



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea triennale in Ingegneria Gestionale (L-9)

APPROCCI SIMULATIVI PER LA SICUREZZA INDUSTRIALE
SIMULATIVE APPROACH FOR INDUSTRIAL SAFETY

Relatore: Chiar.mo

Prof. **Maurizio Bevilacqua**

Correlatore: Chiar.mo

Prof. **Giovanni Mazzuto**

Tesi di Laurea di:

Susanna Scarponi

A.A. 2019/2020

Indice

1. Introduzione	4
2. Industry 4.0	5
2.1 Tecnologie abilitanti.....	7
2.1.1 Realtà aumentata	7
2.1.2 Internet of things	7
2.1.3 Analisi di big data	8
2.1.4 Cloud Computing	9
2.1.5 Cybersecurity	9
2.1.6 Additive manufacturing.....	10
2.1.7 Integrazione verticale e orizzontale.....	10
2.1.8 Robot autonomi	10
2.1.9 Simulazione.....	11
3. Gemelli digitali	13
3.1 Nascita, evoluzione e situazione attuale.....	13
3.2 Definizione e caratteristiche.....	16
3.3 Vantaggi e svantaggi	19
3.4 Applicazioni	21
3.5 Esempi di gemelli digitali	22
4. Creazione di un gemello digitale	24
4.1 Architettura del digital twin	24
4.2 Modellazione.....	25
4.3 Gemello digitale di un motore asincrono di un trapano a colonna.....	29
5. Approcci simulativi per la sicurezza industriale	35
5.1 <i>Sicurezza nelle varie fasi del ciclo di vita di un prodotto</i>	40
5.1.1. <i>Fasi di ricerca e sviluppo</i>	40
5.1.2. <i>Fase di progettazione concettuale</i>	40
5.1.3. <i>Progettazione dettagliata</i>	41
5.1.4. <i>Messa in servizio e fasi operative</i>	41
5.1.5. <i>Disattivazione e bonifica</i>	42
6. Conclusioni	43
7. Bibliografia e sitografia	44

1. Introduzione

L'obiettivo di questa tesi è quello di analizzare il rapporto che c'è tra metodi simulativi, in particolare i gemelli digitali e la sicurezza all'interno dell'ambiente produttivo.

Nel primo capitolo viene definito il nuovo paradigma dell'industry 4.0, spiegando la nascita e le tecnologie che la caratterizzano, ossia la realtà aumentata, l'internet delle cose, i robot autonomi, la sicurezza dei dati, l'analisi dei big data, la simulazione, il cloud, l'integrazione orizzontale e verticale dei sistemi e la stampa additiva.

Il secondo capitolo riporta come sono nati e si sono sviluppati i gemelli digitali, le loro caratteristiche, i vantaggi e gli svantaggi che derivano dalla loro applicazione.

Il capitolo successivo si concentra sul concetto della modellazione dei digital twin e viene descritto il lavoro svolto per realizzare un modello, attraverso il tool di simulazione Simulink, del motore asincrono di un trapano a colonna, utile per poter svolgere analisi di scenario e identificare eventuali rischi.

Nell'ultimo capitolo viene trattata l'applicazione dei gemelli digitali e degli altri metodi simulativi per la sicurezza industriale, in quanto consentono di monitorare il corretto funzionamento del sistema e di rilevare possibili anomalie.

2.Industry 4.0

Negli ultimi anni il settore manifatturiero si è dovuto confrontare con la straordinaria crescita e lo sviluppo delle tecnologie digitali, che si sono diffuse in seguito alla sempre maggiore richiesta di prodotti personalizzati e con cicli di vita più brevi. L'utilizzo di nuove tecnologie è alla base della quarta rivoluzione industriale, anche nota come industry 4.0. Tale espressione è stata utilizzata per la prima volta alla fiera di Hannover nel 2011 in Germania ,facendo riferimento ad una proposta di ripianificazione del sistema industriale tedesco avente come obiettivo quello di migliorare la competitività per far fronte alle pressioni globali da parte dei Paesi in via di sviluppo. Questo modello dai concetti e metodi innovativi è stato poi fonte di ispirazione per tutti gli altri Paesi che hanno idee come priorità nazionale nelle loro strategie di digitalizzazione.¹

La peculiarità di questo modello sta nell'utilizzo di sistemi cyberfisici, ossia sistemi informatici capaci di interagire con i sistemi fisici con cui operano e si basa sulla cooperazione e sull'interconnessione delle risorse, sia meccaniche che umane.²

La principale differenza tra Industry 4.0 e Computer Integrated Manufacturing (CIM),cioè i precedenti sistemi che introducono l'automazione all'interno dell'azienda, è il ruolo umano nell'ambiente di produzione. L'approccio CIM esclude la presenza degli operatori,con l'intenzione di creare le cosiddette "fabbriche senza luci", caratterizzate dall'assenza di essere umani. Al contrario, il paradigma Industry 4.0 promuove la connessione e la collaborazione tra operatori e macchine.

Tale innovazione nell'apparato industriale è orientato a soddisfare le esigenze dei singoli clienti³ e ad incrementare produttività, efficienza e competitività dell'azienda. Tramite l'adozione di tecnologie moderne l'avvento dell'industria 4.0 ha reso possibile trasformare

¹ «Industria 4.0».

² Salento et al., «Industria 4.0».

³ Neugebauer et al., «Industrie 4.0 - From the Perspective of Applied Research».

la produzione di massa, organizzata in celle isolate, in una produzione completamente integrata e automatizzata.⁴

L'implementazione e l'integrazione delle tecnologie ha come obiettivo il raggiungimento della "smart factory", o fabbrica intelligente, in cui macchine dotate di sensori e dispositivi in grado di raccogliere, inviare ed elaborare dati. Queste macchine riescono a comunicare i dati tra loro per svolgere compiti predefiniti. Affinché raggiunga gli obiettivi preposti il sistema delle macchine deve essere istruito sui compiti e monitorato da un'entità superiore, che può essere o un software, o un essere umano o una combinazione di entrambi.

I vantaggi cui la "fabbrica intelligente" ambisce sono:

- la flessibilità produttiva;
- la maggiore velocità nella creazione dei prototipi;
- la maggiore capacità di produzione;
- i ridotti costi di set-up
- la diminuzione del rischio di errore e dei tempi di fermo macchina;
- la maggiore qualità del prodotto
- la diminuzione degli scarti;
- una migliore opinione dei clienti sui prodotti.⁵

⁴ Vaidya, Ambad, e Bhosle, «Industry 4.0 – A Glimpse».

⁵ Büchi, Cugno, e Castagnoli.

2.1 Tecnologie abilitanti

Le moderne tecnologie utilizzate vengono anche definite "abilitanti" o "nove pilastri" e nello specifico sono:

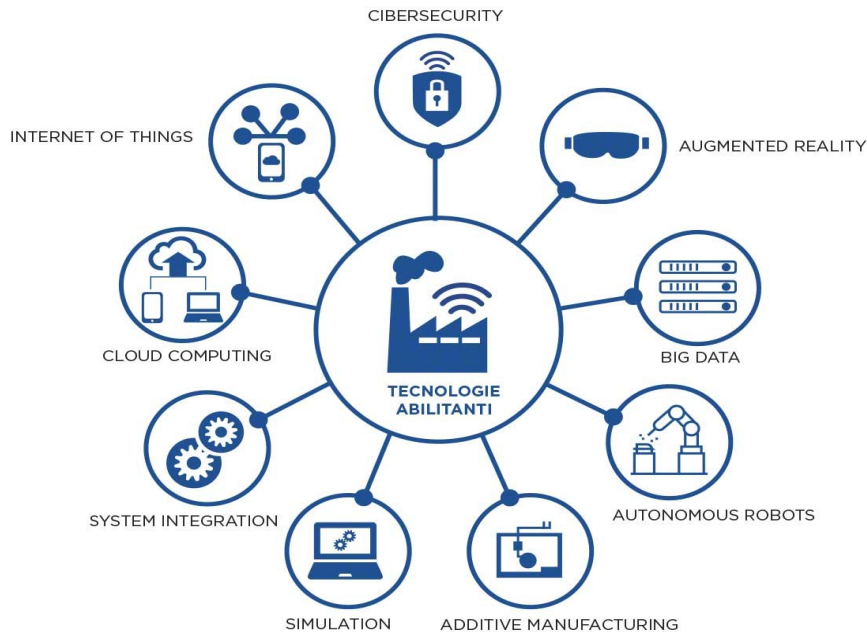


Figura 1: I nove pilastri dell'industry 4.0

2.1.1 Realtà aumentata

Con il termine realtà aumentata si fa riferimento ad una tecnologia capace di sovrapporre uno strato di immagini o dati simulati, che possono essere generati dal computer, al mondo reale, utilizzando dei dispositivi di ascolto (auricolari), visivi (occhiali a proiezione sulla retina), mobili (smartphone), di manipolazione (guanti) o altri dispositivi digitali in grado di integrare il mondo reale con oggetti virtuali in modo che sembrano coesistere nello stesso spazio ⁶

2.1.2 Internet of things

Internet delle cose (Internet of Things, IoT) è un neologismo, introdotto nel 1999 da Kevin Ashton, ricercatore britannico del Mit (Massachusetts Institute of Technology), che

⁶ Azuma et al, «Recent advances in augmented reality - IEEE Journals & Magazine».

teorizzò per primo un mondo di sensori, distribuiti su luoghi e oggetti in modo che tutto fosse direttamente collegato alla rete internet⁷.

Nel 2009 in un articolo pubblicato sul RFID Journal l'ingegnere Kevin Ashton chiarisce cosa intendeva con l'internet delle cose, affermando che aveva analizzato il problema della finitezza del tempo e dell'attenzione dell'uomo, individuando come possibile soluzione quella di programmare ed istruire i sistemi digitali in modo che potessero comunicare tra loro e fossero in grado di sapere in ogni momento cosa dovessero fare senza l'intervento dell'uomo. In questo modo, dichiara, si avrà la possibilità di monitorare e contare tutto e ridurre notevolmente sprechi, perdite e costi.⁸

Con internet of things si fa dunque riferimento alla capacità degli oggetti di essere connessi e di poter scambiare dati ed informazioni fra di loro,⁹ ed è quindi l'estensione di internet al mondo degli oggetti e dei luoghi concreti.¹⁰

Affinché tutto ciò sia possibile sono necessari due requisiti: l'oggetto deve poter essere identificato univocamente sulla rete e deve esserci la possibilità di scambiare dati attraverso la rete stessa. Tutti gli oggetti comuni possono diventare dispositivi attraverso l'internet delle cose, purché in possesso di un indirizzo IP, attraverso il quale vengono identificati, di sensori, con i quali vengono rilevati degli stati dell'oggetto stesso o dell'ambiente esterno e delle memorie, attraverso dei chip su cui vengono registrate le informazioni. Con l'Internet of Things tutti gli oggetti in possesso di queste caratteristiche si interfacciano con la rete, e di conseguenza sono gestibili da remoto.¹¹

2.1.3 Analisi di big data

Proporzionalmente all'aumento dei dispositivi collegati ad internet sono aumentate anche le quantità di dati condivisi. Queste grandi quantità di informazioni sono chiamate Big Data. La definizione comune viene fornita dall'analista Doug Laney, sintetizzabile nel paradigma delle tre V: volume, velocità e varietà. Tale paradigma indica che le quantità di dati sono molto grandi, di carattere eterogeneo, dove ogni tipologia di dato necessita di un

⁷ Palanza, «Internet of things, big data e privacy: la triade del futuro».

⁸ Ashton, «That "Internet of Things" Thing».

⁹ Jansen e Merwe, «A Framework for Industrial Internet of Things».

¹⁰ Giambattista Grusso, «Le tecnologie abilitanti dell'industria 4.0».

¹¹ «Internet of Things».

trattamento specifico, e la cui velocità di acquisizione e accesso è fondamentale, perché i dati devono essere analizzati tempestivamente affinché non diventino obsoleti.¹² Oggi il paradigma di Laney è stato arricchito dalle variabili di Veridicità e Variabilità, per questo si parla di 5V.¹³

Con Big Data Analytics ci si riferisce quindi a tecnologie e metodologie per l'analisi e la raccolta dei big data finalizzate ad ottenere informazioni utili per il business.

2.1.4 Cloud Computing

Il Cloud è un servizio che le aziende offrono per permettere al cliente di disporre delle proprie risorse registrate sulla piattaforma di cui ha bisogno in qualsiasi momento e da qualsiasi device o postazione.

Al giorno d'oggi le aziende non memorizzano le informazioni sui propri sistemi, ma, attraverso le società di servizi cloud. Oltre ad offrire un notevole vantaggio in termini di costi alle aziende, il servizio cloud rende anche più semplice accedere ai dati aziendali ovunque, in quanto vi è la possibilità di inserire, modificare e condividere i dati anche da remoto.¹⁴

2.1.5 Cybersecurity

Con l'aumento della quantità di dati condivisi e delle informazioni a disposizione sulla rete aumentano anche la possibilità di attacchi digitali sia da parte di individui interni all'azienda sia esterni. La potenziale appropriazione illecita di dati sensibili comporta il rischio di danni per il business dell'azienda, a discapito sia dell'impresa sia del singolo. Per questo la cybersecurity elaborante strategie per proteggere i sistemi informatici (computer, reti di telecomunicazione, smartphone, ecc.) e la rete sta assumendo un'importanza fondamentale.¹⁵

¹² Patgiri, Ripon & Ahmed, Arif., «Big Data: The V's of the Game Changer Paradigm.»

¹³ «Big Data».

¹⁴ Yıldız, «Examining The Concept of Industry 4.0 Studies Using Text Mining and Scientific Mapping Method».

¹⁵ «Cyber security».

2.1.6 Additive manufacturing

Al fine di ampliare la possibilità di personalizzare i prodotti occorrono metodi non tradizionali per la produzione. Con tale scopo nasce l'additive manufacturing, anche nota come stampa tridimensionale.¹⁶

Questa tecnologia è in grado di stampare prodotti partendo da un disegno digitale in 3D, realizzato con software CAD. In questo modo si possono realizzare prodotti di qualità elevata e con caratteristiche fisiche che sarebbero difficili da realizzare tradizionalmente. Conseguentemente la stampa 3D ha raggiunto il suo massimo impiego in settori dove la precisione è fondamentale, come ad esempio nell'ambiente biomedico o aerospaziale. Inoltre, attraverso questo metodo innovativo i prodotti vengono realizzati interamente a partire dal disegno, senza necessità di lavorazioni intermedie, incrementando così la rapidità di produzione.

2.1.7 Integrazione verticale e orizzontale

Ingegneria, produzione, marketing e fornitori devono creare uno scenario collaborativo e di integrazione all'interno dell'azienda.¹⁷

Quando si parla di integrazione nel del contesto di Industria 4.0 si fa riferimento all'adozione di determinati sistemi informativi che permettono la comunicazione tra i vari attori della filiera produttiva. Questi sistemi si possono distinguere in due categorie: sistemi di integrazione verticale e orizzontale; Per integrazione orizzontale si intende integrazione dei processi produttivi, che include sia funzioni interne che esterne all'azienda, mentre per quella verticale si intende l'integrazione della produzione con le altre aree aziendali.

2.1.8 Robot autonomi

L'obiettivo dell'industria 4.0 è quello di rispondere alle richieste dei singoli clienti più rapidamente possibile, e per raggiungerlo all'interno dell'impresa è utile utilizzare robot che rendono i tempi di produzione inferiori e permettono di svolgere compiti che risulterebbero difficili o rischiosi agli operatori umani perché situati in posizioni difficili da raggiungere o con carichi troppo elevati o per svolgere lavori pericolosi.

¹⁶ Dilberoglu et al., «The Role of Additive Manufacturing in the Era of Industry 4.0».

¹⁷ Alcácer e Cruz-Machado, «Scanning the Industry 4.0».

Con la quarta rivoluzione industriale si mira ad ottenere ambienti produttivi caratterizzati dalla presenza contemporaneamente di uomini e macchine, in grado di lavorare insieme in sicurezza.

Una delle specie più recenti di robot sono quelli collaborativi, anche noti come cobot, i quali sono in grado di realizzare compiti con accuratezza. La caratteristica principale di questi robot è che permettono la collaborazione nello stesso spazio lavorativo tra uomo e macchina, senza barriere. Essi sono infatti progettati secondo criteri di sicurezza, flessibilità e compattezza; sono dotati di particolari sensori in grado di percepire la vicinanza dell'operatore o il suo ingresso nella zona di lavoro e che permettono di bloccare o rallentare il robot in caso di urto o ingresso. Gli operatori interagiscono con le macchine e questa interazione permette agli esseri umani di andare oltre le proprie capacità migliorando la forza fisica, la precisione, la memoria o la capacità di calcolo. D'altro lato gli esseri umani conservano e trasmettono alle macchine una proprietà che i robot non hanno: la possibilità di modificare in modo dinamico il loro comportamento in funzione dei cambiamenti ed adattarsi ai possibili scenari.

2.1.9 Simulazione

Prima di definire il concetto di simulazione è necessario dare una definizione di sistema e di modello.

Un sistema è una rappresentazione semplificata della realtà. Si considerano sistemi gli insiemi di elementi selezionati, aventi dei limiti specifici e con caratteristiche di tempo predeterminate. Il sistema ha due caratteristiche fondamentali: la presenza di elementi coordinati, che possono interagire e il fatto che questi elementi possono essere sia reali che astratti.

Il modello, invece, è la rappresentazione semplificata di un sistema o di un oggetto fisico. L'efficienza di un modello dipende dal livello di dettaglio: poiché tutti i modelli sono semplificazioni della realtà, un buon modello deve essere una buona approssimazione del sistema reale senza raggiungere la stessa complessità.¹⁸

¹⁸ «Dalla modellazione alla simulazione».

Per lo studio dei sistemi e dei modelli è stata introdotta la simulazione, che permette di riprodurre il comportamento di un determinato sistema, processo o fenomeno tramite un modello che permetta, per esempio, di variare i parametri del sistema o dell'ambiente in maniera più semplice rispetto al sistema che si vuole analizzare o ottimizzare.¹⁹

La simulazione di un sistema è un processo che consente di ottenere la stessa funzionalità del sistema senza disporre della sua realizzazione fisica,²⁰ e si presta a sostituire la prototipazione del prodotto, non più necessaria, eliminando la possibilità di essere sottoposti a particolari rischi o pericoli fisici. Oltre ai numerosi vantaggi dell'utilizzo della simulazione, come la riduzione dei tempi di produzione, dei costi di set-up, degli errori e dei tempi di fermo macchina²¹, bisogna tenere in considerazione che la simulazione fornisce indicazioni sul comportamento del sistema, ma non “risposte” esatte e l'implementazione di un modello di simulazione potrebbe essere complessa e richiedere elevati tempi di calcolo per effettuare una simulazione significativa.

Generalmente le simulazioni sono iterative nello sviluppo: per prima cosa si crea il modello e lo si simula, si registrano le informazioni che si ricevono dalla simulazione, poi si rivede il modello apportando delle modifiche, se necessario, e si itera questo procedimento fino al raggiungimento di un adeguato livello di comprensione.

La simulazione, uno dei nove pilastri dell'industry 4.0, consiste di tutte quelle tecnologie che attraverso l'impiego di sistemi per la rielaborazione dei dati raccolti in tempo reale, analizza e migliora i processi e valuta le possibili problematiche che si possono presentare nella realtà.²²

La simulazione sfrutta i dati raccolti per ricreare il mondo fisico all'interno di un mondo virtuale, concorrendo alla realizzazione del gemello virtuale

¹⁹ «simulare in Vocabolario - Treccani».

²⁰ «Dalla modellazione alla simulazione».

²¹ Büchi, Cugno, e Castagnoli, «Smart Factory Performance and Industry 4.0».

²² Bagnoli et al., «2 La fattibilità tecnica».

3. Gemelli digitali

Un gemello digitale è un modello virtuale di un prodotto, di un processo o di un servizio atto a studiare il comportamento di un sistema. Le informazioni derivanti dalla simulazione del modello permettono di effettuare previsioni sull'impianto al fine di evitarne danni o malfunzionamenti.

3.1 Nascita, evoluzione e situazione attuale

Il settore aerospaziale è stato il primo ad utilizzare il concetto di gemello digitale, ancora prima che fosse stato identificato e teorizzato. In questo ambiente è fondamentale trovare metodi alternativi ai tradizionali per poter controllare ed effettuare previsioni su sistemi, non fisicamente, in quanto spesso è necessario eseguire operazioni di manutenzione su dispositivi molto distanti dagli operatori.

In particolare, la NASA è stata la prima ad utilizzare dei gemelli digitali nel programma Apollo, dove erano previsti almeno due veicoli identici con lo scopo di riprodurre le condizioni di uno sull'altro. Il gemello era stato utilizzato sia durante le esercitazioni, per preparare gli astronauti al viaggio, sia durante la missione. In quest'ultimo caso il veicolo sulla terra era stato utilizzato per simulare il comportamento di quello nello spazio. I dati provenienti dalla navicella venivano riprodotti ed elaborati nel modo più oggettivo possibile sul gemello con l'obiettivo di analizzare e risolvere possibili problemi. In questo modo vi era la possibilità di assistere gli astronauti in molteplici situazioni, critiche e non, permettendo di comprendere i problemi a distanza. Celebre è diventato l'utilizzo per il salvataggio dell'equipaggio dell'Apollo 13 da un'esplosione di cui gli astronauti non conoscevano né la causa né come agire. La NASA si è servita dei simulatori per poter soccorrere gli astronauti, istruendoli dalla base su come risolvere il problema.²³

Tuttavia il termine "gemello digitale" è stato introdotto solo nel 2001 da Michael Grieves, ricercatore presso l'Università del Michigan Michael Grieves all'interno della propria ricerca sulla gestione del ciclo di vita del prodotto (Product Lifecycle Management –

²³ VikramD, «Apollo 13».

PLM). La diapositiva della presentazione, mostrata in figura 1, era intitolata "Conceptual Ideal for PLM".

Grieves riporta in essa tutti gli elementi che contraddistinguono i gemelli digitali, ossia lo spazio reale, quello virtuale e il collegamento tra i due.²⁴

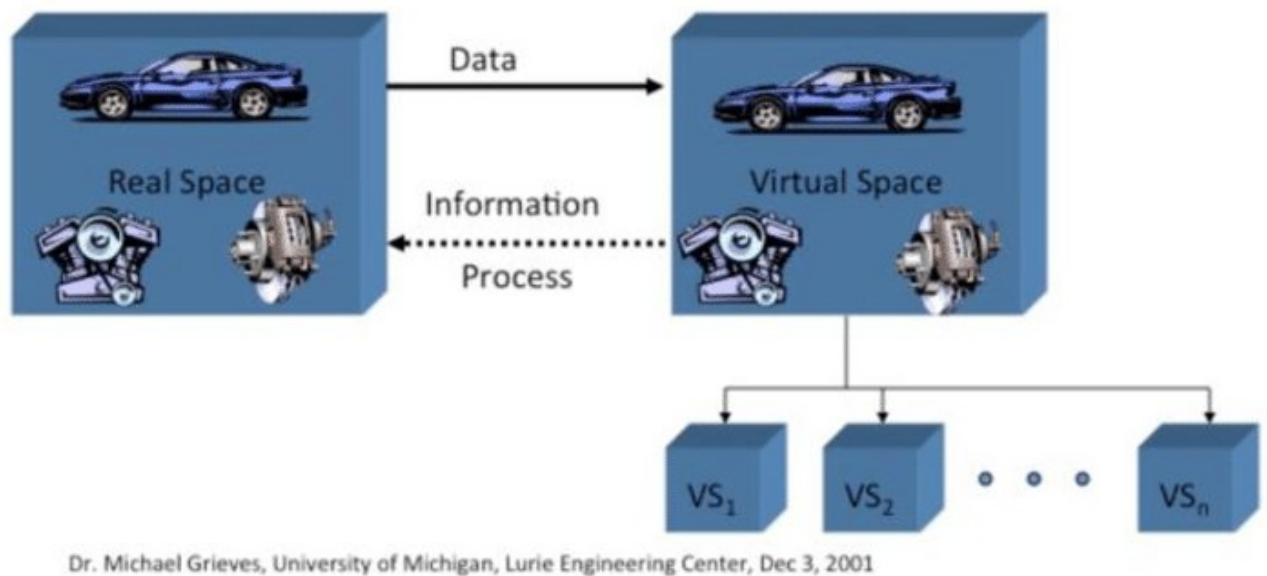


Figura 2 : "Conceptual Ideal for PLM"

Mentre la terminologia per definire questo nuovo metodo di simulazione cambierà nel corso degli anni, le caratteristiche introdotte da Grieves rimarranno comuni alle diverse definizioni.

La prima vera definizione di gemello digitale viene formulata dalla NASA nel 2010:

“Una simulazione ultra-realistica ad alta scalabilità, che utilizza i migliori modelli fisici disponibili, i dati dei sensori e quelli storici per il mirroring di uno o più sistemi reali”²⁵

Oltre alla definizione vengono riportate le principali funzioni del gemello digitale: la predizione, la sicurezza e la diagnosi. Il digital twin, infatti, aiuta a prevedere lo stato del veicolo, la vita utile residua e la probabilità di successo della missione, permettendo ai

²⁴ Grieves, Michael., «Origins of the Digital Twin Concept.»

²⁵ Mike Shafto, Chair et al., «Modeling, Simulation, Information Technology & Processing Roadmap».

sistemi di bordo di rendere il danno più lieve apportando le modifiche suggerite dalla simulazione.

Negli stessi anni l'US Air Force ha iniziato ad utilizzare i gemelli digitali per poter stabilire piani di manutenzione ottimali di un aereo attraverso la simulazione del comportamento sul modello.

La formalizzazione del concetto è avvenuta nel 2014, con la pubblicazione del Whitepaper sul 'digital twin' di Michael Grieves.

Da tale pubblicazione sono sempre più numerose le sperimentazioni in vari ambiti, come, ad esempio, l'ottimizzazione dei processi produttivi, nel settore petrolifero o sanitario. Si è diffuso anche in aziende rilevanti come General Electric, Siemens, Microsoft, Tesla, al fine di migliorare la flessibilità produttiva e la competitività nel mercato.²⁶

In seguito all'aumento dell'utilizzo e della ricerca sui gemelli digitali, nel 2017 la Gartner, società di consulenza nel campo della tecnologia dell'informazione, li ha classificati tra le 10 tendenze tecnologiche per l'anno successivo. La Gartner ha inoltre affermato che entro il 2021 la metà delle maggiori aziende li utilizzerà, ottenendo un miglioramento del 10% in termini di efficienza.²⁷

Attualmente vengono svolti numerosi studi riguardo le prospettive di guadagno e di investimento nelle tecnologie dei gemelli digitali. In particolare, un nuovo studio di Juniper Research ha mostrato che la spesa globale in digital twins tenderà a raggiungere i 12,7 miliardi di dollari (11,3 miliardi di euro) entro il 2021, un aumento del 17% dai 10,8 miliardi di dollari (9,6 miliardi di euro) del 2019. Le previsioni dei guadagni in termini di efficienza inducono le imprese a non ridurre gli investimenti nell'anno del Covid-19, dove si prevede un calo dell'1% della spesa.²⁸

In seguito alla diffusione della tecnologia dell'internet delle cose, i gemelli digitali si sono sviluppati in vari settori, in particolare, la ricerca identifica che la produzione sarà

²⁶ «(PDF) Shaping the Digital Twin for Design and Production Engineering».

²⁷ «Digital twin».

²⁸ «I gemelli digitali diventano grandi e non conoscono crisi».

l'ambiente dove vi sarà la più vasta implementazione di Digital Twins, pari al 34% della spesa totale nel 2021.²⁹

3.2 Definizione e caratteristiche

Le definizioni per i gemelli digitali sono molteplici ed esprimono concetti simili, ma al momento le due definizioni maggiormente accettate sono quelle fornite da Grieves e dalla NASA. Da entrambe emerge la concezione dei gemelli digitali come la copia virtuale di oggetti, processi o servizi reali, utilizzabili per replicare in tempo reale il comportamento del sistema reale grazie agli input derivanti dai sensori applicati.³⁰

I gemelli digitali non sono lo strumento che consente di effettuare previsioni sul sistema, ma sono dei modelli che devono essere implementati da altri metodi simulativi per poter trarre conclusioni sul funzionamento di un processo.

Sin dall'introduzione di questa nuova tecnologia, si possono distinguere tre elementi fondamentali che la costituiscono: il prodotto fisico nello spazio reale, il gemello digitale sotto forma di software e i dati che collegano i primi due elementi.³¹

Come afferma Grives nel *Whitepaper* del 2014., esistono due tipologie di gemelli digitali, le quali operano all'interno di un ambiente definito "digital twin environment " (DTE), e sono:

- Il Digital Twin Prototype (DTP) , che descrive il prototipo del prodotto e riguarda i progetti, le analisi e i processi necessari per la realizzazione di un prodotto fisico, gemello di quello virtuale ;
- La Digital Twin Instance (DTI) , che descrive un prodotto fisico specifico, a cui un singolo gemello digitale rimane collegato per tutto il ciclo di vita .³²

²⁹ «Spend on digital twins to reach \$12.7bn by 2021, as solutions offer IoT investment Rol».

³⁰ «Digital Twin 4.0».

³¹ «What is digital twin?»

³² Grieves, Michael., «Origins of the Digital Twin Concept.»

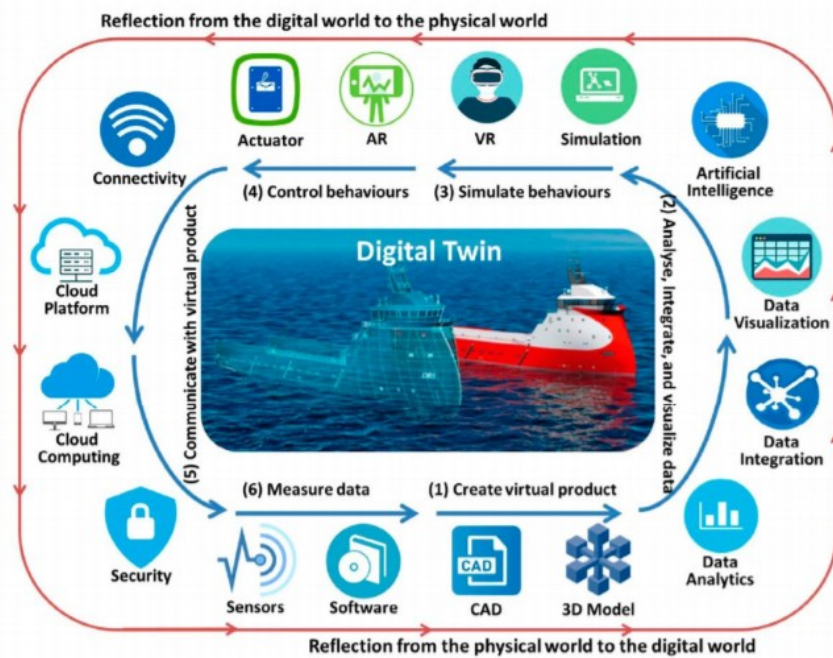


Figura 3: utilizzo delle tecnologie abilitanti

Le tecnologie abilitanti, che negli ultimi anni hanno consentito di realizzare i gemelli digitali, sono tutte quelle presentate nell'ambito dell'Industry 4.0 e possono essere raccolte in tre categorie: connettività, digitalizzazione e intelligenza artificiale.

All'interno del pilastro della connettività possiamo trovare:

- una serie di sensori che raccolgono i segnali, consentendo al gemello di acquisire dati operativi e ambientali relativi al processo fisico nel mondo reale;
- l'internet delle cose, attraverso il quale i vari dispositivi possono comunicare i dati tra di loro;
- i Big data, cioè aggregazioni di informazioni ricevute tramite i sensori dal mondo reale e combinate con altri dati dell'azienda. Ne sono esempi i disegni di progetto prodotti da programmi esterni come CAD oppure log effettuati dai dispositivi sul campo.

Nell'ambito della digitalizzazione, invece, vi sono i modelli di simulazione e quelli basati sui dati (Data-driven modeling). I modelli di simulazione riproducono l'evoluzione nel

tempo dell'oggetto fisico, ricreandone il comportamento e verificandone la funzionalità e l'efficienza per proporre degli scenari di miglioramento.

I modelli basati sui dati, invece, richiedono la conoscenza del funzionamento del sistema reale. Essi prendono in prestito tecniche matematiche e statistiche avanzate per analizzare i dati che caratterizzano un sistema per trovare relazioni tra input e output, allo scopo di definire il lato "digitale" del Digital Twin. Negli ultimi anni, accanto ai modelli di simulazione, anche i Data-driven modeling stanno attirando sempre maggiore attenzione a causa dell'elevata quantità di dati resa disponibile dalla rapida diffusione di sensori avanzati e tecnologie di raccolta dati. Entrambi i modelli vengono utilizzati per poter prendere decisioni informate e prevedere il comportamento dell'oggetto.³³

L'intelligenza artificiale, gli attuatori e le tecniche di data analytics fanno parte dell'ultima categoria. L'intelligenza artificiale consente alle macchine di imparare dall'esperienza, adattarsi a nuovi input ed eseguire attività simili a quelle umane. Grazie ai recenti sviluppi tecnologici, l'intelligenza artificiale può effettivamente percepire l'ambiente, analizzare le situazioni e identificare le decisioni migliori per raggiungere l'obiettivo predefinito. Le tecniche di Data Analytics vengono utilizzate per analizzare e visualizzare, tramite algoritmi, le informazioni raccolte dai sensori. In questo modo consentono di scoprire, interpretare e comunicare andamenti significativi nei dati così da poter prendere decisioni efficaci. Se nel sistema reale è richiesta un'azione, questa viene riprodotta mediante "attuatori" sottoposti al controllo umano, che innescano il processo fisico. L'azione riguarda sia le decisioni operative, come quelle necessarie in un sistema di controllo dinamico, sia quelle di carattere più strategico o organizzativo.³⁴

Dallo studio delle tecnologie applicate per la creazione di un gemello digitale è possibile notare come questo ultimo sia l'unione della realtà fisica e virtuale. Esso si compone infatti sia di entità tangibili sia di entità presenti solo nel mondo digitale. Nella figura sottostante sono mostrati i dispositivi fisici e le entità virtuali presenti all'interno di un gemello digitale.

³³ «Digital twin, come e perché creare una copia digitale della realtà».

³⁴ Luigi Manca, Roberto Grugni, e Ramin Mirzazadeh, «Gemelli digitali».

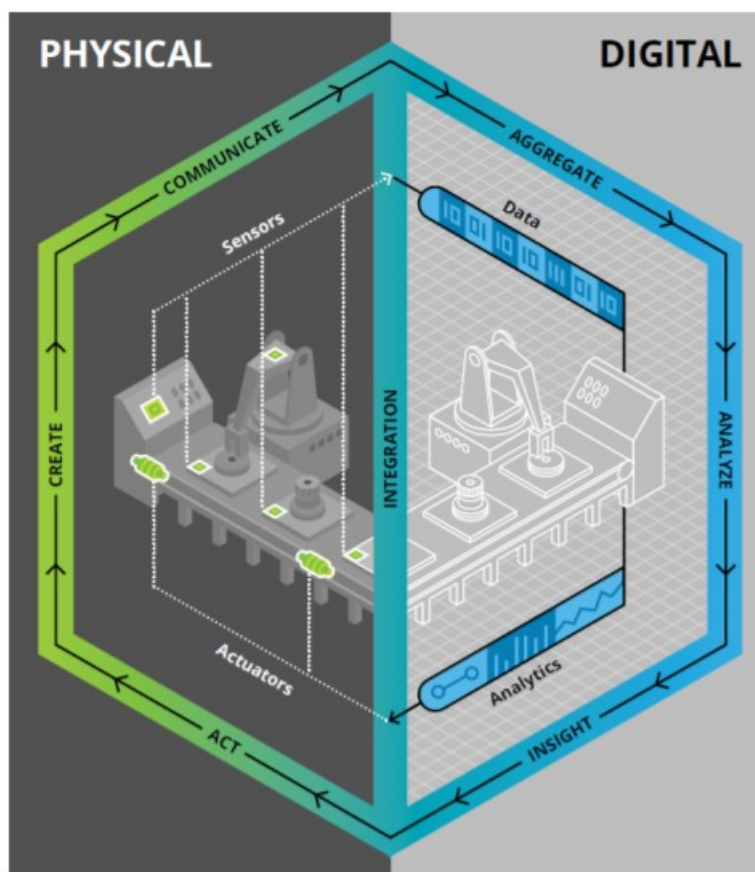


Figura 4: Struttura di un modello di gemello digitale

3.3 Vantaggi e svantaggi

Utilizzare i gemelli digitali all'interno del proprio impianto consente di ottenere numerosi vantaggi, come:

- La riduzione del tempo di lancio nel mercato del prodotto (time to market). I gemelli digitali permettono di cambiare la catena produttiva molto più velocemente rispetto al passato e di risparmiare almeno il 50% del tempo;
- L'incremento della produttività. Secondo Siemens, multinazionale tedesca che opera nei settori delle tecnologie, della mobilità e dei servizi, si prevede un aumento della produzione del 20%, grazie all'impiego dei gemelli digitali;³⁵

³⁵ «Che cosa sono i gemelli digitali e a cosa servono | Libero Tecnologia».

- Il miglioramento continuo: l'implementazione del concetto di Digital Twin coinvolge molte altre tecnologie digitali e innovazioni che, a loro volta, possono configurarsi come fattori chiave per innescare futuri miglioramenti aziendali. La connessione tra prodotto virtuale e fisico consente di analizzare le prestazioni in varie condizioni e apportare modifiche nell'ambiente virtuale per assicurare che il prodotto fisico successivo si comporti esattamente come previsto. Avendo, quindi, una cronologia dettagliata del modello precedente, si possono correggere gli errori e creare nuove versioni più affidabili;³⁶
- La predittività: impiegando diverse tecniche di modellazione (matematica o basata su simulazione o, ancora, su dati) il Digital Twin può essere utilizzato per prevedere lo stato futuro di asset aziendali rilevanti, così come l'impatto di eventuali criticità (ad esempio, interruzioni di servizio o malfunzionamenti di vario genere).
- La riduzione dei costi di manutenzione: attraverso i metodi di simulazione che derivano dal modello del gemello digitale è possibile verificare il funzionamento di un prodotto senza avere la necessità di creare un prototipo fisico, che comporterebbe dei costi maggiori dovuti anche a possibili guasti fisici. In base a uno studio del Forum economico mondiale insieme alla multinazionale di consulenza Accenture, i costi di manutenzione possono essere ridotti di un 30% con i gemelli digitali;
- Le analisi di scenario (what-if): vi è la possibilità di confrontare e valutare diversi scenari. Attraverso interfacce utente correttamente progettate, è facile interagire con il sistema Digital Twin e testare diversi scenari per identificare le migliori azioni da implementare nel sistema reale.
- La visibilità: il gemello digitale migliora la visibilità relativa al funzionamento di macchine o altri asset aziendali, nonché di più grandi sistemi interconnessi;
- La conoscenza: il Digital Twin può essere utilizzato come strumento di comunicazione e documentazione, per comprendere e spiegare i comportamenti di uno o più sistemi.³⁷
- La sostituzione del testing del prodotto fisico con il testing del prodotto digitale: questo permette di risparmiare considerevolmente sui costi di produzione in quanto,

³⁶ «Digital twins, the keys to the Fourth Industrial Revolution».

³⁷ «Digital Twin - Enabling Technologies - Engineering».

anziché realizzare materialmente l'oggetto in molte versioni al fine di trovare quella ottimale, si lavora su una copia digitale effettuando tutti i test necessari che si sarebbero dovuti effettuare con i vari prototipi.

Oltre ai numerosi vantaggi occorre tenere presente anche i limiti di questa tecnologia. Il successo dei gemelli digitali dipende dalla connettività dell'internet delle cose e tramite questa connessione avviene la condivisione dei dati registrati dai sensori. Sarà pertanto necessario applicare dei metodi di cybersecurity. Uno dei principali limiti coincide con un vantaggio ed è quello economico: per poter avere un gemello digitale funzionante e con caratteristiche ottimali è necessario aver investito grandi quantità di denaro nella ricerca ed è richiesta un'infrastruttura all'avanguardia che non tutti gli stabilimenti possono permettersi. Pertanto da un lato i gemelli digitali permettono di avere un'importante riduzione dei costi, ma dall'altro comportano altrettanto grandi esborsi per l'acquisto degli strumenti necessari e la formazione del personale.³⁸ Lo sviluppo e la gestione dei digital twin, infatti, richiede operatori qualificati.

3.4 Applicazioni

I gemelli digitali vengono utilizzati all'interno del sistema industriale in varie fasi: in quella di progettazione o design, di produzione e di servizio.

Un buon design si ottiene migliorando costantemente le specifiche del prodotto. Il gemello digitale è in grado di tenere traccia delle modifiche e monitorare i miglioramenti, in modo da realizzare l'ottimizzazione iterativa del prodotto. La progettazione odierna non segue più il "modello del calzolaio", secondo il quale il calzolaio doveva svolgere tutti i compiti da solo. Oggi si parla di progettazione collaborativa, dove i processi sono frammentati in più parti e ogni settore dell'azienda deve svolgere una o poche funzioni, causando la perdita di molte informazioni utili per il processo decisionale. Per risolvere questo problema di comunicazione può essere utilizzato il gemello digitale, che raccoglie, analizza e registra in tempo reale i dati dallo spazio fisico. Un'altra applicazione dei gemelli digitali è dunque quella di fornire integrità di dati. Il gemello digitale viene impiegato anche per ridurre le

³⁸ «Costruire un gemello digitale».

incongruenze tra il comportamento effettivo e quello atteso e come un prototipo virtuale, realizzando le fasi di valutazione e verifica del prodotto.

Per quanto riguarda la produzione, questi modelli vengono utilizzati per monitorare il processo in tempo reale e, a differenza dei metodi che venivano usati in precedenza, non fornisce soltanto i dati correnti, ma aiuta a comprendere la situazione e prendere decisioni. Nella fase di produzione, potrebbero presentarsi disturbi sia interni che esterni alla fabbrica, come il degrado delle macchine o le variazioni delle materie prime. In questi casi i modelli continuamente aggiornati migliorano l'accuratezza della previsione. I gemelli digitali vengono anche impiegati per la pianificazione della produzione, che comprende sia la gestione delle risorse, sia l'organizzazione della collaborazione all'interno dello stesso ambiente di robot e operatori, sia l'ottimizzazione e la valutazione dei processi.³⁹

Come è possibile notare, le principali funzioni di questi modelli sono la possibilità di effettuare previsioni sulla vita utile di un pezzo o sui processi di produzione, la capacità di monitorare e registrare in tempo reale le informazioni o i dati ricevuti dai sensori e comunicarli agli altri dispositivi che possono trovarsi in altre aree dell'azienda.

Tutti questi scopi possono essere applicati anche alla fase di servizio del prodotto. In particolare per la manutenzione predittiva del prodotto, attraverso la quale con l'utilizzo dei modelli viene stimato il tempo di guasto. Questa è la principale applicazione sia nella ricerca accademica che nella pratica industriale dall'inizio dello sviluppo del gemello digitale ad oggi.

3.5 Esempi di gemelli digitali

"Fornendo una visione in tempo reale di ciò che sta accadendo con le apparecchiature o altre risorse fisiche, i digital twin risultano strategici nel supportare la produzione, riducendo i problemi di manutenzione e garantendo i prodotti ottimizzati."⁴⁰

Ma i gemelli digitali si stanno sviluppando sempre più in tutti i contesti e non solo in quello del sistema industriale.

³⁹ Adamenko et al., «Review and Comparison of the Methods of Designing the Digital Twin».

⁴⁰ «Digital twin».

Oltre all'esempio della NASA, che per prima ha utilizzato dei gemelli digitali nel programma Apollo, si può riportare la General Electric Company, multinazionale statunitense specializzata in molti ambiti e attiva nel settore della tecnologia e dei servizi. Tale impresa possiede più di 500.000 gemelli digitali di turbine che vengono usati per la manutenzione e il controllo dei pezzi. Per fare ciò vi sono dei sensori sulla turbina reale che permettono di ottenere i dati in tempo reale, necessari per realizzare una simulazione concreta del funzionamento della turbina, come la velocità di rotazione, la potenza elettrica o la temperatura delle componenti. Attraverso i digital twin si ricevono dei parametri da parte della turbina fatta di bit e nel caso di anomalie rispetto a quelli reali si attivano dei meccanismi di controllo per individuare e risolvere il problema. "Per ogni risorsa fisica nel mondo, abbiamo una copia virtuale in esecuzione nel cloud che si arricchisce ogni secondo di dati operativi", afferma Ganesh Bell, digital officer e general manager di Software & Analytics presso GE Power&Water.⁴¹

Si possono trovare esempi di questi modelli anche nell'ambiente dell'intrattenimento e dello sport. Questi sono stati infatti utilizzati per perfezionare le corse automobilistiche della formula 1, regolando i parametri del veicolo dopo aver eseguito delle simulazioni. Un altro settore interessante in cui sono stati introdotti è quello urbano, delle "smart cities", in quanto è stato realizzato un gemello digitale di Singapore grazie al quale è possibile migliorare le condizioni di vita dei cittadini gestendo il traffico, l'efficienza dei consumi energetici e i servizi pubblici.

⁴¹ Marr, «What Is Digital Twin Technology - And Why Is It So Important?»

4. Creazione di un gemello digitale

4.1 Architettura del digital twin

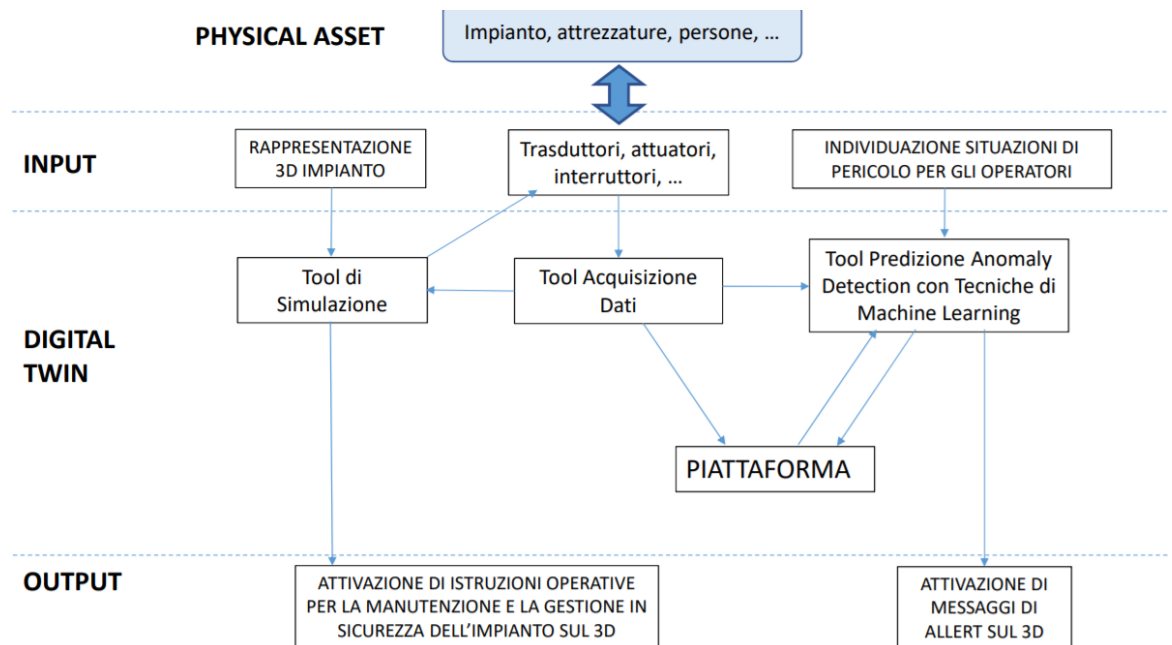


figura 5: Architettura dei gemelli digitali

La creazione dei gemelli digitali prevede numerose fasi e strumenti. In input devono essere forniti i dati provenienti dai sensori, attuatori e dispositivi installati sull'impianto, e l'analisi di queste informazioni per determinare il comportamento ed eventuali situazioni di pericolo che possono verificarsi nel sistema.

Dopodiché devono essere eseguite la modellazione e la simulazione, confrontando il funzionamento reale ed ideale per evidenziare eventuali anomalie. In output quindi si ottiene così l'individuazione di irregolarità e messaggi di alert sul modello 3D che gli operatori e i gestori del sistema possono utilizzare per la manutenzione e la sicurezza dell'entità reale.

4.2 Modellazione

La modellazione viene definita come: "una metodologia di progettazione che si basa sulla produzione di un modello che implementa un sistema e ne rappresenta compiutamente le sue funzionalità in modo tale da consentire al progettista di prevedere il comportamento di un sistema e gli effetti delle variazioni o modifiche che vengono effettuate su questo." ⁴²

Si possono distinguere diverse tipologie di modellazione: quella geometrica, fisica, comportamentale e di regole.

Il modello geometrico descrive un'entità fisica in termini di forma e aspetto, con strutture di dati appropriate, adatte per la conversione e l'elaborazione delle informazioni da parte del computer. Il modello geometrico include sia caratteristiche geometriche (ad esempio, punti, linee, superfici e corpi) sia topologiche (relazioni tra elementi come intersezione, adiacente, tangente, verticale e parallelo). Inoltre, per aumentare il senso della realtà, gli sviluppatori creano effetti di consistenza dell'aspetto (come usura, crepe, impronte digitali o macchie) con bitmap, cioè un formato di dati per la rappresentazione di immagini, che permettono di riprodurre i dettagli della superficie dell'oggetto.

Il modello fisico aggiunge informazioni, come quelle sulla precisione (tolleranza dimensionale, di forma, di posizione, rugosità superficiale...), sui materiali (materiale, prestazioni, requisiti di trattamento termico, durezza...) e sull'assemblaggio (relazione di accoppiamento, ordine di assemblaggio...).

Il modello comportamentale descrive vari comportamenti di un'entità fisica per adempiere alle funzioni, rispondere ai cambiamenti, interagire con gli altri, regolare le operazioni interne ed evitare guasti. La simulazione dei comportamenti fisici è un processo complesso che coinvolge più modelli, come il modello del problema, lo stato modello, modello dinamico, modello di valutazione.

Il modello di regole descrive le regole estratte da dati storici e le conoscenze specialistiche. Le regole dotano il modello virtuale della capacità di ragionare, giudicare, valutare,

⁴² «Dalla modellazione alla simulazione».

ottimizzare e prevedere. La modellazione delle regole implica l'estrazione, la descrizione, l'associazione e l'evoluzione delle regole.

Per raggiungere un'elevata precisione, affidabilità e riprodurre caratteristiche sia statiche sia dinamiche, la modellazione dovrebbe essere progettata multi - obiettivo e per prestazioni complete.⁴³

Generalmente le tecniche di modellazione possono essere raggruppate in due categorie principali: la modellazione tramite metodi basati sulla fisica o sui principi primi e la modellazione fondata sui dati. Independentemente dalla tipologia di creazione, un digital twin viene sempre ideato per adempiere ad un'applicazione specifica ed è pertanto unicamente utilizzabile per gestire la stessa.

I modelli basati sulla fisica sono quelli in cui gli oggetti obbediscono ai principi della fisica e possono essere costituiti basandosi su due approcci:

- si modella la fisica del processo rappresentato, e la si usa per governare e guidare la grafica;
- si utilizza una combinazione di fisica di base e di vincoli matematici per controllare il comportamento dinamico degli oggetti.⁴⁴

Questa tipologia di modelli, basati sul sistema, si concentrano sull'oggetto fisico nel mondo reale, rappresentandolo con maggiore precisione. Per creare un gemello basato sul sistema è necessaria la conoscenza di tutti i dettagli tecnici e le caratteristiche del prodotto, come le dimensioni, il peso o il materiale. Inoltre, devono essere riportate anche le informazioni sul software e sui componenti elettronici utilizzati. Se le caratteristiche del sistema vengono mappate utilizzando modelli informativi coerenti le informazioni necessarie possono essere recuperate in modo standardizzato. Per ottenere un modello basato sulla fisica completo, di grandi dimensioni, è necessario avere uno scheletro che consenta lo scambio di dati tra i vari modelli e sistemi.

Questi modelli sono particolarmente adatti per le simulazioni, poiché forniscono le informazioni sulla causa determinante il comportamento di un oggetto sotto specifiche

⁴³ Qi et al., «Enabling Technologies and Tools for Digital Twin».

⁴⁴ «Metodi di modellazione».

condizioni. Oltre alle simulazioni tradizionali possono essere eseguite analisi di scenario, anche dette what-if, per determinare come si comporterebbe l'oggetto se venissero apportate modifiche. In questo modo può essere simulata la risposta del sistema alla variazione di condizioni ambientali o di altre caratteristiche senza esporre effettivamente il prodotto reale al rischio o al danno fisico, utilizzando dei prototipi. Attraverso queste analisi si può stabilire anche il comportamento che l'operatore umano deve avere in specifiche situazioni, rendendo non più necessaria l'interazione dell'uomo con la macchina e la sottoposizione a situazioni di pericolo. Con le simulazioni di scenario le previsioni vengono migliorate in quanto non si basano solo su dati storici, ma anche su dati che possono verificarsi in futuro ma che non si sono ancora verificati.

L'approccio comune nei gemelli digitali basati sui dati consiste nell'ordinamento in base a funzionalità o assemblaggi diversi dell'oggetto fisico. In questo modo una struttura semplice può supportare l'analisi della causa principale che consente di ottenere rapidamente una panoramica della prestazione dell'oggetto. Per analizzare e valutare i dati possono essere utilizzati algoritmi e funzioni combinati con il machine learning, cioè l'apprendimento automatico, inteso come l'abilità delle macchine di determinare e migliorare determinati compiti con l'esperienza, senza dover essere preventivamente ed esplicitamente programmate per ciò.

La prima fase per la creazione dei modelli basati sui dati consiste nell'accertarsi che essi siano tutti accessibili. Si sviluppano poi le funzioni e i modelli che vengono verificati con i dati resi disponibili. I risultati vengono memorizzati, in questo modo il comportamento di un oggetto può essere compreso anche per un periodo di tempo più lungo. Per poter fornire al cliente un valore aggiunto devono essere effettuate applicazioni finali che consentano all'utente di avere informazioni personalizzate, per lui rilevanti. Con il data-driven il processo di progettazione è altamente iterativo e non tutte le informazioni sono disponibili interamente all'inizio del processo. Per la creazione di questo modello si può utilizzare un file che organizza e collega i dati dei sensori con altre informazioni provenienti da fonti diverse.

Rispetto al modello basato sui dati, quello sulla fisica risulta notevolmente più complesso perché viene richiesta una quantità di dati superiore per una maggiore precisione e una visione più completa della performance dell'oggetto. Inoltre, il modello di sistema non viene utilizzato soltanto per migliorare, comprendere lo stato attuale e prevedere possibili

guasti, ma si utilizza anche per la simulazione eseguita senza l'impiego dell'oggetto fisico.
45

Un'altra possibilità per modellare un gemello digitale è la combinazione di entrambi gli approcci precedentemente presentati, in modo da poter sfruttare i vantaggi di ciascuno ed ottenere la massima precisione possibile della rappresentazione della realtà.

⁴⁵ Adamenko et al., «Review and Comparison of the Methods of Designing the Digital Twin».

4.3 Gemello digitale di un motore asincrono di un trapano a colonna

Per quanto riguarda i tool di simulazione, esistono numerosi strumenti software che permettono di realizzare la modellazione basata sui dati e sul sistema. In particolare, si può utilizzare MATLAB, che è un ambiente per il calcolo numerico ideato dalla compagnia statunitense Mathworks, per i modelli basati sui dati. Mentre per realizzare i modelli basati sulla fisica si può usare simulink,) strumento che opera in ambiente matlab utile per la modellazione, simulazione ed analisi dei sistemi dinamici.⁴⁶

La modellazione basata sulla fisica con Simulink include la progettazione del sistema da principi primi. I modelli possono includere componenti meccanici, idraulici ed elettrici e possono inoltre derivare da un lavoro di progettazione a monte che utilizza la metodologia model-based.⁴⁷

L'obbiettivo di questo progetto è di creare il modello digitale del motore trifase 220V in corrente alternata di un trapano a colonna, ottenendo come output la velocità di rotazione. Attraverso questa è poi possibile ricavare la velocità del mandrino utilizzando delle specifiche tabelle riportate su ogni trapano.

⁴⁶ Redazione, «Simulink».

⁴⁷ «Che cos'è il digital twin?»

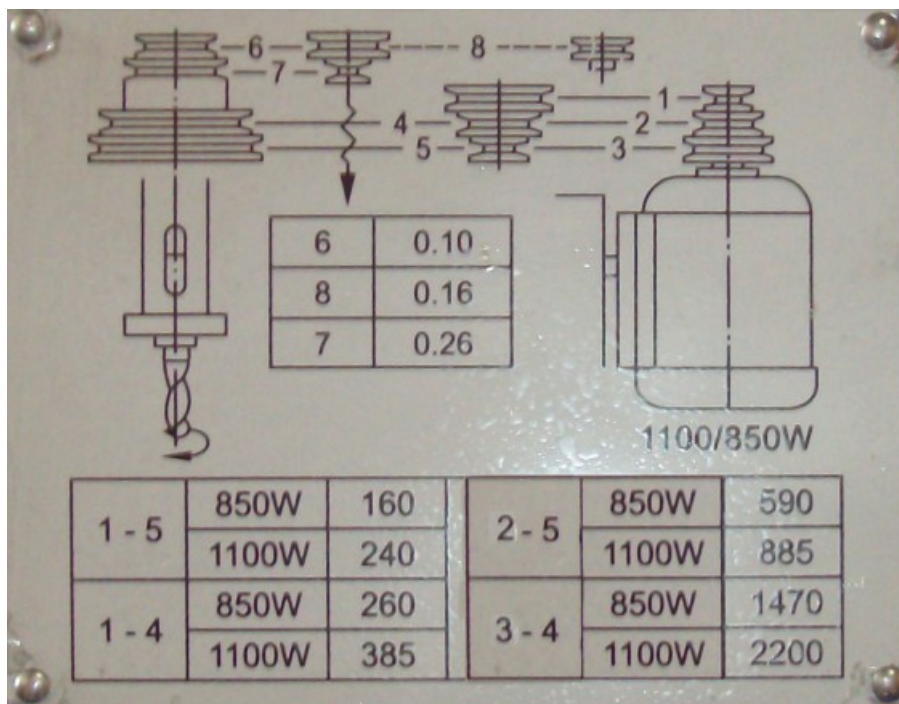


figura 6: targa delle velocità del mandrino

Tali tabelle riportano la configurazione delle cinghie sulle due puleghe presenti nel trapano: a seconda della posizione delle cinghie si possono ottenere diverse velocità.

Tenendo presente che:

- V_{sd}, V_{sq} sono le tensioni statoriche;
- V_{rd}, V_{rq} sono le tensioni rotoriche;
- i_{sd}, i_{sq} sono le intensità di corrente statoriche
- i_{rd}, i_{rq} sono le intensità di corrente rotoriche;
- Φ_{rd}, Φ_{rq} sono i flussi rotorici;
- Φ_{sq}, Φ_{sd} sono i flussi statorici;
- ω_a è la pulsazione di alimentazione;

- ω_r è la velocità rotorica;
- M è la mutua induttanza;
- R_r e R_s sono le resistenze rispettivamente del rotore e dello statore;
- L_r e L_s sono le induttanze rispettivamente del rotore e dello statore;
- C_m è la coppia meccanica;
- p è il numero di coppie polari;
- F_t è il coefficiente di attrito;
- J è l'inerzia del motore;
- C_t è la coppia trasmessa, detta anche elettromagnetica;

sapendo che

$$\dot{\theta}_s = \omega_a \quad \text{e} \quad \dot{\theta}_r = \omega_a - \omega_r$$

le equazioni sono:

$$\begin{aligned} v_{sd} &= R_s \cdot i_{sd} + \dot{\varphi}_{sd} - \dot{\vartheta}_s \cdot \varphi_{sq} \\ v_{sq} &= R_s \cdot i_{sq} + \dot{\varphi}_{sq} + \dot{\vartheta}_s \cdot \varphi_{sd} \\ \varphi_{sd} &= L_s \cdot i_{sd} + M \cdot i_{rd} \\ \varphi_{sq} &= L_s \cdot i_{sq} + M \cdot i_{rq} \\ v_{rd} &= R_r \cdot i_{rd} + \dot{\varphi}_{rd} - \dot{\vartheta}_r \cdot \varphi_{rq} = 0 \\ v_{rq} &= R_r \cdot i_{rq} + \dot{\varphi}_{rq} + \dot{\vartheta}_r \cdot \varphi_{rd} = 0 \\ \varphi_{rd} &= L_r \cdot i_{rd} + M \cdot i_{sd} \\ \varphi_{rq} &= L_r \cdot i_{rq} + M \cdot i_{sq} \end{aligned}$$

Esplicitando le correnti di rotore (i_{sd} e i_{sq}) ed il flusso statorico (φ_{rd} e φ_{rq}), che sono grandezze incognite, in funzione delle correnti statoriche e del flusso del rotore si ottengono le seguenti relazioni:

$$\begin{aligned}\delta i_{sd} &= -\frac{1}{\left(L_s - \frac{M^2}{L_r}\right)} \left(-v_{sd} - \left(L_s - \frac{M^2}{L_r}\right) \omega_a i_{sq} + \varphi_{rq} \left(\frac{M}{L_r} (\omega_a - \omega_r) - \omega_a \frac{M}{L_r} \right) + \varphi_{rd} \left(-\frac{M}{L_r} \frac{R_r}{L_r} \right) + i_{sd} \left(R_s + \frac{M}{L_r} \frac{R_r M}{L_r} \right) \right) \\ \delta i_{sq} &= -\frac{1}{\left(L_s - \frac{M^2}{L_r}\right)} \left(-v_{sq} + i_{sq} \left(R_s + \frac{M}{L_r} \frac{R_r M}{L_r} \right) + \varphi_{rq} \left(-\frac{M}{L_r} \frac{R_r}{L_r} \right) + \varphi_{rd} \left(-\frac{M}{L_r} (\omega_a - \omega_r) + \frac{M}{L_r} \omega_a \right) + \left(L_s - \frac{M^2}{L_r}\right) \omega_a i_{sd} \right) \\ \delta \varphi_{rd} &= (\omega_a - \omega_r) \varphi_{rq} - R_r i_{rd} = (\omega_a - \omega_r) \varphi_{rq} - \frac{R_r}{L_r} \varphi_{rd} + \frac{R_r M}{L_r} i_{sd} \\ \delta \varphi_{rq} &= -(\omega_a - \omega_r) \varphi_{rd} - R_r i_{rq} = -(\omega_a - \omega_r) \varphi_{rd} - \frac{R_r}{L_r} \varphi_{rq} + \frac{R_r M}{L_r} i_{sq}\end{aligned}$$

Il flusso rotorico viene considerato noto perchè può essere determinato attraverso dei sensori nel traferro o stimato attraverso la misura di correnti e tensioni.

Per ottenere un modello completo e funzionale sono necessarie altre 3 equazioni:

$$\begin{aligned}C_m &= p \frac{M}{L_r} (i_{sq} \varphi_{sd} - i_{sd} \varphi_{sq}) \\ \delta \omega_r &= \frac{1}{J_t} (C_m - C_t) - \frac{F_t}{J_t} \omega_r \\ \omega_a = \dot{\gamma} &= \frac{1}{\varphi_{rd}} \frac{R_r M}{L_r} i_{sq} + \omega_r\end{aligned}$$

L'equazione della coppia C_m viene determinata attraverso le proprietà della trasformata di Plank che oltre ad essere ortogonale ha la caratteristica di rimanere immutata nel passaggio da un circuito trifase al bifase equivalente.

Mentre le ultime due equazioni che riguardano la dinamica del motore, rispettivamente la velocità rotorica e la pulsazione di alimentazione, sono state ricavate dalle equazioni delle tensioni rotoriche.

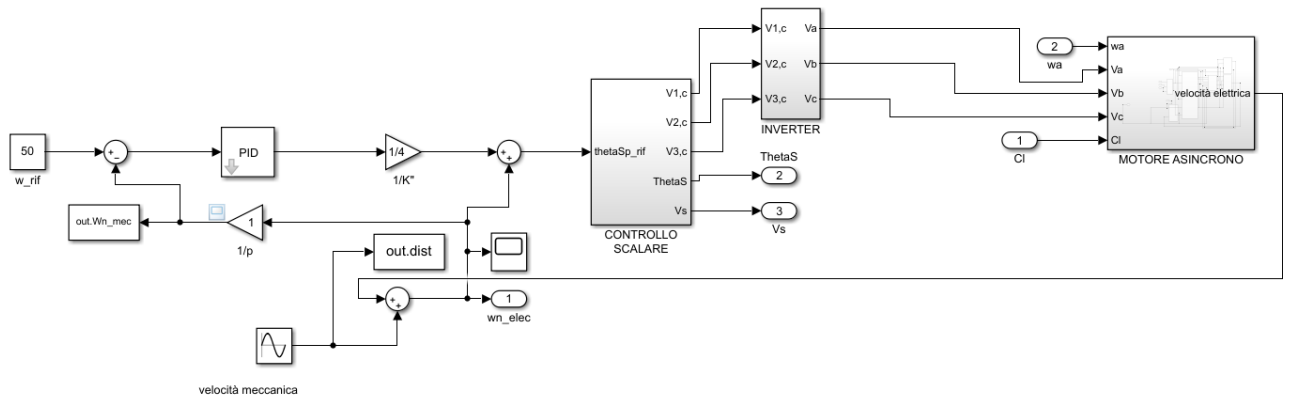


figura 7: modello su Simulink di un motore in corrente alternata

Come è possibile notare dall'immagine per ottenere un modello su Simulink simile al motore reale oltre all'implementazione delle equazioni è necessario inserire altri elementi, come l'inverter che è un apparato elettronico in grado di convertire corrente continua in corrente alternata eventualmente a tensione diversa, oppure una corrente alternata in un'altra di differente frequenza e il controllo scalare cioè una architettura di controllo della velocità angolare che si avvale di grandezze elettromeccaniche scalari, siano esse calcolate o misurate, ma non di fasori spaziali.

All'interno del sottosistema chiamato "MOTORE ASINCRONO" nella figura 5 è stato implementato il modello matematico del motore: in Simulink vengono utilizzati i blocchi per rappresentare le funzioni matematiche. Per esempio l'equazione attraverso la quale si ricava la velocità rotorica si scrive come nella figura sottostante nel programma.

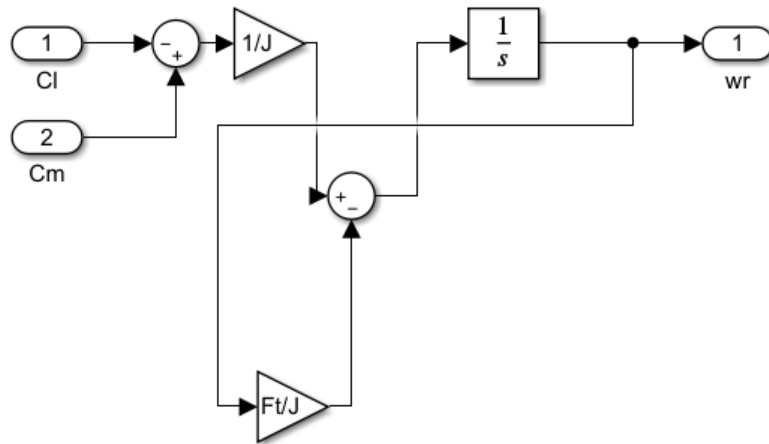


Figura 8: implementazione equazione velocità rotorica

Ogni blocco presente ha una funzione diversa: per esempio l'elemento $1/s$ è l'integratore e consente di passare dalla derivata di w_r ad w_r semplice, i blocchi iniziali sono gli input e sono collegati attraverso l'operatore di somma e differenza, il blocco finale è l'output e quindi l'incognita dell'equazione e gli elementi $1/J$ e F_t/J sono i guadagni e quindi consentono di implementare il prodotto tra ciò che viene prima e,rispettivamente, $1/J$ e F_t/J .

Simulink offre la possibilità non solo di modellare il sistema ma anche di simularlo ed eseguire analisi di scenario. Per fare ciò occorre modificare i parametri, in questo caso,del motore per verificare il comportamento del gemello digitale attraverso i grafici che rappresentano la risposta del software e riportano la relazione che lega gli output.

Attraverso queste simulazioni è possibile determinare le condizioni ottimali del motore e quindi del trapano sia in termini di manutenzione, e quindi per evitare eventuali guasti ai pezzi o rischio di usura eccessivo, sia di sicurezza, per esempio per evitare di applicare velocità troppo elevate che non possono essere sopportate dal trapano e che diventano pericolose per gli operatori che si trovano nello spazio di lavoro.

5. Approcci simulativi per la sicurezza industriale

Una delle più importanti applicazioni dei gemelli digitali e degli altri metodi simulativi è la sicurezza all'interno dell'impianto industriale, che riguarda i prodotti, le apparecchiature e gli operatori.

La sicurezza dei processi e la gestione dei rischi rimangono una sfida significativa per le industrie di processo e manifatturiere. I sistemi digitali sono stati applicati per molti decenni per assistere nella gestione della sicurezza durante l'intero ciclo di vita di un prodotto. Negli ultimi anni hanno acquistato estrema popolarità l'Industria 4.0, digitalizzazione e digital twin riguardo al potenziale di queste tecnologie per migliorare le prestazioni operative e ridurre gli incidenti causati dalla mancanza di sicurezza negli impianti.

Fino ad ora si è fatto riferimento esclusivamente all'applicazione dei gemelli digitali per la simulazione, ma esistono altri metodi simulativi aventi caratteristiche differenti. I digital twin nascono primariamente per identificare preventivamente anomalie rispetto alle condizioni ottimali, permettendo la correzione di errori nel minor tempo possibile, mentre gli altri approcci hanno come fine quello di studiare possibili scenari futuri. Inoltre i gemelli digitali si rivolgono a più utenti che svolgono mansioni differenti e hanno una visione olistica del sistema, generalmente non si concentrano su un unico aspetto ma rappresentano la totalità, a differenza degli altri metodi che rispondono a domande specifiche e vengono utilizzati appositamente per una parte del sistema. Un'altra differenza risiede nel fatto che i gemelli digitali sono in grado e necessitano di interagire con altri dispositivi, attraverso moderne tecnologie come l'internet delle cose, e sono progettati per funzionare online e in maniera continua, in modo tale da poter aggiornare i dati in tempo reale. Al contrario, i modelli simulativi sono usualmente installati sulle macchine e non devono comunicare con altri sistemi e vengono eseguiti in modalità offline, fornendo cioè i dati al sistema un'unica volta.⁴⁸

Gli approcci simulativi consentiranno ai responsabili della manutenzione di rilevare, identificare e sviluppare azioni correttive che possono influire sulla sicurezza degli operatori e sulla riduzione dei costi operativi e di manutenzione. Attraverso questi metodi è

⁴⁸ «Digital Twin - Enabling Technologies - Engineering».

possibile definire e gestire anche un sistema di controllo complesso , garantendo la continuità di monitoraggio e l'informazione degli operatori nel caso di malfunzionamenti o anomalie delle macchine. Con i gemelli digitali i tecnici sono in grado di prendere decisioni di riparazione sulla base di dati e previsioni effettive di scenari futuri, in contrapposizione al tradizionale approccio manutentivo, basato su attività predefinite e congetture, poiché basato sull'esclusiva conoscenza dei problemi imminenti.⁴⁹

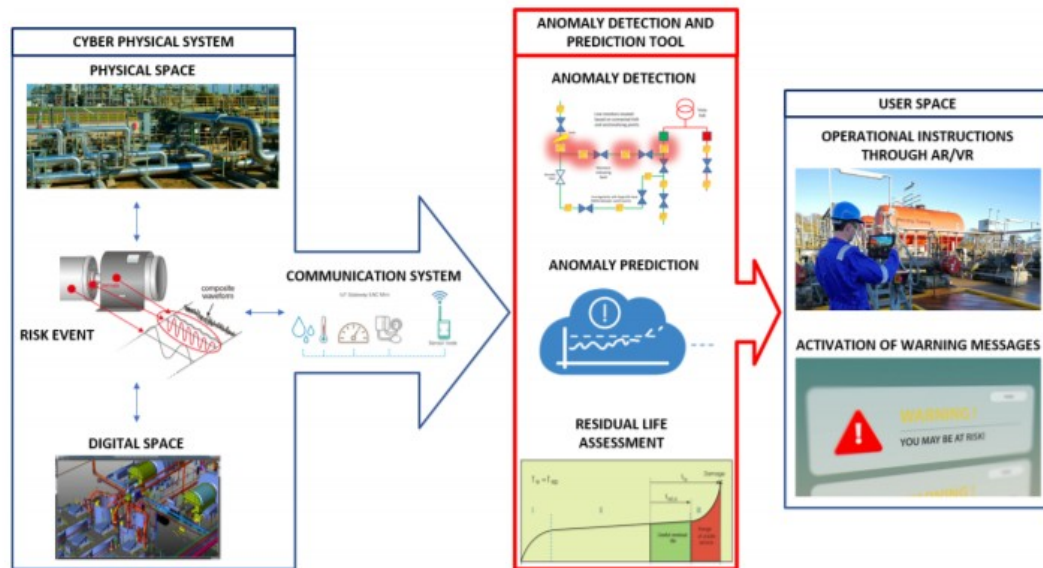


Figura 9: ruolo dello strumento di determinazione delle anomalie

Il modello di simulazione può quindi essere considerato un'immagine speculare della macchina reale, in grado di registrare e monitorare continuamente le condizioni della macchina durante la fase di utilizzo. Inoltre, con la connettività onnipresente offerta dalla tecnologia di cloud computing, il modello accoppiato fornisce anche una migliore accessibilità delle condizioni della macchina per i responsabili della fabbrica nei casi in cui l'accesso fisico alle apparecchiature effettive o ai dati della macchina fosse limitato.⁵⁰

⁴⁹ Bevilacqua et al., «Digital Twin Reference Model Development to Prevent Operators' Risk in Process Plants».

⁵⁰ Lee et al., «Recent Advances and Trends in Predictive Manufacturing Systems in Big Data Environment».

Come spiegato nel capitolo precedente, esistono due diverse tipologie di modellazione: quella basata sul sistema e quella sui dati, entrambe con i rispettivi svantaggi in ambito simulativo. Per poter prevedere eventuali danni possono essere utilizzate statistiche di affidabilità, che richiedono informazioni meno dettagliate e nessun dato specifico né un modello matematico. Le informazioni necessarie per la previsione sono contenute in una serie di diverse funzioni di densità di probabilità.

Nel metodo basato sul modello fisico, il modello matematico riflette il degrado delle prestazioni del sistema e viene stabilito in base al meccanismo di funzionamento interno del sistema target. L'essenza dell'oggetto fisico può essere descritta chiaramente attraverso un modello matematico, con il quale è possibile prevedere l'andamento dell'usura dell'oggetto per ottenere risultati accurati di previsione dei guasti.

Sebbene il metodo basato sul modello fisico possa rivelare la logica dei guasti del sistema senza raccogliere molti dati, ha bisogno del supporto di esperti per essere progettato ed eseguito. La maggior parte delle apparecchiature è generalmente costituita da sistemi meccanici ed elettrici complessi, i cui modelli di degrado corrispondenti sono difficili da stabilire con precisione a causa dell'ignoranza del meccanismo di degradazione.

Per il metodo basato sui dati, le prestazioni dei diversi algoritmi variano a seconda delle caratteristiche del sistema target e dei suoi dati, e fonte di imprecisione è qui la mancanza di comprensione delle caratteristiche fisiche, del rumore e dell'incertezza dell'apparecchiatura. Sulla base dei dati storici di monitoraggio delle condizioni delle apparecchiature, è possibile estrarne le caratteristiche circa lo stato di salute, con lo scopo di costruire un modello basato sui dati per la previsione e la diagnosi delle apparecchiature stesse.

Per superare i difetti dei metodi sopra menzionati, molti studiosi hanno proposto l'approccio ibrido di manutenzione predittiva. Costruendo un metodo di fusione, i vantaggi di ciascun metodo vengono integrati. Tuttavia, per realizzare l'approccio ibrido di manutenzione predittiva, è necessario costruire modelli matematici e fisici accurati e acquisire dati di esecuzione affidabili in tempo reale.

Il concetto di Digital Twin (DT) fornisce una soluzione efficace per l'implementazione dell'approccio di manutenzione predittiva ibrida.

DT contiene un modello digitale ad alta fedeltà di un'apparecchiatura fisica basata su leggi fisiche, in grado di acquisire dati di rilevamento in tempo reale durante il funzionamento dell'apparecchiatura e memorizzare i dati di corsa storici per un ulteriore utilizzo.

Attraverso la simulazione di DT, è possibile ottenere dati e stato interno più accurati senza la necessità di implementare un numero eccessivo di sensori, garantendo la possibilità di una manutenzione predittiva più accurata e affidabile. Inoltre, DT è un modello virtuale completamente computerizzato, capace di eseguire molte simulazioni di danni fisici e di realizzare tutti i tipi di condizioni di esperimento dure ed estreme, fornendo quindi più possibilità e fattibilità rispetto all'esperimento di prototipi fisici.⁵¹

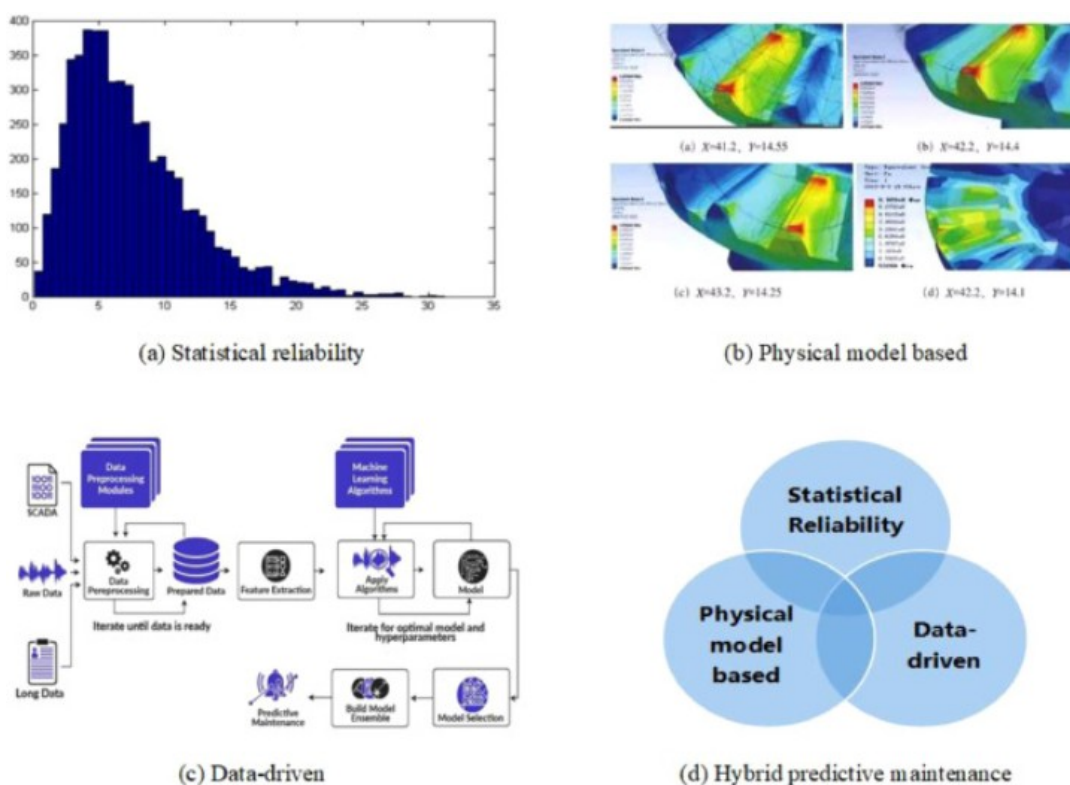


figura 10: Metodi di manutenzione predittiva

Queste considerazioni si riferiscono alla manutenzione predittiva, elemento fondamentale della sicurezza industriale, che monitora le prestazioni e le condizioni delle apparecchiature durante il normale funzionamento per ridurre la probabilità di guasti. I vantaggi della manutenzione predittiva sono enormi dal punto di vista del risparmio sui

⁵¹ Luo et al., «A Hybrid Predictive Maintenance Approach for CNC Machine Tool Driven by Digital Twin».

costi e includono la riduzione al minimo dei tempi di inattività pianificati, la massimizzazione della durata delle apparecchiature e l'ottimizzazione della produttività dei dipendenti. Un altro vantaggio della manutenzione predittiva è la sua capacità di migliorare i risultati e permettere di distribuire le risorse bilanciando caratteristiche prioritarie come la redditività e l'affidabilità.

Uno dei principali svantaggi della manutenzione predittiva è la quantità di tempo necessaria per valutare e implementare una pianificazione dell'impianto. Poiché la manutenzione predittiva è un'iniziativa complessa, il personale dell'impianto deve essere formato non solo su come utilizzare l'attrezzatura, ma anche su come interpretare le analisi e i dati.⁵²

Per quanto riguarda la sicurezza industriale, devono essere messi in evidenza altri fattori come la salute degli operatori, che può essere salvaguardata grazie alla diminuzione del rischio di incidenti sul lavoro. Come riporta l'Inail, nel 2019 gli infortuni sul lavoro denunciati all'Istituto sono stati 644.803 e spesso sono causati da un'adeguata attrezzatura degli operatori. I datori di lavoro sono obbligati dall' art. 18, comma 1, del decreto legislativo 81, ad assicurarsi che i dipendenti abbiano e indossino i dispositivi di sicurezza necessari. Per risolvere tale problema sono state utilizzate delle tecnologie dell'industria 4.0, come la tecnologia RFID (Radio Frequency Identification) basata sulla propagazione nell'aria di onde elettro-magnetiche consentono la rilevazione automatica (hand free), massiva e a distanza di oggetti, animali e persone, sia statici che in movimento.⁵³ Attraverso questa tecnologia, applicando su ogni dispositivo un tag letto da specifici lettori, è possibile rilevare se gli operatori indossano la giusta attrezzatura nell'apposita area esecutiva e in caso di infrazione il datore di lavoro dovrà intervenire e sanzionare il lavoratore.

⁵² Immerman, «The Impact of Predictive Maintenance on Manufacturing».

⁵³ Damiani, «Tecnologia RFID».

Il ciclo di vita di un prodotto è caratterizzato da varie fasi e in ognuna di esse vi sono diversi problemi da dover affrontare per quanto riguarda la sicurezza. Pertanto in ognuna i gemelli digitali e i metodi simulativi vengono applicati per svolgere mansioni diverse.

5.1 Sicurezza nelle varie fasi del ciclo di vita di un prodotto

Molti modelli possiedono caratteristiche e proprietà funzionali che aiutano ad affrontare i problemi di sicurezza del processo e del prodotto. Il quadro che emerge è quello di un ecosistema di modelli, ciascuno creato per casi d'uso specifici in varie fasi del ciclo di vita di un sistema ingegnerizzato. Di seguito vengono analizzate le principali fasi dove vengono applicati i gemelli digitali per la sicurezza del sistema.

5.1.1. Fasi di ricerca e sviluppo

Questa fase del progetto può fornire indicazioni sulla gravità dei processi coinvolti, come pressioni e temperature operative, le sostanze coinvolte e le loro caratteristiche, tra cui corrosività, reattività, tossicità e impatti ambientali. Mediante un'attenta analisi e selezione è possibile implementare principi di progettazione intrinsecamente più sicuri. La comprensione di problematiche in questa fase può anche contribuire a un funzionamento più sicuro, riducendo la necessità di eseguire la sostituzione oppure l'arresto e l'avvio del processo, che generalmente aumentano i rischi durante il funzionamento.

5.1.2 . Fase di progettazione concettuale

In questa fase del ciclo di vita, vengono sviluppati modelli per valutare gli impatti ambientali e sociali del progetto. Le valutazioni qualitative della sicurezza possono utilizzare le informazioni sviluppate nella fase di progettazione concettuale per condurre valutazioni di alto livello sulla salute, la sicurezza e l'ambiente nel quale il progetto verrà sviluppato. Nelle fasi di pianificazione e implementazione la simulazione rappresenta uno strumento utile per migliorare il layout, analizzare colli di bottiglia e throughput permettendo di valutare diverse varianti del processo

5.1.3. Progettazione dettagliata

Durante la progettazione dettagliata, le strategie di gestione del rischio richiedono modelli di incendio ed esplosione, di rumore, di alberi di guasti e / o eventi. Tutto ciò aiuta a quantificare la gravità delle possibili conseguenze e la loro frequenza per valutare se questi rischi sono bilanciabili dagli obiettivi raggiunti, se sono necessarie modifiche alla progettazione o sono necessarie ulteriori barriere. In questa fase vengono testati materiali di costruzione, integrità strutturale, pressioni e temperature di progetto, requisiti di protezione dei soccorsi, requisiti di isolamento, barriere preventive e attenuanti. Anche la posizione e la disposizione dell'impianto vengono influenzate da queste valutazioni del rischio. Gli strumenti CAD utilizzati nella progettazione dettagliata dell'impianto incorporano la gestione dei processi di modifica per garantire che l'impianto finale sia stato verificato e ne siano stati valutati i rischi.

5.1.4 . Messa in servizio e fasi operative

Anche durante le fasi operative, avere un modello di simulazione si rivela un valido strumento per il raggiungimento del target di produzione, validando lo scheduling e i turni dei lavoratori, ottimizzando ancora eventualmente il processo.

Queste fasi richiedono spesso simulatori di addestramento operativo (OTS), basati su modelli di fogli di flusso dinamici. Non solo un OTS è utile nella formazione degli operatori, ma anche per generare procedure per l'avvio, l'arresto e le condizioni di emergenza, nonché per assistere nella messa a punto del controllo.

Gli incidenti relativi alla sicurezza del processo si verificano più frequentemente durante le fasi di avvio e spegnimento rispetto al normale funzionamento. Il funzionamento anomalo è spesso un promotore del trattamento degli incidenti di sicurezza e l'OTS consente agli operatori di esplorare queste situazioni e sviluppare o migliorare la loro capacità di gestire in sicurezza questi eventi. Senza un OTS, gli operatori non avrebbero sperimentato molte situazioni anomale e sarebbero più inclini a commettere errori che possono portare a incidenti. L'OTS è anche utile per sviluppare e testare sistemi di controllo e di sicurezza strumentati per un impianto, fondamentali per un funzionamento stabile, affidabile e sicuro.

Gli strumenti di modellazione possono essere utilizzati per supportare i sistemi di manutenzione, corrosione e ispezione. L'integrità meccanica è la principale causa di

incidenti di sicurezza importanti ed è una delle massime priorità di miglioramento nelle industrie di processo per evitare incidenti di sicurezza.

5.1.5 . Disattivazione e bonifica

La disattivazione dell'impianto comporta rischi per la sicurezza del processo, associati all'arresto e alla decontaminazione delle apparecchiature. L'OTS può anche essere utilizzato per sviluppare procedure e formare operatori per garantire lo smantellamento sicuro dell'impianto.

La fase di demolizione e bonifica si occupa dei rischi associati all'ambiente, della salute e dell'esposizione professionale, piuttosto che dei rischi per la sicurezza del processo.

Risorse significative sono state investite in questi strumenti, utilizzati durante il ciclo di vita dell'impianto. Tuttavia queste ricerche hanno spesso portato a modelli disparati, non collegati, avendo come conseguenza un'ampia analisi euristica circa il loro utilizzo.⁵⁴

Pertanto il gemello digitale non è uno strumento strettamente tecnico, ma è ideale sia per attività di assistenza e servizio sia di formazione e scopi educativi. Possono anche essere utilizzati come strumento organizzativo, poiché una migliore descrizione e quindi comprensione della produzione può contribuire a ottenere una migliore comprensione condivisa della produzione in fase organizzativa.⁵⁵

⁵⁴ Lee, Cameron, e Hassall, «Improving Process Safety».

⁵⁵ I4MS_EU, «Meet the digital twin - the key technology in your smart factory».

6. Conclusioni

Questo elaborato ha come obiettivo quello di analizzare il ruolo dei gemelli digitali, all'interno dell'industria 4.0 e delle fabbriche intelligenti, non solo come un metodo di simulazione ma anche come uno strumento per incrementare la sicurezza industriale.

Sono state messe in evidenza, soprattutto nell'ultimo capitolo, alcune delle applicazioni di questa tecnologia nella sicurezza. In particolare è stata analizzata la manutenzione predittiva realizzata con i gemelli digitali, i quali servono per poter prevedere possibili anomalie e guasti delle macchine permettendo agli operatori di agire in anticipo evitando il danno fisico o l'usura delle attrezzature. Tale tecnologia moderna nata nell'ambiente aerospaziale si sta diffondendo in numerosi ambiti e vari studi affermano che continuerà a svilupparsi consentendo alle imprese di raggiungere vantaggi importanti, tra cui la riduzione dei costi e dei tempi di fermo macchina. In questo modo si possono realizzare prodotti in tempi minori e sempre più personalizzati e queste sono due delle caratteristiche richieste dall'odierno sistema economico, dove per poter essere competitivi nel mercato bisogna fornire prodotti adatti alle specifiche richieste dai clienti e velocemente.

Pertanto emerge che i gemelli digitali sono una tecnologia che consente alle aziende di essere maggiormente competitive e di incrementare i loro utili, la cui conseguenza naturale è l'aumento di investimenti nella ricerca e nello sviluppo. Inoltre, i gemelli digitali non vengono utilizzati solo per realizzare prodotti conformi con le richieste e con costi minori ma le loro mansioni andranno oltre la produzione, come per la creazione di edifici e città intelligenti, per la gestione ambientale oppure per la ricerca di petrolio e gas.

Dunque i gemelli digitali sono degli strumenti fortemente versatili e in questa tesi si è messa in evidenza solo una parte delle loro molteplici applicazioni.

7. Bibliografia e sitografia

- Alcácer, V., e V. Cruz-Machado. «Scanning the Industry 4.0: A Literature Review on Technologies for Manufacturing Systems». *Engineering Science and Technology, an International Journal* 22, n. 3 (1 giugno 2019): 899–919.
<https://doi.org/10.1016/j.jestch.2019.01.006>.
- Ashton, Kevin. «That “Internet of Things” Thing», s.d., 1.
- Azuma et al. «Recent advances in augmented reality - IEEE Journals & Magazine». Consultato 20 agosto 2020. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/963459>.
- Bagnoli, Carlo, Alessia Bravin, Maurizio Massaro, e Alessandra Vignotto. «2 La fattibilità tecnica: le tecnologie abilitanti Industria 4.0». In *Studi e ricerche*, di Carlo Bagnoli, Alessia Bravin, Maurizio Massaro, e Alessandra Vignotto, Chapter_2312. Venice: Edizioni Ca' Foscari, 2018. <https://doi.org/10.30687/978-88-6969-286-4/003>.
- Bevilacqua, Maurizio, Eleonora Bottani, Filippo Emanuele Ciarapica, Francesco Costantino, Luciano Di Donato, Alessandra Ferraro, Giovanni Mazzuto, et al. «Digital Twin Reference Model Development to Prevent Operators' Risk in Process Plants». *Sustainability* 12, n. 3 (2020): 1–17.
- Digital4. «Big Data: cosa sono e come aiutano le aziende a competere», 27 maggio 2020. <https://www.digital4.biz/marketing/big-data-e-analytics/big-data-cosa-sono-e-perche-grazie-alle-analitiche-il-business-continua-a-crescere/>.
- Büchi, Giacomo, Monica Cugno, e Rebecca Castagnoli. «Smart Factory Performance and Industry 4.0». *Technological Forecasting and Social Change* 150 (1 gennaio 2020): 119790. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2019.119790>.

- Cyber Security 360. «Cyber security: cos'è e come garantire la sicurezza dei sistemi informatici e delle reti», 5 settembre 2018.
<https://www.cybersecurity360.it/cybersecurity-nazionale/cyber-security-la-guida-definitiva-per-la-corretta-implementazione-in-azienda/>.

- Elettronica News. «Dalla modellazione alla simulazione», 14 gennaio 2013.
<https://www.elettronicanews.it/dalla-modellazione-alla-simulazione/>.

- Damiani, Massimo. «Tecnologia RFID: Che Cos'è e Come Funziona». *RFID Global 2020* (blog). Consultato 23 settembre 2020. <https://www.rfidglobal.it/tecnologia-rfid/>.
- «Digital Twin - Enabling Technologies - Engineering». Consultato 7 settembre 2020.
<https://www.eng.it/enabling-technologies/digital-twin>.

- Dilberoglu, Ugur M., Bahar Gharehpapagh, Ulas Yaman, e Melik Dolen. «The Role of Additive Manufacturing in the Era of Industry 4.0». *Procedia Manufacturing*, 27th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing, FAIM2017, 27-30 June 2017, Modena, Italy, 11 (1 gennaio 2017): 545–54.
<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.148>.

- Giambattista Gruosso. «Le tecnologie abilitanti dell'industria 4.0», 17 ottobre 2017.

- I4MS_EU. «Meet the digital twin - the key technology in your smart factory». Medium, 16 luglio 2018. https://medium.com/@i4ms_eu/meet-the-digital-twin-the-key-technology-in-your-smart-factory-16d5cf0dd284.

- Immerman, Graham. «The Impact of Predictive Maintenance on Manufacturing». Consultato 23 settembre 2020. <https://www.machinmetrics.com/blog/the-impact-of-predictive-maintenance-on-manufacturing>.

- Digital4. «Industria 4.0: storia, significato ed evoluzioni tecnologiche», 18 settembre 2019.
<https://www.digital4.biz/executive/industria-40-storia-significato-ed-evoluzioni-tecnologiche-a-vantaggio-del-business/>.

- IONOS Digitalguide. «Internet of Things». Consultato 31 agosto 2020.
<https://www.ionos.it/digitalguide/siti-web/diritto-informatico/internet-of-things/>.

- Jansen, Jacques, e Alta van der Merwe. «A Framework for Industrial Internet of Things». *I3E*, 2020. https://doi.org/10.1007/978-3-030-44999-5_12.

- Lee, Jay, Edzel Lapira, Behrad Bagheri, e Hung-an Kao. «Recent Advances and Trends in Predictive Manufacturing Systems in Big Data Environment». *Manufacturing Letters* 1, n. 1 (1 ottobre 2013): 38–41. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2013.09.005>.

- Lee, John, Ian Cameron, e Maureen Hassall. «Improving Process Safety: What Roles for Digitalization and Industry 4.0?» *Process Safety and Environmental Protection* 132 (1 dicembre 2019): 325–39. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.10.021>.

- Luo, Weichao, Tianliang Hu, Yingxin Ye, Chengrui Zhang, e Yongli Wei. «A Hybrid Predictive Maintenance Approach for CNC Machine Tool Driven by Digital Twin». *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 65 (1 ottobre 2020): 101974.
<https://doi.org/10.1016/j.rcim.2020.101974>.

- Marr, Bernard. «What Is Digital Twin Technology - And Why Is It So Important?» Forbes. Consultato 21 settembre 2020.
<https://www.forbes.com/sites/bernardmarr/2017/03/06/what-is-digital-twin-technology-and-why-is-it-so-important/>.

- Neugebauer, Reimund, Sophie Hippmann, Miriam Leis, e Martin Landherr. «Industrie 4.0 - From the Perspective of Applied Research». *Procedia CIRP*, Factories of the Future in the digital environment - Proceedings of the 49th CIRP Conference on Manufacturing Systems, 57 (1 gennaio 2016): 2–7. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.11.002>.

- Palanza, Sabrina. «Internet of things, big data e privacy: la triade del futuro». *Internet of things*, 2016, 26.

- Patgiri, Ripon & Ahmed, Arif. «Big Data: The V's of the Game Changer Paradigm.», 2016.

- Salento, Angelo, Giovanni Masino, Bruno Maggi, Angelo Gasparre, e Matteo Rinaldini. «Industria 4.0: Oltre Il Determinismo Tecnologico». Text, 2018. <https://doi.org/10.6092/UNIBO/AMSACTA/6041>.

- «simulare in Vocabolario - Treccani». Consultato 31 agosto 2020. <http://www.treccani.it/vocabolario/simulare>.

- Vaidya, Saurabh, Prashant Ambad, e Santosh Bhosle. «Industry 4.0 – A Glimpse». *Procedia Manufacturing*, 2nd International Conference on Materials, Manufacturing and Design Engineering (iCMMD2017), 11-12 December 2017, MIT Aurangabad, Maharashtra, INDIA, 20 (1 gennaio 2018): 233–38. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.02.034>.

- Yıldız, Tayfun. «Examining The Concept of Industry 4.0 Studies Using Text Mining and Scientific Mapping Method». *Procedia Computer Science*, 3rd WORLD CONFERENCE ON TECHNOLOGY, INNOVATION AND ENTREPRENEURSHIP"INDUSTRY 4.0 FOCUSED INNOVATION, TECHNOLOGY, ENTREPRENEURSHIP AND MANUFACTURE" June 21-23, 2019, 158 (1 gennaio 2019): 498–507. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.09.081>.