



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea triennale in Ingegneria Gestionale

Definizione di modelli di Digital Twin di macchine utensili

Definition of Digital Twin models of machine tools

Relatore: Chiar.mo/a

Prof. Maurizio Bevilacqua

Correlatore:

Ing. Giovanni Mazzuto

Tesi di Laurea di:

Leonardo Ercoli

A.A. 2019 / 2020

Indice

Introduzione	8
1. Cenni introduttivi Industria 4.0	10
1.1 La Storia	11
1.2 “Smart”	14
1.3 Smart Factory	16
1.3.1 Caratteristiche e Tecnologie Abilitanti	17
1.3.2 Vantaggi della fabbrica intelligente	18
1.4 Sicurezza Informatica	19
2. Digital Twin	20
2.1 Introduzione al concetto di Digital Twin	20
2.2 Perché si ha la necessità di usare un Digital Twin?	22
2.3 Applicazioni dei Digital Twin	23
2.3.1 La produzione Aziendale	23
2.3.2 Automobilistica	24
2.3.3 Assistenza sanitaria	24
2.3.4 Vendita sul mercato	25
2.3.5 Città Smart	25
2.4 Il possibile futuro dei Digital Twin	26
3. Macchine Utensili	27
3.1 Storia	27
3.2 Funzionamento	28
3.3 Esempi di macchine utensili	29
3.3.1 Macchina utensile: Fresatrice	29
3.3.2 Macchina utensile: Tornio	31
4. Definizione di modelli di Digital Twin di macchine utensili	33

Fase 1: Generazione del modello	33
Fase 2: Simulazione del processo	34
Fase 3: Controllo dei processi	35
Fase 4: Identificazione dei guasti	36
Fase 5: Aggiornamenti	37
4.1 Lavorazione Virtuale.....	38
4.2 Macchine utensili Virtuali	39
4.3 Monitoraggio e gestione dei Dati	40
4.3 Casi di applicazione	41
Caso 1: Digital Twin di una Fresatrice Sherline	41
Caso 2: Possibile implementazione di Digital Twin di un Tornio con implementazione di un visore VR	43
5. Conclusioni.....	45
6. Riferimenti.	46

Figura 1 Fonte- https://team3d.it/product/digital-twin/	8
Figura 2 Immagine rappresentativa (Fonte- http://icxt.di.unito.it/laboratori/smart-factory-and-materials-lab/)	8
Figura 3 (Fonte- https://www.italiaoggi.it/news/industria-4-0-prima-il-bonus-poi-l-accertamento-2425354).....	10
Figura 4 Le 4 rivoluzioni industriali (fonte- https://it.wikipedia.org/wiki/Industria_4.0)	11
Figura 5 Esempio di realtà aumentata con VR (fonte- https://virsabi.dk/nyt-initiativ-saetter-fokus-pa-virtual-og-augmented-reality-i-dansk-erhvervsliv/)	13
Figura 6 Fonte- https://www.eldomtrade.it/2015/08/28/smart-home-negli-usa-grande-successo-per-oggetti-e-case-connesse/	14
Figura 7 Smart Device (fonte- https://www.amazon.it/Atomi-Smart-WiFi-Caffettiera-compatibile/dp/B081R8HN17	14
Figura 8 Fonte- https://embeddedams.nl/different-ways-to-connect-iot-devices-to-transmit-and-receive-data/	15
Figura 9 Fonte- https://data-flair.training/blogs/iot-devices/	15
Figura 10 Smart Factory (fonte- https://www.econerre.it/agenda/webinar-su-diventa-una-smart-factory-in-tre-passi/).....	16
Figura 11 Tecnologie abilitanti della Boston Consulting (Fonte- embracing-industry-4.0-rediscovering-growth.html)	17
Figura 12 Fonte- https://www.beantech.it/blog/articoli/sicurezza-informatica-aziendale/ ..	19
Figura 13 esempio grafico di Digital Twin (fonte- https://www.plm.automation.siemens.com/global/it/webinar/the-iiot-digital-twin/41614)	20
Figura 14 Digital Twin di una turbina (fonte- https://job-wizards.com/en/digital-twins-doubling-the-potential-for-innovation/).....	20
Figura 15 Sicurezza sul lavoro (fonte- https://www.iusinitinere.it/la-sicurezza-sul-lavoro-un-dovere-stringente-quanto-fondamentale-rispettare-1420)	22
Figura16 Esempio applicazione Digital Twins per la produzione aziendale. (fonte- https://www.plm.automation.siemens.com/global/it/webinar/digital-twin-in-manufacturing/68561)	23
Figura 17 Esempio applicazione Digital Twins per la produzione aziendale. (fonte- https://www.automotiveit.com/digital-randd/digital-twins-play-a-role-in-all-digitalization-projects-but-data-consolidation-slows-down-implementation/5763.article)	24

Figura 18 Esempio applicazione Digital Twins per assistenza sanitaria. (fonte- https://www.01health.it/featured/ansys-digital-twin/)	24
Figura 19 Immagine rappresentativa (fonte- https://www.theprocurement.it/innovazione/come-skf-usa-un-digital-twin-per-pianificare-la-supply-chain/).....	25
Figura 20 Esempio di Città smart(fonte- https://industrywired.com/how-digital-twins-can-help-create-smart-cities/)	25
Figura 21 Fonte- https://www.agendadigitale.eu/sicurezza/digital-twin-per-la-sicurezza-informatica-ecco-vantaggi-e-limiti/	26
<i>Figura 22 Stampatrice Meccanica (Fonte- http://georgianagarden.blogspot.com/2011/08/la-rotativa-e-il-giornale-quotidiano.html)</i>	<i>27</i>
Figura 23 Vari tipi di macchine utensili(Fonte- https://meccanicatecnica.altervista.org/utensili-e-macchine-utensili/).....	28
Figura 24 Fresatrice con indicazione nomi pezzi (fonte- https://www.compravendita-macchinari-usati.it/fresatrice-principi-funzionamento/).....	29
Figura 25 Struttura Tornio (fonte- https://www.lavorincasa.it/tornitura-dei-metalli/)	31
Figura 26 schema processo progettazione dei pezzi ed automazione (fonte iw – Institute for Machine Tools and Industrial Management)	33
Figura 27 Pezzo Prima dell’ottimizzazione tramite software(fonte Schnoes, F., and M. F. Zaeh. "Model-based Planning of Machining Operations for Industrial Robots." Procedia CIRP82 (2019): 497-502)	34
Figura 28 Pezzo Dopo l’ottimizzazione tramite software(fonte Schnoes, F., and M. F. Zaeh. "Model-based Planning of Machining Operations for Industrial Robots." Procedia CIRP82 (2019): 497-502).....	34
Figura 29 Schema comunicazione tra Smart Box, Sensori e Cloud (fonte iw – Institute for Machine Tools and Industrial Management)	35
Figura 30 Alcuni esempi di andamento di diversi sensori (fonte - iw – Institute for Machine Tools and Industrial Management)	35
Figura 31 Schema di controllo dati (fonte- Schnoes, F., and M. F. Zaeh. "Model-based Planning of Machining Operations for Industrial Robots." Procedia CIRP82 (2019).)	36
Figura 32 (fonte- https://www.tecnelab.it/news/il-fatto/dmg-mori-propone-tecnologie-e-soluzioni-davanguardia)	37

Figura 33 Deform analisi pezzo (fonte- https://www.deform.com/wp-content/uploads/2015/06/DEFORM-3D-Machining.pdf)	38
Figura 34Costruzione utilizzando MSC ADAMS (fonte- https://www.mscsoftware.com/it/product/adams-machinery)	39
Figura 35 Sensori E2B e E2FM (fonte- https://industrial.omron.it/it/solutions/product-solutions/position-detection-bundle)	40
Figura 36 Schema progetto (Fonte- CIE48 Proceedings, 2-5 December 2018, The University of Auckland).....	41
Figura 37 Applicazione Web (Fonte-CIE48 Proceedings, 2-5 December 2018, The University of Auckland).....	42
Figura 38Gemello digitale Tornio (Fonte- https://www.autonsistemi.it/software-cam-per-tornitura/).....	43
Figura 39 Fonte- industry Experts, Secondary Research, and MarketstandMarkets Analysis	45

Introduzione



Figura 1 Fonte-<https://team3d.it/product/digital-twin/>

Ci troviamo in un periodo dove l'unione tra strategia ed innovazione tecnologica nel panorama aziendale rappresentano l'unico modo per poter effettivamente diventare o continuare ad essere quanto più competitivi nel mondo del business.

La principale protagonista di questo periodo è la Quarta Rivoluzione Industriale: prende il nome di "industry 4.0", che abilitata da tecnologie sempre più innovative permette di semplificare ed ottimizzare quanto più possibile i processi di produzione e gestione di una azienda.

Nascono così quelle che si definiscono "Smart Industry" ovvero strutture produttive completamente automatizzate all'interno delle quali il concetto mano d'opera tende a



Figura 2 Immagine rappresentativa (Fonte-
<http://icxt.di.unito.it/laboratori/smart-factory-and-materials-lab/>)

scomparire e invece appaiono nuove tecnologie come Internet of Things e Artificial Intelligence che consentono un'interazione tra robot e persone.

Come è possibile intuire, da questo aumento di tecnologia,

all'interno delle aziende si genera una grandissima mole di informazioni.

Queste informazioni vengono arricchite dall'utilizzo dei Big Data, con l'obiettivo di tenere in considerazione la diminuzione dei tempi di produzione e l'aumento della qualità dei prodotti. Si introduce quindi una nuova tecnologia atta a concretizzare i risultati ottenuti; questa tecnologia prende il nome di Digital Twin (Gemello Digitale).

Il Digital Twin rappresenta una vera e propria rivoluzione nel contesto delle aziende, in quanto, si ha la possibilità di creare prima una copia virtuale del prodotto poi, una volta che la copia virtuale è stata testata e rispetta i requisiti, di crearne una materiale.

Il processo di digitalizzazione è di tipo top down [1] che a differenza della logica bottom up ci fornisce un duplice vantaggio:

- ottenere in modo semplice i dati necessari alla taratura del modello;
- fornire uno strumento applicativo semplice e veloce.

Quindi l'utilizzo delle tecnologie digitali citate precedentemente ha permesso una pianificazione virtuale strategica di prodotti e processi, permettendoci di analizzarli, valutandone gli effettivi vantaggi, con strumenti di simulazione.

L'obiettivo dello studio di questo elaborato è capire quali sono le possibili applicazioni di modelli di Digital Twin di macchine utensili dando una introduzione generica per quanto riguarda l'industry 4.0, i Digital Twin e le macchine utensili.

1. Cenni introduttivi Industria 4.0



Figura 3 (Fonte- <https://www.italiaoggi.it/news/industria-4-0-prima-il-bonus-poi-l-accertamento-2425354>)

“Industria 4.0”: produzione caratterizzata da una crescente connessione tra mondo virtuale e mondo reale. Attraverso la cosiddetta “Internet delle Cose” si ha infatti la connessione tra oggetti che è resa possibile, congiuntamente: dalla disponibilità di sensori e di attuatori sempre più piccoli, sempre meno costosi e con consumi sempre più ridotti; dalla presenza di connessioni a internet (anche wireless) a basso costo e pressoché ubiquo e dalla disponibilità di indirizzi sulla rete in numero praticamente illimitato e quindi attribuibili anche ad oggetti di poco valore. La connessione tra oggetti genera una massa enorme di dati disponibili in tempo reale (“big data”) che possono contenere informazioni utili allo scopo di aumentare l’efficienza dei processi produttivi, la conoscenza dell’utilizzo dei prodotti, la verifica della rispondenza dei modelli alla realtà. L’utilizzo crescente di sistemi Ciber-Fisici porterà a livelli di automazione industriale sempre più elevati. {Federmeccanica}

1.1 La Storia

Con il passare degli anni il concetto di innovazione è diventato sempre più importante in quanto ogni nuova rivoluzione industriale porta a dei cambiamenti radicali che sconvolgono completamente il mercato e costringono tutte le aziende ad aggiornarsi in modo da poter rimanere competitive.

Ad oggi sono state quattro le rivoluzioni industriali ed ognuna di esse ha avuto un importante impatto nell'economia globale. Come illustrato nella Figura4, di seguito verranno descritti brevemente i principali cambiamenti ai quali abbiamo assistito fino ad oggi in ognuna della quattro rivoluzioni.

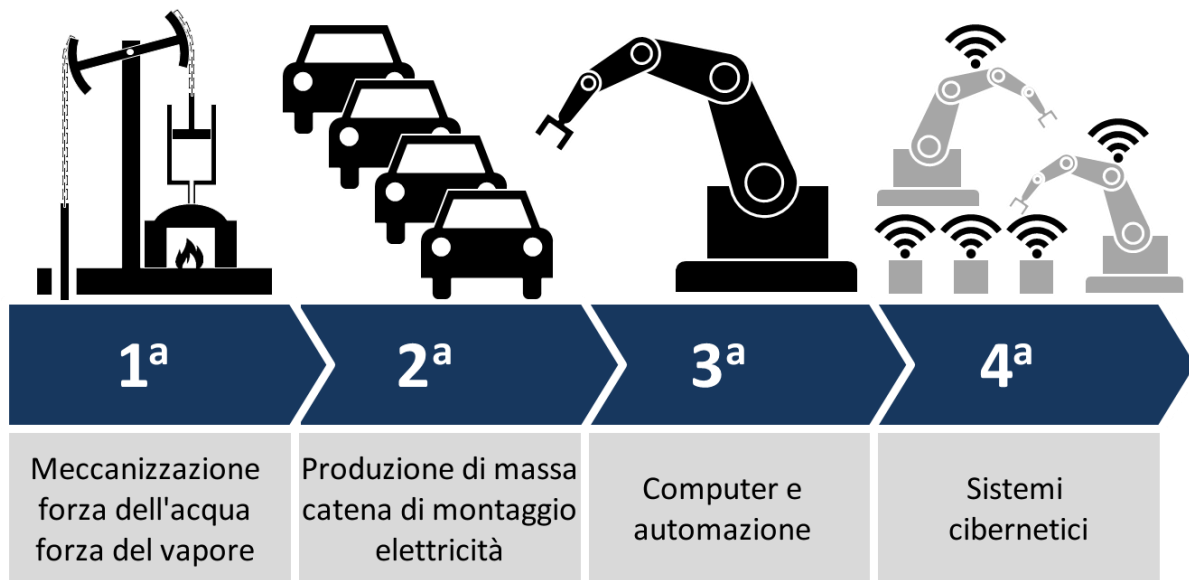


Figura 4 Le 4 rivoluzioni industriali (fonte- https://it.wikipedia.org/wiki/Industria_4.0)

1784 – Industria 1.0

Con Industria 1.0 si fa riferimento ad una rivoluzione della manifattura in termini di utilizzo di energia.

Nasce in questo periodo la macchina a vapore [2] che utilizza il carbone come fonte di energia, permettendo così di abbandonare i mulini e migliorare la produzione velocizzandone i processi.

1870 – Industria 2.0

L'Industria 2.0 rappresenta la seconda generazione energetica[3], la quale vede come principali basi l'utilizzo dell'elettricità e del petrolio per l'alimentazione delle macchine.

Tali macchine diventano molto più veloci e potenti dando vita così al concetto di catena di montaggio ed inaugurando l'era della produzione di massa.

1970 – Industria 3.0

Grazie all'industria 3.0 si ha un vero e proprio incremento delle produzioni con l'utilizzo dell'informatica e dell'elettronica [4] generando un conseguente aumento dei livelli di automazione.

Una importante innovazione riguarda l'organizzazione delle aziende, le quali, grazie alla digitalizzazione, agevolano il lavoro delle persone migliorando così la produzione, le condizioni di vita e la sicurezza sul lavoro.

2011– Industria 4.0

Finalmente nel 2011 si raggiunge il periodo conosciuto come industria 4.0 il quale grazie al mix di sensoristica, robotica, programmazione di macchinari e connessione tra gli stessi [5], permette alle aziende di sviluppare modalità del tutto innovative relativamente alla produzione e gestione dei prodotti.

Sistemi di nuova generazione, ad esempio software gestionali, vengono implementati nelle industrie ottimizzando tempi e costi di produzione.

Viene inoltre introdotta una nuova tecnologia chiamata augmented reality (AR) capace di dare supporto alla pianificazione industriale mediante l'interfaccia uomo-macchina.[6]



Figura 5 Esempio di realtà aumentata con VR (fonte-<https://virsabi.dk/nyt-initiativ-saetter-fokus-pa-virtual-og-augmented-reality-i-dansk-erhvervsliv/>)

Come è mostrato nella Figura5, si può notare un chiaro esempio di interazione tra Uomo e Macchina: infatti mediante l'uso di apposite tecnologie, occhiali per la realtà aumentata, è reso possibile il controllo di alcuni parametri atti a garantire il corretto funzionamento della macchina.

1.2 “Smart”

L'ormai famosissimo termine “Smart”, al quale accostiamo il nome di molteplici oggetti che in



Figura 6 Fonte- <https://www.eldomtrade.it/2015/08/28/smart-home-negli-usa-grande-successo-per-oggetti-e-case-connesse/>

passato venivano considerati tradizionali come smartphone o smarthome, ci fa capire che l'oggetto in questione è tecnologicamente avanzato.

Nel corso degli ultimi anni lo sviluppo tecnologico sta alimentando la trasformazione digitale di abitudini sia in ambito privato che aziendale e questa

trasformazione sta portando a cambiamenti radicali nella realizzazione dei processi produttivi, che si ripercuotono anche nel settore manifatturiero. Tale trasformazione ha alimentato l'idea comune di vivere una nuova rivoluzione industriale.

- **Smart devices:** Sono dispositivi molto semplici da programmare caratterizzati da un basso livello di automazione.

In Figura7 troviamo di una caffettiera che può essere programmata per preparare il caffè in un determinato momento della giornata.



Figura 7 Smart Device (fonte- <https://www.amazon.it/Atomi-Smart-WiFi-Caffettiera-compatibile/dp/B081R8HN17>)

- **Smart connected devices:** Dispositivi controllati a distanza tramite Bluetooth, LTE, Wi-Fi, via cavo o altri mezzi di connettività. Dei possibili esempi possono essere dispositivi come lampadine led con accensione a distanza o altri come riportato nella Figura8.



Figura 8 Fonte- <https://embeddedams.nl/different-ways-to-connect-iot-devices-to-transmit-and-receive-data/>

- **IoT devices:** Sono dispositivi molto simili a quelli precedentemente citati ma si presentano come una combinazione di prodotto, applicazione, analisi e Internet. Hanno la caratteristica di poter essere prontamente aggiornati e automatizzati. Un classico esempio potrebbe essere Amazon Echo o Google Home.

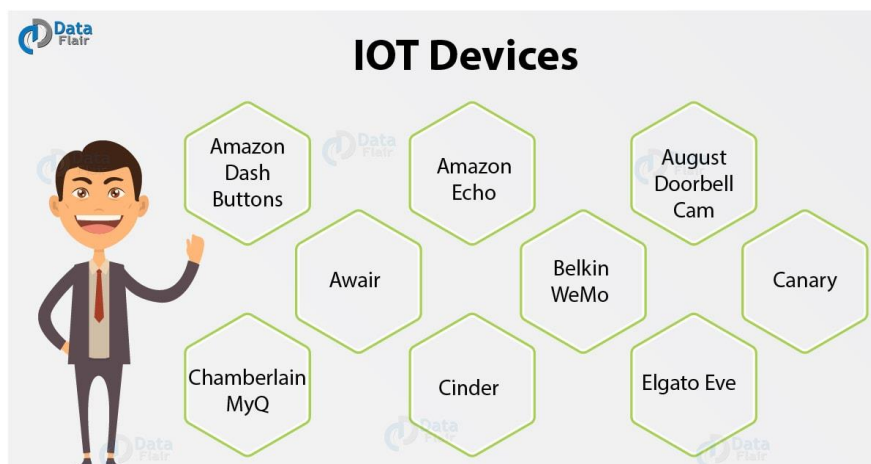


Figura 9 Fonte- <https://data-flair.training/blogs/iot-devices/>

1.3 Smart Factory



Figura 10 Smart Factory (fonte- <https://www.econerre.it/agenda/webinar-su-diventa-una-smart-factory-in-tre-passi/>)

Andando ad introdurre il concetto di Smart Factory non si può prescindere dal citare il termine automazione. Si definisce Smart Factory [7] una azienda che utilizza sistemi automatizzati ed intelligenti, dando l'opportunità a macchine robotizzate di prendere decisioni in maniera autonoma facendole interagire con l'ambiente circostante.

Storicamente situazioni in cui le macchine hanno preso delle decisioni si basavano sull'apertura di una valvola o sull'accensione e spegnimento di una pompa, ma attualmente con l'ingresso dei cyber-physical system e l'applicazione di intelligenza artificiale[8], le fabbriche riescono a risultare più autonome ed efficienti. Naturalmente la presenza dell'uomo è ancora necessaria e la preparazione professionale dei dipendenti è fondamentale.

La Smart Factory è quindi un sistema flessibile che ottimizza le prestazioni, adattandosi a gestire anche autonomamente interi processi produttivi.

Un altro importante aspetto è quello che le Smart Factory sono in grado di connettersi anche a una rete globale di sistemi di produzione simili, in modo da poter confrontare dati come le varie tempistiche di produzione o dati relativi alle usure delle macchine.

Bisogna inoltre considerare che la fabbrica non deve mai considerarsi come "conclusa", ma visto il rapido sviluppo tecnologico si deve essere sempre pronti ad aggiornare e/o modernizzare i vari macchinari e software utilizzati.

Il punto di forza di una fabbrica intelligente è la sua capacità di evolversi e crescere in base alle necessità del mercato come ad esempio: il variare della domanda dei clienti, l'espansione in nuovi mercati, lo sviluppo di nuovi prodotti o servizi.

1.3.1 Caratteristiche e Tecnologie Abilitanti

Una fabbrica intelligente ha bisogno di conoscere ed utilizzare specifiche tecnologie abilitanti [9]. Di seguito vengono riportate alcune delle più importanti: [10][11]

- La robotica avanzata: macchinari dotati di intelligenza artificiale in grado di comunicare tra loro e rapidamente programmabili.
- Big Data e Analytics: gestione di dati attraverso sistemi aperti atti a prevedere e ottimizzare i processi.
- Realtà aumentata: sistemi di visione virtuale attraverso dispositivi indossabili.
- Cyber-Security: garanzia di sicurezza durante le operazioni in rete.
- Cloud: capacità di gestire elevate quantità di dati in rete.
- Integrazione orizzontale e/o verticale: scambio di informazioni tra tutti gli attori del processo produttivo.
- Simulazione: possibilità di simulare virtualmente dei processi prima di attuarli.

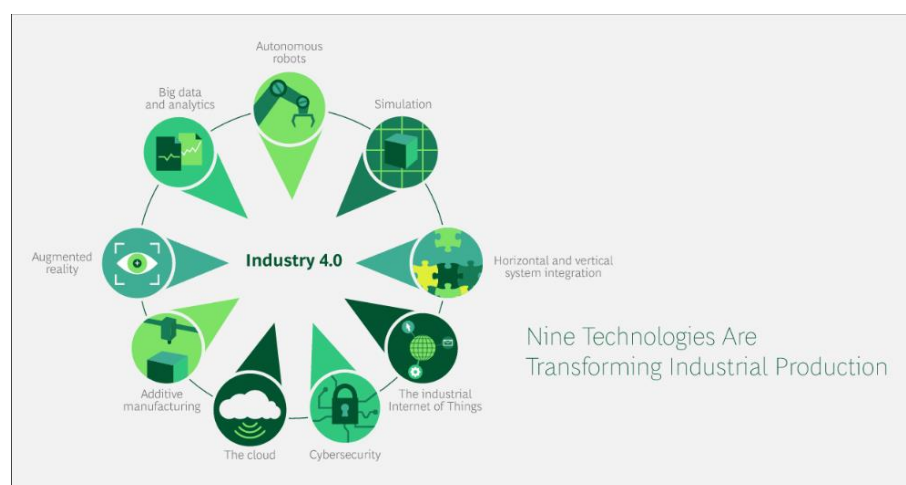


Figura 11 Tecnologie abilitanti della Boston Consulting (Fonte- embracing-industry-4.0-rediscovering-growth.html)

1.3.2 Vantaggi della fabbrica intelligente

La decisione su come intraprendere un'iniziativa di fabbrica intelligente dovrebbe essere allineata con le esigenze specifiche di una impresa, in quanto le molteplici ragioni riguardano l'efficienza, la qualità, i costi, la sicurezza e la sostenibilità delle risorse che si traducono in una migliore redditività e qualità del prodotto [12].

Di seguito vengono elencati alcuni vantaggi di una fabbrica intelligente:

- **Efficienza:** grazie alle continue analisi che vengono effettuate dai sensori possono essere rivelati rallentamenti o problemi relativi alla configurazione delle stazioni che, grazie alla tecnologia di una smart factory efficiente, vengono corrette in maniera autonoma dalle stesse. È proprio questo fattore a distinguere una fabbrica intelligente da una con automazione tradizionale.
- **Qualità:** la qualità è da sempre una caratteristica fondamentale, grazie all'auto ottimizzazione una smart factory è in grado di prevedere ed evidenziare difetti di qualità e identificare possibili problematiche meccaniche ambientali o umane che potrebbero compromettere la qualità finale e i tempi di consegna dei prodotti. Andando ad ottimizzare la qualità di produzione si vanno a diminuire i componenti scartati e si aumentano i tassi di rendimento.
- **Produzione più economica [13] :** andando ad ottimizzare i processi di produzione una causa diretta è quella del minor costo generale del prodotto.
- **Sicurezza e sostenibilità:** i vantaggi rilevati riguardano anche la sicurezza sul lavoro e la sostenibilità ambientale. L'efficienza operativa si traduce in un minore impatto ambientale rispetto ad un processo di fabbricazione convenzionale, inoltre una maggiore automazione nel processo di produzione comporta una minore possibilità di incorrere in errori umani e incidenti industriali, diminuendo quindi il numero di infortuni sul lavoro.

1.4 Sicurezza Informatica



Figura 12 Fonte- <https://www.beantech.it/blog/articoli/sicurezza-informatica-aziendale/>

Ad oggi sono numerosissimi gli attacchi informatici che feriscono gravemente moltissime aziende [14].

Ci sono diversi tipi di attacchi che possono colpire un'azienda e sono:

- Truffe: recente esempio Cryptolocker [15]
- Estorsione
- Intrusione e spionaggio
- Interruzione forzata dei servizi

Vengono elencate di seguito delle competenze fondamentali che dovrebbero essere presenti nelle aziende al fine di diminuire i rischi relativi a questi attacchi:

- Capacità di monitorare, prevenire e rilevare anomalie causate da violazioni della sicurezza.
- Conoscenza dei nuovi protocolli di sicurezza utilizzati dalle soluzioni Industry 4.0 e IoT.
- Controllo delle caratteristiche di sicurezza dei componenti di nuove macchine e servizi correlati;

Un'altra importante accortezza da prendere sarà quella di dare prima una formazione consona in campo di sicurezza informatica in relazione ai macchinari ai propri dipendenti sulle tecnologie che si andranno ad inserire, poi valutare l'inserimento delle nuove tecnologie.

2. Digital Twin

2.1 Introduzione al concetto di Digital Twin

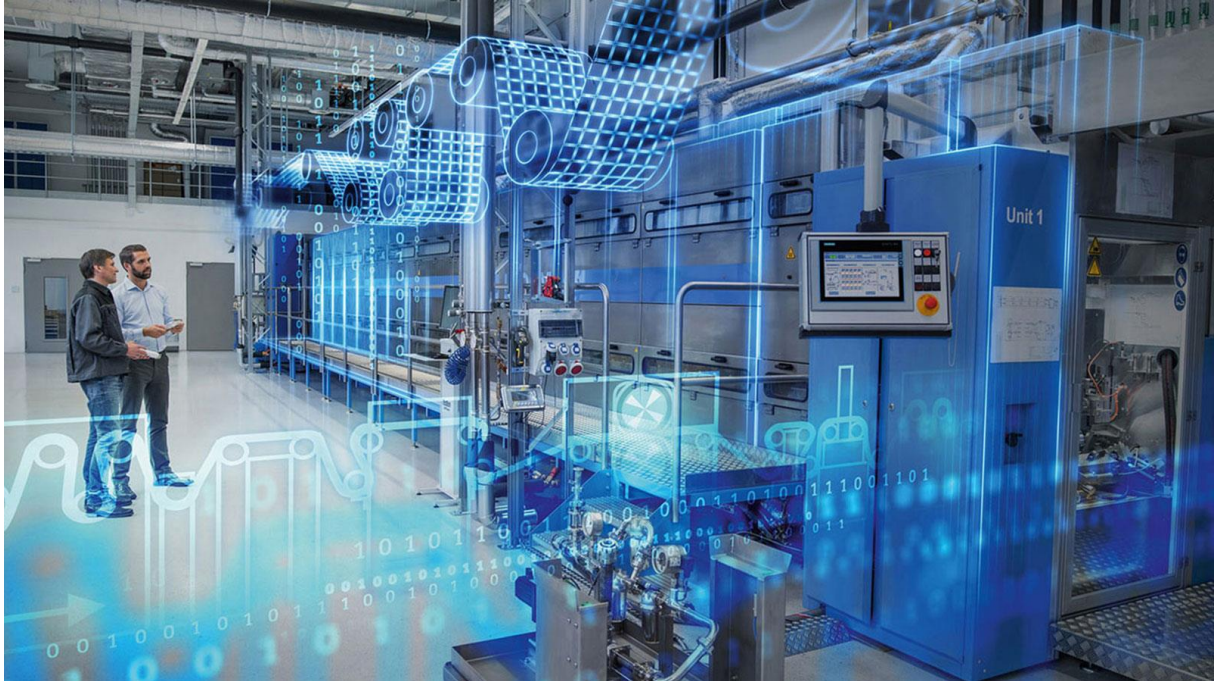


Figura 13 esempio grafico di Digital Twin (fonte- <https://www.plm.automation.siemens.com/global/it/webinar/the-iiot-digital-twin/41614>)

Si definisce Digital Twin (Gemello Digitale) una replica digitale di dispositivi o processi [17]: vengono utilizzate tecnologie quali l'apprendimento automatico e l'intelligenza artificiale per la creazione di modelli digitali che fanno riferimento ad una controparte fisica.

Fondamentali per la creazione del Digital Twin sono i sensori e gli attuatori [18] che vengono appositamente installati e danno la possibilità di ricevere informazioni relative ad azioni compiute dalla macchina in passato. Grazie a tali dati il Digital Twin si aggiorna continuamente



Figura 14 Digital Twin di una turbina (fonte-<https://job-wizards.com/en/digital-twins-doubling-the-potential-for-innovation/>)

riportando le modifiche alla controparte e creando un ciclo di feedback a circuito chiuso in un ambiente virtuale, che permette alle aziende di continuare a ottimizzare i prodotti, la produzione e le prestazioni a un costo minimo.

Il Digital Twin [19] viene utilizzato ampiamente nel contesto dell'industria 4.0 principalmente da grandi aziende che creano modelli virtuali con lo scopo di monitorare e diagnosticare i loro sistemi fisici, ottimizzarne il funzionamento, la manutenzione e calcolarne le possibili prestazioni future.

Grazie al Digital Twin si ha la possibilità di creare un modello digitale che parteciperà a tutto il ciclo di vita della macchina fisica, e che quindi documenterà tutti i suoi cambiamenti e sviluppi. [20]

Si sta lavorando per l'unione dei Digital Twins ad ulteriori tecnologie come la realtà aumentata [21] o le capacità di intelligenza artificiale, facilitando lo sguardo all'interno del gemello digitale, mantenendo la promessa di rendere superflui il controllo dei dispositivi o dei processi di produzione reali [22].

2.2 Perché si ha la necessità di usare un Digital Twin?

Utilizzare un Digital Twin risulta conveniente in quanto progettare una macchina fisica perfetta al primo tentativo risulterebbe molto difficile ed economicamente molto costoso.

I Digital Twins insieme all'intelligenza artificiale ci permettono di conoscere approfonditamente lo stato di un sistema o di un processo, acquisendo una conoscenza su come migliorare i cicli di vita dei prodotti, semplificarne la manutenzione e ottimizzarne le tempistiche di lavorazione.



*Figura 15 Sicurezza sul lavoro (fonte-
<https://www.iusinitinere.it/la-sicurezza-sul-lavoro-un-dovere-stringente-quanto-fondamentale-rispettare-1420>)*

Ne deriva che, se il risultato del sistema modificato non soddisfa le nostre esigenze, avendolo testato su Digital Twin avremmo risparmiato risorse fisiche e tempo da poter investire in altre operazioni di simulazione.

Un altro vantaggio è che gli esperti possono apportare modifiche al Digital Twin anche quando non sono in contatto diretto con il gemello fisico, unendo la semplicità di

apportare modifiche attraverso dei software insieme alla maggiore sicurezza in ambito lavorativo [23] (assenza di infortuni causati da possibili modifiche fisiche alla macchina).

2.3 Applicazioni dei Digital Twin

Anche se il periodo temporale di sperimentazione della tecnologia Digital Twin è ancora abbastanza recente, è possibile scorgere enormi trasformazioni che ci attendono e l'applicazione dei Digital Twins in svariati settori descritti di seguito.

2.3.1 La produzione Aziendale

L'utilizzo dei Digital Twins non ha come obiettivo soltanto quello di migliorare la qualità dei prodotti, ma anche quello di risparmiare tempo e denaro facilitando le aziende a testare rapidamente nuovi progetti.

Parlare di test virtualizzati di una nuova catena di approvvigionamento è molto semplice, mentre testare l'equivalente fisico comporta la chiusura della produzione e la momentanea perdita dei profitti [24].

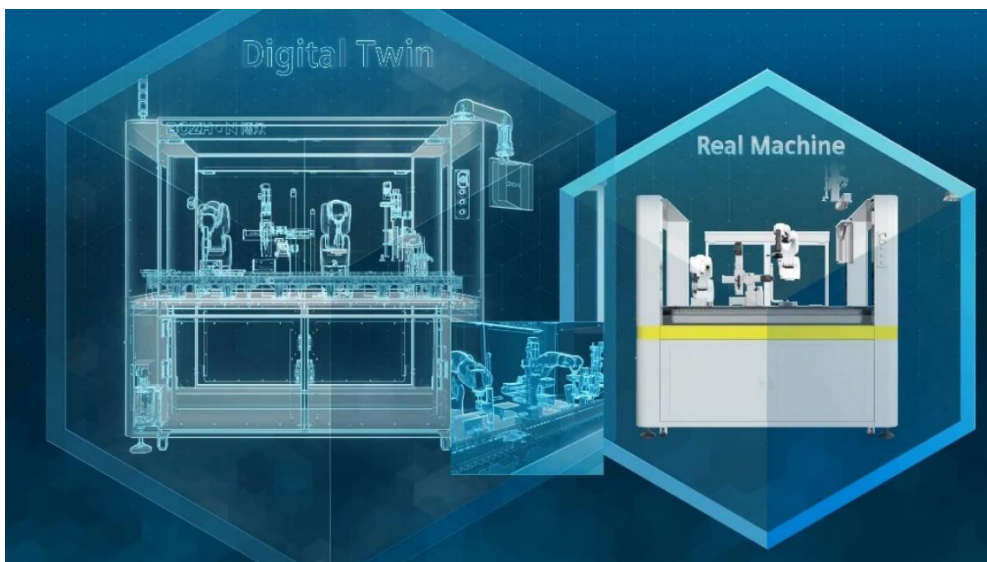


Figura16 Esempio applicazione Digital Twins per la produzione aziendale. (fonte-
<https://www.plm.automation.siemens.com/global/it/webinar/digital-twin-in-manufacturing/68561>)

2.3.2 Automobilistica

Dato il progressivo incremento delle automobili con le tecnologie IoT la capacità di replicare ogni dettaglio diventa sempre più indispensabile.

Grazie ai Digital Twins è sempre più semplice per gli ingegneri prevedere le prestazioni delle macchine, potendone inoltre controllare e testare le nuove funzionalità in sicurezza senza la necessità di utilizzare il veicolo fisico [25].



Figura 17 Esempio applicazione Digital Twins per la produzione aziendale. (fonte-<https://www.automotiveit.com/digital-randd/digital-twins-play-a-role-in-all-digitalization-projects-but-data-consolidation-slows-down-implementation/5763.article>)

2.3.3 Assistenza sanitaria

Un'ulteriore applicazione dei Digital Twins potrebbe essere nell'assistenza sanitaria e in ambito ospedaliero [26].



Figura 18 Esempio applicazione Digital Twins per assistenza sanitaria. (fonte-<https://www.01health.it/featured/ansys-digital-twin/>)

Testare l'impatto di cambiamenti sulle prestazioni sanitarie, individuando guasti alle apparecchiature coinvolte in vari settori medici, garantirebbe un miglioramento in termini di efficienza dei servizi.

Il gemello digitale sta aiutando i medici ad eseguire interventi chirurgici difficili: un esempio è quello di alcuni cardiologi che hanno usato il Digital Twin del cuore del paziente per

determinare con precisione il posizionamento dei vari strumenti che avrebbero funzionato meglio su questo specifico paziente riducendo quindi il rischio di fallimento dell'operazione[27].

2.3.4 Vendita sul mercato

Il Digital Twin migliora l'esperienza del cliente fornendo una simulazione che potrebbe rappresentare accuratamente come un particolare prodotto influirebbe nella sua vita. Consente inoltre di verificare il comportamento degli utenti ad un nuovo design del prodotto, annullando quindi le spese di modifica su larga scala del bene fisico.



Figura 19 Immagine rappresentativa (fonte- <https://www.theprocurment.it/innovazione/come-skf-usa-un-digital-twin-per-pianificare-la-supply-chain/>)

Ottenere la copia digitale esatta della risorsa fisica può portare a innovazioni di tendenza, di conseguenza si può iniziare a investire in risorse fisiche [28].

2.3.5 Città Smart

Ai giorni d'oggi ci stiamo spostando sempre più verso un'era dove anche nelle città la

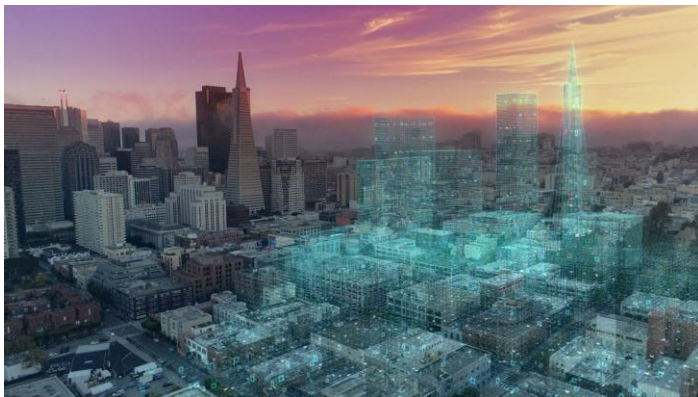


Figura 20 Esempio di Città smart(fonte- <https://industrywired.com/how-digital-twins-can-help-create-smart-cities/>)

digitalizzazione si sta espandendo in modo concreto.

Il Digital Twin può risultare un enorme vantaggio per analizzare le diverse forme di trasporto e sviluppare modelli di movimento pedonale per una migliore pianificazione urbana.

Nella realtà di questa città intelligente, il Digital Twin sta giocando un ruolo significativo fornendo un modello virtuale di città e quindi una replica del mondo fisico [29].

Grazie al Machine Learning è possibile testare soluzioni a problemi come la gestione del traffico. Inoltre, organizzazioni come i vigili del fuoco grazie alla planimetria virtuale degli edifici possono prevedere il comportamento del fuoco durante un incendio.

2.4 Il possibile futuro dei Digital Twin



Figura 21 Fonte-<https://www.agendadigitale.eu/sicurezza/digital-twin-per-la-sicurezza-informatica-ecco-vantaggi-e-limiti/>

Il futuro del mercato globale non può prescindere dalla presenza dei Digital Twins [30], ma la vera sfida è la mancanza di standard chiari per la loro attuazione: infatti in un piano di governance [31] non si può prescindere dalla formazione di personale altamente competente e qualificato, in modo da poter compiere al meglio le operazioni necessarie per i futuri sviluppi di tale tecnologia nei settori precedentemente citati.

Anche gli esseri umani avranno i loro gemelli digitali, che raccoglieranno informazioni in tempo reale da dispositivi indossabili e conterranno il codice genetico univoco dell'utente. Grazie all'utilizzo di queste informazioni, è possibile risolvere preoccupazioni come problemi di salute. Grandi aziende, come Bosch e Microsoft, hanno già iniziato a investire in questa tecnologia prevedendone un enorme aumento di utilizzo nei prossimi anni.

3. Macchine Utensili

3.1 Storia

Per macchina utensile si indica uno strumento che è in grado di funzionare utilizzando una fonte di movimento e di energia diversa da quella umana, anche se la presenza di un operatore che le attivi e ne controlli il corretto funzionamento è spesso necessaria.

Con l'introduzione di queste nuove tecnologie e grazie all'impiego di strumenti meccanici non è stato più necessario l'uso diretto del lavoro umano inteso come forza.

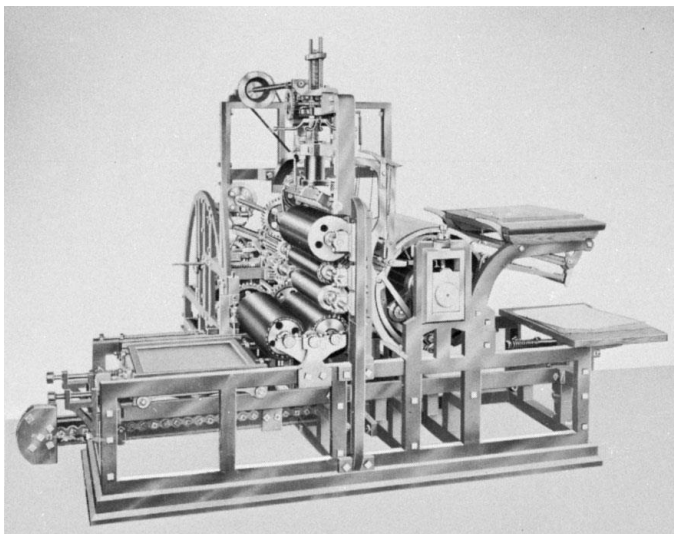


Figura 22 Stampatrice Meccanica (Fonte-
<http://georgianagarden.blogspot.com/2011/08/la-rotativa-e-il-giornale-quotidiano.html>)

Un classico esempio che ci aiuta a comprendere il funzionamento di una macchina utensile potrebbe essere quello delle prime stampatrici meccaniche, con le quali si potevano stampare volantini e giornali senza che questi venissero scritti a mano [32][33]. Le più comuni macchine utensili utilizzate tuttora sono il tornio, la pialla e la fresatrice, che rappresentano strumenti indispensabili per diverse tipologie di lavori manuali.

3.2 Funzionamento

L'impiego delle macchine utensili interessa soprattutto il campo dell'industria meccanica e manifatturiera con la lavorazione prevalentemente di metalli [34].

Il funzionamento avviene attraverso tre moti:

- Il moto di alimentazione: permette di lavorare parti diverse dei pezzi e viene trasmesso principalmente da motore elettrico e cinghie.
- Il moto lavoro: compiuto dal pezzo che si muove intorno all'utensile che resta fermo.
- Il moto di appostamento: determina la quantità di materiale asportabile che si può rimuovere durante il passaggio dell'utensile sul pezzo.

In campo commerciale viene sfruttata una classificazione per suddividere le macchine utensili in varie categorie:

- Macchine utensili a moto circolare uniforme: il tornio, la fresatrice e il trapano.
- A moto rettilineo alternato: la piallatrice, la stozzatrice e la limatrice.
- A moto speciale: la brocciatrice e la mola.
- A moto circolare variabile: racchiude molti degli ultimi tipi di macchine utensili.



Figura 23 Vari tipi di macchine utensili(Fonte-
<https://meccanicatecnica.altervista.org/utensili-e-macchine-utensili/>)

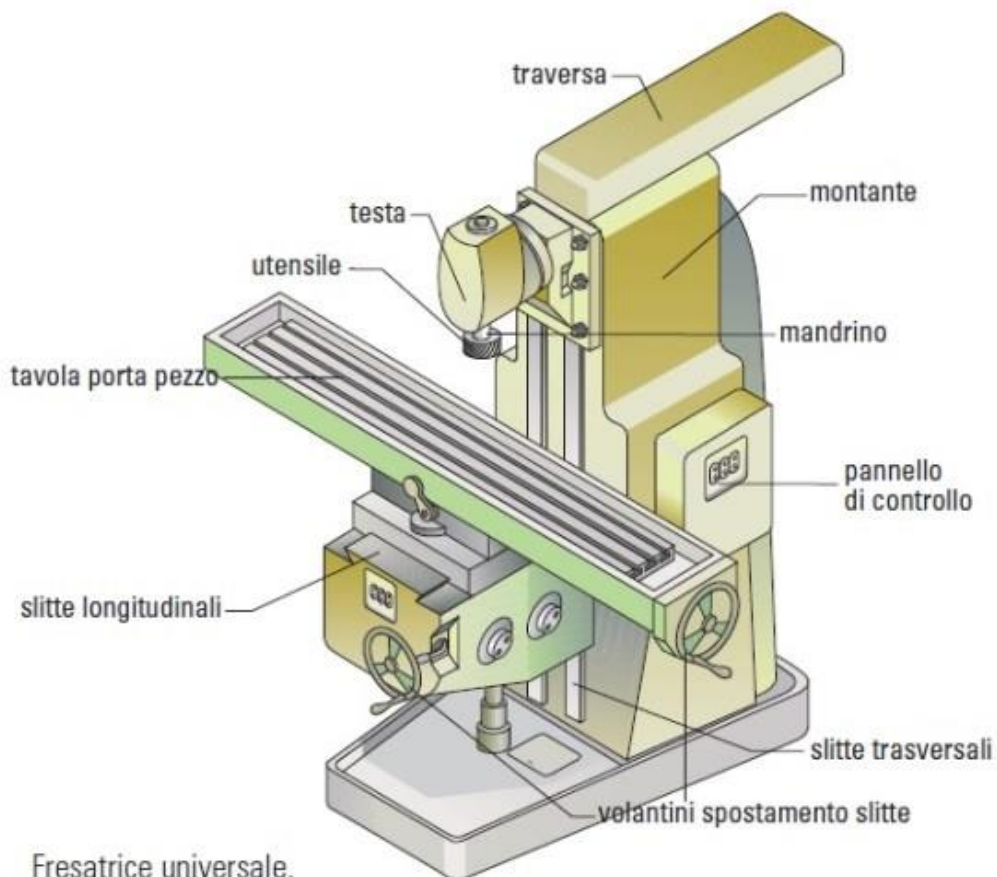
3.3 Esempi di macchine utensili

Si analizzano ora nel dettaglio alcuni tipi di macchine utensili per capire al meglio il loro funzionamento in modo da poterne vedere l'effettivo vantaggio quando successivamente si andranno ad analizzare dei Digital Twin che facciano riferimento a tali macchine.

3.3.1 Macchina utensile: Fresatrice

La fresatura è un processo di taglio che attraverso lavoro generato grazie ad una fresa rotante rimuove il metallo. Grazie a questa operazione è possibile lavorare superfici piane o curve con una buona finitura e precisione.

Altre modalità di utilizzo sono la scanalatura, la foratura, il taglio di ingranaggi e la realizzazione di profili circolari.



Fresatrice universale.

Figura 24 Fresatrice con indicazione nomi pezzi (fonte- <https://www.compravendita-macchinari-usati.it/fresatrice-principi-funzionamento/>)

Viene riportata di seguito una lista delle componenti principali:

- **Basamento:** garantisce supporto alla macchina e consente anche di immagazzinare eventuali fluidi di taglio.
- **Montante:** è collocato verticalmente rispetto alla base, è considerato il telaio di supporto principale e ospita tutti i meccanismi di guida per l'alimentazione del mandrino e di altri componenti.
- **Slitte longitudinali:** si trovano al di sotto della tavola porta pezzo e si muovono trasversalmente.
- **Tavolo porta pezzo:** poggia sulle slitte longitudinali e offre un supporto al pezzo in lavorazione, è solitamente in ghisa e la sua superficie superiore è lavorata con precisione.
- **Traversa:** risiede nella parte superiore della colonna e deve essere perfettamente allineata alle superfici da lavorare.
- **Testa:** la sua funzione è quella di allineare e supportare vari perni tra cui il mandrino che è connesso direttamente all'utensile.
- **Slitte trasversali:** permettono il movimento verticale della struttura composta da tavolo porta pezzo e slitte longitudinali utilizzando un sistema idraulico o elettrico gestito dai "volantini di spostamento slitte".

3.3.2 Macchina utensile: Tornio

Il tornio è una macchina utensile che tiene il pezzo tra due supporti rigidi e robusti chiamati centri. L'utensile da taglio è rigidamente trattenuto e supportato in un portautensile che viene avvicinato contro il lavoro rotante. Le normali operazioni di taglio vengono eseguite con l'utensile da taglio alimentato in parallelo o ad angolo retto rispetto all'asse del lavoro. L'utensile da taglio può anche essere alimentato ad un angolo rispetto all'asse di lavoro per la lavorazione di coni e angoli.

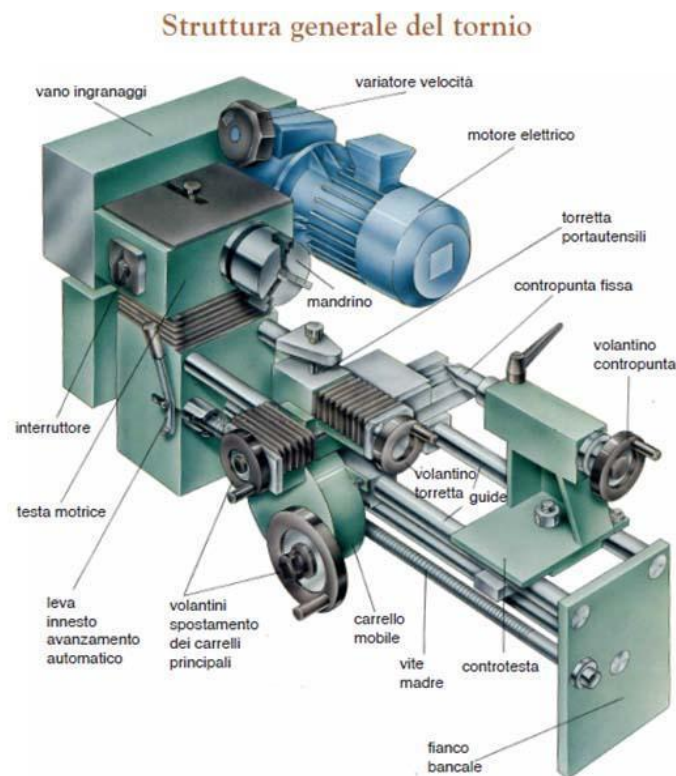


Figura 25 Struttura Tornio (fonte-<https://www.lavorincasa.it/tornitura-dei-metalli/>)

Componenti principali:

- **Basamento:** il basamento è una componente molto pesante e robusto in cui sono montate le parti di lavoro del tornio. Fornisce una base per il movimento del carrello mobile che porta l'utensile.
- **Fianchi:** i fianchi del tornio sostengono l'intero carico della macchina e sono saldamente fissati al pavimento mediante bulloni di fondazione.
- **Vano ingranaggi:** il vano ingranaggi è bloccato sul lato sinistro del tornio e funge da alloggiamento per gran parte dei componenti meccanici della macchina.

- Carrello mobile: il carrello serve a sostenere, guidare e alimentare l'utensile durante il funzionamento.
- Contropunta fissa: la contropunta fissa è una fusione mobile situata in maniera frontale alle vie del basamento. La contropunta può scorrere lungo il basamento per accogliere diverse lunghezze del pezzo.

4. Definizione di modelli di Digital Twin di macchine utensili

Analizzati quindi i principali concetti delle industrie 4.0, dei Digital Twin e alcuni esempi di macchine utensili, si procede con un'analisi delle applicazioni e delle fasi di sviluppo per modelli di Digital Twin di macchine utensili [35].

È possibile riassumere gli steps fondamentali di un Digital Twin di una macchina utensile in 5 fasi [36].

Fase 1: Generazione del modello

In questa fase si va ad effettuare un'analisi di quelli che sono i possibili benefici nell'utilizzo dei Digital Twins utilizzando strumenti di modellazione virtuale per creare sia il modello della macchina sia il modello dello spazio di lavoro.

I principali vantaggi possono essere la riduzione del tempo che intercorre fra l'inizio del processo di sviluppo di un nuovo prodotto e l'avvio della sua commercializzazione (time to market), la riduzione dei costi della creazione dei prototipi, l'aumento delle performance della macchina utensile.

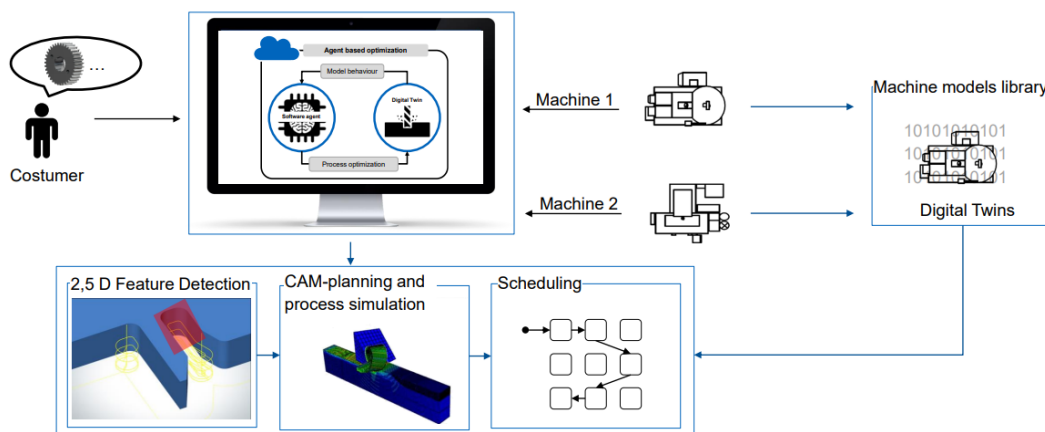


Figura 26 schema processo progettazione dei pezzi ed automazione (fonte iw – Institute for Machine Tools and Industrial Management)

Nello schema in Figura26 è descritto il processo di progettazione dei pezzi e di automazione: a seguito di una richiesta da parte del cliente di un determinato pezzo, si procede attraverso l'utilizzo di software che comunicano con i gemelli digitali delle macchine utensili e si realizza una creazione virtuale, con conseguente scheda dei tempi di produzione, costi e materiali necessari del pezzo in questione.

Fase 2: Simulazione del processo

In questa seconda fase si procede con la simulazione del processo che si dovrà attuare andandone a studiare tutte le possibili problematiche [37].

Cercare di risolvere e rendere quanto più possibile corretto e funzionale il modello durante la simulazione è fondamentale, in quanto rotture di pezzi o errori nelle dimensioni comporterebbero una perdita di tempo e denaro ai quali nessuna azienda vuole andare incontro.

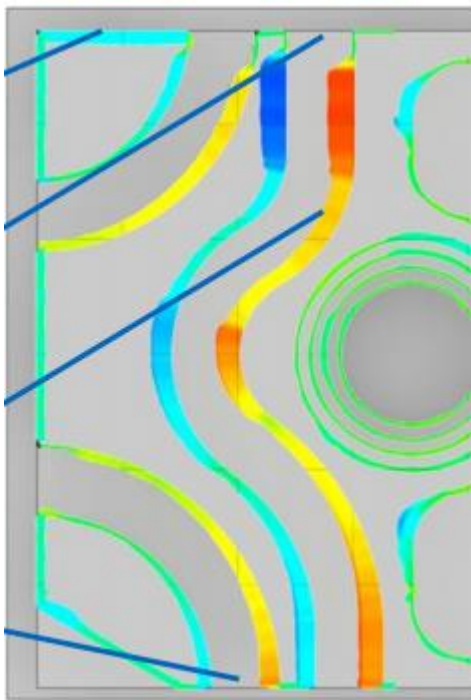


Figura 27 Pezzo Prima dell'ottimizzazione tramite software(fonte Schnoes, F., and M. F. Zaeh. "Model-based Planning of Machining Operations for Industrial Robots." *Procedia CIRP82* (2019): 497-502)

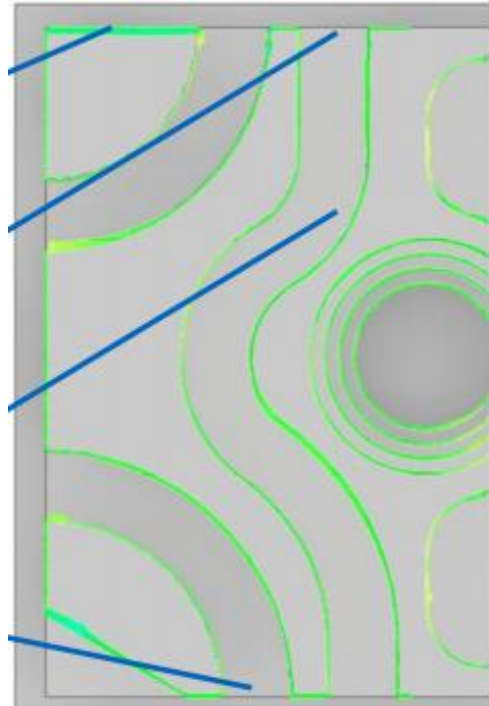


Figura 28 Pezzo Dopo l'ottimizzazione tramite software(fonte Schnoes, F., and M. F. Zaeh. "Model-based Planning of Machining Operations for Industrial Robots." *Procedia CIRP82* (2019): 497-502)

Viene quindi riportato l'esempio pratico di un pezzo prima e dopo una analisi attraverso dei tool di ottimizzazione [38] e si nota un importante cambiamento da una evidente presenza di zone a rischio (blu: precisione -1mm; rosse: precisione +1mm) a un pezzo quanto più preciso e funzionale.

Tale miglioramento si trasforma non solo in un minore dispendio economico da parte dell'azienda, ma anche in una maggiore soddisfazione da parte del cliente che si troverà a lavorare con un pezzo funzionale e strutturalmente ben costruito.

Fase 3: Controllo dei processi

Nella Fase 3 grazie all'utilizzo di modelli online si riesce a controllare in tempo reale, utilizzando un ciclo chiuso, l'andamento della macchina utensile. Nella macchina utensile è presente una Smart Box che riceve, analizza e invia nel cloud tutti i dati ricevuti dai vari sensori presenti. I dati che passano nel cloud possono essere presi e modificati allo scopo di ottimizzare la risposta che dal cloud sarà mandata nuovamente alla Smart Box (definito come cervello della macchina utensile).

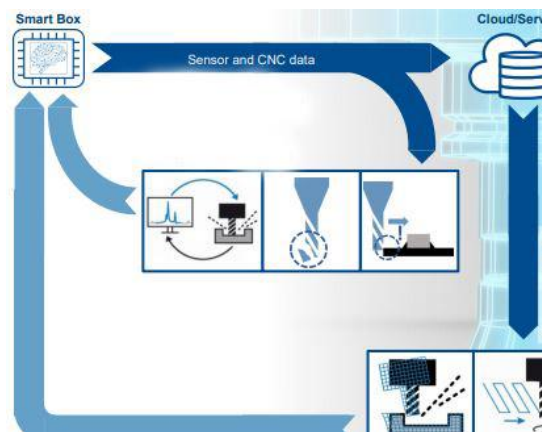


Figura 29 Schema comunicazione tra Smart Box, Sensori e Cloud (fonte iw – Institute for Machine Tools and Industrial Management)

Dei possibili miglioramenti possono essere:

- Rilevamento delle vibrazioni con conseguente diminuzione e aumento della stabilità del processo.
- Controllo usura degli utensili e qualità della superficie.
- Un miglioramento della conoscenza della macchina imparando dai propri errori [39].
- Acquisizione di nuovi dati per migliorie nei futuri progetti.

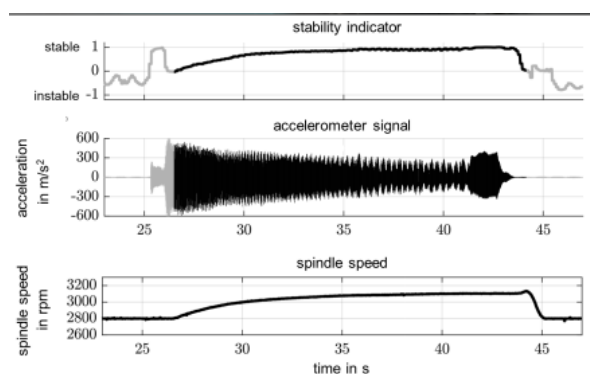


Figura 30 Alcuni esempi di andamento di diversi sensori (fonte - iw – Institute for Machine Tools and Industrial Management)

Fase 4: Identificazione dei guasti

Grazie a tutti i sensori presenti nelle macchine utensili e ai Digital Twins, le macchine utensili di questo tipo sono in grado di auto monitorarsi allo scopo di trovare eventuali guasti da segnalare tramite cloud agli operatori che, nel caso in cui la macchina non sia in grado di risolvere il guasto, provvederanno a effettuare le dovute modifiche e riparazioni.

Proprio grazie ad un confronto con il gemello digitale (per definizione privo di rotture) la macchina fisica riesce a capire non solo che tipo di problema si presenta, ma anche a quali componenti fa riferimento tale problema [40].

Si possono inoltre monitorare le condizioni di una macchina osservandone la precisione degli oggetti prodotti e, a seconda dell'usura della macchina, capire quando risulta necessario andare a effettuare una manutenzione così da rispettare sempre gli standard di qualità.

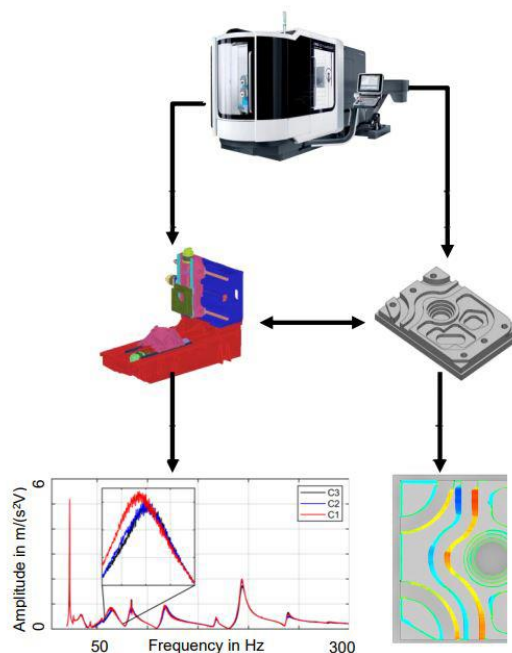


Figura 31 Schema di controllo dati (fonte- Schoes, F., and M. F. Zaeh. "Model-based Planning of Machining Operations for Industrial Robots." *Procedia CIRP82* (2019).)

Nella Figura29 viene rappresentato quanto detto precedentemente: la macchina acquisisce in un primo momento tutti i dati, poi vengono rappresentati virtualmente pezzo e macchina, infine vengono studiati in maniera matematica i risultati in modo da capire quando la soglia minima di qualità non sia più rispettata andando quindi ad effettuare la dovuta manutenzione.

Fase 5: Aggiornamenti

Una caratteristica fondamentale di tutti gli apparecchi tecnologicamente avanzati è la loro capacità di essere aggiornati alle nuove tecnologie, basti pensare ad un telefono che riceve aggiornamenti dalla casa produttrice quasi mensilmente [41], è importante quindi progettare queste macchine utensili dando loro la capacità di ricevere futuri aggiornamenti sia di software sia dai dati che loro stesse producono.

Vi sono 3 principali steps:

- Acquisizione dei Dati: attraverso dati scientifici ottenuti dalle precedenti lavorazioni.
- Elaborazione dei Dati: utilizzando i software presenti nella macchina (aggiornabili con il passare degli anni).
- Capacità di predire i futuri comportamenti: utilizzando lo stesso Digital Twin per simulare quale sarebbe il comportamento della macchina in caso di cambiamenti.



Figura 32 (fonte- <https://www.tecnelab.it/news/il-fatto/dmg-mori-propone-tecnologie-e-soluzioni-davanguardia>)

4.1 Lavorazione Virtuale

Nell'ambito della lavorazione virtuale si stanno attualmente svolgendo numerose ricerche che però, pur fornendo risultati molto importanti, non hanno ancora portato all'ideazione di un sistema capace di integrare le molteplici soluzioni proposte [43].

Esistono prevalentemente due tipi di software di simulazione del percorso utensile disponibili sul mercato per la lavorazione:

- Software che sfruttano la geometria: calcolano principalmente la velocità di asportazione del materiale non riuscendo però a simulare la meccanica del processo, quindi non prevedendo eventuali danneggiamenti dell'utensile.
- Software che includono la fisica del processo: consentono un'ottimizzazione del processo di taglio simulando eventuali problemi di stabilità oltre alle forze di taglio.

Sono disponibili sul mercato software di simulazione analitica e basata sull'analisi FEA [44].

Alcuni tipi di software Cutpro[45], Advantedge[46] e Deform[47] sono pacchetti FEA che consentono il calcolo e la simulazione delle temperature e delle forze di taglio nella lavorazione.

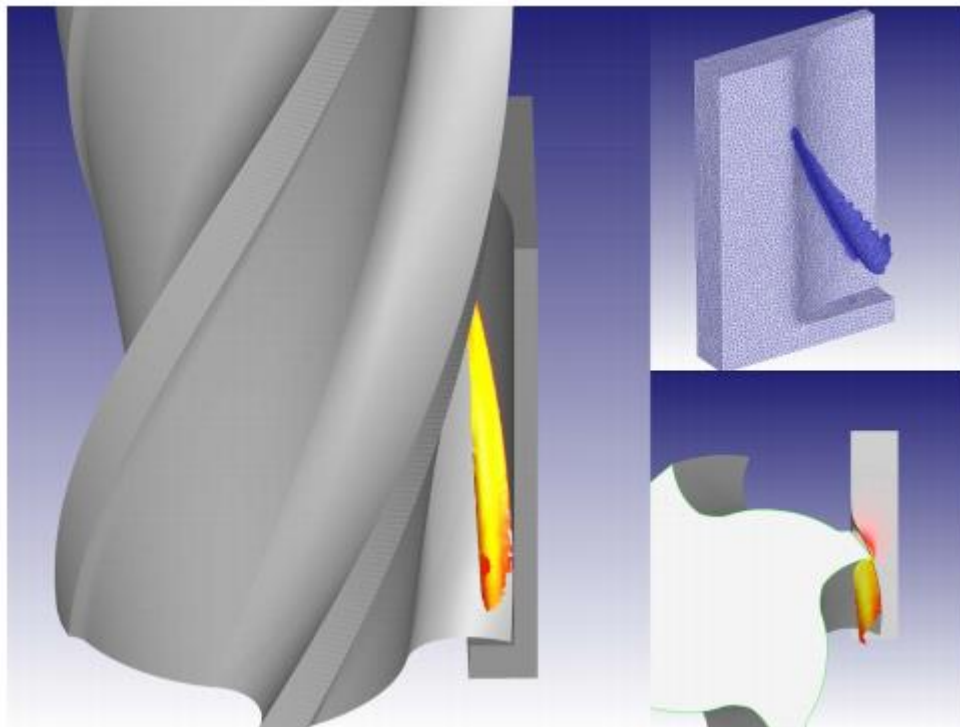


Figura 33 Deform analisi pezzo (fonte-<https://www.deform.com/wp-content/uploads/2015/06/DEFORM-3D-Machining.pdf>)

4.2 Macchine utensili Virtuali

Nell'articolo *"Virtual process systems for part machining operations"* [43] viene effettuata una ricerca sulla tecnologia delle macchine utensili virtuali dove viene mostrato come l'analisi dinamica (FEM) e la cinematica della struttura della macchina utensile siano i principali temi di sviluppo.

L'analisi strutturale delle macchine utensili può essere eseguita utilizzando pacchetti di simulazione commerciale che possono essere classificati in due categorie:

- Software di simulazione di corpi rigidi: un comune esempio è MSC ADAMS [48] considerato software molto veloce che ha lo svantaggio di non considerare le caratteristiche di vibrazione e deformazione di parti strutturali delle macchine utensili.
- Solutori FEA [44], [49]: tra i più utilizzati troviamo ABAQUS, ANSYS e SAMCEF che però non sono ben ottimizzati per l'integrazione di blocchi digitali per la simulazione di circuiti di controllo

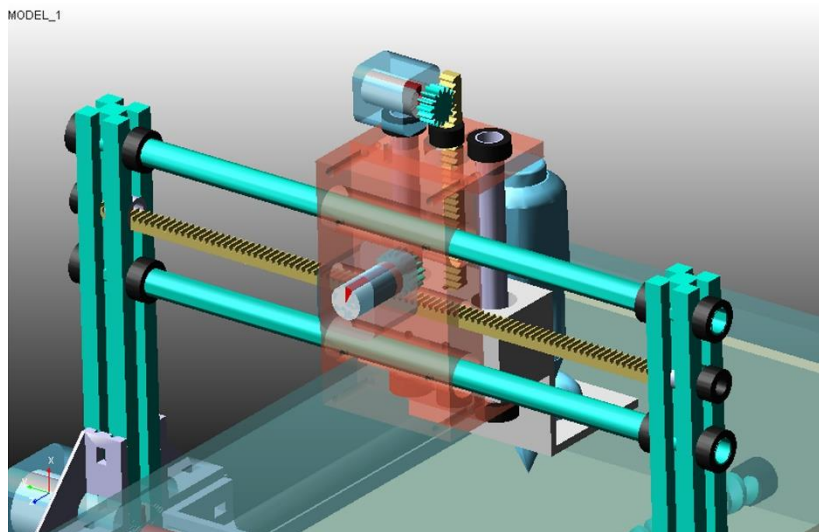


Figura 34 Costruzione utilizzando MSC ADAMS (fonte- <https://www.mscsoftware.com/it/product/adams-machinery>)

Ad oggi la combinazione dei pacchetti FEA e degli strumenti a corpo rigido consentono di simulare sistemi meccatronici molto complessi come le macchine utensili.

Inoltre sistemi come SAMCEF sono molto semplici da interfacciare in quanto codici provenienti da MATLAB Simulink [50] possono essere convertiti.

4.3 Monitoraggio e gestione dei Dati

Al fine di monitorare i processi delle macchine utensili occorre occuparsi dell'acquisizione e dell'elaborazione dei dati. A tale scopo il risultato dell'elaborazione dipende dalle opzioni di montaggio, dal tipo di macchina utensile, dalle influenze del processo, dalle ampiezze del segnale e dai disturbi del processo, per cui è indispensabile una corretta e mirata selezione dei sensori.

I sensori si classificano in tre tipi:

- Sensori esterni: principalmente utilizzati per ottenere informazioni aggiuntive sul processo. Un esempio tipico potrebbe essere l'accelerometro, il principale svantaggio di questi sensori è che essendo hardware aggiuntivi devono essere installati in un momento successivo all'installazione della macchina utensile.
- Sensori interni: si trovano già installati nella macchina utensile e ci consentono di ricevere informazioni come la posizione dell'asse o i consumi dei motori. È interesse dei produttori delle CNC fornire macchine sempre più dotate di sensori quanto più precisi possibile in modo da migliorare l'esperienza del cliente e ricevere tramite internet importanti dati sul funzionamento dalle macchine.
- Sensori virtuali: Fondamentali per il controllo e la misurazione indiretta di alcune funzionalità come le usure dei pezzi. Grazie a dei calcoli e utilizzando dati ricevuti dagli altri due tipi di sensori, ad esempio il consumo energetico del mandrino, si riesce a calcolare l'usura dell'utensile in modo da poter prevedere quando si dovrà effettuare la manutenzione.



Figura 35 Sensori E2B e E2FM (fonte- <https://industrial.omron.it/it/solutions/product-solutions/position-detection-bundle>)

4.3 Casi di applicazione

Si procede quindi con l'analisi dettagliata di alcune possibili applicazioni di Digital Twin di macchine utensili.

Caso 1: Digital Twin di una Fresatrice Sherline

In questo primo caso di applicazione si analizza come una fresatrice verticale a 3 assi di marca Sherling semplificherebbe il suo utilizzo e controllo nel caso le venga creato un gemello digitale connesso ad internet che ne monitori quasi in tempo reale le condizioni [46].

"Le fresatrici Sherline sono disponibili in quattro modelli e possono essere acquistate sia in pollici sia in versione metrica, e ogni modello è prodotto negli Stati Uniti e presenta viti e volantini laminati di precisione graduati in millesimi di pollice (.001 ") o centesimi di millimetro (.01 mm). Le macchine sono dotate di un motore DC ad alta coppia con controllo della velocità variabile. Questo controllo della velocità è dotato internamente di un convertitore che regola automaticamente tra gli ingressi da 100 V CA a 240 V CA, 50-60 Hz. senza perdita di coppia. La velocità è continuamente variabile da 70 a 2800 giri / min senza cambi di marcia o cinghia. È disponibile una seconda posizione della puleggia per fornire una coppia aggiuntiva a bassi regimi." [45]

Viene inoltre utilizzato un dinamometro a 3 assi Kistler 9273 che si installa sul piano di lavoro e permette di capire e misurare le forze di taglio [53].

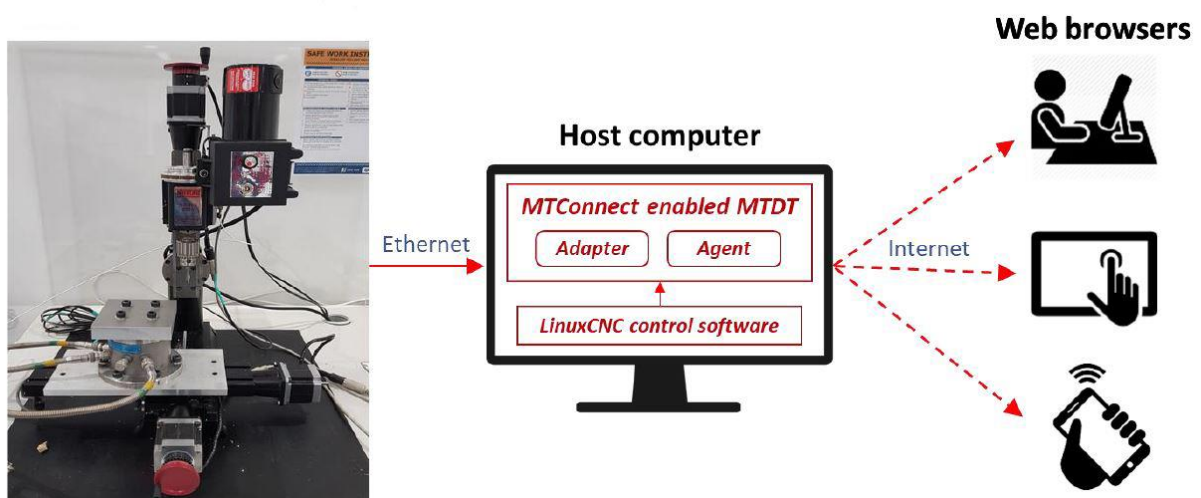


Figura 36 Schema progetto (Fonte- CIE48 Proceedings, 2-5 December 2018, The University of Auckland)

Per il controllo di tale strumentazione viene utilizzato un controller CNC comandato da un software LinuxCNC eseguito nel computer host.

I dati ricavati vengono pubblicati, a seguito di alcuni steps di trasformazione nel formato MTConnect, in XML nella rete locale.

L'applicazione per il monitoraggio di questa macchina utensile è essenzialmente una pagina Web sviluppata in HTML e JavaScript; tale applicazione ci consente di:

- Monitorare lo stato della macchina in tempo reale.
- Visualizzare il movimento della macchina utensile partendo dalle informazioni della posizione degli assi e un modello 3D che rappresenti la macchina.

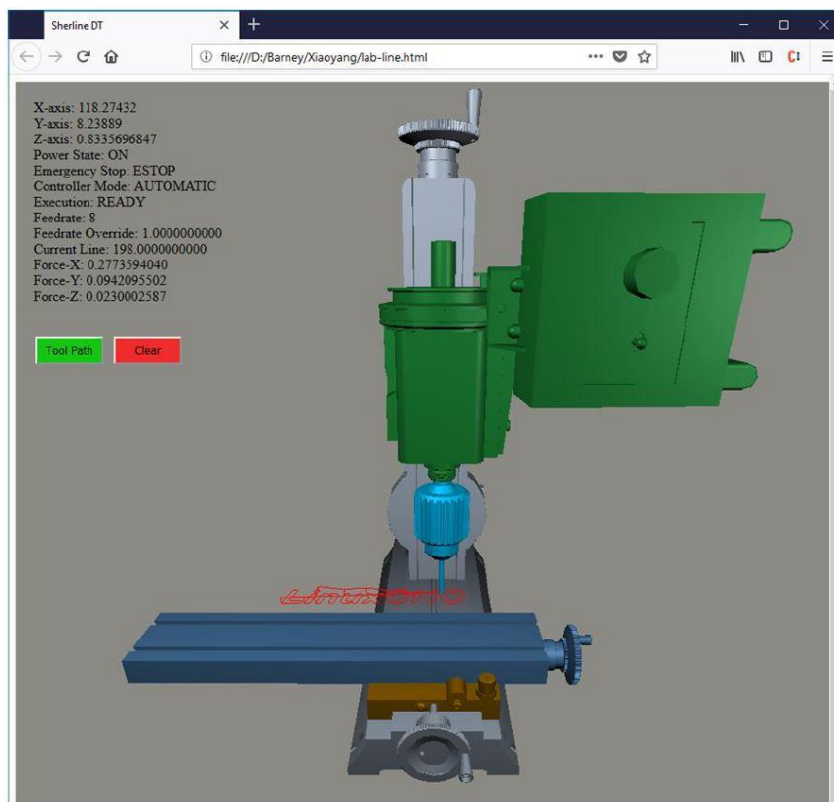


Figura 37 Applicazione Web (Fonte-CIE48 Proceedings, 2-5 December 2018, The University of Auckland)

Grazie ad un controllo tridimensionale si ha la possibilità di ruotare attorno alla macchina virtuale per analizzare il processo da diverse angolazioni. Questa applicazione fornisce inoltre all'utente una facile e intuitiva comprensione dello stato della macchina avendo come punto di forza la facile accessibilità web, infatti basterebbe un telefono connesso ad internet per poter controllare tutti i parametri visibili sulla pagina web della macchina.

Caso 2: Possibile implementazione di Digital Twin di un Tornio con implementazione di un visore VR

Si analizza ora una possibile applicazione di un Digital Twin ad un tornio con lo scopo di semplificare i processi di lavorazione e, grazie all'implementazione del visore VR, di controllare attraverso la realtà aumentata quali saranno i risultati finali.

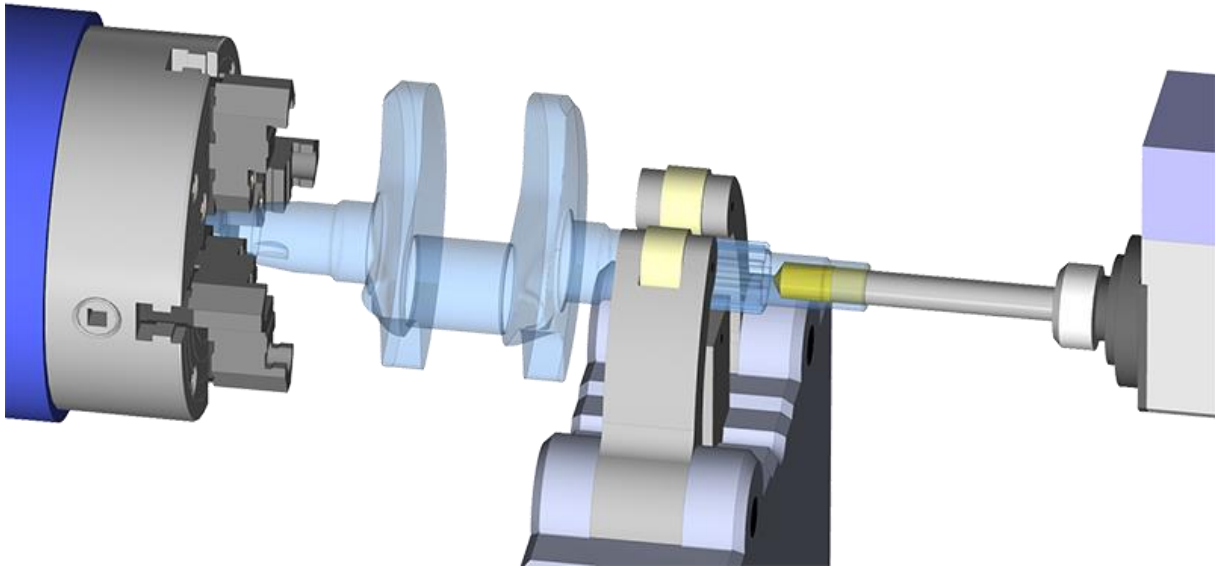


Figura 38 Gemello digitale Tornio (Fonte- <https://www.autosistemi.it/software-cam-per-tornitura/>)

Si utilizzeranno principalmente 2 importanti sensori che ci permetteranno di ottenere dati e informazioni fondamentali per la gestione del Digital Twin e sono:

- E2FM: rilevamento cilindro nell'ambiente di lavorazione
- E2B: controllo camma - cambiautensili, rilevamento del pezzo in lavorazione (barre) sull'alimentatore[54]

Per implementare la comunicazione tra tornio e host si utilizza un software basato su Linux. Vengono inoltre utilizzati un RFID e un Arduino Uno atti a trasferire e ricevere le informazioni fornite dal tornio.

Il visore utilizzato per questo caso è un Microsoft HoloLens considerato come uno dei migliori in termini di prestazioni e semplicità di utilizzo.

L'applicazione presente nel visore necessita di particolari tipi di informazioni definiti come OPC UA [55] che, grazie ad una connessione Wi-Fi, vengono inviati direttamente dal micro-controller Arduino.

Il processo inizia con la progettazione di modelli 3D con software CAD dell'utensile, della materia prima e del pezzo che vengono poi, grazie all'utilizzo del software Creo Parametric[56], trasformati in formato STP.

Lo scopo però non è ancora raggiunto in quanto si vuole avere la possibilità di visionare tali modelli anche su HoloLens e quindi i file STP necessitano di essere convertiti in file .obj e di essere trasferiti a Unity 3D [57], software molto utilizzato nella programmazione di visori.

Perno fondamentale di tutto questo studio è Unity in quanto ci permette di visualizzare in tempo reale il Digital Twin sovrapposto perfettamente al modello fisico.

Questa applicazione nel tornio, come anche in molte altre macchine utensili, consentirebbe di migliorare, semplificare e perfezionare di gran lunga i processi delle macchine utensili e quindi di dare il via ad un nuovo possibile modo di interazione tra uomo-macchina che diventerebbe molto più diretto e funzionale.

5. Conclusioni

A tutti gli effetti si può dire che la quarta rivoluzione industriale è in continuo sviluppo e accrescimento tecnologico.

L'argomento principale di questo studio "Definizione di modelli di Digital Twin di macchine utensili" ha lo scopo di capire quanto anche nelle macchine utensili questo periodo di innovazione sia incisivo.

Facendo riferimento al "Caso 2: Possibile implementazione di Digital Twin di un Tornio con implementazione di un visore VR", che ho introdotto come una possibile "Futura Implementazione" di tale tecnologia, si può intuire quanto, riuscendo ad applicare il modello del Digital Twin a tutte le macchine utensili ed elaborare i dati fornendoli sotto forma di modelli virtuali direttamente nei Visori degli ingegneri del settore, si possano semplificare e controllare procedure che precedentemente avrebbero richiesto più tempo e dispendio economico.

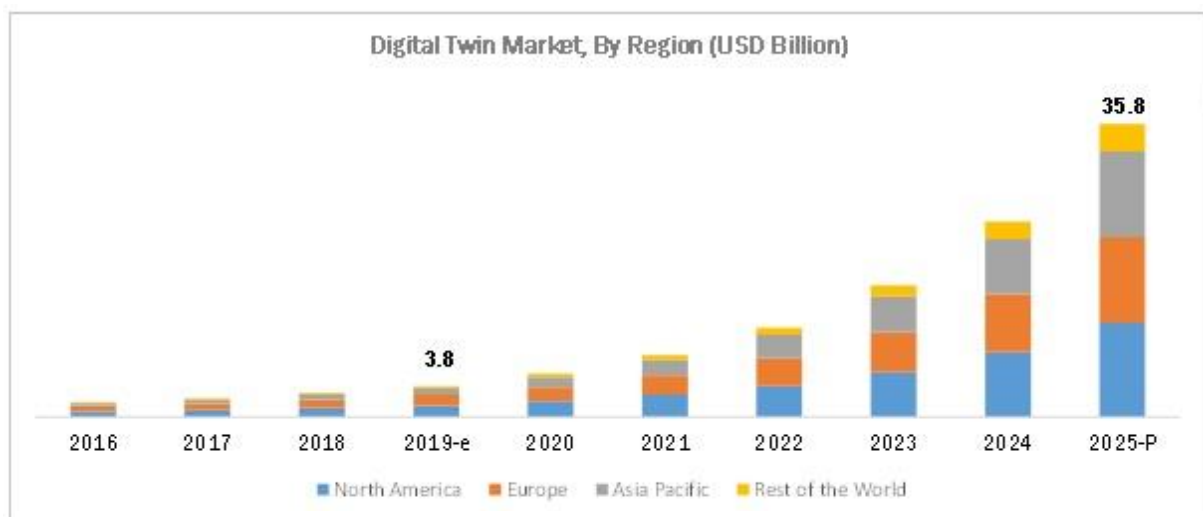


Figura 39 Fonte- industry Experts, Secondary Research, and MarketstandMarkets Analysis

Secondo quanto riportato da questo grafico da MarketsandMarkets la crescita CAGR del mercato Digital Twin sarà del 45,5% e nel 2025 il mercato varrà 35,8 miliardi di dollari.

Diventa molto intuibile quanto questa tecnologia stia impattando nel mondo del mercato ed è per questo che effettuare studi ed investimenti nel settore , al giorno d'oggi, risulta essere fondamentale e strategico.

6. Riferimenti.

- [1] «L'apport top down elementi per una proposta di supporto allo sviluppo di strumenti assicurativi e finanziari per la gestione del rischio idrogeologico». <https://www.politesi.polimi.it/handle/10589/133681>.
- [2] B. Spear, «Coal – Parent of the Industrial Revolution in Great Britain: The early patent history», *World Pat. Inf.*, vol. 39, pagg. 85–88, dic. 2014, doi: 10.1016/j.wpi.2014.06.002.
- [3] A. Iyer, «Moving from Industry 2.0 to Industry 4.0: A case study from India on leapfrogging in smart manufacturing», *Procedia Manuf.*, vol. 21, pagg. 663–670, gen. 2018, doi: 10.1016/j.promfg.2018.02.169.
- [4] J. Rifkin, *La terza rivoluzione industriale*. Edizioni Mondadori, 2011.
- [5] «Industria 4.0: storia, significato ed evoluzioni tecnologiche», *Digital4*, set. 18, 2019. <https://www.digital4.biz/executive/industria-40-storia-significato-ed-evoluzioni-tecnologiche-a-vantaggio-del-business/>
- [6] R. R. Calderón e R. S. Arbesú, «Augmented Reality in Automation», *Procedia Comput. Sci.*, vol. 75, pagg. 123–128, gen. 2015, doi: 10.1016/j.procs.2015.12.228.
- [7] D. Zuehlke, «SmartFactory—Towards a factory-of-things», *Annu. Rev. Control*, vol. 34, n. 1, pagg. 129–138, apr. 2010, doi: 10.1016/j.arcontrol.2010.02.008.
- [8] «Che cos'è la smart factory | Libero Tecnologia». <https://tecnologia.libero.it/che-cose-la-smart-factory-13603>
- [9] «Industry 4.0 - the Nine Technologies Transforming Industrial Production», <https://www.bcg.com>. <https://www.bcg.com/it-it/capabilities/operations/embracing-industry-4.0-rediscovering-growth.aspx>
- [10] P. Osterrieder, L. Budde, e T. Friedli, «The smart factory as a key construct of industry 4.0: A systematic literature review», *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 221, pag. 107476, mar. 2020, doi: 10.1016/j.ijpe.2019.08.011.
- [11] A. Napoleone, M. Macchi, e A. Pozzetti, «A review on the characteristics of cyber-physical systems for the future smart factories», *J. Manuf. Syst.*, vol. 54, pagg. 305–335, gen. 2020, doi: 10.1016/j.jmsy.2020.01.007.
- [12] J. Y. Won e M. J. Park, «Smart factory adoption in small and medium-sized enterprises: Empirical evidence of manufacturing industry in Korea», *Technol. Forecast. Soc. Change*, vol. 157, pag. 120117, ago. 2020, doi: 10.1016/j.techfore.2020.120117.
- [13] C. J. Bartodziej, «The concept Industry 4.0», in *The Concept Industry 4.0 : An Empirical Analysis of Technologies and Applications in Production Logistics*, C. J. Bartodziej, A c. di Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2017, pagg. 27–50.
- [14] «Attacchi informatici, boom dei danni economici per le aziende: quali strategie di difesa», *Cyber Security 360*, gen. 21, 2019. <https://www.cybersecurity360.it/news/attacchi-informatici-boom-dei-danni-economici-per-le-aziende-quali-strategie-di-difesa/>
- [15] A. Hansberry, A. Lasser, e A. Tarrh, «Cryptolocker: 2013's Most Malicious Malware», pag. 5.
- [16] «Il Digital Twin a ciclo chiuso», *Siemens Digital Industries Software*. <https://www.plm.automation.siemens.com/global/it/webinar/the-iiot-digital-twin/41614>
- [17] F. Tao, Q. Qi, L. Wang, e A. Y. C. Nee, «Digital Twins and Cyber–Physical Systems toward Smart Manufacturing and Industry 4.0: Correlation and Comparison», *Engineering*, vol. 5, n. 4, pagg. 653–661, ago. 2019, doi: 10.1016/j.eng.2019.01.014.

- [18] «Digital twins of machine tools | Digitalization topics | Siemens Global», *siemens.com Global Website*.
<https://new.siemens.com/global/en/markets/machinebuilding/machine-tools/cnc4you/fokus-digitalisierung/digit-twin-rarely-comes-alone.html>
- [19] «Sfruttamento della tecnologia del digital twin nell'industria | PTC».
<https://www.ptc.com/it/industry-insights/digital-twin>
- [20] «Digital Twin | Siemens», *Siemens Digital Industries Software*.
<https://www.plm.automation.siemens.com/global/it/our-story/glossary/digital-twin/24465>
- [21] Z. Zhu, C. Liu, e X. Xu, «Visualisation of the digital twin data in manufacturing by using augmented reality», *Procedia CIRP*, vol. 81, pagg. 898–903, giu. 2019, doi: Zhu, Zexuan, Liu, Chao <<http://orca.cf.ac.uk/view/cardiffauthors/A24648036.html>> and Xu, Xun 2019. Visualisation of the digital twin data in manufacturing by using augmented reality. *Procedia CIRP* 81 , pp. 898-903. 10.1016/j.procir.2019.03.223 <<http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2019.03.223>> file <<http://orca.cf.ac.uk/123709/1/Martin%20-%20Conference%20-%20Visualisation%20of%20the%20Digital%20Twin%20data%20in%20manufacturing%20by%20using%20Augmented%20Reality.pdf>>.
- [22] S. Rabah *et al.*, «Towards improving the future of manufacturing through digital twin and augmented reality technologies», *Procedia Manuf.*, vol. 17, pagg. 460–467, gen. 2018, doi: 10.1016/j.promfg.2018.10.070.
- [23] M. Bevilacqua *et al.*, «Digital Twin Reference Model Development to Prevent Operators' Risk in Process Plants», *Sustainability*, vol. 12, n. 3, Art. n. 3, gen. 2020, doi: 10.3390/su12031088.
- [24] «Il Digital Twin nella produzione», *Siemens Digital Industries Software*.
<https://www.plm.automation.siemens.com/global/it/webinar/digital-twin-in-manufacturing/68561>
- [25] «Digital twins play a role in all digitalization projects but data consolidation slows down implementation | Article | automotiveIT International».
<https://www.automotiveit.com/digital-randd/digital-twins-play-a-role-in-all-digitalization-projects-but-data-consolidation-slows-down-implementation/5763.article>
- [26] «Utilizzo del digital twin per migliorare l'assistenza sanitaria», *01health*, set. 11, 2018.
<https://www.01health.it/featured/ansys-digital-twin/>
- [27] I. Naplekov *et al.*, «Methods of computational modeling of coronary heart vessels for its digital twin», *MATEC Web Conf.*, vol. 172, pag. 01009, 2018, doi: 10.1051/mateconf/201817201009.
- [28] C. Volonté, «Digital twin, collaborazione tra Rockwell Automation e Ansys», *Industria Italiana*, dic. 09, 2019. <https://www.industriaitaliana.it/digital-twin-collaborazione-tra-rockwell-automation-e-ansys/>
- [29] V. Kumar, «How Digital Twin Can Help Create Smart Cities», *IndustryWired*, gen. 07, 2020. <https://industrywired.com/how-digital-twins-can-help-create-smart-cities/>
- [30] R. Rosen, G. von Wichert, G. Lo, e K. D. Bettenhausen, «About The Importance of Autonomy and Digital Twins for the Future of Manufacturing», *IFAC-Pap.*, vol. 48, n. 3, pagg. 567–572, gen. 2015, doi: 10.1016/j.ifacol.2015.06.141.
- [31] «Il Piano di Governance». <http://www.lab-mc.com/piano.governance/modello.htm>
- [32] «Georgiana's Garden: La rotativa e il giornale "quotidiano"».
<http://georgianagarden.blogspot.com/2011/08/la-rotativa-e-il-giornale-quotidiano.html>

- [33] S. Füssel, *Gutenberg and the Impact of Printing*. Routledge, 2020.
- [34] «UTENSILI E MACCHINE UTENSILI - Meccanica Tecnica».
<https://meccanicatecnica.altervista.org/utensili-e-macchine-utensili/>
- [35] C. Liu, X. Hong, Z. Zhu, e X. Xu, «Machine tool digital twin: Modelling methodology and applications», Auckland, New Zealand, dic. 2018, pag., Available at:
<http://orca.cf.ac.uk/123829/>.
- [36] M. Busch, «Digital Twins for Machine Tools», *Glob. Prod.*, pag. 35.
- [37] F. Schnoes e M. F. Zaeh, «Model-based Planning of Machining Operations for Industrial Robots», *Procedia CIRP*, vol. 82, pagg. 497–502, 2019, doi:
10.1016/j.procir.2019.04.331.
- [38] M. A. Elbestawi, Y. Mohamed, e L. Liu, «Application of Some Parameter Adaptive Control Algorithms in Machining», *J. Dyn. Syst. Meas. Control*, vol. 112, n. 4, pagg. 611–617, dic. 1990, doi: 10.1115/1.2896186.
- [39] S. Marriott e R. F. Harrison, «Can Machines Ever Learn from Their Own Mistakes?», *Meas. Control*, vol. 30, n. 10, pagg. 300–307, dic. 1997, doi:
10.1177/002029409703001003.
- [40] R. Yan e R. X. Gao, «Approximate Entropy as a diagnostic tool for machine health monitoring», *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 21, n. 2, pagg. 824–839, feb. 2007, doi:
10.1016/j.ymssp.2006.02.009.
- [41] R. Jhanwar, «(54) DYNAMIC SOFTWARE UPDATE», pag. 18.
- [42] «WHAT'S NEW: Website Update: Application for Machine Tools».
<http://marposs.blogspot.com/2018/08/website-update-application-for-machine.html>
- [43] Y. Altintas, P. Kersting, D. Biermann, E. Budak, B. Denkena, e I. Lazoglu, «Virtual process systems for part machining operations», *CIRP Ann.*, vol. 63, n. 2, pagg. 585–605, gen. 2014, doi: 10.1016/j.cirp.2014.05.007.
- [44] «FEA/Analisi a elementi finiti», *Siemens Digital Industries Software*.
<https://www.plm.automation.siemens.com/global/it/our-story/glossary/finite-element-analysis-fea/13173>
- [45] «CutPro Simulation Software», *MAL Inc.* <https://www.malinc.com/products/cutpro/>
- [46] «Advantedge», *Third Wave Systems*. <https://www.thirdwavesys.com/advantedge/>
- [47] «DEFORM-3D Machining – Scientific Forming Technologies Corporation».
<https://www.deform.com/products/deformd-machinin/>
- [48] «MSC Adams». <https://www.msccsoftware.com/it/product/adams?language=it>
- [49] «Analisi agli elementi finiti», *Wikipedia*. dic. 09, 2019,. Available at:
https://it.wikipedia.org/w/index.php?title=Analisi_agli_elementi_finiti&oldid=109339392.
- [50] «Simulink - Simulazione e progettazione model-based».
<https://it.mathworks.com/products/simulink.html>
- [51] «Fresatrici verticali Sherline - Prodotti Sherline». <https://www.sherline.com/sherline-vertical-milling-machines/>
- [52] W. Luo, T. Hu, C. Zhang, e Y. Wei, «Digital twin for CNC machine tool: modeling and using strategy», *J. Ambient Intell. Humaniz. Comput.*, lug. 2018, doi: 10.1007/s12652-018-0946-5.
- [53] M. Gomez, T. No, e T. Schmitz, «Digital force prediction for milling», *Procedia Manuf.*, vol. 48, pagg. 873–881, gen. 2020, doi: 10.1016/j.promfg.2020.05.125.
- [54] «Rilevamento della posizione dei pezzi da lavorare sulle macchine utensili».
<https://industrial.omron.it/it/solutions/product-solutions/position-detection-bundle>

- [55] M. Olding, «Che cos'è lo standard OPC UA e perché verrà utilizzato sempre di più?»
<https://www.exorint.com/it/blog/che-cosè-lo-standard-opc-ua-e-perché-verrà-utilizzato-sempre-di-più>
- [56] «Creo», *Wikipedia*. mar. 13, 2020, [In linea]. Available at:
<https://it.wikipedia.org/w/index.php?title=Creo&oldid=111420885>.
- [57] «Unity (motore grafico)», *Wikipedia*. mag. 01, 2020, [In linea]. Available at:
[https://it.wikipedia.org/w/index.php?title=Unity_\(motore_grafico\)&oldid=112675603](https://it.wikipedia.org/w/index.php?title=Unity_(motore_grafico)&oldid=112675603).