la sicurezza degli operatori sul lavoro. Il sistema era composto da un web app e da due applicazioni front-end in dotazione agli operatori: uno consisteva in un'applicazione per smartphone in grado di segnalare il guasto all'operatore, mentre la seconda era una soluzione di Mixed Reality supportata da un dispositivo HMD. Nella figura 3.5 è descritto il funzionamento del sistema.

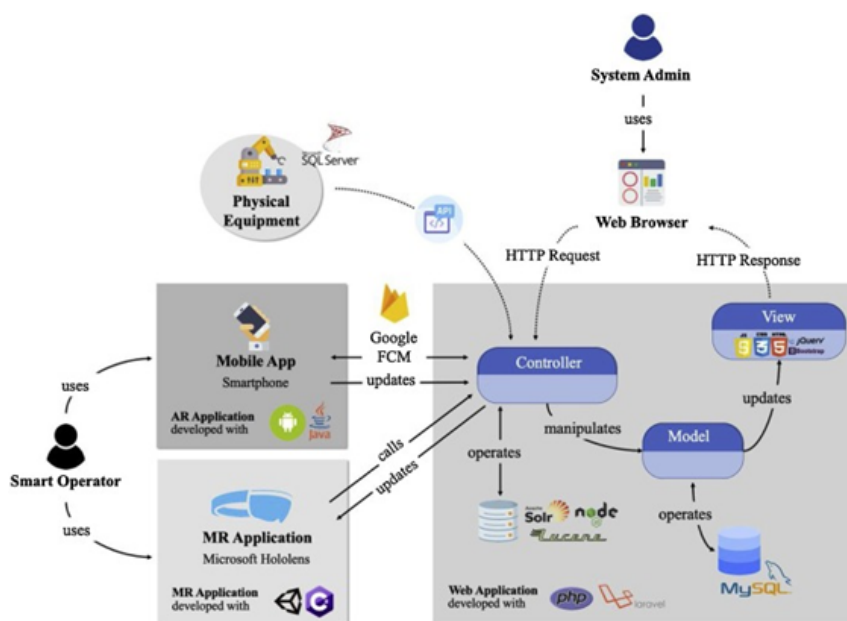


Fig. 3.5 Architettura della soluzione proposta da Bottani et al. (2021). Essa comprende tre componenti: una web app, un'applicazione per smartphone e un'applicazione di Mixed Reality.

Un admin può accedere alla web app per modificare e inserire i dati all'interno del database. Le informazioni all'interno del database riguardano le macchine, i possibili guasti con i loro ID, le cause e gli effetti, gli operatori che potrebbero risolvere il problema, e immagini, video o audio correlati. Le macchine vengono poi connesse alla web app. A questo punto ogni nuovo allarme viene identificato attraverso il suo ID e viene comunicato tramite l'app su mobile (figura 3.7) e sul dispositivo HMD, dove continua ad apparire fino a quando non viene confermata la visualizzazione attraverso il click. Come già anticipato, se l'operatore indossa le HoloLens, le informazioni appaiono in sovrapposizione direttamente sulle lenti, con le quali può comunicare tramite sguardo, voce o gesti. Attraverso l'app e l'HMD, l'operatore, una volta notificato l'allarme, può intervenire e seguire la procedura di risoluzione, anch'essa resa visibile attraverso le HoloLens come evidenziato in figura 3.6. L'interazione tramite la voce permette una ricerca delle informazioni più rapida rispetto all'utilizzo di manuali.

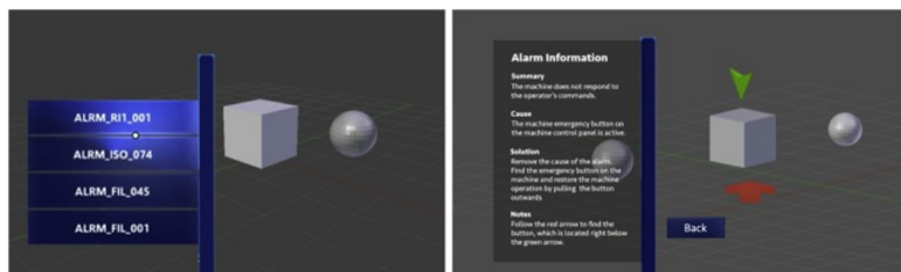


Figura 3.6 Visualizzazione delle informazioni attraverso l'HMD

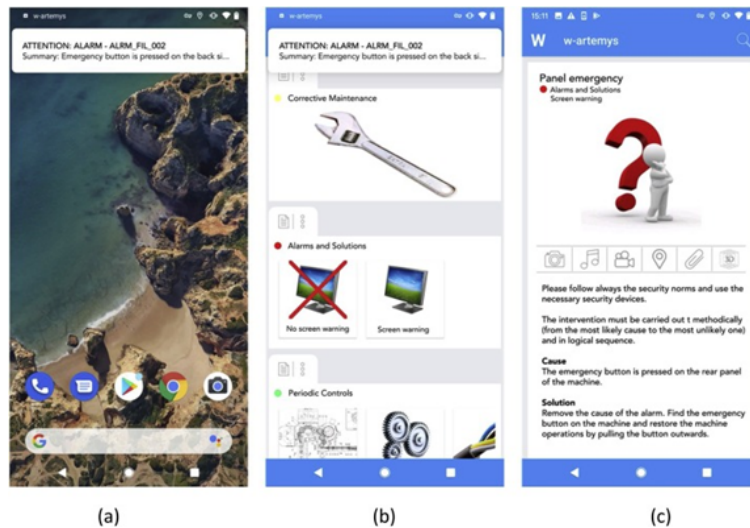


Figura 3.7 Visualizzazione delle notifiche di allarme tramite l'app per smartphone

Chiaramente, ogni guasto ha il suo livello di difficoltà diverso nella risoluzione, che può influire sulla percezione di utilità degli strumenti forniti: vengono allora create tre classi di difficoltà, quali semplice, medio e complesso, sulla base del tempo richiesto per l'intervento e sul numero di azioni da compiere. Viene inoltre definito un questionario basato su 14 statements prese in parte dal System Usability Scale (come ad esempio "I think that I would like to use this system frequently" oppure "I found the system very cumbersome to use") alle quali i partecipanti dovevano associare un valore da 1, cioè totale disaccordo, a 5, completamente d'accordo. A questo punto vengono coinvolti alcuni operatori per valutare l'usabilità, efficacia e il gradimento sia degli strumenti proposti. Viene scelto il numero di otto operatori come compromesso tra il numero minimo di persone che devono essere coinvolte per avere un feedback efficace e la disponibilità degli stessi in relazione alle necessità della linea. Per una corretta valutazione dell'usabilità, a nessuno dei dipendenti vengono fornite informazioni sul funzionamento dei dispositivi, né sul come utilizzarli correttamente. Ad ogni partecipante viene chiesto, per un tempo di 15 minuti, di effettuare una serie di azioni: dopo aver indossato le Microsoft HoloLens, gli operatori erano tenuti a rispondere alla notifica di allarme sui dispositivi, trovare la soluzione per la risoluzione del guasto e intervenire sul macchinario ripristinando le sue funzionalità. Diversi sono gli spunti di riflessione che emergono dalle valutazioni finali degli operatori. In generale, sia l'usabilità dell'app che dell'applicazione di Mixed Reality ha avuto un esito positivo. Nella comparazione delle due tecnologie emerge che, nonostante le Microsoft HoloLens siano

percepite come più facilmente utilizzabili rispetto allo smartphone, la tecnologia preferita dagli operatori continua ad essere lo smartphone per ogni genere di task. Questa preferenza sembra essere correlata alla maturità della tecnologia, alla sua facilità di utilizzo e alla difficoltà nell'indossare le HoloLens per tutto il turno di lavoro, confermando uno dei limiti principali di questo strumento. Questo studio si è dimostrato utile per determinare quali possono essere i problemi principali nell'implementazione di tecnologie 4.0 all'interno delle imprese. Uno di questi è sicuramente il livello di digitalizzazione dei macchinari: per introdurre delle applicazioni di industria 4.0 è evidente la necessità di equipaggiare i macchinari con gli strumenti per la raccolta e lo scambio delle informazioni. Altro punto fondamentale è rappresentato dalla necessità che ogni macchinario si possa collegare ad internet per lo scambio di dati. Anche il periodo di utilizzo di nuove tecnologie rappresenta un aspetto importante dell'implementazione, non solo per permettere che l'impiego di queste diventi abitudinario e, di conseguenza, poterne valutare il reale impatto, ma anche per poter migliorare ulteriormente le applicazioni proposte in termini di usabilità, di sicurezza degli operatori e di feedback sulla correttezza delle azioni intraprese. (Bottani et al. 2021)

3.4.3 “Probing an intelligent predictive maintenance approach with deep learning and augmented reality for machine tools in IoT-enabled manufacturing” (Liu et al. 2022)

Premessa. Il sistema proposto da Liu et al. (2022) è un sistema dotato di due componenti fondamentali: un'applicazione di deep-learning che ha lo scopo di prevedere i guasti per programmare al meglio la manutenzione, tenendo conto di vari fattori di costo con l'obiettivo di minimizzare i costi totali. L'altro contributo è fornito da una soluzione AR-based che aiuta gli operatori durante la manutenzione. Non essendo il deep-learning oggetto di questa tesi, la parte di sviluppo del modello è stata tralasciata. La decisione non va però a incidere sui componenti importanti del modello di realtà aumentata, dal momento che le due applicazioni sono separate. Questo è confermato dal caso studio poiché per misurare l'efficienza della soluzione di realtà aumentata proposta si è comparato il sistema AR-based con delle istruzioni fornite su base cartacea, mentre la comparazione tra l'algoritmo di deep learning e altri algoritmi viene fatta separatamente in un'altra sezione.

Anche in questo caso, come in quello precedente, la realtà aumentata viene utilizzata in insieme ad un'altra tecnologia dell'industria 4.0. Liu et al.(2022) propongono un sistema di

manutenzione predittiva che fonde la realtà aumentata con una branca dell'intelligenza artificiale, il deep learning, strumento dimostratosi estremamente utile nell'elaborazione di dati. L'obiettivo dello studio è quello di valutare l'efficacia e praticità dello schema proposto. Lo schema della soluzione che lo studio propone è descritto precisamente in figura 3.8.

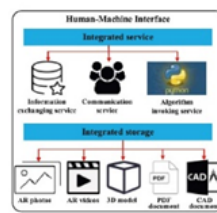
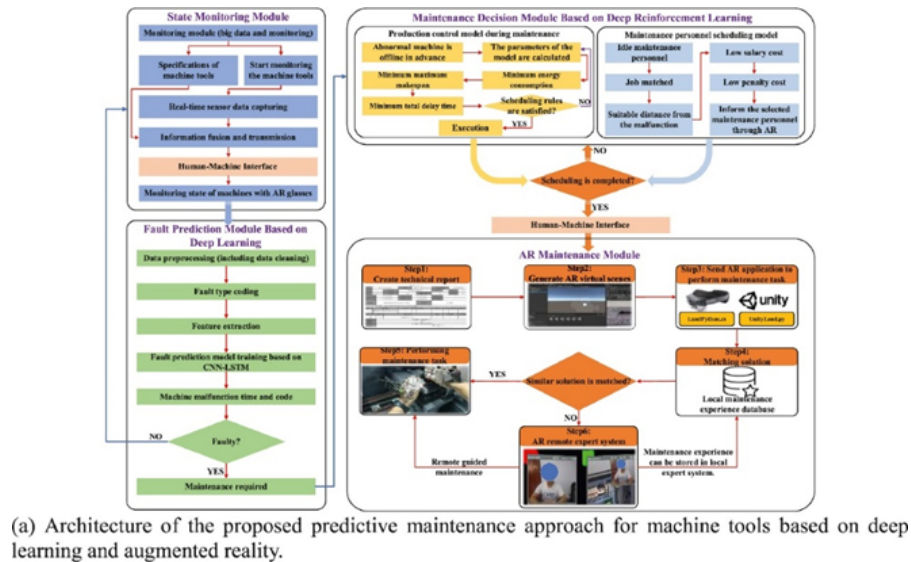


Figura 3.8 Schema complessivo del sistema proposto da Liu et al. (2022) che unisce deep-learning e realtà aumentata (Liu et al. 2022)

Lo schema è composto da vari moduli, che si andranno ad analizzare brevemente:

- *State monitoring module*: questo modulo si occupa principalmente di raccogliere i dati sullo stato dei macchinari, i quali vengono conservati in un database su cloud. I dati raccolti sono accessibili anche dagli AR Glasses (in questo caso le Microsoft HoloLens 2) Una Human-Machine Interface (fig 3.8 (b)) è l'interfaccia attraverso la quale, con l'utilizzo delle funzioni garantite dal software AR, l'operatore può visualizzare le informazioni desiderate.

- Fault Prediction Module: riassumendo il funzionamento della soluzione di deep learning proposta, in questo modulo vengono effettuate le previsioni sulla vita utile rimanente dei macchinari. Le previsioni sono accessibili tramite gli AR Glasses. L'output di questo modulo è quindi una previsione di guasto e un codice di guasto che viene rilevato dal sistema IoT. Lo State Monitoring Module e il Fault Prediction Module vengono eseguiti fino a quando la macchina non si guasta. A quel punto viene inviata una richiesta di manutenzione al Maintenance Scheduling Module.
- Intelligent Maintenance Decision Module: questo modulo è composto da due sottomoduli, il primo detto Production Control Model During Maintenance che ha l'obiettivo di minimizzare il consumo di energia, il makespan, e il tempo di ritardo della produzione. Al contempo il Maintenance personnel Scheduling Model si pone l'obiettivo di selezionare il personale più adatto per la risoluzione del problema andando a minimizzare i costi, selezionando l'operatore con a preparazione adeguata e più vicino alla macchina, il quale viene avvertito tramite una notifica sugli AR Glasses.
- Una volta che l'operatore selezionato è pronto per l'intervento, gli vengono inviate le informazioni necessarie tramite un protocollo HTTPS. Utilizzando un metodo marker-based sono fornite le informazioni sull'ispezione e sulle parti della macchina da riparare. Il guasto può essere nuovo o simile ad altri guasti già occorsi in passato. Se il tipo di guasto è conosciuto, le procedure di ripristino vengono estratte dal database e fornite tramite gli AR Glasses all'operatore. Se il guasto è inaspettato e nuovo, viene fornito supporto in tempo reale da un esperto collegato da remoto. A questo punto, i dati relativi al nuovo guasto vengono registrati e conservati per situazioni future analoghe.

Concentrandosi maggiormente sull'apporto della realtà aumentata nel caso studio, è importante citare anche l'Augmented Reality-enabled auxiliary maintenance module, descritto in figura 3.9.

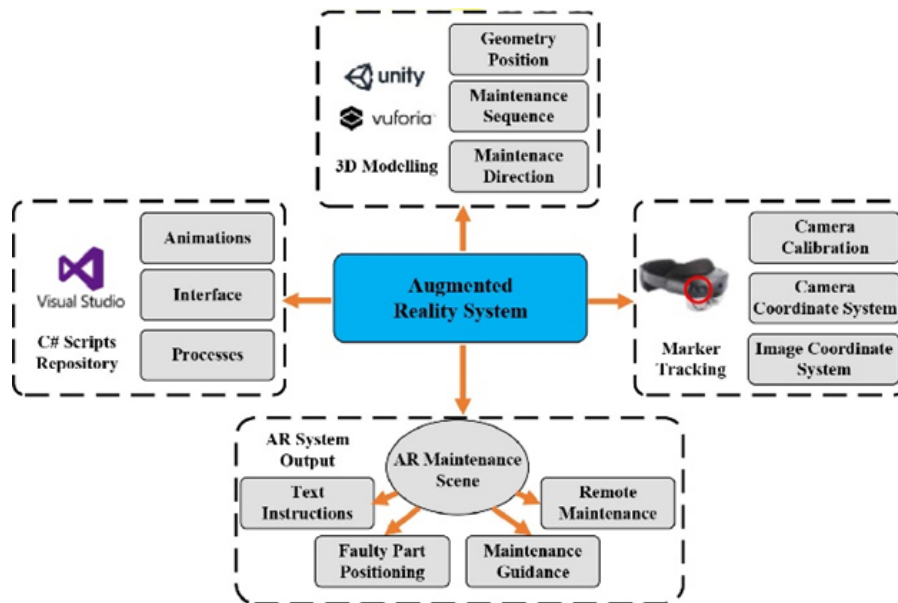


Figura 3.9 Dettaglio della soluzione AR-based (Liu et al. 2022)

Lo schema si articola in quattro sottosezioni che compiono azioni diverse. Il device impiegato è Microsoft HoloLens 2. Esso è dotato di un sistema di tracking ibrido che permette di posizionare le entità virtuali nell'ambiente reale con grande precisione. Sono impiegati diversi strumenti nello sviluppo dell'applicazione: Unity 3D e Vuforia, per l'integrazione dei modelli 3D e per guidare gli operatori durante la manutenzione in modo più preciso, e Visual Studio per lo sviluppo delle animazioni e dell'interfaccia uomo macchina.

Nel caso studio proposto, sei stazioni di lavoro (due torni, una fresatrice, una foratrice e due macchine per l'incisione laser) sono utilizzate per testare la validità del sistema. L'ambiente viene fornito di sensori al fine di raccogliere i dati e avere un reale sistema IoT. Dopo l'applicazione e l'analisi dei risultati del modello di deep learning, si passa a valutare l'utilizzo della realtà aumentata come guida durante le attività di manutenzione. Viene simulato il cambio di un coltello difettoso. In primo luogo, il coltello viene riconosciuto dal HMD, che verifica la correttezza l'utensile selezionato grazie alla sovrapposizione tra questo e il modello 3D del coltello. Successivamente, il nuovo coltello viene inserito nella macchina e quest'ultima configurata. Affinché gli errori siano minimizzati, il personale è supportato da un'animazione 3D e dai manuali proiettati sull'ambiente reale dal device. La procedura è spiegata dettagliatamente in figura 3.10.

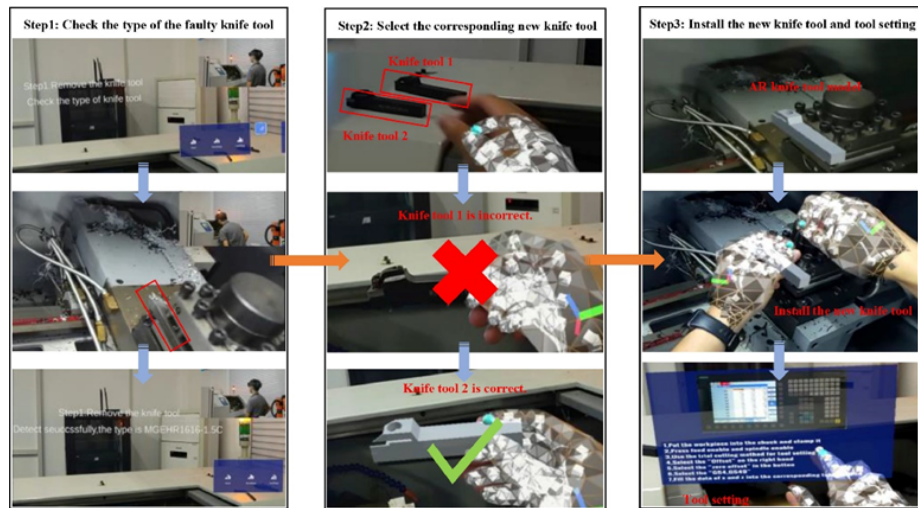


Figura 3.11 Le Microsoft HoloLens 2 favoriscono la corretta scelta dell'utensile attraverso dei feedback. Inoltre supportano l'operatore proiettando le informazioni necessarie (Liu et al. 2022)

Viene anche simulato un guasto non convenzionale, al quale segue la necessità di interagire con un esperto da remoto per ricevere supporto. Tramite gli AR glasses, l'operatore connesso da remoto può interagire in tempo reale con il manutentore, vedendo la scena dal punto di vista del manutentore stesso, e fornire le indicazioni necessarie per la buona riuscita dell'intervento. Le informazioni raccolte durante la manutenzione vengono raccolte e conservate nel database, nel caso di guasti simili in futuro.

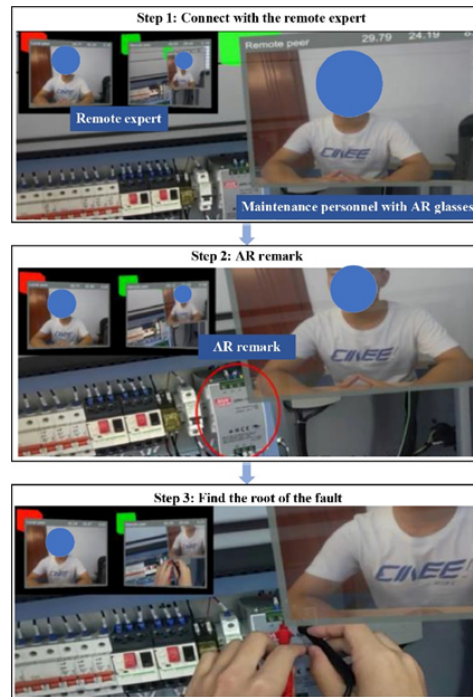
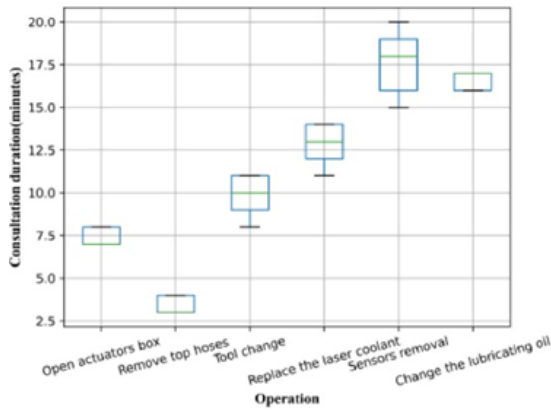
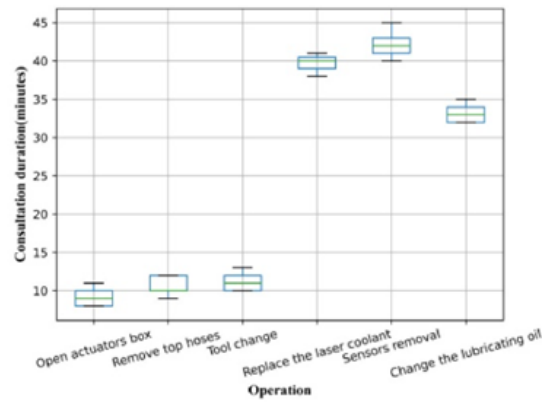


Figura 3.12 L'operatore viene aiutato da un esperto collegato da remoto per la risoluzione di un guasto imprevisto.

Il sistema AR-based proposto viene anche comparato con i metodi tradizionali, dove le istruzioni sono fornite tramite PDF. In particolare, vengono selezionate sei operazioni di manutenzione durante le quali gli operatori vengono ripresi. Dai video vengono cronometrati i tempi di consultazione delle informazioni prima che si passi allo svolgimento delle operazioni. Nella figura 3.13 sono indicati i risultati. La facilità delle prime tre operazioni non evidenzia sostanziali differenze tra i due metodi. Laddove la difficoltà si alza, cioè per le altre tre task, la soluzione di realtà aumentata evita agli operatori faticosi cambi di focus tra i manuali in formato PDF e le attività manuali, favorendo una più veloce comprensione delle informazioni, come evidenziato in figura 3.14.



(a) AR-supported maintenance



(b) PDF-supported maintenance

Figura 3.13 Sono rilevati i tempi di consultazione delle indicazioni per sei diverse operazioni di manutenzione. Nella figura a) sono riportati i minuti impiegati se le informazioni vengono fornite tramite l'HMD, nella figura b) se le stesse sono fornite tramite PDF.

(https://ars.els-cdn.com/content/image/1-s2.0-S073658452200045X-gr14_lrg.jpg)

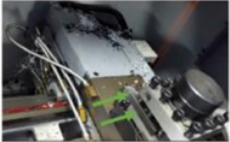



PDF-supported maintenance		AR-supported maintenance	
Illustration	Op.3	Operation	
	Lathing machine	<ol style="list-style-type: none"> 1.Remove the faulty knife tool from the tool holderand. 2.Check the type of the faulty knife tool. 3.Select the correct corresponding knife tool from the tool library. 4.Install the new knife tool with the allen wrench. 5.Complete the tool setting operation according to the manual. 	
	Lathing machine	The manual of the tool setting.	

Figura 3.14 Modello di informazioni fornite tramite PDF e modello di informazioni virtuali

(https://ars.els-cdn.com/content/image/1-s2.0-S073658452200045X-gr13_lrg.jpg)

E' chiaro quindi che, il sistema AR-based proposto permette agli operatori di ottenere performance migliori.

CONCLUSIONI

Nella prima sezione dell'elaborato si è indagato l'importanza dell'industria 4.0 nel panorama produttivo odierno, valutandone i principi fondamentali e le tecnologie ad essa associate. Si sono poi approfondite l'architettura di riferimento per la realizzazione delle fabbriche intelligenti e lo schema di funzionamento dei suoi componenti base, cioè i sistemi CPS. A conclusione della prima sezione si è discusso del futuro dell'Industria 4.0 con riferimento alla rivoluzione 5.0, un processo non più technology-driven ma value-driven, che punta a rendere le imprese del futuro sostenibili, umano-centriche e resilienti. Si è poi discussa l'importanza della manutenzione per le imprese, e come le più recenti politiche manutentive si leghino con le innovazioni introdotte dalla quarta rivoluzione industriale. Infine, nell'ultimo capitolo, si è analizzato come la realtà aumentata possa essere impiegata a supporto degli operatori durante gli interventi. Ciò che emerge dai casi studio è che la realtà aumentata rappresenta uno strumento estremamente utile nello svolgimento delle attività di manutenzione. Come si è potuto notare, i cambiamenti apportati ai sistemi di produzione dalle nuove tecnologie hanno portato la complessità degli interventi ad un livello maggiore, rendendo sempre più facile per l'operatore commettere errori. E' necessario uno strumento al servizio dei tecnici della manutenzione che possa fornire le informazioni necessarie nel posto giusto al momento opportuno, senza sovraccaricare gli operatori. In tal senso, la realtà aumentata favorisce la disponibilità delle informazioni necessarie sovrapponendo i contenuti virtuali all'ambiente di lavoro e alleggerendo il carico mentale degli operatori, costretti prima a districarsi tra indicazioni paper-based o PDF-based spesso poco chiare e, pertanto, inclini a essere recepite erroneamente. Nel caso di guasti non convenzionali, strumenti come gli Head Mounted Display consentono la comunicazione tra l'operatore e un esperto collegato da remoto, il quale può fornire tutte le informazioni necessarie in tempo reale, diminuendo di molto i tempi di fermo impianto. Si è visto come la realtà aumentata renda i tecnici più rapidi nelle loro operazioni, specialmente se si tratta di attività molto articolate. Si è potuto osservare anche come questa tecnologia si inserisca in un ambiente di Industria 4.0, e come può essere utilizzata in collaborazione con altri strumenti, come le applicazioni per smartphone e il deep-learning. A fianco dei comprovati vantaggi, è evidente che le soluzioni di realtà aumentata, e in particolare i device, abbiano ancora diversi limiti. Per quanto riguarda gli Head Mounted Display, sebbene permettano di mantenere le mani libere durante le operazioni, risultano scomodi se utilizzati per lunghi periodi. Al contrario, gli Hand Held

Display ad oggi sembrano la soluzione più matura, soprattutto per la già ampia diffusione di tablet e smartphone, ma necessitano di essere tenuti in mano, limitando l'utilizzo delle mani. Nella maggior parte degli interventi la possibilità di utilizzare entrambe le mani è di primaria importanza, pertanto il rendere indossabili gli HMD per lunghi periodi di lavoro rappresenta una delle sfide di maggiore importanza per il settore.

BIBLIOGRAFIA

1. Afolalu S.A., Ikumapayi O. M., Abdulkareem A., Soetan S.B., Emetere M.E., Ongbali S.O., Enviale roles of manufacturing processes in sustainable fourth industrial revolution – A case study of mechatronics, *Materials Today: Proceedings*, Volume 44, Part 1, 2021, Pages 2895-2901, ISSN 2214-7853, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.099>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221478532100122X>)
2. Baroroh D. K., Chu C., Wang L., Systematic literature review on augmented reality in smart manufacturing: Collaboration between human and computational intelligence, *Journal of Manufacturing Systems*, Volume 61,2021, Pages 696-711, ISSN 0278-6125, <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.10.017>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0278612520301862>)
3. Bigliardi B., Bottani E., Casella G., "Enabling technologies, application areas and impact of industry 4.0: a bibliographic analysis", *Procedia Manufacturing*, Volume 42,2020,Pages 322-326, ISSN 2351-9789, <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.02.086>
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S235197892030651X>)
4. Bottani E., Longo F., Nicoletti L., Padovano A., Tancredi G. P. C., Tebaldi L., Vetrano M., Vignali G. , Wearable and interactive mixed reality solutions for fault diagnosis and assistance in manufacturing systems: Implementation and testing in an aseptic bottling line, *Computers in Industry*, Volume 128, 2021, 103429, ISSN 0166-3615, <https://doi.org/10.1016/j.compind.2021.103429>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0166361521000361>)
5. Bottani E., Vignali G. (2019) Augmented reality technology in the manufacturing industry: A review of the last decade, *IISE Transactions*, 51:3, 284-310, DOI: 10.1080/24725854.2018.1493244
6. Breque M., De Nul L., Petridis A., European Commission, Directorate-General for Research and Innovation, *Industry 5.0: towards a sustainable, human-centric and resilient European industry*, Publications Office, 2021, <https://data.europa.eu/doi/10.2777/308407>
7. Burns T., Cosgrove J., and Doyle F., “A Review of Interoperability Standards for Industry 4.0.” *Procedia Manufacturing* 38 (2019): 646–653.

8. Carvalho N., Cazarini E., (2020). Industry 4.0 - What Is It?. 10.5772/intechopen.90068.
9. Chaurey S., Kalpande S. D., Gupta R. C., Toke L.K. "A Review on the Identification of Total Productive Maintenance Critical Success Factors for Effective Implementation in the Manufacturing Sector." Journal of quality in maintenance engineering. (2021).
10. Chen Y., Wang Q., Chen H., Song X., Tang H., Tian M. (2019). "An overview of augmented reality technology". Journal of Physics: Conference Series. 1237. 022082. 10.1088/1742-6596/1237/2/022082.
11. Cheng J., Chen K., Chen W. (2017). Comparison of marker-based AR and markerless AR: A case study on indoor decoration system. 10.24928/JC3-2017/0231.
12. Corallo A., Lazoi M., Lezzi M., Cybersecurity in the context of industry 4.0: A structured classification of critical assets and business impacts, Computers in Industry, Volume 114, 2020, 103165, ISSN 0166-3615, <https://doi.org/10.1016/j.compind.2019.103165>
13. de Paula Ferreira W. , Armellini F. , De Santa-Eulalia L. A. , Simulation in industry 4.0: A state-of-the-art review, Computers & Industrial Engineering, Volume 149, 2020, 106868, ISSN 0360-8352, <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106868> , <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360835220305635>
14. de Souza Cardoso L. F., Mariano F.C.M.Q., Zorzal E.R., A survey of industrial augmented reality, Computers & Industrial Engineering, Volume 139, 2020, 106159, ISSN 0360-8352, <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106159> . <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036083521930628X>
15. Dikhanbayeva D., Shaikholla S., Suleiman Z., and Turkyilmaz A., 2020. "Assessment of Industry 4.0 Maturity Models by Design Principles" Sustainability 12, no. 23: 9927. <https://doi.org/10.3390/su12239927>
16. Dilberoglu U. M., Gharehpapagh B., Yaman U., Dolen M., The Role of Additive Manufacturing in the Era of Industry 4.0, Procedia Manufacturing, Volume 11, 2017, Pages 545-554, ISSN 2351-9789, <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.148>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978917303529>
17. Eschen H., Kötter T. , Rodeck R. , Harnisch M., Schüppstuhl T., Augmented and Virtual Reality for Inspection and Maintenance Processes in the Aviation Industry, Procedia Manufacturing, Volume 19, 2018, Pages 156-163, ISSN 2351-9789,

- <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.01.022>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978918300222>)
18. Fernández del Amo I. , Erkoyuncu J. A. , Roy R. , Palmarini R. , Onoufriou D. , A systematic review of Augmented Reality content-related techniques for knowledge transfer in maintenance applications, *Computers in Industry*, Volume 103, 2018, Pages 47-71, ISSN 0166-3615, <https://doi.org/10.1016/j.compind.2018.08.007> .
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016636151830160X>)
19. Fernández del Amo I., Erkoyuncu J. A., Roy R., Wilding S., Augmented Reality in Maintenance: An information-centred design framework, *Procedia Manufacturing*, Volume 19, 2018, Pages 148-155, ISSN 2351-9789, <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.01.021>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978918300210>)
20. Fiorentino M., Uva A. E., Gattullo M., Debernardis S., Monno G., Augmented reality on large screen for interactive maintenance instructions, *Computers in Industry*, Volume 65, Issue 2, 2014, Pages 270-278, ISSN 0166-3615, <https://doi.org/10.1016/j.compind.2013.11.004>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0166361513002340>)
21. Frank A. G., Mendes G.H.S., Ayala N. F., Ghezzi A., Servitization and Industry 4.0 convergence in the digital transformation of product firms: A business model innovation perspective, *Technological Forecasting and Social Change*, Volume 141, 2019, Pages 341-351, ISSN 0040-1625, <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2019.01.014>.
22. Gupta P., Modularity enablers: a tool for Industry 4.0. *Life Cycle Reliab Saf Eng* 8, 157–163 (2019). <https://doi.org/10.1007/s41872-018-0067-3>
23. Habib M.K., Chimsom C., "Industry 4.0: Sustainability and Design Principles," 2019 20th International Conference on Research and Education in Mechatronics (REM), 2019, pp. 1-8, doi: 10.1109/REM.2019.8744120.
24. Han T., Yang B.-S., Development of an e-maintenance system integrating advanced techniques, *Computers in Industry*, Volume 57, Issue 6, 2006, Pages 569-580, ISSN 0166-3615, <https://doi.org/10.1016/j.compind.2006.02.009>
25. Hankel M., and Bosch Rexroth. "The reference architectural model industrie 4.0 (rami 4.0)." *ZVEI 2.2* (2015): 4-9.

26. Huang S. , Wang B. , Li X. , Zheng P. , Mourtzis D. , Wang L. , Industry 5.0 and Society 5.0—Comparison, complementation and co-evolution, Journal of Manufacturing Systems, Volume 64, 2022, Pages 424-428, ISSN 0278-6125, <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.07.010>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0278612522001224>)
27. Ireland, F. , Dale, B.G. (2001), "A study of total productive maintenance implementation", Journal of Quality in Maintenance Engineering, Vol. 7 No. 3, pp. 183-192. <https://doi.org/10.1108/13552510110404495>
28. Jain, A., Bhatti, R. , Singh, H. (2014), "Total productive maintenance (TPM) implementation practice: A literature review and directions", International Journal of Lean Six Sigma, Vol. 5 No. 3, pp. 293-323. <https://doi.org/10.1108/IJLSS-06-2013-0032>
29. K B, Ashwini and Patil, Preethi N and R, Savitha, Tracking Methods in Augmented Reality – Explore the Usage of Marker-Based Tracking (November 21, 2020). Proceedings of the 2nd International Conference on IoT, Social, Mobile, Analytics & Cloud in Computational Vision & Bio-Engineering (ISMAC-CVB 2020), Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=3734851> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3734851>
30. Karnik N. , Bora U. , Bhadri K. , Kadambi P. , Dhattrak P. , A comprehensive study on current and future trends towards the characteristics and enablers of industry 4.0, Journal of Industrial Information Integration, Volume 27, 2022, 100294, ISSN 2452-414X, <https://doi.org/10.1016/j.jii.2021.100294>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2452414X21000911>)
31. Kehayov M., Holder L., Koch V., Application of artificial intelligence technology in the manufacturing process and purchasing and supply management, Procedia Computer Science, Volume 200, 2022, Pages 1209-1217,ISSN 1877-0509, <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.01.321>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050922003301>)
32. Korchagin A., Deniskin Y., Pocebneva I., Vasilyeva O., Lean Maintenance 4.0: implementation for aviation industry, Transportation Research Procedia, Volume 63, 2022, Pages 1521-1533, ISSN 2352-1465, <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.06.164>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352146522004197>)
33. Lambán M.P., Morella P., Royo J. , Sánchez J. C., Using industry 4.0 to face the challenges of predictive maintenance: A key performance indicators development in a

- cyber physical system, *Computers & Industrial Engineering*, Volume 171, 2022, 108400, ISSN 0360-8352, <https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108400>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360835222004417>)
34. Lee J., Bagheri B., Kao H., A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems, *Manufacturing Letters*, Volume 3, 2015, Pages 18-23, ISSN, 2213-8463, <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2014.12.001>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221384631400025X>)
35. Lee W. H., Lee K. H., Lee J. M., Nam B. W. , Registration method for maintenance-work support based on augmented-reality-model generation from drawing data, *Journal of Computational Design and Engineering*, Volume 7, Issue 6, December 2020, Pages 775–787, <https://doi.org/10.1093/jcde/qwaa056>
36. Liu C., Zhu H., Tang D., Nie Q., Zhou T., Wang L., Song Y. , Probing an intelligent predictive maintenance approach with deep learning and augmented reality for machine tools in IoT-enabled manufacturing, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Volume 77, 2022, 102357, ISSN 0736-5845, <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2022.102357>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S073658452200045X>)
37. Lu Y. , Zheng H. , Chand S. , Xia W. , Liu Z. , Xu X. , Wang L. , Qin Z. , Bao J. , Outlook on human-centric manufacturing towards Industry 5.0, *Journal of Manufacturing Systems*, Volume 62, 2022, Pages 612-627, ISSN 0278-6125, <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.02.001>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0278612522000164>)
38. Manzini R., Regattieri A. *Manutenzione dei sistemi di produzione*. Società Editrice Esculapio, 2008.
39. Martins A., Costelha H., Neves C., "Shop Floor Virtualization and Industry 4.0," 2019 IEEE International Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions (ICARSC), 2019, pp. 1-6, doi:10.1109/ICARSC.2019.8733657
40. Mourtzis D., Gargallis A., Zogopoulos V., Modelling of Customer Oriented Applications in Product Lifecycle using RAMI 4.0, *Procedia Manufacturing*, Volume 28, 2019, Pages 31-36, ISSN 2351-9789, <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.12.006>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978918313489>)

41. Munirathinam S., Ramadoss B., "Big data predictive analytics for proactive semiconductor equipment maintenance," 2014 IEEE International Conference on Big Data (Big Data), 2014, pp. 893-902, doi: 10.1109/BigData.2014.7004320
42. Ouadah A., Zemmouchi-Ghomari L., Salhi N., Selecting an appropriate supervised machine learning algorithm for predictive maintenance. *Int J Adv Manuf Technol* 119, 4277–4301 (2022). <https://doi.org/10.1007/s00170-021-08551-9>
43. Palmarini R., Erkoyuncu J. A., Roy R. , Torabmostaedi H. , A systematic review of augmented reality applications in maintenance, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Volume 49, 2018, Pages 215-228, ISSN 0736-5845, <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2017.06.002>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0736584517300686>)
44. Philbeck T., Davis N., “THE FOURTH INDUSTRIAL REVOLUTION: SHAPING A NEW ERA.” *Journal of International Affairs* 72, no. 1 (2018): 17–22. <https://www.jstor.org/stable/26588339>.
45. Poór P., J. Basl J., Zenisek D., "Predictive Maintenance 4.0 as next evolution step in industrial maintenance development," 2019 International Research Conference on Smart Computing and Systems Engineering (SCSE), 2019, pp. 245-253, doi: 10.23919/SCSE.2019.8842659.
46. Prassida G.F., Asfari U., A conceptual model for the acceptance of collaborative robots in industry 5.0, *Procedia Computer Science*, Volume 197, 2022, Pages 61-67, ISSN 1877-0509, <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.12.118>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050921023425>)
47. Quandt M., Beinke T., Freitag M., User-Centered Evaluation of an Augmented Reality-based Assistance System for Maintenance, *Procedia CIRP*, Volume 93, 2020, Pages 921-926, ISSN 2212-8271, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.03.053>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827120306612>)
48. Radziwon A., Bilberg A., Bogers M., Skov Madsen E., The Smart Factory: Exploring Adaptive and Flexible Manufacturing Solutions, *Procedia Engineering*, Volume 69, 2014, Pages 1184-1190, ISSN 1877-7058, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.03.108>.
49. Re G.M., Bordegoni M. (2014). An Augmented Reality Framework for Supporting and Monitoring Operators during Maintenance Tasks. In: Shumaker, R., Lackey, S. (eds) *Virtual, Augmented and Mixed Reality. Applications of Virtual and Augmented*

- Reality. VAMR 2014. Lecture Notes in Computer Science, vol 8526. Springer, Cham.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-07464-1_41
50. Rosenzweig E., The Strategic Model. Successful User Experience: Strategies and Roadmaps, 2015.
51. Segovia M., Garcia-Alfaro J. Design, Modeling and Implementation of Digital Twins. *Sensors*. 2022; 22(14):5396. <https://doi.org/10.3390/s22145396>
52. Sharma A.K. , Bhandari R. , Pinca-Bretotean C. , Sharma C. , Dhakad S.K. , Mathur A. , A study of trends and industrial prospects of Industry 4.0, *Materials Today: Proceedings*, Volume 47, Part 10, 2021, Pages 2364-2369, ISSN 2214-7853, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.321>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785321032417>)
53. Singh R., Gohil A., Shah D., Desai S., Total Productive Maintenance (TPM) Implementation in a Machine Shop: A Case Study, *Procedia Engineering*, Volume 51, 2013, Pages 592-599, ISSN 1877-7058, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.01.084>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705813000854>)
54. Tortorella G. L., Fogliatto S. F., Paulo A. Cauchick-Miguel, Sherah Kurnia, Daniel Jurburg, Integration of Industry 4.0 technologies into Total Productive Maintenance practices, *International Journal of Production Economics*, Volume 240, 2021, 108224, ISSN 0925-5273, <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2021.108224>.
55. Vogel-Heuser B., Hess D., "Guest Editorial Industry 4.0—Prerequisites and Visions," in *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, vol. 13, no. 2, pp. 411-413, April 2016, doi:10.1109/TASE.2016.2523639
56. Xu X., Lu Y., Vogel-Heuser B., Wang L., Industry 4.0 and Industry 5.0—Inception, conception and perception, *Journal of Manufacturing Systems*, Volume 61, 2021, Pages 530-535, ISSN 0278-6125, <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.10.006>
57. Yamamoto K., Milstead M., Lloyd R. (2019). A review of the development of lean manufacturing and related lean practices: The case of Toyota Production System and managerial thinking. *International Management Review*, 15(2), 21-90.
58. Yang T., Yi X., Lu S., Johansson K. H., Chai T., Intelligent Manufacturing for the Process Industry Driven by Industrial Artificial Intelligence, *Engineering*, Volume 7, Issue 9, 2021, Pages 1224-1230, ISSN 2095-8099, <https://doi.org/10.1016/j.eng.2021.04.023>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095809921003064>)

59. Zhu J., Ong S.K., Nee A.Y.C. A context-aware augmented reality system to assist the maintenance operators. *Int J Interact Des Manuf* 8, 293–304 (2014). <https://doi.org/10.1007/s12008-013-0199-7>
60. Zolotová I., Papcun P., Kajáti E., Miškuf M., Mocnej J., “Smart and cognitive solutions for Operator 4.0: Laboratory H-CPPS case studies”, *Computers & Industrial Engineering*, Volume 139, 2020, 105471, ISSN 0360-8352, <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.10.032> ,
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360835218305126>)

SITOGRAFIA

- <https://www.forbes.com/sites/bernardmarr/2018/09/02/what-is-industry-4-0-heres-a-super-easy-explanation-for-anyone/?sh=789c44969788> , 23/08/2022
- <https://www.desouttertools.com/industry-4-0/news/503/industrial-revolution-from-industry-1-0-to-industry-4-0> , 8/08/2022
- https://it.wikipedia.org/wiki/Terza_rivoluzione_industriale , 8/08/2022
- <https://azure.microsoft.com/it-it/resources/cloud-computing-dictionary/what-is-cloud-computing/#benefits> , 12/08/2022
- <https://www.mckinsey.com/business-functions/quantumblack/our-insights/an-executives-guide-to-ai> , 12/08/2022
- <https://www.bcg.com/it-it/publications/2013/advanced-analytics-how-get-started-big-data> , 12/08/2022
- <https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/EN/Downloads/Publikation/rami40-an-introduction.html> , 6/09/2022
- <https://ceimagazine.ceinorme.it/ceifocus/il-background-tecnologico-e-normativo-di-industria-4-0/> , 6/09/2022
- https://www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Themen/Industrie_4.0/Das_Referenzarchitekturmodell_RAMI_4.0_und_die_Industrie_4.0-Komponente/pdf/ZVEI-Industrie-4-0-RAMI-40-English.pdf , 8/08/2022
- <https://www.intesa.it/servitization-4-0-cose-e-il-ruolo-delle-tecnologie/> 24/08/2022
- <https://www.forbes.com/sites/sap/2022/03/28/what-is-servitization-and-how-can-it-help-your-business/?sh=2ba8a4db7cf5> , 24/08/2022
- <https://unric.org/it/agenda-2030/> , 14/08/2022

- <https://www.forbes.com/sites/forbestechcouncil/2020/10/20/how-is-big-data-analytics-using-machine-learning/?sh=712ccfba71d2> , 24/08/2022