



**Politecnico
di Torino**

Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria gestionale

A.a. 2022/2023

Sessione di Laurea Marzo 2023

Digital Twin: overview e applicazioni in Manufacturing

Relatori:

Prof. Maurizio Galetto

Dott.ssa Elisa Verna

Candidati:

Lorenzo Stella

Digital Twin: overview e applicazioni in Manufacturing: Indice

Introduzione.....	4
CAPITOLO 1 – Framework/Background	5
1.1 Smart Manufacturing	8
1.2 Tecnologie abilitanti.....	8
1.2.1 Cyber-Physical Systems (CPS).....	9
1.2.2 Internet of Things (IoT).....	11
1.2.3 Big Data	12
1.2.4 Internet of Service (IoS).....	13
1.2.5 Cloud	14
1.2.6 Cybersecurity.....	16
1.2.7 Virtual Reality e Augmented Reality	16
1.2.8 Artificial Intelligence e Machine Learning.....	17
1.2.9 Robot	18
1.2.10 Additive Manufacturing.....	18
1.3 Le caratteristiche dell’Industria 4.0.....	20
1.3.1 Integrazione verticale.....	20
1.3.2 Integrazione Orizzontale	21
1.3.3 Ingegnerizzazione End-to-end.....	22
1.3.4 Integrazione Tecnologica	22
1.3.5 Piano di incentivazione italiano.....	23
1.4 Industria 5.0	25
1.4.1 Il nuovo ruolo del lavoratore.....	28
1.4.2 Ambiente di lavoro sicuro e inclusivo	28
1.4.3 Skills, up-skilling and re-skilling.....	29
1.4.4 I benefici dell’Industria 5.0.....	30
1.5 Quality 4.0	33
1.5.1 La Norma UNI EN ISO 9001 del 2015	34
1.5.2 Sistema di Gestione per la Qualità	34
1.5.3 Industry 4.0 e Quality 4.0	38
1.6 Quality 5.0	39
1.6.1 La trasformazione dalla quarta alla quinta generazione.....	41
CAPITOLO 2: DIGITAL TWIN.....	43
2.1 Introduzione	43
2.2 Le origini del DT.....	45

2.3 Analisi della letteratura.....	46
2.4 Definizione e caratterizzazione del Digital Twin	49
2.4.1 Definizioni in letteratura	51
2.4.2 Caratteristiche del DT.....	57
2.4.3 Digital Twin e tecnologie simili.....	64
2.5 Implementazione del DT	65
2.5.1 Identificazione degli obiettivi del Digital Twin	66
2.5.2 Scopo del Digital Twin	66
2.5.3 Rappresentazione virtuale del Digital Twin.....	67
2.5.4 Interconnessioni di dati del Digital Twin	67
2.6 Il nuovo paradigma del Digital Twin.....	68
2.6.1 Approccio Now-What come supporto decisionale	68
2.6.2 Modularità del Digital Twin.....	69
2.6.3 Come il Digital Twin impatta i Business Model	69
Capitolo 3: Applicazioni del DT.....	71
3.1 Digital Twin in product lifecycle	71
3.1.1 Digital Twin in Design Stage	71
3.1.2 Digital Twin in Production Stage	72
3.1.3 Digital Twin in Service Stage.....	74
3.1.4 Applicazioni in Retire Stage.....	75
3.2 Applicazioni DT in ambito Manufacturing.....	75
3.2.1 La piramide dell'automazione.....	76
3.2.2 Digital Twin Shop-Floor	77
3.2.3 Digital Twin for Additive Manufacturing.....	78
3.2.4 Digital Twin for Product Design.....	79
3.2.5 Digital Twin for PLM	80
3.2.6 Digital Twin for real-time geometry assurance.....	82
3.2.7 Digital Twin for laser welding.....	84
3.2.8 Processo di Quality Management per l'assemblaggio di velivoli aerospaziali	85
3.2.9 DT per una metodologia Zero Defect Manufacturing (ZDM).....	87
3.2.10 DT per l'analisi delle prestazioni di accoppiamento di una valvola a cursore	89
Conclusione	91
Bibliografia	94

Introduzione

L'industria manifatturiera sta attraversando una fase di trasformazione senza precedenti, grazie all'introduzione della quarta rivoluzione industriale, anche nota come Industria 4.0. Questa nuova era è caratterizzata dalla diffusione di tecnologie digitali avanzate e dalla crescente connessione tra macchine, prodotti e persone. Tra le tecnologie abilitanti dell'Industria 4.0 si annoverano il *Cyber-Physical Systems (CPS)*, l'*Internet of Things (IoT)*, il *Big Data*, il *Cloud*, la *Cybersecurity*, la *Virtual Reality e Augmented Reality*, l'*Artificial Intelligence e Machine Learning*, i *Robot* e l'*Additive Manufacturing*.

In questo contesto, il *Digital Twin (DT)* emerge come una delle tecnologie più promettenti per abilitare le sfide dell'Industria 4.0. Il DT è una replica digitale di un prodotto, di un processo o di un sistema reale, che consente di monitorare, simulare e ottimizzare il comportamento di un prodotto o di un sistema nel corso del suo ciclo di vita.

Il presente lavoro di tesi si concentra sull'analisi del *Digital Twin*, focalizzandosi in particolare sulla sua definizione, caratterizzazione e implementazione. Il Capitolo 1 fornisce un *framework* di background per contestualizzare l'argomento analizzando le tecnologie abilitanti dell'Industria 4.0, le caratteristiche dell'Industria 4.0, l'Industria 5.0 e la Quality 4.0 e 5.0.

Il Capitolo 2 si concentra sul *Digital Twin*, analizzando le sue origini, la letteratura esistente, la definizione e la caratterizzazione del DT, nonché la sua implementazione. In particolare, verrà analizzato il nuovo paradigma del DT, che fornisce un supporto decisionale attraverso l'approccio *Now-What*, la modularità del DT e il suo impatto sui *Business Model*.

Infine, il Capitolo 3 si concentra sulle applicazioni del DT, analizzando il suo utilizzo nel ciclo di vita del prodotto, nel contesto manifatturiero e in diversi casi applicativi reali. In particolare, verranno presentati casi di utilizzo del DT nel design, produzione, servizio e ritiro di prodotti, nonché il suo impiego per la gestione della qualità, *Additive Manufacturing*, la progettazione del prodotto, la gestione del ciclo di vita del prodotto, la verifica della geometria in tempo reale, la saldatura al laser e la metodologia generica *Zero Defect Manufacturing (ZDM)*.

Attraverso l'analisi di queste tematiche, questa tesi mira a fornire una visione d'insieme del *Digital Twin*, evidenziandone le potenzialità e le sfide nella realizzazione di sistemi manifatturieri sempre più intelligenti e connessi.

CAPITOLO 1 – Framework/Background

Il termine “Industria 4.0” è stato introdotto lo scorso decennio alla fiera di Hannover acquisendo, da allora, una notevole importanza a livello globale capace di incentivare molti paesi, non solo ad introdurre tecnologie abilitanti ma anche, e soprattutto, a ricercare continuamente tecniche e metodi capaci di facilitarne l’implementazione. Il risultato è stato proprio la ricerca e la persecuzione di un obiettivo comune che fosse in grado di garantire lo sviluppo di innovazioni tecnologiche in tutti i settori dell’Industria (Vogel-Heuser & Hess, 2016).

La terminologia utilizzata è quindi sinonimo della nuova era di cambiamento tecnologico nel sistema produttivo e indica le tappe di un’evoluzione rapida, avvenuta nel tempo, che approda nello sviluppo di una *digital transformation* sempre più spesso sinonimo di *disruptive*; tutto questo grazie all’interconnessione di spazi digitali e fisici nel campo della robotica, *internet of things* e *artificial intelligence*.

Negli ultimi anni si è infatti assistito ad una rapida evoluzione delle tecnologie digitali che hanno trasformato, e continuano a trasformare profondamente, il sistema industriale e il modo di concepire i business da parte sia di grandi che di piccole strutture aziendali, impattando su scala globale i principali settori economici. Tale evoluzione viene identificata dall’espressione “Quarta rivoluzione industriale” (o *Industry 4.0*), con cui si fa riferimento a un nuovo paradigma della produzione manifatturiera più intelligente, efficace e rapida, capace di garantire diverse configurazioni di mercato grazie, non solo a una trasformazione organizzativa e strategica ma anche alla creazione di nuovi modelli di *business* capaci di determinare l’evoluzione dell’intera catena del valore.

Alla base di questa nuova trasformazione c’è l’innovazione, denominatore comune delle precedenti tre rivoluzioni industriali, capace di rispondere ancora una volta alle nuove esigenze di mercato permettendo il consolidamento dei vari settori industriali.

La nascita della macchina a vapore (1784) ha segnato l’inizio della Prima Rivoluzione Industriale grazie alla meccanizzazione dei processi di fabbrica con conseguenti aumenti di velocità e capacità di produzione; l’utilizzo dell’elettricità come fonte di energia ha successivamente dato il via alla Seconda Rivoluzione Industriale (1870), permettendo lo

sviluppo della produzione di massa nelle industrie, specialmente quelle automobilistiche; la Terza Rivoluzione industriale è quella che invece, ha visto la diffusione delle tecnologie informatiche per l'automazione della produzione (1950). Infine, la Quarta Rivoluzione Industriale, o *Industry 4.0*, riguarda l'introduzione di tecnologie abilitanti, l'interconnessione tra mondo virtuale e reale e i *big data*, grazie all'uso di *internet*, e ha permesso all'industria manifatturiera di passare dall'essere *product-oriented a service-oriented*, concentrandosi sull'affiancare, al prodotto stesso, servizi customizzati per migliorare tutta l'esperienza d'acquisto dei clienti impattando, in tal modo, sull'intera catena del valore.

A titolo d'esempio, si riporta di seguito il grafico riassuntivo di quanto fino ad ora esposto sulle caratteristiche principali delle quattro Rivoluzioni Industriali e sulla loro evoluzione temporale.

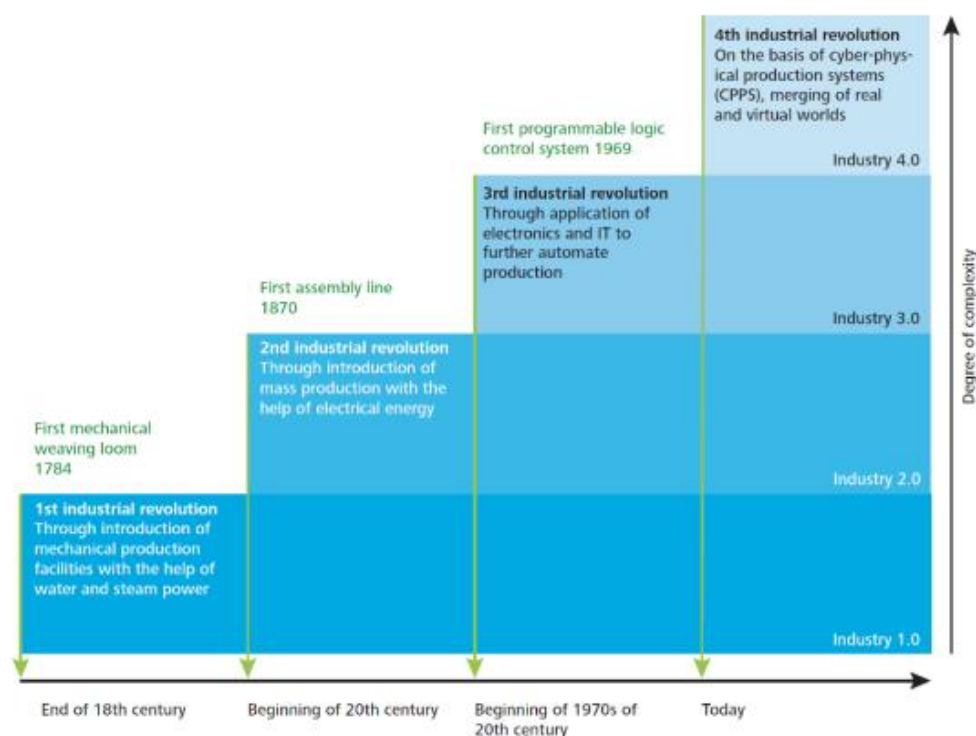


Figura 1 – Evoluzione temporale e caratteristiche delle quattro Rivoluzioni Industriali (Zhou et al., 2015)

Tornando *all'Industry 4.0*, è importante dire che la connessione tra i due sistemi (digitale e fisico) ha consentito la produzione dei famosi "*Big Data*", ovvero quell'ingente quantità di dati fruibili in tempo reale che rappresentano la chiave di lettura del mercato. Ottenere moltissime

informazioni ed essere capaci di interpretarle permette infatti di ottenere risposte più complete e un approccio diverso ai problemi; essi possono, infatti, essere utilizzati per la creazione di modelli di prodotto o servizi predittivi, per migliorare la *customer experience*, per migliorare l'efficienza operativa dei processi decisionali e per implementare algoritmi di *Machine learning* affinché i sistemi riescano ad apprendere da esperienze passate piuttosto che agire in modo programmato. Viene da sé pensare che tutto questo è possibile solo grazie all'implementazioni di tecnologie avanzate capaci di rendere l'industria più intelligente, veloce ed efficace.

In questo modo l'Industria 4.0 ha risposto ad esigenze quali:

- aumento della produttività e riduzione dei tempi di approvvigionamento e di fermo macchina;
- elevata flessibilità nella personalizzazione di prodotti o servizi in piccoli lotti;
- maggiore velocità nello sviluppare nuovi prodotti grazie a tecnologie come la *rapid prototyping*;
- potenziamento della qualità grazie alla possibilità di raccogliere ed elaborare dati ed un conseguente aumento della competitività.

È importante ricordare che l'essenza dell'innovazione 4.0 non presuppone soltanto una interconnessione tra soggetti, macchine e dispositivi (tramite adozione di tutte le innovazioni tecnologiche) ma lo scopo ultimo è quello di integrare l'intera catena di produzione. Questa precisazione ha l'obiettivo di non indurre, erroneamente, il lettore ad accostare la *digital transformation* alla mera adozione di nuove tecnologie. Tale trasformazione deve coinvolgere anche l'ambito strategico aziendale per avere successo a livello produttivo, intendendo un'evoluzione e riqualifica della forza lavoro, prontezza dinanzi alla elevata dinamicità del mercato, pianificando il tutto per prospettive che guardano al lungo periodo. Questa rivoluzione deve quindi avere chiara una visione totale, passando dalle tecnologie abilitanti, alle strategie aziendali, sino al contesto culturale che richiede un coinvolgimento di tutte le funzioni aziendali.

1.1 Smart Manufacturing

Per *Smart Manufacturing* si intende un profilo nascente di produzione industriale che, attraverso diversi fattori quali piattaforme di calcolo, sensori, tecnologie di comunicazione, controllo, simulazione e ingegneria predittiva, è in grado di integrare gli asset con le tecnologie di produzione. Si ha quindi a che fare con un impianto altamente digitalizzato in cui le strutture fisiche e digitali sono interconnesse tra loro, con una conseguente condivisione di dati in *real time*. La trasmissione di informazioni tra i diversi sistemi e l'intera organizzazione avviene attraverso una connessione ad Internet; l'impianto è quindi capace di convertire i dati in informazioni utili alla realizzazione di azioni collegate da intraprendere in futuro, senza tralasciare l'importante capacità di adattamento dinamico ai cambiamenti sulle richieste dell'intera catena del valore. Grazie all'integrazione di queste tecnologie, discusse in modo più dettagliato nei successivi paragrafi, e alla loro interconnessione è possibile ottenere benefici che riguardano l'intera organizzazione come l'ottimizzazione del consumo delle risorse, la possibilità di elaborare strategie alternative attraverso nuovi modelli di business, la capacità di migliorare la gestione dell'intero ciclo di vita dei prodotti con la relativa riduzione del *time-to-market*, la customizzazione di massa e la possibilità di sfruttare le conoscenze derivanti dai *Big Data* per conoscere in tempo reale le esigenze dei consumatori.

Alla luce di quanto detto è fondamentale concentrarsi sui suoi incalcolabili vantaggi, ragion per cui l'impegno delle aziende deve voltare all'integrazione tra prodotti e servizi e non interpretare la *Smart Manufacturing* solo in termini di produttività, efficienza e riduzione dei costi. Restando ancorati a sistemi obsoleti, che prendono forma esclusivamente da risorse umane o poche risorse tecnologiche scollegate, risultano evidenti gli svantaggi della mancata adozione di quanto sopra detto; tutto nasce da una mancata raccolta di dati che rende il prodotto comune e poco personalizzato generando una scarsa comunicazione con il bacino degli attuali e potenziali clienti, nonché un limite di innovatività sia operativa che strategica.

1.2 Tecnologie abilitanti

La Commissione Europea definisce come abilitanti quelle tecnologie ad "alta intensità di conoscenza e associate a elevata intensità di R&S, a cicli di innovazione rapidi, a consistenti spese di investimento e a posti di lavoro altamente qualificati." (...). La loro applicazione porta a una maggiore qualità nella catena produttiva rendendo innovativi, sia i procedimenti che i prodotti/servizi in tutto il sistema industriale. La tendenza alla digitalizzazione dell'industria è

già da tempo consolidata all'interno del mondo imprenditoriale, ma "attualmente la loro applicazione è purtroppo limitata e sporadica".

Le più note tecnologie abilitanti la *Smart Manufacturing* sono i sistemi cyber-fisici condotti da *IoT*, *Cloud computing*, *AI e analisi dei Big Data*. Si riporta di seguito una panoramica di tali tecnologie.

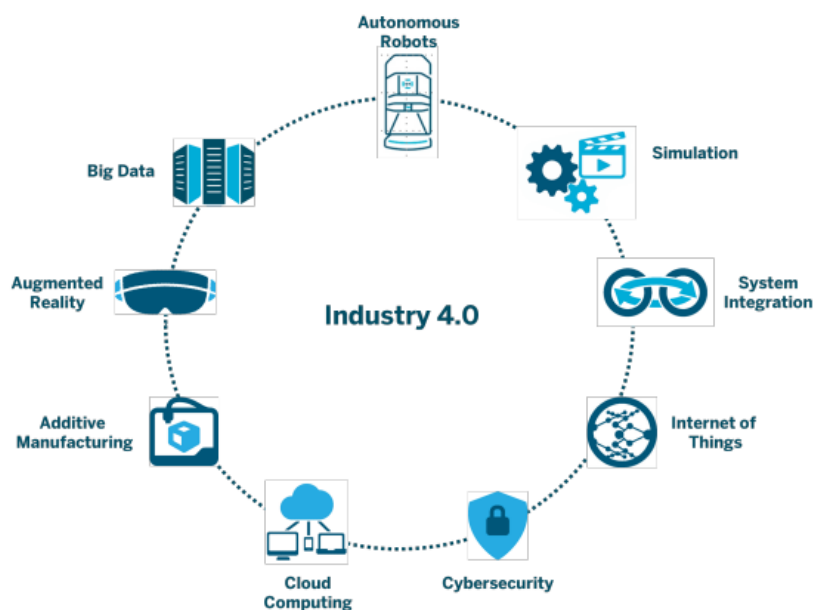


Figura 2 -Quadro delle tecnologie abilitanti all'interno dell'Industry 4.0 (Technology for safety, 2020)

Con riferimento alla soluzione DT, si precisa che questa verrà ampiamente discussa nel Capitolo 2 del seguente elaborato di tesi.

1.2.1 Cyber-Physical Systems (CPS)

I *Cyber-Physical Systems*, noti anche come CPS, possono essere considerati come una delle principali tecnologie costituenti l'Industria 4.0, la cui origine può essere fatta risalire al 2006. I CPS sono tutti quegli elementi che garantiscono un'integrazione tra i componenti fisici e digitali in modo continuo; si tratta, infatti, di elementi fisici dotati di capacità computazionale *embedded* che riescono a fondersi con il mondo virtuale grazie al quale è possibile monitorare sia lo stato che il comportamento del componente fisico regolandolo se necessario (Zhou et al., 2015). In particolare, grazie alla connessione di rete si crea un sistema intelligente con capacità di memorizzazione e di comunicazione, nonché un sistema autonomo. Le informazioni elaborate dai dati, tramite sensori integrati nei componenti fisici, vengono raccolte stabilendo lo stato operativo dei CPS; in questo modo il sistema digitale, che gode di

un'intelligenza decentralizzata, riesce a simulare vari scenari e a scegliere le azioni da intraprendere attraverso degli attuatori, comunicando tali scelte sia a tutti componenti fisici che a tutta la catena del valore.

Come mostrato di seguito in figura, i CPS sono composti da un'architettura organizzata su cinque livelli, secondo Lee et al. (2015) questa struttura permette di valutarne il solo livello di applicazione all'interno di un sito produttivo e di creare un flusso di lavoro per l'adozione di tale tecnologia.

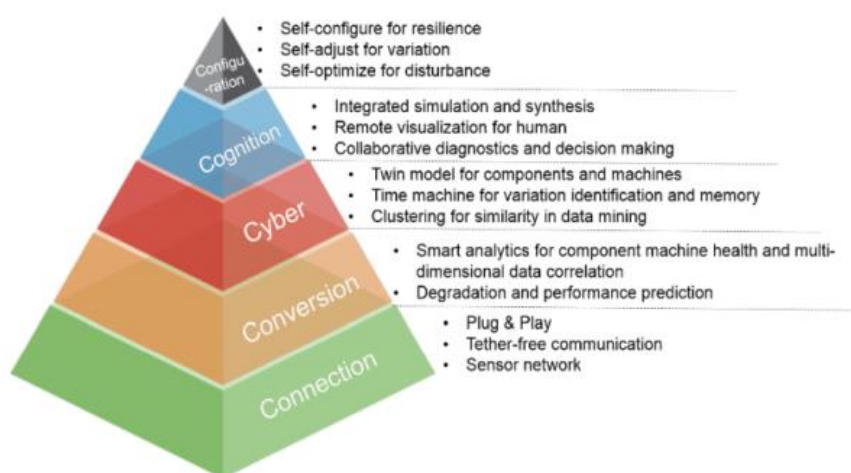


Figura 3 – Struttura del CPS a cinque livelli (Roy et al., 2017)

La struttura in Figura 3 illustra i cinque livelli teorizzati in ordine crescente, partendo dal basso (Livello 1) verso l'alto (Livello 5):

1. *Smart connection level*: nel livello 1 vengono generati i dati dalle varie macchine in tempo reale per essere trasferiti;
2. *Data to information conversion level*: al livello 2 i dati vengono analizzati e convertiti per creare valore aggiunto;
3. *Cyber level*: nel livello 3 le informazioni vengono analizzate e comparate con gli storici, inoltre avviene una clusterizzazione per similitudine;
4. *Cognition level*: Al livello 4 avviene il processo decisionale tramite la visualizzazione su una dashboard dei vari scenari;
5. *Configuration level*: Nel livello 5 il CPS può effettuare azioni correttive derivanti da feedback ottenuti dalla componente virtuale, al fine di garantire il corretto andamento della produzione (Jin et al., 2017).

Tale struttura introduce al concetto di *Digital Twin*: tramite digitalizzazione di componenti fisici, o anche interi sistemi, è possibile riprodurre il loro comportamento e valutarne le *performance*.

1.2.2 Internet of Things (IoT)

Il termine IoT venne coniato alla fine degli anni '90 da Kevin Ashton, il quale descrisse un sistema di oggetti fisici capaci di essere collegati ad internet tramite sensori sfruttando la radiofrequenza RFID (*Radio Frequency Identification*). Questa tecnologia era in grado di consentire ai computer di raccogliere e trasformare i dati in informazioni utili in maniera completa autonoma; si tratta di un'evoluzione tecnologica che estende la comunicazione all'interazione tra oggetti fisici diversi e fisicamente distanti. In altre parole, ci si riferisce ad un insieme di tecnologie che consentono ad oggetti e dispositivi fisici di generare dati e di condividerli con altri oggetti così da renderli "*smart*". Tali oggetti fisici, in questo modo, possono interagire sia con i loro stati interni, sia con l'ambiente esterno. Un esempio molto semplice riguarda le lampadine "*smart*" di casa, esse possono essere controllate da remoto con il proprio smartphone, indipendentemente dal luogo e dal momento in cui il comando viene lanciato, unica condizione è una connessione ad *Internet*.

Nonostante la continua evoluzione degli ultimi anni riguardanti la connettività di rete e i dispositivi rilevanti all'interno delle aziende, il principio base è rimasto lo stesso: utilizzare internet connettendo i dispositivi cyber-fisici tra di loro per raccogliere e analizzare informazioni.

L'IoT viene applicato trasversalmente in diversi campi, specie quello delle infrastrutture intelligenti quali le case, i trasporti, le Smart City, le fabbriche e quanto altro. Le *Smart Factory* traggono un grande vantaggio da tale tecnologia, che nel mondo del manufacturing evolve in Industrial Internet Of Things.

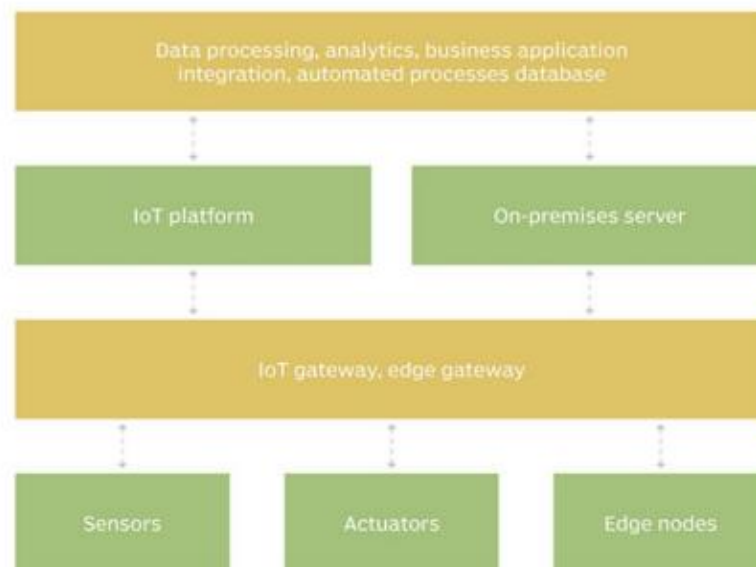


Figura 4 – Struttura IoT (Strandhagen et al., 2017)

1.2.3 Big Data

Con Big Data ci si riferisce all'ingente ed eterogenea massa di dati raccolti, in ogni fase della produzione, da macchine e operatori, generati ogni giorno e in qualunque momento da un'azienda. Il fatto che venga continuamente generata una mole massiccia di dati pone davanti agli occhi delle aziende una grande sfida, la quale riguarda l'utilizzo strategico degli stessi per ottenere il vantaggio competitivo sul mercato rispetto ai competitors (Strandhagen et al., 2017); se quindi da una parte un grande problema riguarda l'ottenimento, dall'altra parte il grande problema riguarda l'analisi e la comprensione al fine di consentire ai manager la possibilità di prendere scelte strategiche di breve e lungo periodo. Già nel 2001 l'analista Douglas Laney aveva definito un modello tridimensionale per la crescita (Modello 3V), dovuto al fatto che i Big Data richiedevano un dataset talmente grande da richiedere strumenti non convenzionali per eseguire le varie operazioni di manipolazione ed interpretazione. Le tre variabili sono volume, velocità e varietà:

- Volume: riguarda la quantità di dati ottenibile con tutti i mezzi a disposizione; tale quantità è però in continua crescita tanto da rendere difficile definire un limite al di sopra del quale è possibile parlare di big data.

- **Velocità**: in questo caso non si intende soltanto le velocità di origine e raccolta dei dati, ma ci si riferisce più ad una velocità di analisi che punta ad una comprensione *real time*, in modo tale da essere tempestivi e intraprendere le giuste azioni.

- **Varietà**: questa infinità di dati proviene da fonti diverse, sia interne che esterne, ed è quindi importante saperli interpretare nel modo corretto.

Successivamente sono state aggiunte altre due dimensioni per effettuare delle correzioni da problemi emersi nel corso degli anni:

- **Veridicità**: Avere una grande quantità e varietà di dati non basta, è infatti fondamentale che questi siano attendibili e veritieri; il rischio è prendere decisioni sbagliate che possono creare danni ingenti.

- **Variabilità**: il significato di uno stesso dato muta in funzione del contesto in cui è stato acquisito ed analizzato, è necessaria dunque una corretta interpretazione.

Tra i diversi tipi di analisi a disposizione ad attirare maggiormente l'attenzione sono sicuramente di quelle di tipo prescrittive e automatizzate, cioè metodi che grazie all'implementazione di tecnologie, quali *Machine Learning* e *Artificial Intelligence*, permettono di proporre azioni strategiche da applicare per determinati processi, o aree funzionali, e di implementare autonomamente tali azioni.

1.2.4 Internet of Service (IoS)

Mentre IoT permette all'utente di controllare i dispositivi con le sue specifiche applicazioni, IoS consente di integrarne il controllo. L'aumento vertiginoso dei dispositivi connessi ad internet ha infatti portato ad una moltiplicazione delle funzioni da gestire, da qui nasce l'esigenza di disporre di un modello integrato per il controllo dei dispositivi che permetta la corretta interconnessione simultanea di tutti gli oggetti di IoT, aumentando il valore aggiunto per tutti gli attori della catena del valore. Attraverso questo nuovo "canale" è stato possibile innovare il modello di business sia lato cliente, sia lato produttore. Il consumatore può avere accesso alle informazioni sul servizio, grazie ad un monitoraggio in tempo reale, creando un maggior valore aggiunto; il produttore riesce a monitorare tutto il ciclo di vita del prodotto con a possibilità di risolvere eventuali errori o malfunzionamenti da remoto.

Tutto questo è possibile grazie due concetti fondamentali: il Web 2.0 e *Service-Oriented Architecture* (SOA). Il primo consente agli utenti di poter apportare modifiche ai contenuti sul web; il secondo, invece, è un modello logico che riorganizza le infrastrutture software mettendole in comunicazione. Il risultato che si ottiene dalla combinazione di questi due concetti è l'opportunità concessa agli utenti, quali fornitori, clienti e partner commerciali, di fruire di servizi normalmente limitati dentro i confini aziendali.

1.2.5 Cloud

Il Cloud Computing è un modello di architettura IT in cui un fornitore offre servizi computazionali con accesso on-demand ad un pool condiviso di risorse preesistenti e configurabili (*Hardware e software*) in tempo reale, usufruibile attraverso internet (Strandhagen et al., 2017). In particolare, il *Cloud Computing* offre servizi di elaborazione come server, risorse di storage, database, networking e intelligence, quindi dal calcolo, all'archiviazione, sino alla sicurezza. Il vantaggio di questa tecnologia rispetto alla tradizionale consiste nell'affidabilità, centralizzazione degli sforzi di gestione e scalabilità.

Ecco le principali forme di Cloud Computing:

- **Software as a Service (SaaS):** Il cliente sfrutta le applicazioni presenti sull'infrastruttura del fornitore, le quali possono essere personalizzate o standardizzate, pur non avendo necessariamente consapevolezza della sua complessità. Paga semplicemente l'utilizzo del servizio;
- **Platform as a Service (PaaS):** Il cliente riesce a sfruttare le applicazioni dell'infrastruttura web per implementare applicazioni proprie grazie ai linguaggi di programmazione, librerie e servizi dedicati;
- **Infrastructure as a Service (IaaS):** il cliente riesce ad utilizzare le risorse del fornitore per creare e gestire un'intera struttura all'interno del Cloud; si ha, quindi, un outsourcing delle risorse.



Figura 5 – Cloud Solutions (Expert magazine, 2020)

Vi è inoltre un'ulteriore forma di Cloud Computing (CaaS – Container as a Service); si tratta di un servizio online tramite il quale il fornitore consente all'utente di aver accesso a un ambiente di virtualizzazione a container all'interno del quale è possibile svolgere varie attività sui software: svilupparli, eseguirli, testarli e distribuirli sfruttando specifiche infrastrutture informatiche. L'applicazione di tale tecnologia al settore produttivo permette di dirigersi verso un'industria manifatturiera basata sui servizi e conosciuta come Cloud Manufacturing (CMfg), caratterizzata da risorse e capacità produttive delle aziende legate attraverso il cloud ai potenziali clienti. I vantaggi per le imprese diventano notevoli e permettono di abbattere sia i costi fissi che quelli di manutenzione; grazie al fatto che il servizio si paga solo durante il suo uso effettivo si ha un abbattimento degli sprechi.

Da questo rapido elenco di tecnologie, un primo risultato che si evince è la possibilità per il cliente di avere accesso ad un'ampia gamma di strumenti con semplicità e rapidità. Un secondo effetto a cui è possibile risalire è la riduzione dei costi di gestione, di implementazione di asset fisici (hardware) e di risorse umane, allocando tali risorse in base alle necessità aziendali. Non beneficiare di tali servizi comporterebbe infatti un'immobilizzazione di risorse economiche causando un'inefficienza delle risorse produttive.

Tra i problemi principali sicuramente si ha la sicurezza dei dati, sia come possibili violazioni dei diritti di privacy, sia sotto l'aspetto del controllo degli stessi; un provider che sottoscrive contratti con molti clienti detiene infatti il possesso di una quantità di dati incalcolabile detenuti in un hard disk di difficile localizzazione.

1.2.6 Cybersicurity

Per Cyber security si intende l'insieme di tutte quelle tecnologie volte alla protezione di un sistema informatico da attacchi che possono portare alla compromissione o, nel peggiore dei casi, alla perdita dei dati e delle informazioni (Deloitte, 2020). È stato l'aumento di interconnessione tra device e il collegamento sempre più stretto tra i vari attori a portare l'esigenza di proteggere tali sistemi da eventuali minacce informatiche; gli oggetti stessi collegati ad internet diventano infatti mezzi di accesso ai sistemi per gli estranei. Il pericolo aumenta se si considera che la condivisione di uno spazio concettuale condiviso, cioè il *cyberspace*, permette la condivisione e l'accesso ad informazioni in *real time* tra settori e aree geografiche distinte. Si tratta per l'appunto di uno spazio a cui è possibile accedere in qualunque momento da qualunque luogo (*always on*), incrementando a dismisura la possibilità di accessi dall'ambiente esterno non autorizzati.

Il *cyberspace* è uno spazio intelligente poiché abilitato dalle tecnologie prima citate; dovrebbe essere quindi dotato di strumenti sofisticati che permettano la prevenzione e il rilevamento da possibili attacchi informatici. È per questo la *cybersecurity* fa uso di tutte quelle tecnologie che consentono l'integrità del cyber spazio.

La differenza tra il settore IT e una *smart factory* è che per il primo gli attacchi riguardano principalmente le informazioni confidenziali, mentre per la seconda gli attacchi si concentrano sull'integrità del processo fisico. Infatti, potrebbe accadere che si verificano fermi macchina, rischi per la salute dei dipendenti e danni per l'immagine dell'azienda nonché economici.

1.2.7 Virtual Reality e Augmented Reality

Virtual Reality (VR) e *Augmented Reality* (AR) sono molto simili ma non identici; la differenza consiste infatti nella modalità di interazione che queste due tecnologie hanno con il mondo reale. Con la prima si intende una realtà digitale simulata che permette all'utente di interagire con gli oggetti presenti in essa, con la seconda, invece, entra in gioco la percezione sensoriale umana con informazioni che non sono presenti nel mondo reale.

Nelle fasi iniziali di sviluppo prodotto queste tecnologie permettono di rivedere e modificare velocemente, e ogni volta che si vuole, i concept testandoli in ambiente virtuale; per quanto riguarda la produzione, è possibile programmare e simulare i processi produttivi avendo una chiara visione di quelli che sono i pregi ma anche, e soprattutto, i difetti.

In particolare, grazie alla tecnologia AR, che non estrania il lavoratore dal contesto produttivo, è possibile aumentare le capacità del dipendente, il quale può effettuare assemblaggi complessi senza dover necessariamente ricordare ogni singolo passaggio. Inoltre, grazie a queste tecnologie, è possibile integrare gli operatori ed evitare la loro alienazione, permettendo loro di aumentare la conoscenza dei macchinari che utilizzano al fine di poter compiere azioni complesse in maniera precisa.

1.2.8 Artificial Intelligence e Machine Learning

Per *Artificial Intelligence* si intende l'insieme di tecnologie che, interagendo tra loro, permettono alle macchine di avere comportamenti simili a quelli umani, come agire, comprendere e percepire. Il primo concetto di AI risale al 1956 quando Marvin Minsky la descrisse come la scienza che avrebbe permesso alle macchine di svolgere compiti che avrebbero richiesto intelligenza se compiuti da un essere umano. Il suo sviluppo negli anni è stato straordinario, tanto da far evolvere in maniera contingente le sue definizioni di pari passo con lo sviluppo delle tecnologie a disposizione. Lo studio e l'applicazione dell'AI ha richiesto un grande sforzo; permettere alle macchine di elaborare modelli computazionali che emulassero funzioni sintetiche/astratte di ragionamento, o meta-ragionamento, significava integrare una maggior componente cognitiva man mano che il modello si complicava. Per questo sono stati introdotti i concetti di *Deep Learning* e di *Machine Learning*, rispettivamente per AI debole e forte:

- AI debole: sistemi capaci di emulare determinate funzioni cognitive umane. È il caso del Deep Learning, il quale permette alle macchine di tradurre testi, trasformare un testo in audio o riconoscere oggetti all'interno di immagini;
- AI forte: sistemi capaci di sviluppare intelligenza propria, senza emulare le funzioni cognitive umane. È il caso del Machine Learning, il quale permette alle macchine di apprendere dalle esperienze per compiere i successivi compiti in autonomia.

Altre applicazioni dell'intelligenza artificiale riguardano la creazione di business innovativi come la personalizzazione di prodotti sulla base delle richieste, o le previsioni di domanda del mercato per ottimizzare l'approvvigionamento delle materie prime, logistica, magazzino e manutenzione. Inoltre, si tenta anche la collaborazione tra robot e uomo nelle filiere produttive.

Il *Machine Learning* (ML), come detto prima, è un sottoinsieme dell'*Artificial Intelligence*. Si tratta di una riproduzione del comportamento umano: esso apprende, imita, commette errori ed impara da questi, ed infine impara e memorizza i giusti processi (Ben Dickson, 2018): Sfruttando gli input, l'analisi dei dati e il processo decisionale, le macchine che utilizzano questa tecnologia all'interno di un'industria possono portare a dei grandi miglioramenti tramite ottimizzazione dei processi, per esempio tramite algoritmi.

1.2.9 Robot

Negli ultimi anni l'investimento in robot industriali nel campo della manifattura si è rivelato molto proficuo, se non essenziale. Infatti, grazie ad essi è possibile portare avanti metodi di produzione autonoma ed intelligente migliorando il grado di integrazione uomo-macchina. Questa "collaborazione" tra operatori di linea di produzione e robot può consentire l'implementazione di linee ibride che vedono la condivisione degli spazi al fine di eseguire congiuntamente i compiti (COBOT) (Gereald & Peter, 2017); questa novità dell'Industria 4.0 era prima evitata per ragioni di sicurezza, in quanto queste macchine eseguivano operazioni potenzialmente pericolose per l'uomo come fresatura, pressatura, foratura, saldatura e stampaggio tra le altre. Questo è stato possibile grazie a sistemi di controllo posti a limitazione della forza, monitoraggio della velocità e su tutte quelle caratteristiche che potevano mettere in pericolo l'incolumità degli operatori.

La produzione di queste macchine da parte di varie aziende fa emergere un elemento comune di criticità, cioè l'integrazione di diversi robot di case diverse sulla stessa linea; questi, infatti, spesso usano linguaggi di programmazione proprietari che causano incompatibilità di comunicazione.

Infine, i cobot hanno la funzione di supportare gli operatori in attività usuranti, ripetitive o pericolose svolgendo le attività in modo Smart, concentrandosi su flessibilità, sicurezza, versatilità e autonomia. Questo ne permette varie applicazioni in diversi settori aumentando l'efficienza della filiera produttiva (Bahrin et al., 2016).

1.2.10 Additive Manufacturing

Con il termine *Additive Manufacturing* si intende la stampa tridimensionale, o manifattura additiva, cioè quei processi che permettono la produzione di manufatti tridimensionali dall'aggiunta di strati di materiale consecutivi; in particolare, secondo la normativa ISO 2017:

“Il processo di giunzione dei materiali, strato per strato, in contrapposizione ai metodi di produzione sottrattiva”. Come suggerisce il nome e come definito dalla normativa ISO, questa tecnica produttiva lavora per addizione di materiale contrariamente alle tecniche più antiche che invece lavoravano per asportazione di truciolo; ciò ha permesso una notevole riduzione degli sprechi di materiale, il quale è quindi utilizzabile per la produzione di altri prodotti, una riduzione sia dei costi di produzione che del *time-to-market*. Quest’ultima caratteristica deriva dal fatto che la produzione utilizza come input una rappresentazione digitale tridimensionale da un file CAD, seguita da un processo semi-automatico di conversione del file in un formato STL, il quale consente la realizzazione del prodotto in strati (*layer*). Altri vantaggi riguardano la dimensione minima del lotto, il cui costo di ogni singola unità prodotta non è proporzionale alla dimensione del lotto, e la complessità dei pezzi che infatti non devono essere modificati per conformità alla produzione. Per questi motivi, la produzione additiva non si presta bene a produzione di massa. È importante dire che, rispetto alla produzione classica in cui i componenti di un oggetto vengono prodotti separatamente e poi assemblati, tramite AM è possibile realizzare il prodotto completamente finito composto da tutte le sue parti. I materiali stampabili, cioè adatti alla produzione in AM vanno dai polimeri fino alle ceramiche.

Esistono 7 tipologie di *Additive Manufacturing* (Hybrid Manufacturing Technologies, 2021):

- Vat Photopolymerization: la polimerizzazione in vasca utilizza un modello costruito strato per strato in cui una luce ultravioletta (UV) polimerizza una resina (polimero), immersa in una vasca, mentre una piattaforma sposta l’oggetto in fase di realizzazione verso il basso dopo la creazione di ogni strato;
- Powder bed fusion: è una tecnica che utilizza un fascio laser concentrato per fondere un letto di polveri metalliche;
- Binder Jetting: questa tecnologia usa una testina di stampa che fa aderire il materiale in polvere selettivamente tramite un legante eliminando, successivamente, la polvere in eccesso;
- Material Jetting: utilizza una testina per depositare di materiale (metalli, resine o cere) strato su strato, fino a raggiungimento del modello completo;
- Sheet Lamination: consiste nella laminazione adesiva o chimica, effettuata tramite rulli, di una serie di fogli di materiale metallico/plastico; le parti non necessarie vengono poi rimosse al fine di modellare l’oggetto finale;

- Direct Energy Deposition: utilizza un materiale sotto forma di polvere o filo, che viene depositato e fuso localmente tramite una fonte ad alta densità di energia;
- Material Extrusion: conosciuta come FDM, sfrutta un ugello attraverso il quale il materiale viene riscaldato e depositato strato dopo strato in filamenti, la piattaforma si muove verticalmente dopo ogni strato. È una tecnica comunemente usata su molte stampanti 3D domestiche;

L'Additive Manufacturing trova i suoi principali campi di applicazione nel settore manifatturiero per la produzione di prototipi e nella fase di ingegnerizzazione.

1.3 Le caratteristiche dell'Industria 4.0

La trasformazione digitale si fonda su quattro caratteristiche principali che delineano il profilo dell'attività e dell'organizzazione all'interno dell'Industria 4.0:

1. Integrazione verticale tra tutti i livelli della catena del valore;
2. Integrazione orizzontale tra tutti gli attori della *supply chain*;
3. Progettazione end-to-end che lega tutte le fasi del ciclo di vita del prodotto;
4. Integrazione tecnologica tramite accelerazione dei processi produttivi.

1.3.1 Integrazione verticale

Con integrazione verticale ci si riferisce al passaggio di informazioni in maniera trasversale, rispetto alla struttura gerarchica dell'azienda, grazie al collegamento dovuto alla digitalizzazione; quest'ultima ha infatti consentito uno scambio di informazioni molto rapido e una comunicazione molto più lineare lungo tutta la catena del valore (Werthmann, 2017). Non a caso, qualunque processo possibile grazie ai CPS garantisce una gestione più efficace sia delle richieste che delle domande rendendo possibile la gestione autonoma della manutenzione e del magazzino; ne segue un'agevolazione di comunicazione tra i vari reparti e un risparmio di tempo nel passaggio dei flussi informativi che normalmente intercorrono nella classica catena del valore dai confini definiti e prestabiliti. Dalle varie fasi, che vanno dalla raccolta dei dati alla produzione, è possibile ricavare diverse informazioni che permettono una gestione e una risposta alle problematiche che bisogna essere in grado di gestire; per far ciò diventa fondamentale l'*Internet of Things* che, grazie all'analisi real time, permette di avere una conoscenza continua sullo stato produttivo dell'azienda.

Un elemento distintivo per le *Smart Factory* riguarda la possibilità di disporre di una struttura di produzione fortemente customizzata e riconfigurabile in base alle specifiche richieste del cliente o alle mutazioni dinamiche del mercato. In questo modo l'integrazione verticale mostra la capacità di espletare una struttura produttiva flessibile, snella e riconfigurabile (Werthmann, 2017).

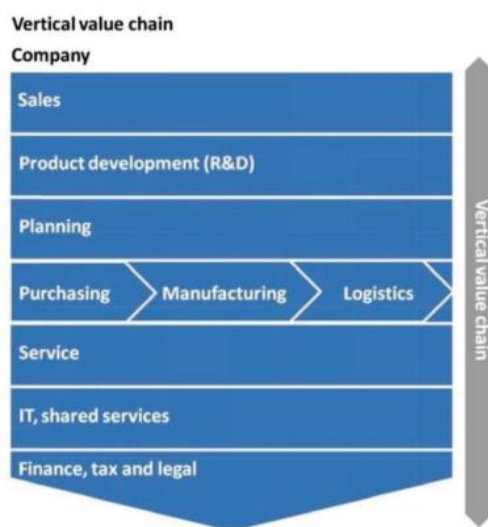


Figura 5 – Struttura verticale della catena del valore (Koch et al., 2014)

1.3.2 Integrazione Orizzontale

Per integrazione orizzontale si intende la rete per la creazione del valore, ovvero la capacità di connettere tra loro le risorse produttive interne ed esterne ottimizzando il flusso a partire dai fornitori, passando internamente per l'impresa, fino al consumatore finale. Il CPS garantisce questo livello di integrità, oltre che garantire l'interconnessione tra le aree funzionali interne sincronizzandole con quelle esterne. Si generano così delle reti globali, dalla fase di acquisto alla produzione fino alla vendita, o viceversa che vengono aggiornate in tempo reale ed offrono un elevato livello di trasparenza e flessibilità per poter rispondere più rapidamente all'evoluzione della domanda, dei livelli di stock e ai guasti ai macchinari (Koch et al., 2014). Questa "memoria di prodotto" consente una tracciabilità costante.

Risulta fondamentale, a questo punto, la trasparenza all'interno della catena del valore che, se da un lato, consente a tutti gli attori un libero accesso alle informazioni, dall'altro porta alla nascita di numerose questioni legate alla proprietà e protezione dei dati (Werthmann, 2017).

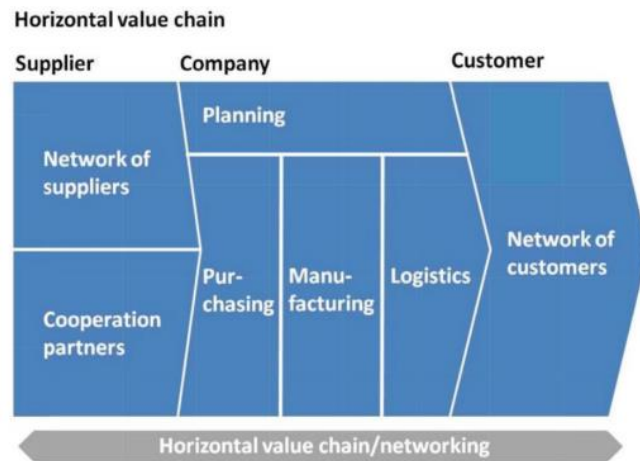


Figura 6 – Struttura orizzontale della catena del valore (Koch et al., 2014)

1.3.3 Ingegnerizzazione End-to-end

L'attenzione dell'ingegneria *End-to-End* si focalizza sull'intero *Product Life-Cycle* (PLC), dall'approvvigionamento delle materie prime fino al suo smaltimento (*Stock & End of life*), passando da un'attenzione rivolta solo al processo produttivo ad un'attenzione rivolta anche al prodotto finale. Tutto questo è possibile grazie alla digitalizzazione di tutte le fasi del ciclo di vita del prodotto e alla fruizione continua di informazioni che permettono di monitorare l'evoluzione nel tempo del prodotto. È necessario specificare che l'ingegnerizzazione *End-to-End* esiste solo se esistono integrazione verticale e orizzontale (Werthmann, 2017).

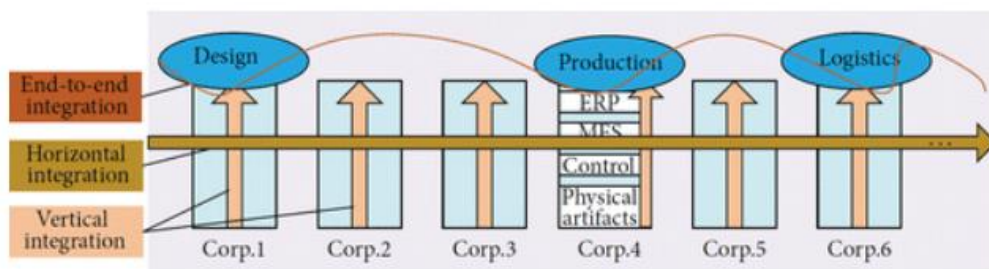


Figura 7 – Integrazione verticale, orizzontale ed End-to-end con le funzioni aziendali (Werthmann, 2017)

1.3.4 Integrazione Tecnologica

Una *Smart Factory* integra diverse tecnologie, spostando la comunicazione dal piano fisico a quello digitale. Questo tipo di integrazione, definita appunto tecnologica e tipica dell'Industria 4.0, impatta come un catalizzatore sull'azienda, permettendo un elevato grado di flessibilità e una riduzione dei costi. Sono state già citate le tecnologie abilitanti che danno un'idea lampante di come queste possono impattare su vari livelli, sia internamente che esternamente

a livello di *Supply Chain Management*. Un esempio di una tecnologia che ha avuto una diffusione esponenziale è la stampante 3D (*Additive Manufacturing*); tale tecnologia, oltre che rendere disponibili nuove soluzioni di produzione, offre nuove opportunità a livello di *Supply Chain* (ad es. riduzione scorte), o addirittura nuove opportunità di business (ad es. integrazione con i clienti).

1.3.5 Piano di incentivazione italiano

Nel 2016 il Governo italiano ha varato il piano “Industria 4.0”, rivisitato nel 2018 e rinominato “Impresa 4.0” costituito da un’ampia raccolta di forme diverse di incentivi, alcune delle quali preesistenti e altre create ad hoc, rivolte sia alle grandi che alle piccole e medie imprese (PMI) interessate a modernizzare i loro processi produttivi (prodotti e/o servizi).

Si riportano di seguito gli incentivi inclusi nel piano italiano MISE (Governo Italiano, 2017)

- **Iper e Super Ammortamento (130%-250%)**: supportare e incentivare le imprese che investono in beni strumentali nuovi, in beni materiali e immateriali funzionali alla trasformazione tecnologica e digitale dei processi produttivi;
- **Nuova Sabatini**: sostenere le imprese che richiedono finanziamenti bancari per investimenti in nuovi beni strumentali, macchinari, impianti, attrezzature di fabbrica a uso produttivo e tecnologie digitali;
- **Credito d’imposta R&S**: stimolare la spesa privata in ricerche e sviluppo per innovare processi e prodotti e garantire la competitività futura dell’impresa;
- **Patent Box**: rendere il mercato maggiormente attrattivo per gli investimenti nazionali ed esteri di lungo termine, incentivare la collaborazione dei beni immateriali, attualmente detenuti all’estero da imprese italiano o estere, e favorire l’investimento in attività R&S;
- **Startup e PMI innovative**: sostenere le imprese innovative in tutte le fasi del ciclo di vita, favorire lo sviluppo dell’ecosistema nazionale dell’imprenditoria innovativa e diffondere una nuova cultura imprenditoriale;
- **Fondo di garanzia**: sostenere le imprese e i professionisti che hanno difficoltà ad accedere al credito bancario perché non dispongono di sufficienti garanzie;
- **Contratto di sviluppo**: sostenere gli investimenti di grandi dimensioni nel settore industriale, turistico e di tutela ambientale;

- **Accordi per l'innovazione:** progetti riguardanti attività di ricerche industriali e di sviluppo sperimentale finalizzati alla realizzazione di nuovi prodotti, processi o servizi o al miglioramento degli esistenti, tramite lo sviluppo di una o più tecnologie identificate Programma quadro dell'Unione Europea per la ricerca e l'innovazione "Orizzonte 2020";
- **Credito di Imposta formazione 4.0:** supportare la spesa nella formazione del personale dipendente;
- **Fondo per il Capitale Immateriale, Competitività e Produttività:** perseguire obiettivi di politica economica e industriale, connessi anche al programma Industria 4.0 e a crescere la competitività e la produttività del sistema economico nazionale.

1.4 Industria 5.0

L'industria 5.0 affonda le sue radici nel concetto di "Industria 4.0", nato come un progetto *high-tech* adottabile da imprese e imprenditori, legato non solo alla soddisfazione dei requisiti economici, ma anche e soprattutto al sostentamento di una crescita economica individuale e di massa, senza dimenticare la missione ecologica per un'industria a zero emissioni e ad alta efficienza energetica (Xu et al., 2021). Negli anni, quello che si è visto, è stato un grande ed elevato sviluppo tecnologico e di digitalizzazione per ottenere un grande progresso sulla produzione, a discapito però di quei principi originali quali sostenibilità ed equità sociale. Ed è proprio in riferimento alla società e l'industria che guarda ad essa, che entra in gioco il concetto di Industria 5.0 (per questo si parla di *Society 5.0*), in grado di indirizzare verso un nuovo paradigma. Il concetto di *Society 5.0* nasce in Giappone nel 2016 e viene presentato per la prima volta da un'importantissima federazione imprenditoriale giapponese; successivamente la promozione arriva anche dal governo con l'obiettivo di diffondere il tessuto digitale al fine di raggiungere una trasformazione culturale, quasi filosofica.

Parlando di rivoluzioni industriali, salta subito all'occhio come le quattro rivoluzioni non siano equamente distribuite lungo la linea temporale, ma si è andati incontro ad una compressione temporale tra l'una e l'altra, contrariamente a quanto successo per le prime. Il motivo non è solo tecnologico ma anche societario, dovuto al modo con cui le persone cercano assicurarsi il loro sostentamento; sfida con cui i progressi degli ultimi decenni dovrebbero andare a braccetto. La risoluzione dei problemi sociali ed ambientali è, invece, passata in secondo piano, lasciando sempre più spazio allo sviluppo economico, per lo più manifatturiero. La *Society 5.0* cerca di colmare questo gap integrando spazi virtuali e fisici grazie alle tecnologie sopra discusse, in contesti pubblici utili per i cittadini, quali sanità e scuola (Breque et al., 2021).

Lo scopo di evolvere l'industria come principale fornitore di prosperità, e non più come registro contabile, passa attraverso i concetti di globalizzazione e tecnologia; esso è costituito da tre elementi: centralità umana, sostenibilità e resilienza.

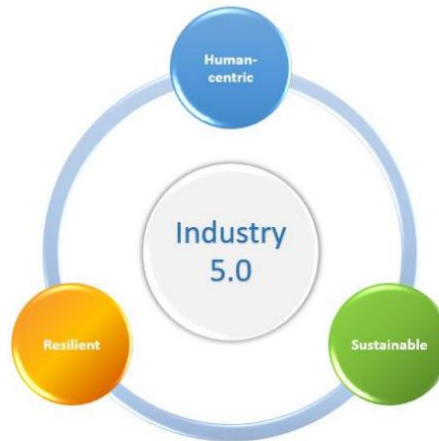


Figura 8 – Elementi costituenti l'Industria 5.0 (Breque et al., 2021)

Ciò che cambia è la prospettiva con cui si guarda alla tecnologia e all'uomo, ovvero un cambiamento di *centralità*. Significa garantire ai lavoratori i loro diritti fondamentali, quali dignità umana, autonomia e privacy, pensare alle nuove tecnologie come strumenti per migliorare il nostro benessere adattandole alle esigenze del lavoratore.

Per rispettare questi principi, è inoltre di fondamentale importanza che l'industria sia *sostenibile* sviluppando processi circolari che riducano e riciclano i rifiuti per limitare l'impatto ambientale; evitare l'esaurimento di risorse ambientali, ridurre emissioni di gas serra e consumo energetico per evitare di mettere a repentaglio le vite delle prossime generazioni. Innovazione responsabile.

Gli ultimi decenni, ed in particolare gli ultimi anni, hanno mostrato una forte debolezza delle industrie, esse vengono stressate da cambiamenti geopolitici, disastri naturali come la pandemia Covid-19, evidenziando tutte le fragilità di meccanismi di produzione poco robusti. Per questo motivo, una caratteristica da rivalutare è la resilienza, cioè predisporre piani preventivi per reagire a situazioni che creano instabilità e sviluppare catene del valore strategiche che sappiano rispondere alle esigenze fondamentali della collettività, come sicurezza e sanità.

Per definire il concetto di Industria 5.0 ci avvaliamo della definizione riportata su un documento dell'unione europea:

“L'Industria 5.0 riconosce il potere dell'industria di raggiungere gli obiettivi sociali al di là dell'occupazione e della crescita per diventare un fornitore resiliente di prosperità, rendendo

la produzione rispettosa dei confini del nostro pianeta e ponendo il benessere del lavoratore industriale al centro del processo produttivo.” (Breque et al., 2021).

Questa definizione deriva da alcune considerazioni:

- La rapida evoluzione in tutto il mondo dovuta alla globalizzazione ha portato una prosperità generale, ma ha anche accentuato disuguaglianze locali che hanno portato ad avere catene del valore meno stabili in forniture e infrastrutture; questa corsa alla soddisfazione del mercato ha causato un uso improprio delle risorse naturali con conseguente inquinamento ambientale;
- Importante è la visione politica attuale, la quale mira a guidare questo sviluppo digitale indirizzandolo sempre più verso la massimizzazione dei benefici per i cittadini, minimizzando i rischi che ne derivano. Queste intenzioni sono chiaramente visibili in due progetti europei: il “Green Deal” che mira a raggiungere la neutralità climatica entro il 2050 e il “Europe Fit for the Digital Age” che mira alla maggiore digitalizzazione di tutto il territorio europeo;
- Nonostante sembri che l’adozione del digitale cresca esponenzialmente, in Europa la crescita è più lenta rispetto ad altre parti del mondo, causata principalmente per una mancanza di competenze digitali, trasformazione digitale delle PMI e diffusione delle reti 5G. Questi fattori rendono la crescita lineare, spaziando da industrie high-tech a piccole imprese familiari con registri cartacei. La mancanza di investimenti in digitalizzazione è un campanello d’allarme in Europa che ha portato, come anticipato precedentemente, la Commissione Europea a dare priorità ai progetti sopraccitati.
- Infine, tramite l’analisi di progetti di ricerca sostenuti dall’Europa per l’innovazione, si è evidenziato come tra gli obiettivi e i risultati di tali progetti ci fossero elementi di trasformazione attinenti a Industria 5.0, nonostante il riferimento non fosse esplicito; essi richiamano la sostenibilità, la resilienza e la competitività a lungo termine avendo come supporto la digitalizzazione.

Una delle transizioni paradigmatiche più importanti che caratterizzano l'Industria 5.0 è il passaggio dal progresso guidato dalla tecnologia a un approccio completamente incentrato sull'uomo (Breque et al., 2021). Un ambiente di lavoro sicuro, il rispetto dei diritti umani e i

requisiti di competenza dei lavoratori, sono dei vincoli sociali che pongono l'obiettivo su un'eguaglianza umana che spinge i meno fortunati al pari degli altri.

1.4.1 Il nuovo ruolo del lavoratore

Considerare il lavoratore come un "investimento" e non come un "costo", permettendo lo sviluppo dell'individuo stesso che dell'azienda, fa capire come il ruolo dello stesso sia notevolmente diverso nell'Industria 5.0. Questa breve premessa, oltre che ad implicare l'attenzione del titolare per il benessere e le competenze del lavoratore, fa raggiungere un'altra importante considerazione: la tecnologia è uno strumento per servire il dipendente e non il contrario. Ciò significa che il lavoratore non deve più adattarsi ai rapidi cambiamenti tecnologici, ma deve essere la tecnologia utilizzata ad adattarsi alle esigenze dei dipendenti rendendo il contesto lavorativo più inclusivo.

Coerentemente con quanto detto, vi sono stati in questi anni molti sforzi per identificare nuovi ruoli per i lavoratori, il White Paper "*Human-centered factories from theory to industrial practice*" ha proposto la suddivisione dei lavoratori in cinque categorie: operatore virtuale e aumentato, operatore sociale e collaborativo, operatore super forte, Operatore sano e felice e operatore unico nel suo genere (Fletcher et al., 2019). L'operatore unico nel suo genere è stato aggiunto alla tipologia per abbracciare le caratteristiche e le preferenze dei singoli lavoratori, per promuovere l'inclusività sul posto di lavoro (Breque et al., 2021).

1.4.2 Ambiente di lavoro sicuro e inclusivo

Applicare le nuove tecnologie può avere un doppio effetto, da un lato rendere i luoghi di lavoro più inclusivi e sicuri, dall'altro lato può aumentare la soddisfazione e il benessere dei lavoratori. Nonostante ciò, l'aumento di introduzione di macchine e robot all'interno delle industrie ha fatto percepire ai lavoratori tale progresso come una minaccia relativamente alla perdita di posti di lavoro. Tecnologia precedentemente discusse, come AI, AR e VR, unitamente a robot, possono contribuire svolgendo compiti ripetitivi e semplici, ma possono anche guidare i lavoratori in processi di apprendimento e supporto in compiti più specializzati che richiedono una formazione superiore. Ciò non di meno, porterebbe altri benefici, come la possibilità di assumere più persone con deficit mentali e fisici, o anche la possibilità di supportare le donne in lavori che solitamente vengono svolti da uomini perché necessitano di una forza fisica maggiore. Inoltre, la recente crisi dovuta al Covid-19, ha messo a forte rischio

le imprese a causa di un allontanamento dei lavoratori dai luoghi operativi; in questo modo ha preso sempre più piede il lavoro a distanza mostrando tutto il suo potenziale e aumentando la resilienza produttiva; ovviamente parlando di salute, non ci si riferisce soltanto ad un aspetto fisico, ma anche mentale. Per questo la progettazione digitale deve tener conto anche di questo, poiché possono sorgere nuovi rischi associati alla digitalizzazione.

Ultimo punto riguarda i diritti fondamentali dei lavoratori: dignità, privacy, autonomia e salute non devono essere scalfiti dal progresso tecnologico; l'ambiente di lavoro non deve denigrare nessun lavoratore, in modo implicito o esplicito, né la sua identità, indipendentemente dalla razza, genere ed età (Breque et al., 2021).

1.4.3 Skills, up-skilling and re-skilling

Le industrie sono alle prese con un disallineamento tra domanda e offerta di competenze, e gli istituti di istruzione e formazione non riescono a rispondere alla richiesta. Una indagine Deloitte ha scoperto che il 70% dei giovani ritiene di non avere tutte le competenze necessarie per il mondo del lavoro. Quello che probabilmente potrebbe aiutare, sarebbe una tecnologia più user-friendly, in modo tale che ai lavoratori non siano richieste competenze particolari, o che addirittura, contemporaneamente all'utilizzo, si sviluppino le competenze necessarie. Si tratta di una formazione a tutti gli effetti in cui la tecnologia si evolve insieme al lavoratore; questo approccio è già seguito in progetti come Horizon 2020 SAM (*Sector Skills Strategy in Additive Manufacturing*) e SAIS (*Skills Alliance for Industrial Symbiosis* - un progetto intersettoriale per un'industria di processo sostenibile) (Fletcher et al., 2019).

Con l'evoluzione delle tecnologie e la conseguente automazione delle stesse, le competenze dei lavoratori non riusciranno ad aggiornarsi, diventando obsolete. Secondo il rapporto "*Job lost, jobs gained: Workforce transitions in a time of automation*", redatto da McKinsey Global Institute, entro il 2030 il 14% della forza lavoro globale (circa 375 milioni) potrebbe aver bisogno di cambiare categoria di lavoro, intendendo un processo di apprendimento di nuove competenze per poter svolgere un lavoro diverso; tutto questo come conseguenza della digitalizzazione.

L'Industria 5.0 non vuole solo competenze digitali, ma anche competenze trasversali, legate alle capacità "umane" del lavoratore come creatività, mentalità aperta e imprenditorialità. Infatti, secondo il rapporto "*Skill For The Future of Manufacturing*" del 2019 di World

Manufacturing Forum (WMF), nella top 10 delle competenze, solo quattro fanno riferimento a quelle del futuro: AI e analisi dati, capacità di lavorare con le nuove tecnologie, cybersecurity e data mindfulness.



Figura 9 – Principali competenze dell’Industria 5.0 secondo World Manufacturing Forum (WMF)

Sicuramente la diffusione di queste tecnologie dipende prevalentemente dalla capacità di assorbimento dei lavoratori; per questo è molto importante che le imprese investano in formazione sul capitale umano, in quanto esse sono a conoscenza delle competenze che desiderano possiedano i lavoratori.

1.4.4 I benefici dell’Industria 5.0

Industria 5.0 avvantaggia i lavoratori tanto quanto le aziende. I vantaggi per l'industria sono di ampia portata, vanno da una migliore attrazione e fidelizzazione dei talenti, oltre al risparmio energetico, ad una maggiore resilienza generale. Il vantaggio complessivo per l'industria europea è a lungo termine: competitività e pertinenza costanti, ottenuti da un adattamento efficace sia ad un mondo in evoluzione che a nuovi mercati. A breve termine, gli investimenti necessari potrebbero esporre le industrie europee al rischio di perdere temporaneamente competitività rispetto a quelle che ancora non investono in Industria 5.0.

In questo caso è fondamentale disporre del tempo necessario per coordinare accuratamente gli investimenti al fine di mitigare questo rischio; tuttavia si ritiene che i maggiori rischi per l'industria possano concretizzarsi qualora venisse meno l'impegno nei confronti della transizione sociale verso la sostenibilità, della centralità umana e della resilienza, perdendo così competitività nel lungo periodo.

Uno dei vantaggi dell'Industria 5.0 risiede nella capacità di attrarre e trattenere i talenti, dato che tra i principali problemi delle aziende digitalizzate è l'impiego di posizioni che richiedono competenze tipiche dell'industria 4.0 e multidisciplinari; questo è tendenzialmente possibile con le generazioni più giovani come i *"millennials"* e i *"digital native"*. Queste generazioni sono guidate da valori sociali, ambientali e lavorative molto diversi dai loro predecessori; sono solite guardare gli impegni sociali e ambientali dell'azienda per decidere se lavorarci o meno, cercano aziende socialmente responsabili, guardano a datori di lavoro da stimare, e da cui prendere esempio, e sono disposti anche a sacrificare la retribuzione per soddisfare i propri bisogni e il proprio benessere. Altre caratteristiche cui guardano i giovani lavoratori sono attività esterne alle attività principali dell'azienda, come azioni di volontariato e attività ricreative. Dati tutti questi fattori è importante che le aziende siano in grado di soddisfare i requisiti richiesti dal mercato per accaparrarsi le migliori risorse umane disponibili.

Altro vantaggio dell'Industria 5.0 riguarda l'efficienza delle risorse per la sostenibilità e la competitività. I principi su cui si fonda il concetto di Industria 5.0 permette di rendersi attraenti per investitori e consumatori. L'efficienza delle risorse consiste nell'ottimizzare il rapporto tra output di prodotto con l'input di risorse, riconsiderare il ciclo di vita dei prodotti e lo smaltimento a fine vita. Il progetto RE-CIRCLE dell'OCSE fornisce una guida politica per l'efficienza delle risorse e per la transizione verso un'economia circolare, che non solo sarà vantaggiosa per la sicurezza materiale, ma anche per il miglioramento dei risultati ambientali ed economici (Fletcher et al., 2019). L'agenda 2030 delle Nazioni Unite ha previsto il modello di adozione di efficienza innovativa delle risorse "Obiettivi di Sviluppo Sostenibile" (SDG) per "industria, innovazione e infrastrutture" e "consumo e produzione responsabile" che, negli ultimi anni, tramite rilevazioni statistiche ha potuto constatare un miglioramento dovuto all'attuazione dei principi contenuti nel modello (Breque et al., 2021).

Altro vantaggio derivante dall'Industria 5.0 è una maggiore resilienza. Le industrie dovranno essere pronte ad adattarsi rapidamente alle mutevoli circostanze socio-politiche e naturali; flessibilità è la caratteristica di cui le imprese devono dotarsi per rispondere ai repentini cambiamenti della catena del valore, solo così saranno in grado di garantire prosperità in ogni momento. Tecnologie che permettono linee di produzione modulari, nuove materie prime, gestione e controllo da remoto e mitigazione del rischio in tempo reale possono essere fattori chiave per implementare strategie efficienti a favore di settori industriali resilienti. Questo è molto importante, perché in settori poco resilienti quello che accade è che si ricerca l'efficienza produttiva e della catena del valore, a discapito della resilienza stessa; un basso costo può portare a fragilità che possono mostrarsi in meno che non si dica (i.e. Covid-19) portando a riduzioni significative di output. In definitiva, gli strumenti sono le tecnologie digitali, l'obiettivo è la resilienza, in mezzo stanno tutti quei rischi dovuti all'interconnessione digitale come attacchi informatici e malfunzionamenti. Un ruolo chiave sarà svolto dalla *cybersecurity* (Breque et al., 2021).

1.5 Quality 4.0

Il concetto di qualità nasce dai bisogni e aspettative dei clienti, che mutano continuamente, implicando attributi e significati sempre nuovi. Di conseguenza il significato di qualità si è evoluto nel tempo coerentemente con le civiltà che si sono susseguite; le prime testimonianze scritte risalgono, infatti, al Medioevo, in cui si parla di ripetibilità e regole dei mestieri. Come già discusso nei paragrafi precedenti, le quattro rivoluzioni industriali hanno implicato grandi trasformazioni a livello tecnologico e sociale, ma solo nei primi decenni del Novecento si sviluppa il primo controllo qualità sul prodotto, incentrato esclusivamente sul prodotto stesso. A conclusione dei processi produttivi, il personale specializzato esaminava i pezzi a campione e decideva se scartarli o accettarli; questo implicava, però, che la causa che generava i pezzi difettosi veniva trascurata e quindi un probabile malfunzionamento nel processo veniva ignorato, causando dei costi per l'azienda. La successiva evoluzione fu il controllo statistico a campione, una tecnica che ha permesso alle aziende di abbandonare il controllo a tappeto, metodo troppo oneroso in termini di costo e impegno. Un passo importante venne raggiunto con il passaggio al controllo, non solo dei prodotti, ma anche dei processi, arrivando a definire concetti come quello di affidabilità di un sistema produttivo, ovvero la proprietà del sistema di funzionare nel tempo di progetto, e di manutenibilità, ovvero la grandezza che esprime il tempo medio di riparazione. Nel frattempo, la qualità diviene sempre più importante, tanto da non essere considerata solo come un valore aggiunto del prodotto finale, ma viene applicato già in fase di progettazione; questo allargamento di applicazioni del concetto di qualità porta alla nascita del *Total Quality Control* (TQC), cioè il modo in cui tutta l'organizzazione aziendale si occupare della qualità dell'output, seguito dalla nascita del *Total Quality Management* (TQM) come adattamento del TQC. Il concetto di qualità si estende anche al management e cerca di coinvolgere tutta la catena del valore includendo tutti gli attori con l'intento di produrre qualità, questa infatti viene intesa come un investimento da effettuare per godere di grandi benefici, e non più come un elevato costo per ottenere singoli prodotti o servizi di qualità. Verso la fine del Novecento, l'evoluzione dei mercati e la globalizzazione hanno portato a un significativo miglioramento delle pratiche di qualità permettendo al TQM di divenire fenomeno globale. La prima normativa UNI EN ISO 9000 (*International Organization for Standardization*) risale al 1986 e definisce la qualità come "l'insieme delle proprietà e delle caratteristiche di un prodotto o servizio, che conferiscono ad esso la capacità di soddisfare esigenze espresse o implicite"; questa definizione comprendere il fatto che il

concetto di qualità era associato solamente a beni tangibili. Nel 2015 la normativa viene rinnovata definendo la qualità come il “grado in cui un insieme di caratteristiche intrinseche soddisfa i requisiti”, che a differenza della vecchia normativa non fa riferimento a beni tangibili ma lascia intendere che sono le esigenze degli utilizzatori a definire il concetto stesso di qualità.

1.5.1 La Norma UNI EN ISO 9001 del 2015

La Norma ISO 9001, nella sua ultima versione rilasciata il 23 settembre 2015, differentemente dalle vecchie versioni, le quali presentavano solo cambiamenti di forma rispetto alle precedenti, ha mostrato carattere innovativo andando a definire i requisiti che il SGQ di un’organizzazione deve possedere per garantire il livello di qualità del prodotto/servizio dichiarato per la distribuzione sul mercato. La Norma, infatti, è stata elaborata sulla base di una struttura di alto livello, *High Level Structure (HLS)*, che consente l’adattamento ad ogni tipo di azienda, a prescindere dalle dimensioni dell’organizzazione e dal tipo di prodotto/servizio, e l’integrazione agli altri sistemi di gestione ISO grazie alla semplicità del linguaggio e requisiti meno stringenti. Inoltre, la linea guida per l’elaborazione dell’implementazione segue la direzione del *risk-based thinking*, della documentazione e del contesto organizzativo, di fatto allontanandosi dall’approccio *Plan Do Check Act (PDCA)*.

Ai sensi della Norma, un’organizzazione decide di applicare il contenuto descritto quando vuole mostrare la propria capacità di fornire i prodotti/servizi con regolarità, soddisfacendo i requisiti cogenti, o quando c’è l’intenzione di voler accrescere la soddisfazione del cliente tramite SGQ in modo efficace. Nonostante l’appartenenza alla famiglia delle Norme ISO 9000, questa può essere certificata dalle aziende che intendono implementarla, ma questo passaggio non è obbligatorio, pur sapendo che un’eventuale certificazione porta all’azienda un grande vantaggio competitivo.

1.5.2 Sistema di Gestione per la Qualità

Il Sistema di Gestione per la Qualità (SGQ) è l’insieme delle attività di gestione aziendale che determinano obiettivi e responsabilità e li mettono in pratica mediante pianificazione, controllo, assicurazione della qualità e il suo miglioramento continuo. Si cerca di soddisfare le richieste del cliente cercando di affinare i proprio prodotti e/o servizi sfruttando la chiarezza e puntualità con cui sono state definite attività e le procedure da seguire. I requisiti utili

all'implementazione del SGQ sono contenuti nella Norma UNI EN ISO 9001 del 2015 e derivano dai principi descritti nella Norma ISO 9000; l'attuazione del Sistema avviene attraverso tre fasi:

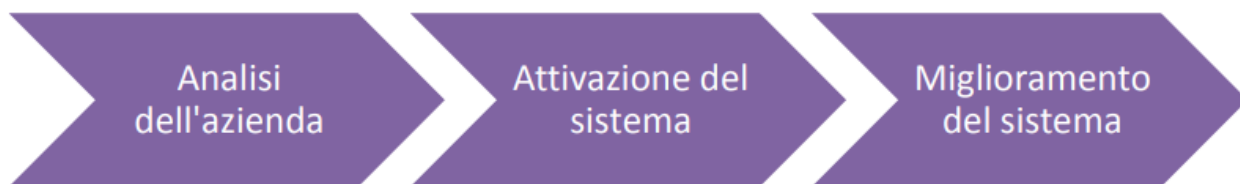


Figura 10 – Le fasi di implementazione del Sistema di Gestione per la Qualità (SGQ) (Parker et al. (2017))

1. Analisi dell'azienda: fase di analisi in cui vengono definiti gli obiettivi da raggiungere, identificando esigenze e aspettative dei clienti, e i processi e modalità di operato ;
2. Attivazione del sistema: conoscendo le mansioni particolari dei dipendenti a ogni livello di organizzazione e le attività definite nella fase precedente, si procede all'attivazione del sistema applicando la norma e rendendola funzionale alla realtà aziendale;
3. Miglioramento del sistema: la fase precedente è monitorata, controllata e registrata, nel senso che tutti i dati raccolti quotidianamente vengono usati per trovare non conformità nel sistema e apportare le dovute migliorie, senza dimenticare di guardare al raggiungimento dell'obiettivo finale.

Il SGQ si basa su sette principi fondamentali.



Figura 11 – I sette principi su cui si fonda il Sistema di Gestione per la Qualità (SGQ) (Parker et al. (2017)

- **Focus sul cliente:** l'obiettivo di qualunque azienda è vendere il proprio prodotto e/o servizio, per fare questo è di fondamentale importanza conoscere le aspettative e le esigenze del cliente. Si instaura una continua comunicazione con il cliente per estrarre le informazioni necessarie alla sua soddisfazione rivalutandone periodicamente i requisiti;
- **Leadership:** l'applicazione del SGQ avviene anche a livello strategico, è necessario che venga supportata anche dai livelli più alti dell'organizzazione, se questo non avviene si alzano le probabilità di insuccesso;
- **Impegno del personale:** i dipendenti devono accogliere il SGQ come strumento che permette di migliorare la qualità del loro lavoro e il successo dell'azienda, per cui lavorano portando valore aggiunto; è importante che ci sia un impegno a livello individuale che si concretizzi in un impegno collettivo;
- **Approccio per processi:** si scende ad un livello più basso andando a controllare ogni singolo processo in modo da avere la gestione dell'intero sistema;
- **Miglioramento continuo:** innovarsi e cercare il continuo miglioramento è un fattore non trascurabile in un mercato sempre più competitivo e in un contesto sempre più dinamico come quello odierno. La recente storia ha mostrato tutte le debolezze della nostra economia, per cui è fondamentale ricercare sempre il perfezionamento dei dettagli;

- Evidenza nel processo decisionale: oggi conosciamo l'importanza dei dati e la forza che questi possono donare a chi li conosce e riesce a gestirli; bisogna dotarsi di adeguati strumenti per sfruttarli al meglio;
- Gestione delle relazioni: gli attori della catena del valore, dal fornitore, al cliente, hanno un impatto sulla performance dell'azienda, si tenta quindi di gestire le relazioni al meglio.

L'utilità derivante dall'implementazione del SGQ si manifesta in benefici economici e commerciali, per questo è importante considerare l'impatto che può avere a livello strategico per l'azienda. Tra i giovamenti a livello commerciale si annoverano:

- Fidelizzazione del cliente: è lo strumento che permette al cliente di non cambiare fornitore; la conoscenza storica permettere di attrarre nuovi clienti tramite certificazione;
- Valore aggiunto: molte aziende richiedono che i fornitori siano in possesso della certificazione di qualità; quindi, l'implementazione del SGQ permette di ottenere un vantaggio sui competitor nazionali ed internazionali.

Tra i benefici organizzativi e operativi:

- Riduzione di costi e tempo: ridurre al minimo le non conformità e gli errori nei processi consente di ridurre sprechi, ridondanza e ottimizza la gestione in toto;
- Miglioramento dei processi: il ciclo produttivo è monitorato dall'inizio alla fine in modo efficiente, si ottiene un'attenta analisi a cui segue una tempestiva risoluzione delle problematiche;
- Identificazione delle responsabilità: conseguentemente al miglioramento dei processi viene da sé che si ha un ulteriore controllo sulla responsabilità dei task e sulle rispettive competenze, invogliando i dipendenti a rendere;
- Customer satisfaction: si è in grado di controllare la soddisfazione dei clienti ricercando il miglioramento;
- Svolgimenti aziendali: la presenza di ampia gamma di documenti che testimoniano l'operato del SGQ in tutto il suo ciclo di vita, consente di riconoscere e gestire più velocemente eventuali strategie di miglioramento.

1.5.3 Industry 4.0 e Quality 4.0

Il termine Quality 4.0 viene usato per definire il legame tra Quality e Industry 4.0. La quarta rivoluzione industriale ha messo a disposizione dell'uomo moltissime tecnologie che hanno distrutto i vecchi paradigmi; per la qualità, queste tecnologie sono importanti perché consentono la trasformazione della cultura, della leadership, della collaborazione e della conformità. La qualità 4.0 non riguarda la tecnologia, ma gli utenti di quella tecnologia e i processi che utilizzano per massimizzare il valore (Jakob, 2017); come sostenuto da Asif (2020) qualità e Industria 4.0 condividono gli stessi obiettivi ma con metodologia diversa; la qualità tenta infatti di migliorare i processi riducendo la variabilità mentre l'Industria cerca di aumentare la produzione grazie all'uso di tecnologie. Dalla fusione di questi due concetti nasce la Qualità 4.0.

Parker et al. (2017) parlava di qualità aperta relazionando, così come mostrato in figura 11, il concetto di qualità alla rispettiva rivoluzione industriale intendendo che essa può far ricorso a strumenti e approcci diversi, proponendo una pianificazione, progettazione e produzione tramite le tecnologie messe a disposizione da Industry 4.0, quali Artificial Intelligence (AI), Internet of Things (IoT) e Big Data.

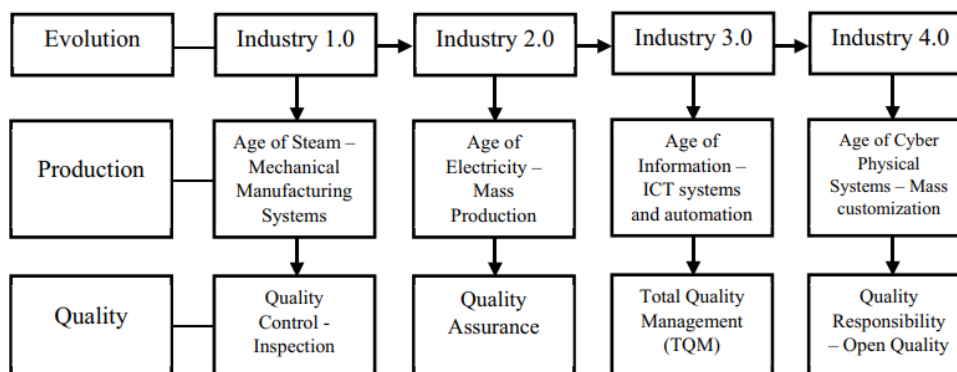


Figura 12 – Produzione e Qualità nelle 4 rivoluzioni industriali (Parker et al.,2017)

In questo senso non c'è un "salto" che prevede l'abbandono di quello che è stato a favore di ciò che sarà, ma piuttosto si tratta di un miglioramento dei metodi tradizionali a favore di tempestività in azioni correttive; questo concetto dovrebbe indurre le industrie a valutare il loro stato attuale per pianificare i cambiamenti futuri necessari, sottolineando l'opportunità per la qualità di mostrarsi come leader all'interno di un'organizzazione grazie alla capacità di adattarsi e integrarsi alle nuove tecnologie.

Mezzi così potenti consentono di creare una connessione di processi e risultati visibilmente ottimi che, con l'aggiunta dell'opportunità della gestione dei dati in tempo reale, impatta positivamente sull'intera struttura aziendale a livello organizzativo e culturale. In questo contesto fortemente evolutivo nasce il *Digital Quality Management (DQM)*, un sistema che permette la connessione tra tutti i processi fondamentali fornendo dati in tempo reale, secondo uno standard di qualità predefinito, e segnalando, permettendone correzioni, le non conformità generate dai processi; questo tipo di organizzazione consente di creare valore passando da un vantaggio competitivo che necessita di un modello di apprendimento aziendale a tutto tondo. Il controllo critico del prodotto e dei servizi, che comprende la gestione delle risorse umane, la gestione della tecnologia e della strategia, permette il funzionamento del sistema qualità migliorando la soddisfazione dei clienti e la riduzione dei costi, adattandosi alla forte componente di customizzazione dei prodotti e alla produzione massiva.

1.6 Quality 5.0

Gli ultimi anni hanno registrato un repentino cambio di tendenza a favore di valori sociali, trainati dalle nuove generazioni che hanno mostrato una forte sensibilità a determinati temi. Col susseguirsi delle rivoluzioni industriali, altrettanto ha fatto anche la qualità, adattandosi perfettamente alle esigenze specifiche del periodo.

The development of the Quality Concept

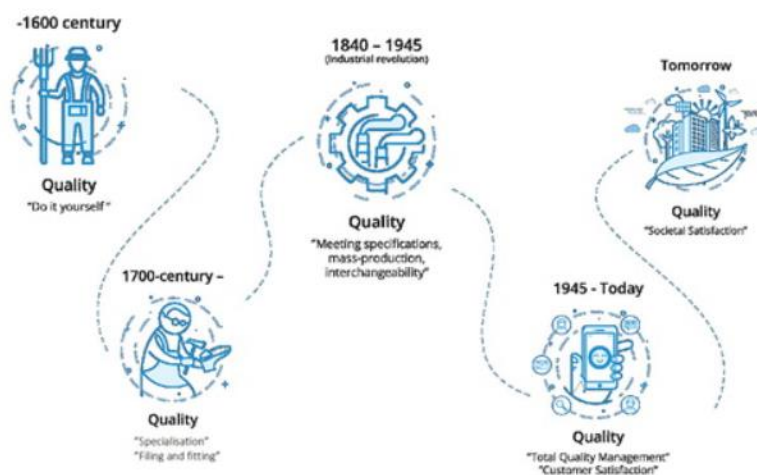


Figura 13 – Lo sviluppo della qualità nel corso delle rivoluzioni industriali (Broday, 2022)

Come è possibile vedere dalla Figura 14, il concetto di qualità risale a molti secoli fa, quando si notò che alcuni individui erano più talentuosi di altri nel fare e nell'elaborare soluzioni e idee; si passò da una qualità "privata" che riguardava i prodotti per l'uso personale come poteva fare un contadino, ad un controllo qualità che riguardava i prodotti da offrire a terzi, come poteva fare un calzolaio; questo segnò il momento in cui il produttore e il cliente non necessariamente dovevano coincidere. Con la rivoluzione industriale e la produzione di massa, si incomincia a seguire la soddisfazione del cliente, anche se inizialmente si trattava semplicemente di rispettare le specifiche di progetto, gettando le basi per la modularità dei prodotti e i principi di standardizzazione, aumentando di molto l'efficienza operativa a discapito di variabilità dei prodotti per i clienti. Dalla seconda metà del '900 ad oggi c'è stata un'inversione di tendenza in cui le aziende hanno puntato a mantenere e migliorare l'efficienza operativa della produzione di massa volgendo lo sguardo alla soddisfazione del cliente, fino a renderlo punto cardine del controllo qualità. Oggi si è arrivati al punto in cui un'azienda non può non considerare l'interdipendenza tra il proprio operato e la sfera pubblica, perseguendo il miglioramento del valore sociale e ambientale; in questo senso si ricerca un senso più alto di qualità ridisegnando la prospettiva di stakeholder, considerando il cliente non come singolo acquirente. Anche la normativa ISO 14001 agisce in questo senso standardizzando il sistema di gestione ambientale delle aziende che si impegnano ad applicare le proprie politiche interne e le leggi, al fine di ridurre l'inquinamento ambientale. L'idea di eccellenza risiede nell'aumentare la soddisfazione dei clienti interni ed esterni ampliando così il concetto di stakeholder; infatti, la *Quality 5.0* pone l'obiettivo di soddisfare la *Society 5.0* con prospettive di sostenibilità per generazioni odierne senza intaccare quelle future. Risulta evidente, quindi, come la direzione seguita si diriga verso una nuova era di qualità, dove le aziende guardano all'implementazione di strategie di responsabilità sociale e sostenibile; già nel 1987 all'interno del Report Brundtland, lo sviluppo sostenibile veniva definito come "quello sviluppo che consente alla generazione presente di soddisfare i propri bisogni senza compromettere la possibilità delle generazioni future di soddisfare i propri". La società oggi mira a soddisfare i propri bisogni e obiettivi impattando fortemente su scala economica, ambientale e sociale; il grande problema riguarda la sostenibilità di queste aspettative coerentemente con la capacità della natura di fornire le risorse necessarie. Questo tema viene affrontato nel 15° Rapporto sul rischio globale del World Economic Forum (WEF, 2020). È altresì importante che questa sostenibilità sia abbracciata da tutte le organizzazioni, in quanto

sono loro a produrre e consegnare tutti i prodotti e servizi; è fondamentale, oggi, che le aziende ottengano profitto catturando la soddisfazione del cliente puntando alla performance finanziaria e alla sostenibilità.

Alla luce delle seguenti chiarificazioni, risulta evidente come la definizione di qualità necessiti di un'ulteriore rivisitazione. La definizione di qualità ricade sull'intera società e non più esclusivamente sul cliente, perché quello che essa desidera è il benessere, specialmente se questo viene intaccato da attività che non la riguardano; si parla di Qualità 5.0 perché le strategie aziendali contemplano la sostenibilità ambientale al pari della soddisfazione del cliente. Non è solo la definizione di qualità a necessitare di una rivisitazione, ma anche la definizione di costo, di scarsa qualità e di investimento. Nel piano strategico non rientra soltanto l'operato dell'azienda stessa, ma interessa anche la catena del valore, comprendendo fornitori e altre parti interessate che possono occuparsi di riciclaggio e azioni volte a ridurre l'impatto ambientale; la sfida risiede nel combinare l'integrazione di questi nuovi valori, non più trascurabili, con le strategie operative di lungo termine e fondere la ricerca nel Quality Management con discipline come sociologia, psicologia ed etica aziendale.

1.6.1 La trasformazione dalla quarta alla quinta generazione

Come per il passaggio da Industry 4.0 a Industry 5.0, il passaggio da Quality 4.0 a Quality 5.0 avviene per una evoluzione di valori e di necessità sociali; risulta evidente come i temi di industria, qualità e società siano fortemente legati e come gli uni influenzino gli altri. Oggi, per le aziende, il tema della sostenibilità è imprescindibile, ed è impensabile portare avanti il proprio business trascurando i valori fondamentali sostenitori della Società 5.0, la quale comprende sia gli interni all'azienda stessa, che gli esterni (come i non consumatori), che impattano sulla visibilità aziendali condannando chi non si fa portavoce dei loro valori. Risulta chiaro come il passaggio ad Industry 5.0 sia necessario per proporre nuovi modelli di business sostenibili a livello economico, sociale ed ambientale; risulta altrettanto evidente come il Quality Management debba intraprendere la strada del Quality 5.0 come sostegno di questo arduo compito. Quindi la nuova generazione di qualità deve essere una piattaforma composta dagli attuali strumenti del QM, ma che sviluppa e adotta nuovi valori. Ridefinire nuovi costrutti per la soddisfazione del cliente derivanti dal business e da altri fattori, contemplando un nuovo e ampio concetto di soddisfazione che includa temi come la sicurezza sul lavoro, la salute, la

cura per l'ambiente, l'etica aziendale; importante è anche la rivalutazione di una nuova figura di manager della qualità che sia capace di incorporare questa più ampia responsabilità.

Questa analisi non vuole risolvere i quesiti del caso e nemmeno rispondere alle domande irrisolte, vuole, piuttosto, focalizzare l'attenzione sull'importanza dell'argomento e sulle sfide del futuro prossimo:

- Il ruolo dei quality manager: come detto pocanzi, il ruolo dei manager potrebbe avere una certa rilevanza vista la complessità dell'allineare i mondi della qualità con quello della soddisfazione sociale tramite i temi cruciali sopra discussi;
- Il ruolo dei management team: i futuri team di gestione devono, in alcuni casi, essere coproduttori e collaboratori con i concorrenti aziendali. Clienti, utenti e parti interessate sono anche coproduttori critici nello sviluppo del business. Questo sviluppo dovrà trasformare l'economia nella corsa alla sostenibilità. Di conseguenza, vi è anche la necessità critica di sviluppare modelli di gestione adattabili a un ambiente in rapida evoluzione. In futuro, sarà anche interessante studiare i ruoli e la portata del processo decisionale tramite l'intelligenza artificiale (AI) e l'apprendimento automatico;
- Nuovi "strumenti di misurazione": è stato detto che la Quality 5.0 sfrutta i concetti, strumenti e pratiche del QM tradizionale. Ma è necessario definire come adattare tali concetti, strumenti e pratiche per la misurazione della soddisfazione dei nuovi stakeholder e della Society 5.0 e quali sono le implicazioni di riuscire in questa impresa;
- Verso la transizione: che implicazioni può portare il passaggio dalla quarta alla quinta generazione di qualità agli stakeholder? Come è possibile inglobare i nuovi valori? Come si inizia una tale rivoluzione?

CAPITOLO 2: DIGITAL TWIN

2.1 Introduzione

Il Digital Twin, tipicamente descritto come un sistema composto da un'entità fisica e una controparte virtuale e le loro relative connessioni di dati bidirezionali, ha assunto negli ultimi anni un ruolo sempre più centrale nella ricerca accademica e industriale come strumento in grado di migliorare le prestazioni della sopraccitata entità fisica tramite le tecniche computazionali della controparte virtuale (Jones et al., 2020). Tale interesse è quindi aumentato negli ultimi anni determinando una importante crescita nel numero di pubblicazioni.

Ai giorni d'oggi, durante il ciclo di vita dei prodotti industriali si ha un ampio utilizzo di differenti software ingegneristici e apparecchiature digitalizzate che determinano, di conseguenza, una produzione massiccia di dati di natura differente. Tali dati risultano tuttavia isterici e isolati l'uno dall'altro, ciò ne causa un loro baso utilizzo e una loro scarsa efficienza (Liu et al., 2021). Mentre i modelli teorici e statistici potevano essere applicati in una fase iniziale di pianificazione al fine di verifica, convalida e ottimizzazione, oggi non è più possibile trascurare la fase di simulazione durante il run-time dei sistemi, da qui nasce la necessità di sviluppare tecnologie ad alto contenuto tecnologico per compensare alla profonda inconsistenza di dati (Liu et al., 2021).

Con il nuovo paradigma dell'*Industry 4.0*, come ampiamente discusso nel capitolo precedente, la produzione è andata incontro ad una evoluzione intelligente grazie all'introduzione di diverse tecnologie, tra cui *Internet of Things (IoT)*, *Big Data*, *Cloud Computing* e il *Cyber-Physical-Systems (CPS)*, definito come "sistema di entità computazionali che collaborano in stretta connessione con il mondo fisico circostante e i suoi processi in corso, fornendo e utilizzando, allo stesso tempo, i servizi di accesso ai dati e di elaborazione dati disponibili su Internet" (Monostori, 2015); tali sistemi riescono a creare una copia dei processi reali in ambiente digitale in tempo reale grazie al continuo scambio di dati (Lee et al., 2015). In questo contesto, trova terreno fertile il concetto di Digital, mostrando tutto il suo potenziale nel replicare sistemi di produzione in tempo reale, analizzando i dati raccolti, monitorando, gestendo e ottimizzando i sistemi presi in esame.

In altri termini, il nuovo paradigma del Digital Twin con la relativa creazione di duplicati virtuali di macchinari, processi, attività e persone, cerca di concretizzare in un unico strumento (capace di analizzare tutti i flussi informativi) gli obiettivi che la quarta rivoluzione industriale con le sue tecnologie vuole raggiungere, garantendo di interfacciarsi in modo estremamente semplice con la controparte digitale e facilitando le attività di gestione da parte del management. Mentre con l'Industry 4.0 si ha che la digitalizzazione parte dal mondo fisico e arriva a quello virtuale (processo *bottom-up*), con il Digital Twin prima viene creato digitalmente il prodotto e successivamente questo viene materializzato (processo *top-down*); diventa indispensabile possedere un'ampia mole di dati da rielaborare affinché il DT possa contribuire a fornire risposte efficaci alle richieste dei processi di business.

Tra i vantaggi potenziali derivanti dall'implementazione del concetto di Digital Twin, la letteratura evidenzia la riduzione dei costi, un aumento di efficienza, un miglioramento dei servizi offerti, una maggiore sicurezza, affidabilità e resilienza, tutti a favore dei processi decisionali all'interno dell'azienda (VanDerHorn & Mahadevan, 2021). Tuttavia, dall'analisi della letteratura esistente, risulta necessario ottenere una definizione consolidata del concetto di Digital Twin, per evitare che la grande varietà di definizioni esistenti possano causare confusione con altre tecnologie simili o limitandone la comprensione e la possibilità di raggiungere i benefici dichiarati; inoltre, sembra utile una più approfondita analisi circa le strategie di implementazione che tenga conto dei contesti tecnici e culturali affinché il supporto ai processi decisionali sia concreto e misurabile (VanDerHorn & Mahadevan, 2021).

2.2 Le origini del DT

La produzione digitale, forte della continua e rapida evoluzione delle tecnologie abilitanti, sta portando un valore sempre più alto all'interno del settore industriale sotto ogni punto di vista; grazie alla rappresentazione virtuale di fabbriche, risorse, forza lavoro, ecc., si riesce a costruire modelli e a simulare prodotti e processi creando un'integrazione del mondo fisico con quello virtuale. Questo crea da un lato un'ottima opportunità per le aziende di affrontare con mezzi potenti e adeguati la crescente complessità e le elevate richieste del mercato, dall'altro, uno sconvolgimento così rapido delle tecnologie ne ha limitato la piena comprensione e la capacità di integrazione (Liu et al., 2021). Un concetto simile a quello di DT fu introdotto nel 2006 da Hribernik et al. parlando di "product avatar", il quale intendeva gestire il flusso bidirezionale informativo a partire dal prodotto stesso; dal 2015 pare che il termine di product avatar sia stato completamente sostituito dal concetto di Digital Twin (Liu et al., 2021).

La prima vera applicazione e la prima definizione dettagliata del concetto di DT sono da attribuire alla NASA, in particolare durante lo sviluppo del programma spaziale Apollo, vennero costruiti due veicoli identici di cui uno, il "gemello", sarebbe rimasto a terra per simulare e prevedere le condizioni del veicolo nello spazio (Boschert & Rosen, 2016). Il DT ha poi trovato molte applicazioni nel settore aerospaziale con la funzione di monitoraggio e ottimizzazione delle prestazioni dei velivoli, col passare degli anni i campi di applicazione si sono ampliati verso altri settori. Tuttavia, a Michael Grieves, accompagnato da John Vickers, nel 2003 presso l'Università del Michigan, è attribuito il riconoscimento di aver introdotto per la prima volta il concetto definendolo come "equivalente digitale di un prodotto fisico" (Liu et al., 2021) con lo scopo di impattare fortemente lungo tutto il ciclo di vita del prodotto. Successivamente, questa definizione venne ampliata nel suo White Paper del 2014 descrivendo il DT come la costituzione di un prodotto fisico, una sua rappresentazione virtuale e una connessione bidirezionale di dati chiamata "*Mirroring*" o "*Twinning*". (Jones et al., 2020). Per tre anni consecutivi, la Gartner Inc. ha posizionato il DT tra i primi 10 trend tecnologici strategici da seguire non solo nel campo manifatturiero ma anche in altri settori comprendendo persone, imprese e processi. La grande attenzione mostrata nei confronti del DT negli ultimi anni ha portato ad una vasta varietà di definizioni che hanno comportato una dannosa diluizione della prima descrizione di Grieves.

2.3 Analisi della letteratura

Questa volontà di una più efficace ed efficiente integrazione tra mondo fisico e virtuale ha fatto sì che le ricerche degli ultimi anni si concentrassero sul concetto di *Digital Twin*, mostrando un forte trend crescente come da figura:

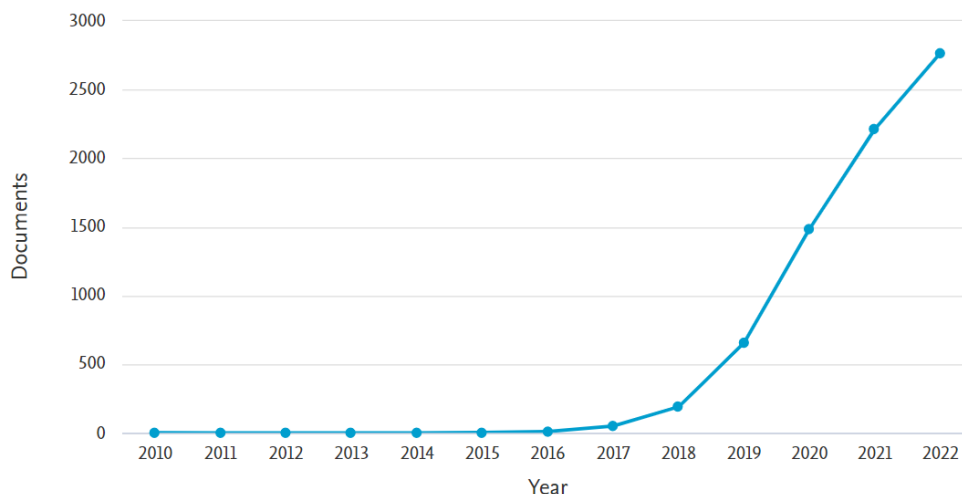


Figura 14: Grafico trend pubblicazioni "Digital Twin" (Scopus, Marzo 2023)

si può constatare come, analizzando una finestra temporale che va dall'anno 2010 all'anno 2022 con oltre 7000 pubblicazioni, il trend che si è mantenuto costantemente a zero per quasi cinque anni, ha subito una crescita repentina del 2017 in avanti. In particolare, si è passati dalle 49 pubblicazioni del 2017, alle 2765 del 2022; nel primo mese del 2023 le pubblicazioni sono state 233, ipotizzando lo stesso numero di pubblicazioni per i successivi mesi dello stesso anno, potrebbero raggiungersi le 2796 pubblicazioni. Non è inverosimile che questo numero possa essere più alto.

Per quanto riguarda le il numero di pubblicazioni per istituzione (Figura 2.2), le università si confermano centro di forza per la ricerca; infatti, le prime dieci posizioni per pubblicazioni sono occupate quasi interamente da quest'ultime.

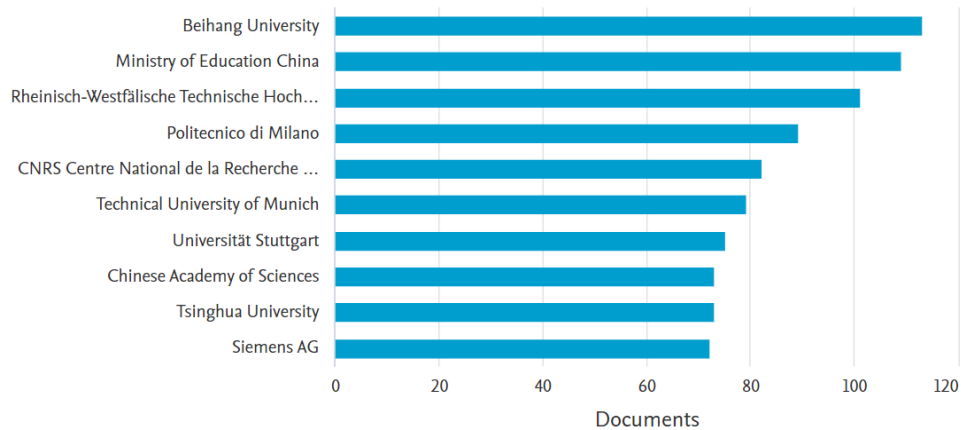


Figura 15: Pubblicazioni per istituzioni (Scopus, Marzo 2023)

In particolare, comparando il grafico della Figura 2.2 con quello della Figura 2.3 si riscontra evidenza di come la Cina sia il Paese che ha dedicato maggiori sforzi nello studio di questo argomento con quasi 1800 pubblicazioni di cui più di duecento appartengono alle due università con più pubblicazioni, Beihang University e Ministry of Education China.

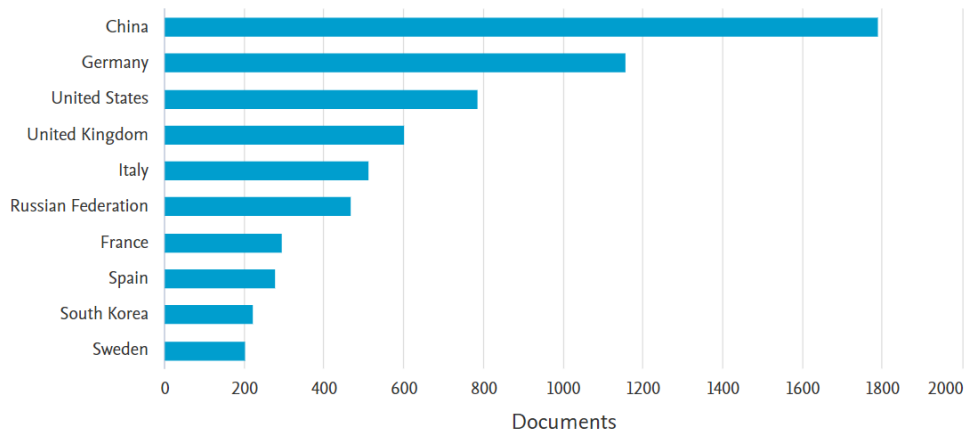


Figura 3: Paesi per numero di pubblicazioni (Scopus, Marzo 2023)

Di queste oltre 7000 pubblicazioni, il 92,9% sono divise quasi equamente tra Conference Paper e Article, mentre il restante 7,1% è composto in maggioranza da Review e Book Chapter.

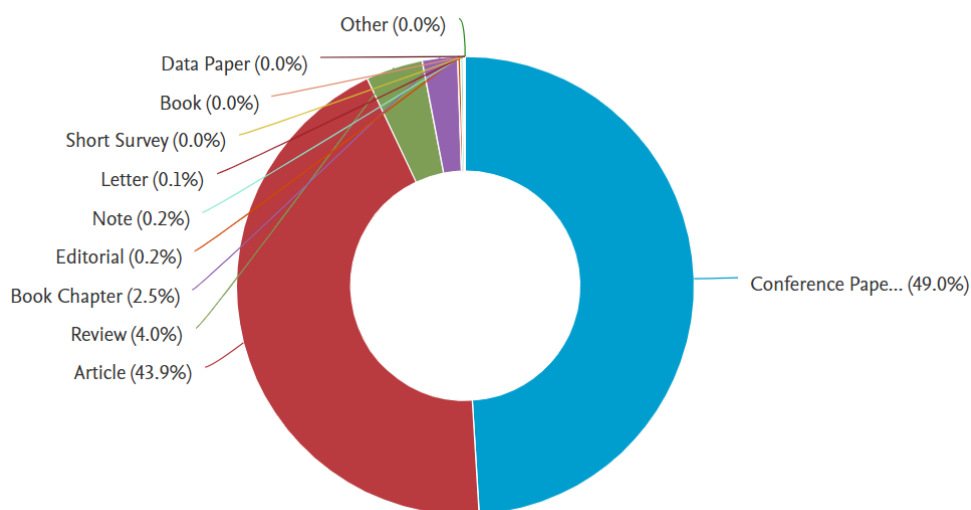


Figura 16: Tipi di documenti (Scopus, Marzo 2023)

È interessante vedere come le aree tematiche spazino molto riguardando prevalentemente l'ambito scientifico, ma il DT riesce a coinvolgere anche le scienze sociali, l'arte e le materie umanistiche.

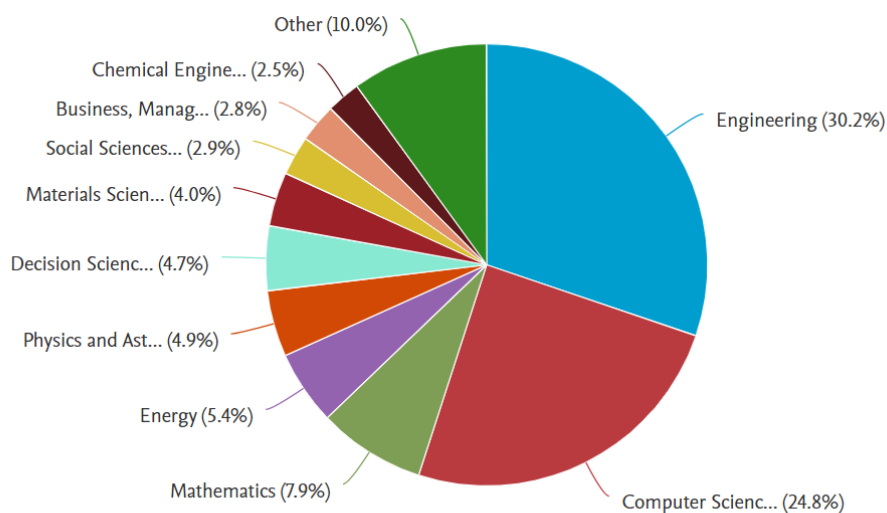


Figura 4: Digital Twin per aree applicative (Scopus, Marzo 2023)

Quello che si evince da questi pochi grafici è una forte tendenza di interesse nei confronti del DT; si sta prestando un forte impiego di risorse affinché si possa chiarire cosa è e cosa fa in modo da sfruttare pienamente il potenziale. La ricerca è ancora è ancora poca e ancora molti

punti restano vaghi, ma c'è una chiara volontà di voler sfruttare questa tecnologia nel miglior modo possibile.

2.4 Definizione e caratterizzazione del Digital Twin

Come detto in precedenza, il concetto di Digital Twin è assimilabile a un sistema composto da due entità, una fisica e una virtuale, e dalle connessioni bidirezionali capaci di trasmettere i dati, le informazioni elaborate e i processi dalla rappresentazione fisica a quella virtuale e dalla rappresentazione virtuale a quella fisica. Lo spazio virtuale è costituito da tanti sotto-spazi virtuali che permettono ognuno una differente operazione tra cui: modellazione, test e ottimizzazione (Grieves & Vickers, 2017) (si veda Figura 18).

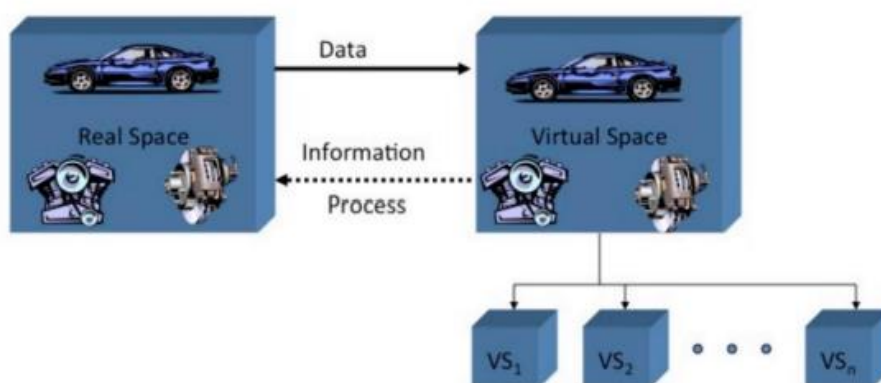


Figura 17 - "Conceptual Ideal for PLM" by (Grieves et al. 2016)

Le componenti principali del DT sono quindi:

- Spazio fisico
- Spazio virtuale (o digitale)
- Connessioni bidirezionali che connettono i due spazi

Si tratta di un paradigma in grado di creare un duplicato virtuale di un oggetto fisico sfruttando le tecnologie abilitanti dell'Industry 4.0 discusse nel capitolo precedente. Grazie all'utilizzo dei CPS è infatti possibile creare l'interazione, la collaborazione e la comunicazione tra i due modelli, quello reale e quello virtuale; attraverso gli IoT (sensori e attuatori) le informazioni vengono inviate in cloud al DT e poi elaborate utilizzando le tecnologie di *Big Data Analytics*. I risultati ottenuti possono successivamente essere confrontati, anche se questo non risulta sempre possibile, utilizzando AI (*Artificial Intelligence*) e implementando algoritmi di ML (*Machine Learning*). Simultaneamente il DT funge sia da *benchmark* di confronto con il

funzionamento reale che da strumento di settaggio dell'oggetto. L'immagine seguente mostra le tecnologie abilitanti del DT.

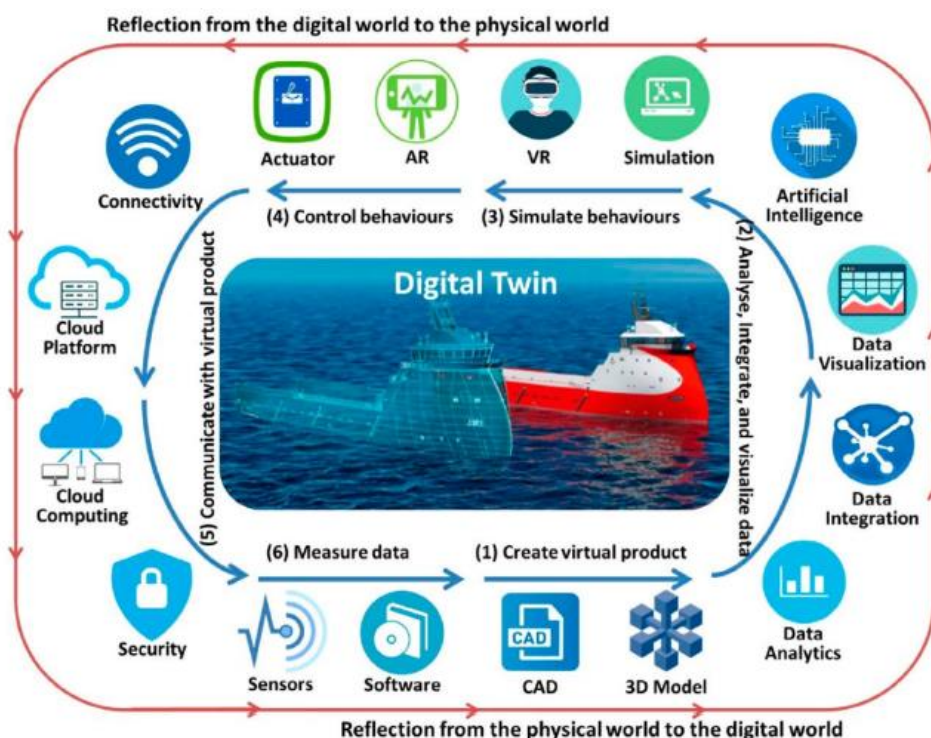


Figura 18 - Tecnologie abilitanti del Digital Twin (Tao & Zhang, 2017)

In questo senso un DT così costituito soddisfa perfettamente il concetto di Smart Manufacturing, permettendo all'industria di avere uno strumento per comunicare e gestire in tempo reale i dati recuperati dai sensori e dagli attuatori fornendo una rappresentazione accurata della realtà, di avere una comunicazione efficace e tempestiva tra tutte le risorse (umane e non) e di avere supporto nel processo gestionale; si tratta quindi di uno strumento che permette di affrontare le criticità e la dinamicità del mercato globale. L'efficacia del DT consiste anche nel fatto che la riproduzione del modello fisico non si riduce al singolo prodotto, ma può rappresentarne una sua parte come il motore di un veicolo, o anche un processo intero, come quello manifatturiero. Questa tecnologia consente, tramite simulazioni, di prevedere il comportamento del prodotto fisico con una precisione di calcolo che aumenta in base alla quantità di simulazioni e al numero di macchine collegate alla rete (Boschert & Rosen, 2016). Ad esempio, è possibile eseguire simulazioni all'interno del *Product Life-Cycle* (PLC) prendendo in esame il DT di un motore a reazione che recupera i dati da tutti i motori a reazione posseduti dalla compagnia aerea, esso può eseguire simulazioni basate sui

dati di tutti quei motori piuttosto che solo di uno, aumentandone la sua precisione (Boschert & Rosen, 2016).

In altre parole, il DT è in grado di adempiere alla rappresentazione e simulazione dell'oggetto fisico nel mondo reale nel suo significato più ampio, cioè quello di rappresentare un sistema integrato capace di simulare, calcolare, regolare e monitorare i processi dell'intero sistema.

2.4.1 Definizioni in letteratura

Tutta la ricerca degli ultimi anni succede le definizioni scientifiche di Grieves e della NASA, da quel momento infatti si sono susseguite una serie di ricerche mirate sia ad ampliare il concetto di DT sia a consolidarne la struttura. Negri et al. (2017) effettuarono una revisione della letteratura al fine di capire come la comunità scientifica definiva il DT e quale ruolo avrebbe svolto all'interno dell'Industry 4.0 presentandone due possibili utilizzi:

- pianificare la attività di manutenzione
- ottimizzare il processo decisionale analizzando l'intero ciclo di vita del prodotto fisico.

Tao et al. (2019), concentrandosi su una revisione approfondita della letteratura, sullo stato dell'arte delle ricerche e sulle applicazioni e struttura del DT, hanno esaminato varie teorie come quelle di modellazione, simulazione, verifica, integrazione e servizio; inoltre hanno determinato tre fasi sullo stato di ricerca del DT individuandone i periodi: fase di formazione dal 2003 al 2011, fase di incubazione dal 2011 al 2014 e fase di crescita dal 2014 ad oggi. Liu et al. (2021) hanno fornito una revisione della letteratura e delle tecnologie chiave utili all'implementazione del DT, hanno analizzato le principali applicazioni e hanno riscontrato una varietà di applicazioni, implementazioni e studi componentistici che causano difficoltà nel trovare il modello di riferimento da seguire, raccomandano quindi di concentrarsi sulla sistematicità degli studi.

Per avere un quadro completo di cosa sia il Digital Twin, di seguito si riporta una tabella riassunta delle sue principali definizioni presenti in letteratura scientifica, indicandone anche autore e anno (Tabella 1):

ARTICOLO	DEFINIZIONE
(Glaessgen & Stargel, 2012)	Un Digital Twin è una simulazione probabilistica multi-fisica, multi scala e integrata di un veicolo o sistema costruito che

	utilizza i migliori modelli fisici disponibili, gli aggiornamenti dei sensori, la cronologia dei dati, ecc., per rispecchiare la vita del suo gemello volante corrispondente. Il Digital Twin è ultra-realistico e può considerare uno o più sistemi di veicoli importanti e interdipendenti, tra cui cellula, propulsione e accumulo di energia, supporto vitale, avionica, protezione termica, ecc.
(Lee et al., 2013)	Modello accoppiato della macchina reale che opera nella piattaforma cloud e simula le condizioni di salute con una conoscenza integrata degli algoritmi analitici basati sui dati e altre conoscenze fisiche disponibili.
(Reifsnider & Majumdar, 2013)	Modello strutturale che comprenderà dati quantitativi delle caratteristiche a livello di materiale con elevata sensibilità.
(Michael Grieves, 2014)	Il modello concettuale Digital Twin [...] contiene tre parti principali: a) prodotti fisici nello spazio reale, b) prodotti virtuali nello spazio virtuale, e c) le connessioni di dati e informazioni che legano insieme i prodotti virtuali e reali.
(Rosen et al., 2015)	Modelli molto realistici dello stato attuale del processo e del suo comportamento nell'interazione con l'ambiente nel mondo reale.
(Ríos et al., 2015)	Prodotto controparte digitale di un prodotto fisico.
(Schluse & Rossmann, 2016)	Sostituti virtuali di oggetti del mondo reale costituiti da rappresentazioni virtuali e capacità di comunicazione che costituiscono oggetti intelligenti capaci di agire come nodi intelligenti all'interno dell'Internet e dei servizi.
(Canedo, 2016)	Rappresentazione digitale di un oggetto del mondo reale con particolare attenzione all'oggetto stesso.
(Gabor et al., 2016)	La simulazione dell'oggetto fisico stesso per prevedere gli stati futuri del sistema.

(Schroeder et al., 2016)	Rappresentazione virtuale di un prodotto reale nel contesto dei sistemi cyber-fisici.
(Kraft, 2016)	Una simulazione integrata multifisica, multi-scala, probabilistica di un sistema as-built, abilitata da thread digitale, che utilizza i migliori modelli disponibili, le informazioni del sensore e i dati di input per rispecchiare e prevedere attività/ prestazioni durante la vita del suo gemello fisico corrispondente.
(Boschert & Rosen, 2016)	La visione del Digital Twin si riferisce a una descrizione fisica e funzionale completa di un componente, prodotto o sistema, che include più o meno tutte le informazioni che potrebbero essere utili in tutte le fasi del ciclo di vita attuale e successivo.
(Abramovici et al., 2016)	Un gemello virtuale è un modello che integra modelli di prodotto virtuali interdisciplinari (meccanica, elettronica, software e servizi) e relativi dati in tempo reale di un'istanza di prodotto (gemello fisico). Un gemello virtuale può essere generato dinamicamente da un modello e da uno spazio dati per svolgere un compito specifico (ad esempio, riconfigurazione dinamica di un prodotto intelligente durante la fase di utilizzo).
(Roy et al., 2017)	Un gemello digitale è la rappresentazione digitale di un bene unico (prodotto, macchina, servizio, sistema prodotto-servizio o altro bene immateriale) che compromette le sue proprietà, condizioni e comportamento per mezzo di modelli, informazioni e dati.
(Schleich et al., 2017)	In sintesi, la visione del gemello digitale descrive la visione di una relazione bidirezionale tra un artefatto fisico e l'insieme dei suoi modelli virtuali. In questo contesto, il "gemellaggio" virtuale, ossia l'instaurazione di tali relazioni tra le parti fisiche e i loro modelli virtuali, consente l'esecuzione efficiente della progettazione, della fabbricazione, della manutenzione e di varie altre attività lungo tutto il ciclo di vita del prodotto.

(Grieves & Vickers, 2017)	il Digital Twin (DT) è un insieme di costrutti di informazioni virtuali che descrivono completamente un prodotto fisico potenziale o reale dal livello micro-atomico al livello macro-geometrico. Al suo livello ottimale, qualsiasi informazioni che potrebbe essere ottenuta dall'ispezione di un prodotto fisico fabbricato può essere ottenuta dal suo gemello digitale.
(Negri et al., 2017)	DT [Digital Twin] consiste in una rappresentazione virtuale di un sistema di produzione in grado di funzionare su diverse discipline di simulazione, caratterizzata dalla sincronizzazione tra il sistema virtuale e quello reale, grazie ai dati rilevati e ai dispositivi intelligenti connessi, modelli matematici ed elaborazione dei dati in tempo reale.
(Vachálek et al., 2017)	Sistema funzionale di ottimizzazione continua dei processi grazie alla collaborazione di linee di produzione fisiche con una copia digitale.
(Söderberg et al., 2017)	Copia digitale di un sistema fisico.
(Alam & Saddik, 2017)	Digital twin è un'esatta copia cyber di un sistema fisico che rappresenta veramente tutte le sue funzionalità.
(Tao & Zhang, 2017)	[... A] DT completa [Digital Twin] dovrebbe includere cinque parti: parte fisica, parte virtuale, connessione, dati e servizio.
(Autiosalo, 2018)	Digital Twin è la parte cyber di un sistema Cyber-fisico.
(Demkovich et al., 2018)	Un Digital Twin di un sistema di produzione è un layout digitale multilivello che descrive il prodotto, i processi e le risorse nell'ambiente del loro funzionamento, cioè permette di simulare i processi che si svolgono nel sistema reale, nonché di raccogliere e visualizzare in tempo reale i dati temporali sullo stato degli oggetti ottenuti dal PLC e dai sensori installati nel sistema produttivo sia su apparecchiature industriali.

(Hu et al., 2018)	Sulla base delle definizioni date di un gemello digitale in tutto il contesto, si potrebbe identificare una comprensione comune dei gemelli digitali, come controparti digitali degli oggetti fisici.
(Hu et al., 2018)	Il gemello digitale è in realtà un modello vivente del bene o sistema fisico, che si adatta continuamente ai cambiamenti operativi in base ai dati e alle informazioni raccolte online e può prevedere il futuro della controparte fisica corrispondente.
(Vrabič et al., 2018)	Un gemello digitale è una rappresentazione digitale di un oggetto fisico o di un assemblaggio che utilizza simulazioni integrate e dati di servizio. La rappresentazione digitale contiene informazioni provenienti da più fonti lungo tutto il ciclo di vita del prodotto. Queste informazioni sono continuamente aggiornate e vengono visualizzate in una varietà di modi per prevedere le condizioni attuali e future, sia in ambienti di progettazione che operativi, per migliorare il processo decisionale.
(Tao et al., 2018)	Modelli virtuali per gli oggetti fisici utili a simulare i loro comportamenti.
(Bruynseels et al., 2018)	Modello digitale che riflette dinamicamente lo stato di un artefatto.
(Talkhestani et al., 2018)	Il Digital Twin è un modello virtuale di un asset fisico in grado di rispecchiare pienamente le sue caratteristiche e funzionalità durante l'intero ciclo di vita. Si tratta di un approccio per gestire tutti i dati digitali generati di un componente o sistema lungo il suo ciclo di vita e recuperarli in base alle esigenze delle funzioni di simulazione o ottimizzazione per affrontare eventuali problemi.
(Mabkhot et al., 2018)	Un modello virtuale di oggetti fisici viene creato in un mondo digitale per simulare e monitorare il loro comportamento in ambienti reali. Il gemello digitale è costituito da tre componenti, che sono le entità fisiche, i modelli virtuali e i dati che li legano.

(Zheng et al., 2019)	Un Digital Twin è un insieme di informazioni virtuali che descrive completamente una produzione fisica potenziale o effettiva dal livello micro-atomico al livello macro-geometrico.
(Madni et al., 2019)	Un Digital Twin è un'istanza virtuale di un sistema fisico (gemello) che viene continuamente aggiornato con i dati di prestazioni, manutenzione e stato di salute di quest'ultimo durante tutto il ciclo di vita del sistema fisico.
(Riedelsheimer et al., 2020)	Un gemello digitale è una rappresentazione digitale di un prodotto unico attivo (dispositivo reale, oggetto, macchina, servizio o bene immateriale) o di un sistema prodotto-servizio unico (un sistema costituito da un prodotto e da un servizio correlato) che comprende le sue caratteristiche selezionate, proprietà, condizioni e comportamenti per mezzo di modelli, informazioni e dati all'interno di una singola o anche attraverso più fasi del ciclo di vita.

Le varie definizioni, oltre al chiaro obiettivo di descrivere ciò che è un Digital Twin, si dilungano su alcuni attributi specifici quali fedeltà di rappresentazione del modello fisico, raccolta e scambio di dati, frequenza di sincronizzazione e funzionalità di simulazione; sporadicamente si fa riferimento anche ai casi d'uso specifici e alle fasi del ciclo di vita preso in esame (VanDerHorn & Mahadevan, 2021).

Di seguito vengono riportate e dettagliate le definizioni principali, nonché le più note in letteratura, esplicative delle tecnologie e funzionalità menzionate finora.

Per Negri et al. (2017) il DT viene visto come una rappresentazione di un oggetto fisico basata su un modello semantico dei dati che consente di effettuare simulazioni in diversi contesti. Nel caso specifico, il modello semantico si occupa dell'aggiornamento continuo della rappresentazione virtuale grazie ai dati in tempo reale, mentre la simulazione permette di predire il comportamento futuro dell'oggetto. Per Boschert e Rosen (2016) il DT è invece lo step successivo della simulazione che diventa il principale strumento di supporto alle decisioni quando viene completamente integrato nel sistema. Questo diventa però possibile solo se il

DT possiede una struttura capace di connettere dati ingegneristici e operativi utilizzando differenti modelli di simulazione, modelli in grado di essere generati manualmente, nella fase iniziale, per poi essere aggiornati tramite un sistema intelligente che seleziona il modello ad hoc per il problema specifico. Stark et al (2017), riferendosi nello specifico ai sistemi di produzione, descrivono il DT come un collegamento tra il Digital Master e il Digital Shadow, ovvero un collegamento tra la rappresentazione del modello universale di simulazione del sistema fisico e l'insieme di tutti i dati operativi; tale collegamento è rappresentato ad esempio da algoritmi e modelli di simulazione. Kunath et al (2018) invece, riferendosi al caso specifico dei sistemi di manifattura, descrivono il Digital Twin come una rappresentazione orientata di dati di tutti gli elementi di un sistema produttivo, del flusso di materiale, del flusso di valore e delle risorse umane. Essa è connessa agli elementi fisici corrispondenti attraverso sensori, attuatori e sistemi di comunicazione, al fine di supportare il concetto di sistema cyber-fisico di produzione (CPPS).

Dall'insieme della vasta quantità di definizioni presenti in letteratura, si può risalire ad una definizione generalizzata, e consolidata, del Digital Twin: "il DT è una rappresentazione virtuale di un sistema fisico, del suo ambiente e dei suoi processi associati, in grado di essere aggiornato attraverso lo scambio di dati tra il sistema fisico e quello virtuale." Tale definizione, che si concentra solo sui tre elementi chiave di rappresentazione virtuale, sistema fisico e scambio di informazioni, ha infatti carattere del tutto generale e non fa riferimento ad alcuna caratteristica né terminologia specifica del DT. Spesso le caratterizzazioni specifiche sui gemelli digitali, riportate in molte delle definizioni presenti in letteratura, diventano infatti uniche per il caso d'uso descritto; generando quindi molta confusione intorno al concetto stesso del DT e a ciò che lo caratterizza, e non, effettivamente.

2.4.2 Caratteristiche del DT

Per caratterizzare ulteriormente il DT verranno commentate più nel dettaglio le componenti primarie costituenti, la realtà fisica, la controparte virtuale e le connessioni bidirezionali mostrate in Figura.

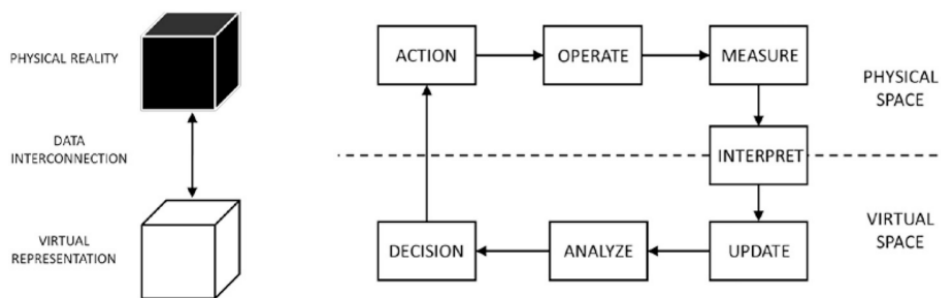


Figura 19 - I componenti del Digital Twin e i processi di alto livello (VanDerHorn & Mahadevan, 2021)

2.4.2.1 Realtà fisica

Parlando di realtà fisica, la letteratura offre una terminologia molto specifica utilizzando termini come “veicolo”, “prodotto”, “modello” e “artefatto”. In questo senso, dunque, realtà fisica è il termine più generale per rappresentare tutto ciò che fisicamente può essere modellato comprendendo sistemi conosciuti e sconosciuti. La Realtà fisica può essere scomposta in sistema fisico, ambiente fisico e processo fisico.

2.4.2.2 Sistema fisico

Per sistema fisico si intende un insieme di diversi elementi reciprocamente interconnessi e comunicanti tra loro e l’ambiente esterno, questa entità viene confinata dalla struttura stessa o dallo scopo di utilizzo. Infatti, il sistema può interessare un singolo componente, più componenti o un intero macchinario, o sistemi di macchinari. È bene notare come il concetto di sistema fisico si estende anche ad ambienti naturali o del corpo umano, dato che il DT ha trovato applicazione anche in settori come la sanità e l’agricoltura.

2.4.2.3 Ambiente fisico

Per ambiente fisico si intende lo spazio in cui è relegato il sistema fisico all’interno della realtà fisica, esso interagisce con il suo ambiente tramite i processi fisici. Quello che determina il confine tra sistema e ambiente fisico viene spesso definito dalla specifica applicazione del Digital Twin. Un esempio semplice può riferirsi al processo produttivo tramite Additive Manufacturing, si può considerare come sistema fisico la stampante 3D e come ambiente fisico quello di produzione influenzato da tutti i processi di lavorazione riguardanti temperatura, insufflaggio di aria e vibrazioni. Un caso più complesso può riguardare il DT di una stanza di un edificio che include nell’ambiente fisico sistemi di ventilazioni, locali adiacenti e fattori esterni legati ad erosione. Da questi esempi emerge che posso partecipare al

contributo dell'ambiente fisico tutti quegli elementi misurabili che possono influenzare il sistema fisico.

2.4.2.4 Processo fisico

I processi fisici sono il mezzo di comunicazione tra ambiente fisico e sistema fisico e sono tutti quei meccanismi che ne permettono il cambio stato al suo interno. Esempi di processi che impattano sullo stato del sistema fisico in ambito manifatturiero possono includere saldatura, sabbiatura, tornitura, ecc. Questa interazione viene rappresentata digitalmente nello spazio virtuale.

2.4.2.5 Rappresentazione virtuale

Con rappresentazione virtuale si intende una idealizzazione della realtà fisica all'interno dello spazio virtuale. Anche per la rappresentazione virtuale, così come per quella fisica, esistono una serie di termini specifici e simili tra loro (prodotto, mondo, modello, cyber, dispositivo e oggetto); con il termine "entità virtuale" ad esempio si fa spesso riferimento al caso generale mentre ci si riferisce a "gemello virtuale" quando l'entità virtuale stessa è gemellata.

Secondo Grieves, infatti, esistono più Entità Virtuali all'interno di un Gemello Digitale ognuna delle quali presenta uno scopo specifico come ad esempio la pianificazione, il monitoraggio della salute, ecc.; ciò che però la letteratura non chiarisce è il come tali entità riescano ad interagire e cooperare tra loro né come esse siano aggregate. Per chiarire tale concetto si consideri ad esempio il caso in cui l'entità virtuale di monitoraggio sanitario abbia un componente difettoso proprio nell'istante in cui l'entità virtuale di pianificazione sta ottimizzando il processo per rispettare una scadenza, quale entità diventa prioritaria? E soprattutto, sulla base di cosa viene presa questa scelta?

2.4.2.6 Rappresentazione della realtà fisica

Quando si vuole modellare la realtà fisica è richiesto uno sforzo e una capacità di astrazione e idealizzazione volte a plasmare strutture di dati e strutture matematiche o computazionali capaci rispettivamente di conservare una quantità di variabili necessarie alla descrizione del livello di astrazione desiderato, e capaci di descrivere l'interazione tra queste variabili. Grazie alla raccolta e alla interpretazione dei dati in tempo reale è possibile attribuire i valori alle variabili, riuscendo così a descrivere la realtà idealizzata; è quindi fondamentale che il livello di astrazione sia bene definito affinché questo impatti positivamente sul caso d'uso e affinché

i dati raccolti trovino coerenza con la rappresentazione della realtà fisica mostrandone una corretta evidenza. In Figura viene mostrato il processo di rappresentazione esposto da VanDerHorn & Mahadevan (2021) in cui a valle del processo di misurazione tramite sensori, vi è una fase di studio e interpretazione dei dati al fine di ottenere la rappresentazione idealizzata.



Figura 20 - Processo di astrazione dei dati (VanDerHorn & Mahadevan, 2021)

2.4.2.7 Stati e parametri del sistema

Lo stato si riferisce alla condizione corrente sia della realtà fisica che virtuale, esso viene caratterizzato attraverso i parametri che costituiscono le informazioni, i dati e i processi che lo descrivono. I parametri permettono al DT di riuscire a replicare lo stato del sistema fisico, questo consente, oltre alla sua rappresentazione, di effettuare previsioni sugli stati futuri grazie alla disamina degli stati passati. Il continuo monitoraggio degli stati, attraverso i loro parametri, consente una evoluzione nel tempo in funzione dei dati in input alla loro scambiabile influenza; alcuni parametri rimangono fissi nel tempo, altri cambiano continuamente. Come detto nei punti precedenti, la loro definizione è fortemente dipendente dal caso d'uso in esame e quindi dalla specifica astrazione rappresentante il DT; in quanto si parla di informazioni che coinvolgono il sistema, l'ambiente e i processi associati. È importante sottolineare che non tutti i parametri del sistema sono misurabili, questo è dovuto a limiti tecnologici o economici; ne consegue che queste limitazioni di informazioni impattano sul grado di scambio di informazioni tra realtà fisica e virtuale. In questi casi vengono utilizzate altre tecniche per stabilire dei valori "concreti", derivandoli, ad esempio, da analisi storiche, analisi statistiche, stime da osservazione o tramite elaborazioni computazionali. Questo processo di *scoping* è fondamentale per l'implementazione del DT.

2.4.2.8 Sistema virtuale

Il sistema virtuale è caratterizzato da dati e modelli scelti nella prima fase a seconda del livello di astrazione stabilito, esso può contenere vari modelli a livello di astrazione diversi che possono o non possono interagire tra loro. (VanDerHorn & Mahadevan, 2021)

2.4.2.9 Ambiente virtuale

Esattamente come per il sistema virtuale, l'ambiente virtuale è la rappresentazione, ad un certo livello di astrazione, dell'ambiente fisico; anche qui i parametri dell'ambiente fisico vengono misurati e inviati all'ambiente virtuale tramite sensori al fine "specchiare" la realtà.

2.4.2.10 Processi virtuali

I processi virtuali permettono al sistema virtuale di mostrare il suo comportamento in base al livello di astrazione scelto. Questi processi virtuali sono comunemente descritti da modelli computazionali che rappresentano il modello fisico tramite relazioni tra dati di input e output relativamente ai cambiamenti degli stati del sistema; sfruttano le tecnologie abilitanti come il Machine Learning per l'apprendimento automatico, *Artificial Intelligence* per simulare modelli di processi senza conoscerne il modello specifico oppure sfruttando modelli *data-driven*. Queste tecniche di simulazione sono fondamentali, perché permettono al Digital Twin di analizzare i casi d'uso su scenari futuri, piuttosto che su scenari in corso. Tutte queste tecniche che permettono al DT di "ipotizzare" il comportamento del sistema fisico in determinate condizioni, mettendo l'utente in condizione di poter decidere le azioni da intraprendere grazie alla comparazione dei risultati ottenuti con i risultati sperati (supporto al processo decisionale).

2.4.2.11 Connessione tra fisico e virtuale

L'ultimo componente è l'interconnessione tra la realtà fisica e la rappresentazione virtuale in cui dati/informazioni vengono scambiati in entrambe le direzioni: fisico-virtuale e virtuale-fisico (Jones et al., 2020). La connessione fisico-virtuale è il mezzo abilitante il processo per cui lo stato della realtà fisica viene duplicato nella realtà virtuale mediante i dati raccolti; quindi, c'è un continuo aggiornamento dei parametri fisici partendo dai parametri fisici. Generalmente il processo di collegamento fisico-virtuale si compone di tre fasi:

- Processo di raccolta dei dati: in questa fase sembra che le tecnologie rilevanti siano i sensori e l'Internet of Things (IoT), utilizzato anche durante la raccolta dati per la

misurazione di parametri reali. Tramite queste tecnologie è possibile effettuare una raccolta dati frequente e di qualità elevata. In aggiunta a questa raccolta dati “online”, viene menzionata anche una raccolta dati “offline” come l’ispezione visiva, registri di riparazione, ecc.

- Interpretazione dei dati: questa fase può comprendere l’elaborazione dei dati, pulizia e conversione
- Aggiornamento dei dati: in questa fase i dati corrispondono ad uno stato per rispecchiare il medesimo stato del sistema fisico. Per ottenere modelli e stati sconosciuti si cerca di identificare un problema ed incrociare i dati ricavati da fonti diverse.

Questa connessione fisico-virtuale con il DT si differenzia dagli altri metodo di simulazione simili, poiché l’analisi/intervento dell’analista avvengono durante la fase attiva di funzionamento (“online”), mentre per gli altri l’intervento dell’operatore avviene a ciclo di lavoro concluso.

2.4.2.12 Fusione e frequenza di scambio di informazioni

Combinando insieme di dati disponibili tra loro è possibile creare un insieme derivato di informazioni che riesce a ridurre la ridondanza e l’incertezza, per fare questo è necessario associare i dati, definire e fondere gli stati per prendere una decisione (Castanedo, 2013). Questa tecnica può essere utilizzata anche per ridurre la mole di dati disponibili e può essere anche applicata al processo di connessione virtuale-fisica per definire le analisi sulle azioni che coinvolgeranno il sistema fisico. Un altro fattore importante diventa la frequenza con cui i due sistemi si scambiano i dati in modo bidirezionale. Solitamente questo scambio è descritto come *Real time*, cioè un modello in cui gli scambi avvengono istantaneamente o quasi, ma questo non è sempre possibile o necessariamente essenziale; si tratta, infatti, di un modello ideale. Può tornare più utile una frequenza di scambio a intervalli regolari, o allo scattare di determinati eventi o ancora a frequenze diverse e regolabili come nell’esempio di un sistema fisico che ha bisogno di aggiornarsi ogni volta che deve compiere un’azione, come può essere il volo di un aereo. In conclusione, l’approccio alla frequenza di scambi è tipico del caso d’uso.

2.4.2.13 Connessione da virtuale a fisico

La connessione virtuale-fisica è il processo che consente il trasferimento di informazioni dalla rappresentazione virtuale alla realtà fisica. Questa connessione, che convoglia il flusso informativo come appena detto, chiude il ciclo del Digital Twin, e permette di realizzare quello che si è tentato di ipotizzare nella controporta virtuale; quello che avviene nell'atto pratico consiste in azioni volte ad avere un impatto sul sistema fisico con il conseguente cambio di stato e la conseguente nuova disponibilità di informazioni. Anche qui il processo avviene in due fasi distinte, per prima cosa tramite la rappresentazione virtuale si determina quale stato si vuole raggiungere e come bisogna raggiungerlo, successivamente si attuano le azioni necessarie. L'effetto ottenuto dalle due connessioni è un ciclo chiuso che può portare flusso continuo di adattamento e miglioramento, proprio questo ciclo lo differenzia da modelli tradizionali

2.4.2.14 Fedeltà

La fedeltà del DT si riferisce al numero di parametri, alla loro accuratezza e al livello di astrazione per il quale questi descrivono il sistema fisico. Nonostante si ipotizzi che a un grado più alto di fedeltà corrisponda un allineamento migliore tra realtà fisica e controparte virtuale, questo potrebbe non essere vero nel caso in cui fosse il sistema fisico a raccogliere i dati in modo non appropriato al livello di astrazione. Inoltre un modo ad alta fedeltà presuppone anche altri problemi, quali la gestione della memorizzazione dei dati, potenza di elaborazione e tempi di risposta; non è ancora chiaro se sia possibile stabilire oggettivamente la fedeltà come una caratteristica del DT in nel senso più generale, o se questa caratteristica sia fortemente dipendente dai casi d'uso.

2.4.2.15 Tasso di gemellaggio

Il gemellaggio è un concetto molto legato alla fedeltà, in quanto descrive quanto gli stati fisici e virtuali siano "uguali" tra loro, ovvero l'uguaglianza tra parametri fisici e virtuali. Per tasso di gemellaggio si intende la frequenza con cui avviene il gemellaggio, cioè tutte le volte che il ciclo si ripete tra realtà fisica e controparte virtuale; questo adattamento al gemellaggio da parte del sistema fisico avviene in tempo reale permettendo ai due sistemi di lavorare in modo simultaneo allo stesso modo.

2.4.3 Digital Twin e tecnologie simili

Questa sezione confronterà il DT con tecnologie simili al fine evitare difficoltà nel riconoscere ciò che è un DT e ciò che non lo è, confusione dovuta anche alla mancanza di una definizione ufficiale condivisa dalla comunità scientifica; in particolare verranno analizzati tre modelli comunemente associati al DT.

2.4.3.1 Digital Twin e Digital Model

Il DT è spesso accostato a modelli digitali ingegneristici più tradizionali come la progettazione assistita *Computer Aided Design (CAD)*, *Computer Aided Engineering (CAE)* e la gestione del prodotto *Product Lifecycle Management (PLM)*; la difficoltà nella distinzione tra questi strumenti/modelli con il DT deriva dal fatto che questi sono spesso incorporati o utilizzati dal DT stesso. La discriminante risiede nel fatto che il DT rappresenta una singola istanza del sistema fisico che comunica con la controparte virtuale, in questi modelli manca la comunicazione e in alcuni casi anche l'oggetto reale; il DT è una trasposizione della realtà (VanDerHorn & Mahadevan, 2021).

2.4.3.2 Digital Twin e Simulation Model

I modelli di simulazione sono processi attraverso il quale si effettuano previsioni e stime circa le prestazioni di un modello reale. Questi modelli sono spesso usati in fase di progettazione per capire come il sistema reagirà in certe condizioni, creando confusione di interpretazione con quello che è il DT. La principale differenza è che il DT basa le sue simulazioni anche su stati passati e attuali ricercando quella specifica istanza del sistema durante il funzionamento, mentre il modello di simulazione basa i suoi processi su ipotesi iniziali ben predefinite. Anche in questo caso le due tecnologie vengono usate simultaneamente, creando ulteriore confusione. Spesso i modelli computazionali usati per desumere lo stato corrente del DT sono gli stessi usati per simulare gli stati futuri grazie al vantaggio di poter utilizzare i parametri aggiornati circa il comportamento dell'istanza specifica del DT, fornendo ulteriori informazioni come guida per il processo decisionale (VanDerHorn & Mahadevan, 2021).

2.4.3.3 Digital Twin e Surrugate Model

La modellazione surrogata consiste in un metodo ingegneristico che utilizza modelli computazionali più economici per imitare modelli più costosi, questo può comportare una confusione con un modello più complesso e sicuramente più costoso come il DT. Sia il modello

surrogato che il DT utilizzano approcci basati sui dati (input e output) dal modello originale per imitarne il comportamento, nonostante ciò, un modello surrogato non è un DT, in quanto non mantiene una rappresentazione virtuale degli stati di un'istanza di un sistema fisico. Anche in questo caso il modello surrogato può essere usato in accoppiamento a un DT al fine di migliorare la sua funzionalità, per esempio per migliorare i tempi di risposta quando sono richiesti approfondimenti in intervalli di tempo ristretti (VanDerHorn & Mahadevan, 2021).

2.4.3.4 Qualificatori DT

Possiamo racchiudere in due punti i qualificatori che fanno di una tecnologia un DT o meno:

1. La rappresentazione virtuale rappresenta una singola istanza di un sistema fisico;
2. I dati e le informazioni provenienti dal sistema fisico sono utilizzati per aggiornare gli stati della rappresentazione virtuale nel tempo (VanDerHorn & Mahadevan, 2021).

2.5 Implementazione del DT

Come già discusso in precedenza, il Digital Twin risponde perfettamente ai requisiti richiesti dalla trasformazione digitale, la quale si avvale delle più innovative tecnologie per essere il riferimento chiave dell'Industry 4.0 (Schumann et al., 2017). In questa sezione si analizzeranno gli elementi che costituiscono l'implementazione del DT tenendo conto delle definizioni e delle caratteristiche elencate precedentemente. Implementare il DT richiede alcuni passaggi imprescindibili che prescindono dal caso d'uso, quali identificazione degli obiettivi e dei risultati da raggiungere, analizzare lo scopo del DT determinando sistema fisico e relativo livello di astrazione, creare la rappresentazione virtuale e necessarie interconnessioni di dati (VanDerHorn & Mahadevan, 2021). Attualmente le principali soluzioni di implementazioni riguardano:

- Componenti di prodotto: si tratta di aziende che offrono al mercato parte dei loro prodotti per combinarli e customizzare l'offerta lasciando all'utente la libertà di implementazione, e.g. Microsoft (Stackowiak, 2019). Questa soluzione permette alle aziende di potersi rivolgere a diversi partner implementando soluzione che soddisfano le funzionalità che solo un fornitore non potrebbe coprire.
- Commerciali standard: sono le soluzioni utilizzate principalmente nelle industrie, dove l'utilizzo del DT *off-the-shelf* richiede apparecchiature originali (OEM), come GE (Power Digital Solutions, 2016).

- Custom hybrid: in questa categoria il prodotto è totalmente personalizzato sfruttando anche la combinazione di prodotti, anche se in questo caso è difficile definire la portata di questo approccio, in quanto molto dipendente dall'organizzazione, dalla disponibilità economica e dal caso d'uso specifico (VanDerHorn & Mahadevan, 2021).

2.5.1 Identificazione degli obiettivi del Digital Twin

Il DT deve permettere l'utente di raggiungere un risultato, è quindi importante che questo venga identificato preventivamente in modo tale da limitare l'ambito di applicazione del DT stesso. Non essere a conoscenza dell'obiettivo da perseguire può portare a una perdita di tempo e di denaro, per questo è necessario che esistano obiettivi mirati che possano essere misurabili e quantificabili, definendo una proposta di valore che permetta al DT di svolgere il proprio ruolo apportando i suoi benefici. Questi ultimi possono essere di ampia portata a seconda del settore di applicazione, quelle che comunemente vengono associati ai DT sono benefici in termini di costi e rischi, efficienza, sicurezza, affidabilità, resilienza e supporto al processo decisionale.

2.5.2 Scopo del Digital Twin

Lo scopo del DT deve essere quello di garantire il raggiungimento degli obiettivi previsti in fase di progettazione, senza aggiungere fattori di complessità o costi aggiuntivi che possano compromettere la sua fattibilità. Identificato il campo di applicazione e i risultati previsti, verrà determinata la logica attraverso la quale identificare il livello corretto astrazione in relazione al sistema fisico selezionato. Bisogna quindi demarcare il giusto confine tra sistema e ambiente fisico per delimitare la realtà fisica al fine di garantire il livello corretto di dettaglio senza appesantire il modello; a questo punto bisogna definire il livello di astrazione raccogliendo i dati relativi agli stati fisici del sistema che dovranno poi essere modellati e riprodotti nella controparte virtuale. Tornando al concetto precedente secondo cui il modello non deve essere appesantito in complessità, anche il livello di astrazione deve rispettare questo principio, poiché questa caratteristica determinerà i modelli computazionali più o meno complessi da utilizzare; quindi, la selezione del livello di astrazione deve mirare al raggiungimento degli obiettivi prestabiliti. Nel caso in cui modello debba supportare modelli a diversi livelli di astrazione occorre tener conto dei diversi parametri preoccupandosi che gli stati fisici condivisi tra i diversi modelli di astrazione rimangano coerenti (VanDerHorn & Mahadevan, 2021).

2.5.3 Rappresentazione virtuale del Digital Twin

Il primo passo per la creazione di una rappresentazione virtuale del DT passa dalla creazione di modelli di dati che possano storicizzare gli stati di interesse, per esempio attraverso tecnologie come il Cloud Computing che può offrire vantaggi in termini di capacità di archiviazione, accessibilità, elaborazione e trasferimento (Hu et al., 2018). Nei casi di maggiore sicurezza è possibile scegliere soluzioni di archiviazione locale; non è esclusa una soluzione combinata o anche soluzioni con strumenti di visualizzazione per estrarre informazioni dai dati utili al processo decisionale come i metodi statistici.

Il passo successivo è l'implementazione dei modelli computazionali, i quali vengono applicati per due motivi:

- Problema inverso: grazie alla ricerca e alla fusione dei dati circa il sistema in questione vengono stimati gli stati e i parametri del DT tramite l'osservazione dei dati;
- Problema diretto: applicare i processi virtuali al sistema virtuale in modo da simulare le risposte del sistema in termini di stati e processi relativamente al sistema fisico.

Questa fase è fondamentale perché è la discriminante che, attraverso queste simulazioni sul mondo virtuale, deciderà se trasferire tali azioni allo spazio fisico per provare i cambiamenti di stato per ricavarne i risultati; per questo è importante avere una buona base di dati a disposizione, un modello di dati, un modello di visualizzazione a supporto dell'utente per una adeguata comprensione e una buona interconnessione tra loro. Non va dimenticato che uno strumento di visualizzazione dei dati permette di dimostrare il valore del DT all'interno dell'organizzazione.

2.5.4 Interconnessioni di dati del Digital Twin

Implementare le interconnessioni di dati del DT comporta la scelta di modalità di raccolta dei dati, la frequenza di raccolta e le modalità di scambio tra gli spazi.

- Raccolta dati: prevede la raccolta dati sia online che offline tramite varie tecniche. Può avvenire tramite sensori e attuatori, ispezioni, NDE, registri di manutenzione, video, pareri di esperti in materia. Durante questa fase di ricerca sarebbe ottimale reindirizzare la metodologia alle successive fasi di elaborazione e fusione degli stessi.
- Frequenza di raccolta dati: questa fase è nota anche come frequenza di aggiornamento del DT. Questa frequenza dipende dall'intervallo di decisione, cioè la scala temporale

secondo cui deve essere intrapresa una decisione; questo tempo può variare dai secondi o minuti nel caso di decisione operative che necessitano di risposte più celeri, o ai mesi e agli anni delle decisioni più complesse di gestione dell'integrità dell'intera attività. Inoltre, questa fase è strettamente collegata alla successiva.

- Frequenza di scambi dati: in genere non è detto che la frequenza di raccolta dati coincida con la frequenza di scambio di dati. Questa frequenza può essere dipendente anche dalla tecnologia in uso per la connessione virtuale-fisica; infatti, devono tenersi in conto lo scambio di dati tramite DT per controllare gli attuatori che agiscono sul sistema fisico, i processi richiesti per lo scambio tra fisico-virtuale.

2.6 Il nuovo paradigma del Digital Twin

Nei paragrafi precedenti si è cercato di valorizzare la tecnologia del DT, che negli ultimi anni ha causato molto interesse nella comunità scientifica e ha spinto la ricerca verso un sforzo consistente, quello che soprattutto si è cercato di mostrare è che il DT non è un mero strumento tecnologico di simulazione, ma il salto del nuovo paradigma che integra le nuove tecnologie abilitanti dell'Industry 4.0, rispondendo alle sue moderne esigenze dettate dal mercato. Il passaggio cruciale consiste nella capacità del DT di sovrastare la simulazione tradizionale, a favore di una tecnologia capace di validare soluzioni di ottimizzazione del ciclo di vita del prodotto (Ciavotta et al., 2018).

2.6.1 Approccio Now-What come supporto decisionale

Gli strumenti di simulazione tradizionale supportano il processo decisionale attraverso scenari di tipo *What-if*, questa metodologia permette di simulare gli effetti di una decisione in fase di progettazione senza il bisogno di effettuare una valutazione operativa sul campo, ma sfrutta una performance teorica. Attraverso l'implementazione del DT, e quindi dell'insieme delle nuove tecnologie, quali i CPS, è possibile passare da uno scenario di tipo *What-If* a uno di tipo *Now-What* grazie alla fruibilità immediata dei dati; questo è reso possibile dalla comparazione dei dati raccolti e valutati durante la fase operativa con i dati ricavati dalle simulazioni.

In figura è mostrato un modello di DT di un sistema manifatturiero di supporto al processo decisionale (Figura 22):

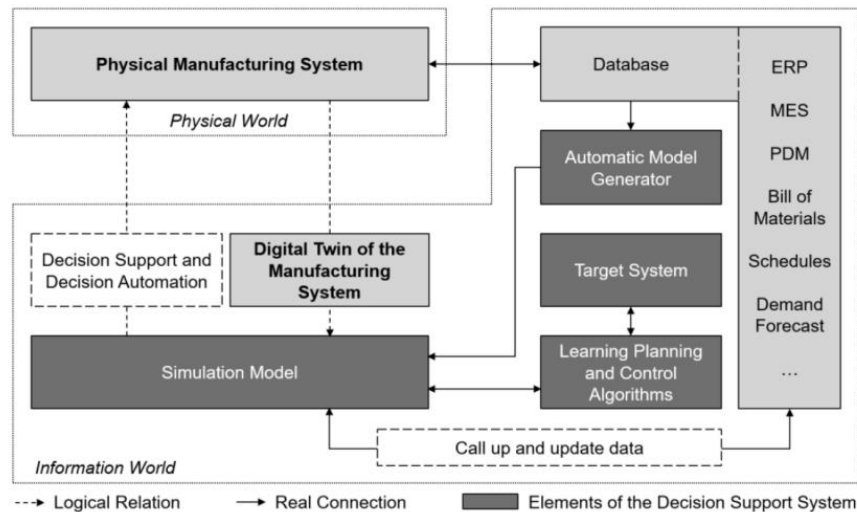


Figura 21 - Integrazione del Digital Twin all'interno di un sistema di supporto alle decisioni (Kunath & Winkler, 2018)

In questo modello la realtà fisica è connessa alla controparte virtuale e alle tecnologie informative che immagazzinano i dati nei database. Un generatore automatico crea costantemente nuovi modelli di simulazione utilizzando i dati immagazzinati, durante i processi simulativi un algoritmi ricerca la soluzione migliore per il problema che poi viene a sua volta sottoposta al decisore (Kunath & Winkler, 2018).

2.6.2 Modularità del Digital Twin

Un'altra caratteristica importante del DT è la sua modularità, ovvero la capacità di creare la controparte virtuale di più moduli, corrispondenti ai rispettivi sistemi fisici, di una stessa linea di produzione, come ad esempio i macchinari dei work center. Oppure questa caratteristica potrebbe essere legata all'integrazione con la tecnologia *Blockchain* (BC), in cui la struttura in linea di principio è simile a quella sopraccitata; infatti, si tratta di più moduli collegati tra loro che formano una catena. Una possibile integrazione tra queste tecnologia permettere molte applicazioni riguardanti questioni di sicurezza dei dati all'interno delle fabbriche, come ad esempio gli *Smart Contract* (i-Scoop, 2022).

2.6.3 Come il Digital Twin impatta i Business Model

Il DT impatta fortemente sui modelli di business, partendo dalla *Value Proposition*, passando dalla *Value Creation*, fino alla *Value Capture*. Infatti, il DT è caratterizzato dall'offerta di un prodotto più una serie di servizi collegati che creano un valore aggiunto per gli utenti (*Product as a Service*); tutta la gestione dei dati, dalla raccolta all'utilizzo che possono portare a nuovi modelli di business crea il valore, grazie alla interoperabilità del DT si crea valore lungo tutta

la catena del valore aumentando l'efficienza; in fine si riesce a catturare valore anche post vendita grazie a IoT sfruttando la raccolta dati sullo sviluppo di nuovi prodotti, con la possibilità di sviluppare approcci *As a Service* concentrandosi sull'utilizzo dei dati. Secondo la *General Electric* (2020) il DT permette di:

- Ottimizzazione degli asset: grazie al monitoraggio in tempo reale degli asset riesce ad applicare azione correttive senza l'intervento dell'operatore ottimizzando le performance e allungando la vita residua degli stessi;
- Manutenzione predittiva: permette una riduzione dei costi al cliente e al fornitore evitando rispettivamente fermi macchina indesiderati e la possibilità di fare economie di scala svolgendo il servizio manutentivo in remoto;
- Assicurazione degli asset: il DT potrebbe essere proposto dalle compagnia assicurative garantendo il monitoraggio e manutenzione degli asset grazie alla fruibilità dei dati in tempo reale.

Capitolo 3: Applicazioni del DT

3.1 Digital Twin in product lifecycle

L'applicazione del DT può avvenire lungo tutto il *Product Lifecycle* (PLC); le tre fasi principali che compongono il PLC sono: la fase di progettazione, la fase di produzione e la fase di servizio (la fase di ritiro non contiene informazioni sufficienti) (Liu et al., 2021).

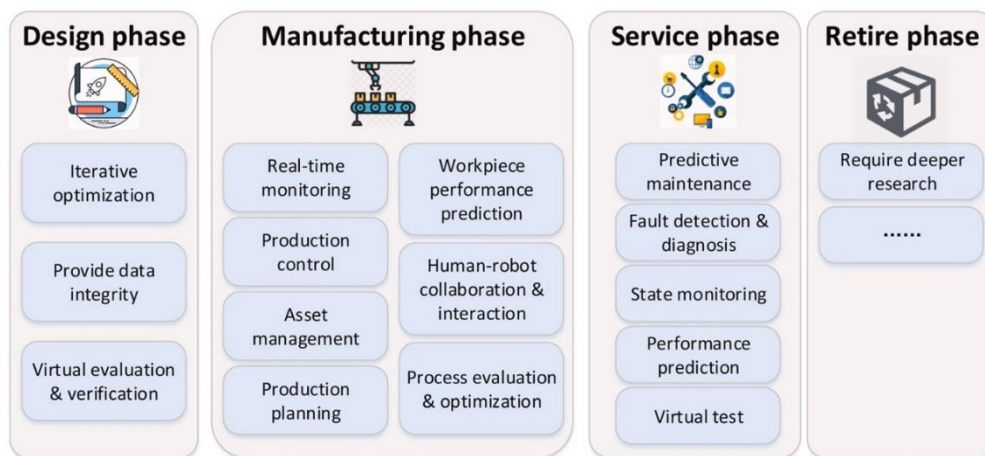


Figura 22 - Applicazioni del DT nelle diverse fasi del PLC (Liu et al., 2021)

3.1.1 Digital Twin in Design Stage

La prima fase è quella di Design, in cui il prodotto viene progettato in tutte sue parti e componenti. Il DT consente la realizzazione di un processo di ottimizzazione iterativo tramite una configurazione statistica e dinamica (Liu et al., 2019) e la scelta dei materiali migliori per la produzione (Xiang et al., 2019). Inoltre, esso garantisce un'ampia acquisizione di dati dallo spazio fisico per consentire lo sviluppo di processi totalmente digitali che però devono, a loro volta, avere dietro una strategia di sicurezza informatica (Lutters, 2018). Successivamente questa idea deve essere validata, si può pensare ad esempio a dei test effettuati su un prototipo a seguito di un lavoro di design da parte di un progettista; tutto questo processo richiede un grande dispendio di denaro. Il vantaggio del DT consiste nel poter valutare preventivamente le prestazioni del prodotto in fase di progettazione, abbattendo costi e tempi di valutazione grazie alla possibilità di effettuare i relativi test in ambiente virtuale, è quindi possibile prevedere errori di sistema, simulare l'impatto di eventuali nuovi macchinari.

È stato detto più volte come il ruolo del DT assolve alla funzione di supporto al processo decisionale; in questa fase diventa fondamentale la raccolta dei dati derivante da test e simulazioni, che permettono sia la correzione che il miglioramento del prodotto finale. Un esempio interessante di integrazione di DT con una *Smart Manufacturing System* (SMS) è stato proposto da Leng et al. (2021); nello specifico essa permette di analizzare le performance tramite una struttura innovativa chiamata *Function-Structure-Behavior-Control-Intelligence-Performance* (FSBCIP) utilizzando IoT,VR/AR un modello a 5D-DT.

3.1.2 Digital Twin in Production Stage

La fase successiva a quella di progettazione è quella di produzione, in cui prendono forma tutte le scelte fatte nella fase precedente e le materie prime vengono trasformate in prodotti finiti (Esmailian et al., 2016). Questa fase è la più importante a livello economico per un'industria poiché è quella che ne determina in maniera prevalente i profitti; essa richiede inoltre una grande organizzazione e una modellazione di processi molto accurata capace di determinare l'efficienza e la corretta distribuzione delle risorse materiali e umane. Come discusso nel precedente capitolo, il DT in questa fase risulta molto utile in quanto consente il monitoraggio della linea produttiva grazie all'analisi dell'enorme quantità di dati che riceve e permette il miglioramento della linea produttiva in tempo reale con aggiustamenti *real-time*; il grande vantaggio risiede nella possibilità di far coesistere il DT e la produzione senza che uno interferisca con l'altro e cioè senza interrompere la produzione. Questo processo richiede una interazione costante tra spazio virtuali e fisico all'interno di un ciclo chiuso in cui il DT permette la comunicazione tra i due ambienti. Grazie alla sua capacità di comunicare con gli elementi circostanti e grazie alla capacità di prendere decisioni "intelligenti", il DT può essere considerato quindi come elemento "*context-aware*", ovvero un elemento descritto dalla capacità precedenti (Liu et al., 2021).

Un esempio applicativo che sfrutta il DT per l'ottimizzazione di una linea produttiva è presentato da Jeon et al. (2020) in un'analisi del caso studio Siemens, la quale utilizza il software Siemens *Tecnomatix Plant Simulation* (ambiente virtuale), collegato all'ambiente reale tramite un PLC2 programmato con Siemens SIMATIC TIA Portal; Tao & Zhang (2017) hanno approfondito il concetto di Digital Twin shop-floor (DTS) che verrà descritto nei successivi paragrafi.

Si riportano di seguito alcune applicazioni del DT all'interno della fase di produzione:

1. **Real time monitoring:** generalmente si intende il monitoraggio del processo di produzione nelle fabbriche.

Nel caso del gemello digitale invece, questo meccanismo avviene in tempo reale e in modo diverso e migliore. Questo perché, in primo luogo, il gemello digitale è in grado di integrare visivamente tutti i dati necessari con i modelli 3D e, in secondo luogo, perché il gemello digitale unisce dati storici, dati real-time e dati previsti per tracciare il passato, monitorare il presente e prevedere anche il futuro;

2. **Production control:** si riferisce al fatto che i sistemi di produzione devono eseguire operazioni pianificate e reagire continuamente alle difficoltà emergenti; tale sistema di produzione è solitamente controllato da un sistema centrale, chiamato *Manufacturing Execution System* (MES), il quale si basa su ipotesi statiche (Rosen et al., 2015). In questo contesto il DT è in grado di collegare il sistema fisico con il suo equivalente virtuale e di eseguire un controllo intelligente in tempo reale attraverso una prospettiva olistica(Liu et al., 2021);

3. **Workpiece performance prediction:** nella fase di produzione, gli ostacoli sono da intendere sia esterni che interni alla fabbrica, si può trattare delle degradazioni delle macchine o più comunemente di variazioni di materie prime (Liu et al., 2021).

In questo caso il compito del DT non è semplice, in quanto esso dovrebbe essere in grado di prevedere le performance dei pezzi prima della produzione identificando complesse regole di fenomeni di produzione quali rugosità superficiale e assemblaggi di prodotti complessi (Liu et al., 2021);

4. **Human robot collaboration & interaction:** fa riferimento al fatto che il DT, all'interno della collaborazione uomo macchine, riesce a supportare l'allocazione delle risorse e delle attività ottimizzando i layout delle workstation, effettuando analisi ergonomiche e analizzando i programmi dei robot (Liu et al., 2021);

5. **Process evaluation & optimization:** La crescente complessità della produzione rende difficile la pianificazione dei processi in modo tradizionale; i planner, infatti, non sono in grado di valutare le condizioni di elaborazione effettive perché possono verificarsi cambiamenti dinamici nel processo di lavorazione dovuti all'elevato grado di incertezza. Il DT grazie all'acquisizione in tempo reale dei dati e alla contestuale

elaborazione, integra questi dati con i modelli associati, interagendo con altri sistemi e ottimizzando i parametri di produzione (Liu et al., 2021);

6. **Asset management:** il DT riesce a tenere traccia degli asset aziendali, riveste quindi un importante ruolo nella fase di controllo, ottimizzazione e pianificazione delle decisioni CIT; nello specifico il DT consente lo svolgimento di un lavoro interattivo con tutte le altre risorse di produzione;
7. **Production planning:** come già accennato in precedenza, i crescenti problemi nella fase di produzione richiedono una pianificazione dinamica e intelligente della produzione stessa, per questo il gemello digitale necessita di un piano di produzione ottimizzato a livello globale in base al cambiamento di stato in tempo reale (Liu et al., 2021).

È importante precisare che il DT può essere applicato anche in fase di preproduzione; Söderberg et al. (2017) hanno infatti mostrato come il DT può essere utilizzato in queste fasi per le ispezioni geometriche tramite macchine di misura a coordinate (CMM) e scanner con programmazione *off-line* (OPL).

3.1.3 Digital Twin in Service Stage

In questa fase vengono svolte tutte quelle attività di manutenzione e monitoraggio volte a consentire il funzionamento del prodotto dopo la sua messa in attività e al successivo smaltimento dello stesso. In questo caso il DT, grazie alle citate caratteristiche e grazie alla sua integrazione con il processo di *Prognostics and Health Management* (PHM), ovvero il processo che si occupa della diagnosi e della prognosi del prodotto, permette l'analisi del prodotto e simula scenari di guasto permettendone la prevenzione. Lo scambio di dati con PHM consente il supporto necessario al processo decisionale e al relativo aumento di efficienza.

Si riportano di seguito alcune delle applicazioni del DT nella fase di servizio:

1. **Predictive maintenance:** in fase di progettazione, solitamente, viene già definito ciò che è pericoloso per i prodotti indipendentemente dal metodo di fabbricazione o dal modo di utilizzo (Liu et al., 2021); nello specifico vengono programmate delle sessioni di manutenzione che fanno lievitare il costo del prodotto e ne limitano le prestazioni in via cautelare. Il *Digital Twin* integra quindi un modello multidisciplinare (geometrico, meccanico, materiale, elettrico, ecc.) per calcolare

con precisione la risposta dell'analogo modello fisico al suo ambiente; questo spiega il perché ha trovato molto successo in letteratura in ambito di manutenzione preventiva;

2. **Fault detection & diagnosis:** una diagnosi dei guasti basata solo sui dati può avere successo per anomalie già conosciute, ma può fallire per le anomalie imprevedute; il DT può sfruttare tecnologie come il deep transfer learning (Xu et al., 2019) e la rete Bayesiana dinamica (Li et al., 2017) per modellare il comportamento fisico del prodotto e integrare i dati insufficienti (Liu et al., 2021);
3. **State monitoring:** fa riferimento al fatto che il Digital Twin può interpretare i dati raccolti da altre prospettive, riesce ad effettuare un continuo confronto tra i dati reali (raccolti) e i dati simulati (virtuali) per monitorare lo scostamento tra i due modelli e ad effettuare l'aggiornamento degli stati del sistema. Questo può aiutare a determinare le varie modalità di guasto. Inoltre, il DT permette il monitoraggio degli stati del sistema da remoto attraverso un identificatore (Liu et al., 2021);
4. **Performance prediction:** la progettazione iniziale potrebbe non essere soddisfacente a valle dei cambiamenti in fase di servizio; in questo caso il DT, conoscendo ogni aspetto del prodotto fisico nel suo ambiente, è uno strumento di supporto per l'ottimizzazione e la predizione delle prestazioni (Liu et al., 2021);
5. **Virtual test:** il DT permette simulazioni e verifiche più realistiche e precise senza impattare sui sistemi fisici (Liu et al., 2021).

3.1.4 Applicazioni in Retire Stage

La fase di dismissione viene spesso ignorata, causando però una perdita di dati. Il DT potrebbe consentire di mantenere i dati della fase di dismissione nello spazio virtuale sfruttando le generazioni di prodotti precedenti. (Wang & Wang, 2019) hanno proposto un nuovo sistema basato sul DT per la riparazione dei WEEEEE (*Waste Electrical and Electronic Equipment*) a supporto delle operazioni di produzione lungo PLC, compreso il riciclaggio finale.

3.2 Applicazioni DT in ambito Manufacturing

Questo paragrafo si concentrerà sulle principali applicazioni del DT in uso, o in corso d'opera. Si tratta quindi di un'analisi di casi studio presenti in letteratura e casi reali adottati da aziende che hanno l'obiettivo di mostrare lo stato dell'arte cercando di mantenere un focus

sull'industria manifatturiera e in ambito qualità. Si è ritenuto opportuno approfondire il funzionamento e il grado di integrazione tra tutti gli strumenti che permettono l'automazione nelle Industry al fine di consentire al lettore di avere un quadro più chiaro di come il DT si interfaccia con questi applicativi.

3.2.1 La piramide dell'automazione

Le basi di ogni processo industriale possono essere rappresentate da una struttura centralizzata definita Piramide dell'Automazione costituita da una struttura a cinque strati (Cimino et al., 2019).

Nell'immagine riportata di seguito (ISO/IEC, 2012), a sinistra è possibile osservare la piramide dell'automazione con le relative funzioni del *Manufacturing Execution System* (MES), elencate dalla *Manufacturing Execution System Association* (MESA INTERNATIONAL, 1997) a destra è invece riportato il corrispondente livello di gestione della produzione (Govindaraju & Putra, 2016):

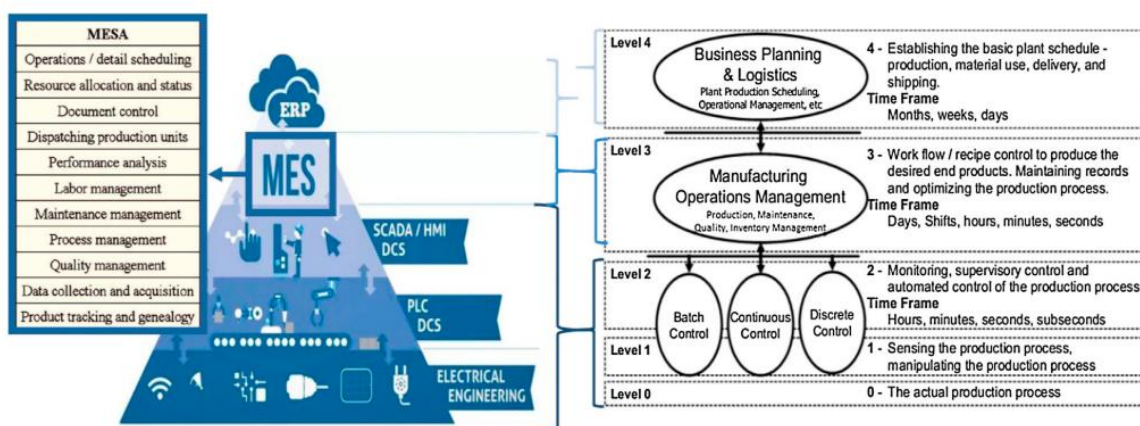


Figura 23 - La piramide dell'automazione con il corrispondente livello di gestione della produzione (Cimino et al., 2019)

Nello specifico è possibile individuare i seguenti livelli:

- Livello 0, livello 1 e livello 2, definiti come livelli di controllo, tra cui: livello di ingegneria elettrica, *Programmable Logic Controller* (PLC) / *Distributed Control Systems* (DCS) e livelli Scada/HMI;
- Livello 3, o intermedio, rappresentante il *Manufacturing Execution System* (MES) che guida il processo;

- Livello 4 rappresentante l'*Enterprise Resource Planning* (ERP) finalizzato all'integrazione di funzioni organizzative per una migliore assistenza clienti e pianificazione (Zuehlke, 2010).

In questa struttura, il MES guida il processo produttivo, monitorando tutte le fasi di un prodotto in modo centralizzato. Tutte le funzioni MES non sono però sullo stesso livello, come suggerito da (Saenz de Ugarte et al., 2009), ma una volta identificate dal MES le funzioni, alcune di esse vengono direttamente collegate al processo di produzione (come la pianificazione e il controllo di qualità), mentre altre (come la gestione delle risorse e la tracciabilità) rappresentano funzioni trasversali che non vengono strettamente legate al processo di produzione (Cimino et al., 2019).

3.2.2 Digital Twin Shop-Floor

Il *Digital Twin Shop-floor* (DTS) è l'applicazione di tale paradigma ad una linea produttiva in ambito manufacturing. Il processo tradizionale di produzione è costituito da numerosi passaggi. Prima di tutto, vi è una fase di pianificazione della produzione durante la quale viene stilato un piano di produzione basato su dati storici; una volta che il piano viene approvato vi è la fase di produzione vera e propria. Durante questa fase avviene un monitoraggio continuo da parte delle figure preposte affinché il piano schedulato venga rispettato il più possibile; nel caso in cui la produzione subisca disallineamenti con il piano questo viene modificato e riadattato (Tao & Zhang, 2017b).

Nella fase finale della produzione, vengono effettuati i controlli qualitativi e vengono valutate le performance; tramite queste operazioni vengono poi generati una serie di documenti che sono archiviati sotto forma di file. Nella produzione tradizionale si ha quindi che, lo spazio virtuale è limitato e tende a sovrapporsi a quello fisico; l'attenzione è posta sul raccogliere i dati e collezionarli. Una *Smart Factory* ha la possibilità di abilitare il DT all'interno di uno *shop-floor* e di efficientare la produzione garantendo che le risorse fisiche possano comunicare tra loro, controllare ed elaborare i dati (Knapp et al., 2017).

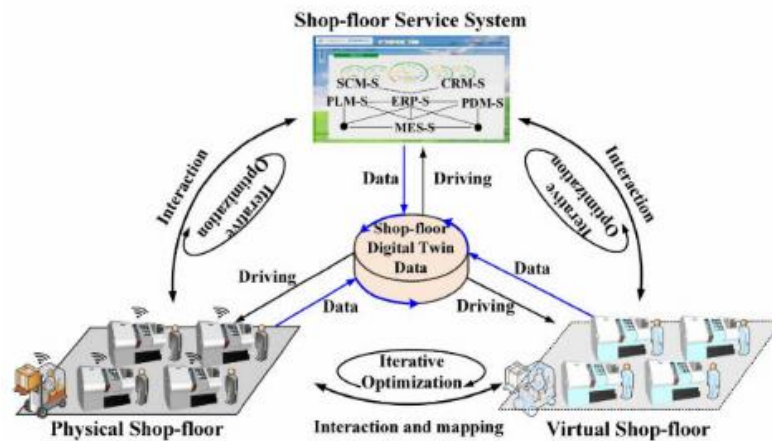


Figura 24 - Modello concettuale di un Digital Twin shop-floor (Tao et al., 2019)

Come rappresentato in figura, il modello concettuale di un DTS (*Digital Twin Shop-Floor*) è costituito da una parte centrale (database) che ha l'obiettivo di accentrare e direzionare le informazioni. In particolare, dovendo la replica digitale mantenersi costantemente aggiornata, avviene un'interazione continua tra il *Physical Shop-floor* e il *Virtual Shop-floor*; tali dati vengono poi inviati al database centrale il quale, a sua volta, scambia le informazioni con lo Shop-Floor Service System dove sono presenti tutti i sistemi informativi aziendali per il controllo, gestione e programmazione della produzione e supply chain. Infine, l'informazione viene inviata nuovamente al livello fisico sotto forma di comandi. In questo modo il modello concettuale permette la sincronizzazione, la consistenza e l'interoperabilità dei dati (Knapp et al., 2017).

3.2.3 Digital Twin for Additive Manufacturing

La necessità di ottimizzare il processo di produzione di *Additive Manufacturing* (AM) di tipo *laser-assisted* ha portato alla nascita del DTAM, ovvero del *Digital Twin for Additive Manufacturing*.

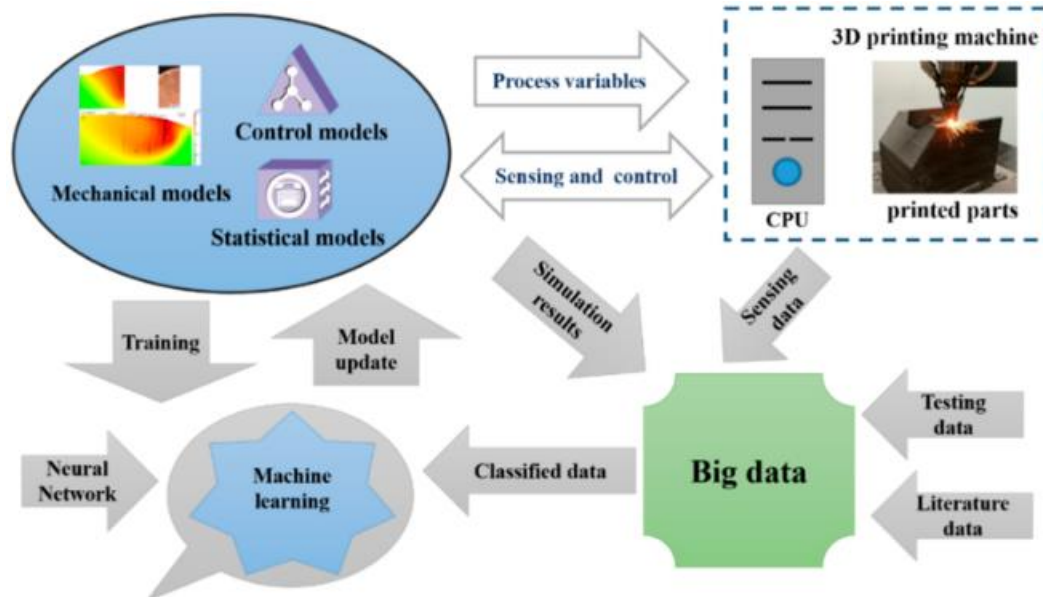


Figura 25 - Rappresentazione logica del DT for AM (Zhang et al., 2020)

L'idea su cui si basa il DTAM è quella di prevedere tutte le variabili principali in grado di condizionare sia la struttura che le proprietà metallurgiche di tutti i suoi componenti. La qualità del prodotto finito e dell'intero processo manifatturiero è infatti fortemente influenzato dalla geometria, dalla microstruttura e dai difetti; ognuna di queste caratteristiche, a sua volta, è influenzata da una vasta gamma di variabili di processo e peculiarità del metallo che non sempre risultano facilmente individuabili e che spesso vengono identificate durante la produzione. Tuttavia, tra le variabili ve ne sono alcune non correlate che, se selezionate in modo ottimale, possono determinare e garantire un processo produttivo efficiente; proprio questa selezione ottimale ed efficiente rappresenta la principale potenzialità del DTAM nella fase produttiva (Tao et al., 2018).

3.2.4 Digital Twin for Product Design

Il *Digital Twin for Product Design* (DTPD) è un'applicazione che permette di creare un prodotto basandosi sulle analisi dei Big Data. Una difficoltà importante consiste nel saper sfruttare tali dati considerato che sono numerosi e spesso non strutturati; bisogna inoltre essere in grado di leggere le informazioni nascoste dietro l'incrocio di dati provenienti da fonti diverse. La forza di questa applicazione, rispetto ai metodi classici quali *Quality Function Deployment* (QFD), *Analytic Hierarchy Process* (AHP), *Failure Mode and Effects Analysis* (FMEA), *TRIZ* e *Modello di Kano*, consiste nella minor dipendenza dall'esperienza umana; è importante dire che questo non significa però una totale indipendenza infatti le figure del data scientist sono

comunque necessarie al fine di creare i giusti pattern all'interno Big Data generando prodotti custom per i clienti (Tao et al., 2018). Il DTPD necessita di tre componenti per la sua implementazione: il sistema fisico nell'ambiente fisico, il sistema virtuale nell'ambiente virtuale e il collegamento tra i due mondi. Oltre alla geometria del modello, alle regole e alle proprietà dei materiali, Il modello virtuale include le regole di monitoraggio e l'analisi dei dati ricevuti dai prodotti già consegnati ai clienti al fine di migliorare gli sviluppi futuri del prodotto stesso. L'attività di product design non si esaurisce infatti con l'invio dell'oggetto in produzione, ma grazie all'IoT segue il prodotto dal cliente e l'informazione fluisce in modo circolare permettendo di ottimizzare le future fasi del prodotto (Tao & Zhang, 2017).



Figura 26 - Modello generale Digital Twin per un prodotto (Tao & Zhang, 2017b)

3.2.5 Digital Twin for PLM

Uno dei grandi problemi del PLC consiste nella gestione dei dati generati; non è infatti inverosimile che possano esserci molti duplicati da dover gestire che generano ridondanza e complicano il processo di analisi dei Big Data. Il problema può essere aggravato da una mancanza di interazione tra i processi di analisi dei Big Data e quelli di manifattura; in questo contesto il DT si pone come risolutore del PLM. Grazie alla connessione tra spazio virtuale e fisico e alle attività di analisi, comparazione e interpretazione dei dati è possibile evitare il problema di duplicazione (Leng et al., 2019).

Zheng et al. (2019) hanno proposto una struttura applicativa del DT per il PLM costituita da uno spazio virtuale, uno spazio fisico e un livello di elaborazione delle informazioni all'interno del quale i dati vengono mappati, archiviati e processati. Come è possibile osservare nella

figura riportata di seguito, in questa struttura lo scambio tra i due spazi è consentito da un canale di scambio bidirezionale.

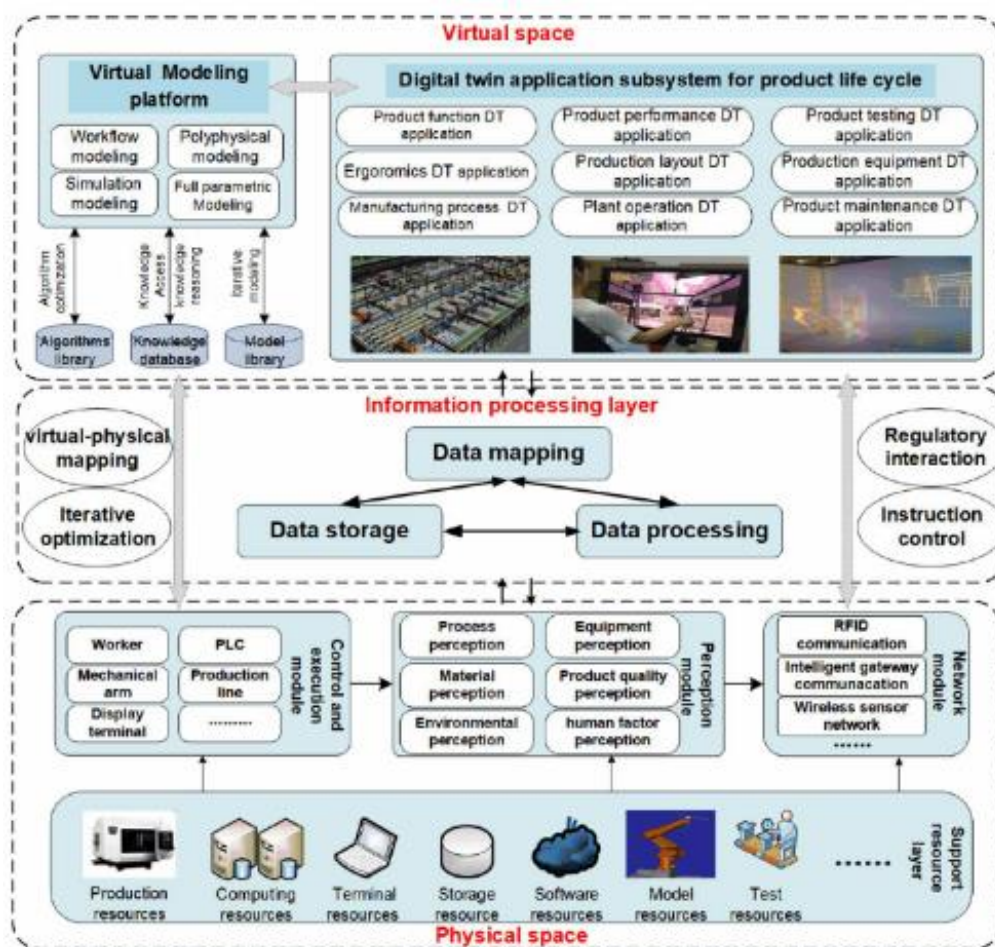


Figura 27 - Framework applicativo del DT per il PLM (Zheng et al., 2019)

I dati raccolti, provenienti dallo spazio fisico in cui ed esempio coesistono persone, macchine e software vengono utilizzati per gestire, controllare e ottimizzare i processi grazie all'integrazione con sistemi informativi quali ERP, MES e PDM.

Le informazioni provenienti dal mondo fisico e virtuale vengono ripulite e analizzate, poi strutturate e clusterizzate; questi processi permettono la sincronizzazione tra i due spazi e la loro comunicazione continua. Affinché questa struttura funzioni correttamente è fondamentale però avere a disposizione un Data Model efficiente per l'analisi di dati multidimensionali ed eterogenei.

Lo spazio virtuale è costituito da un *Virtual Environment Platform* (VPM) e da un sottosistema del DT per il PLM, in cui il VPM elabora e condivide al DT più modelli virtuali che dovranno

essere confrontati con i dati storici al fine di smistare le informazioni alle diverse applicazioni del PLM (Zheng et al., 2019).

3.2.6 Digital Twin for real-time geometry assurance

Söderberg et al. (2017) hanno proposto un modello per l'implementazione di un DT lungo le fasi di progettazione, preproduzione e produzione per le attività di *geometry assurance*, cioè quelle attività volte a minimizzare la variazione geometrica sul prodotto finale.

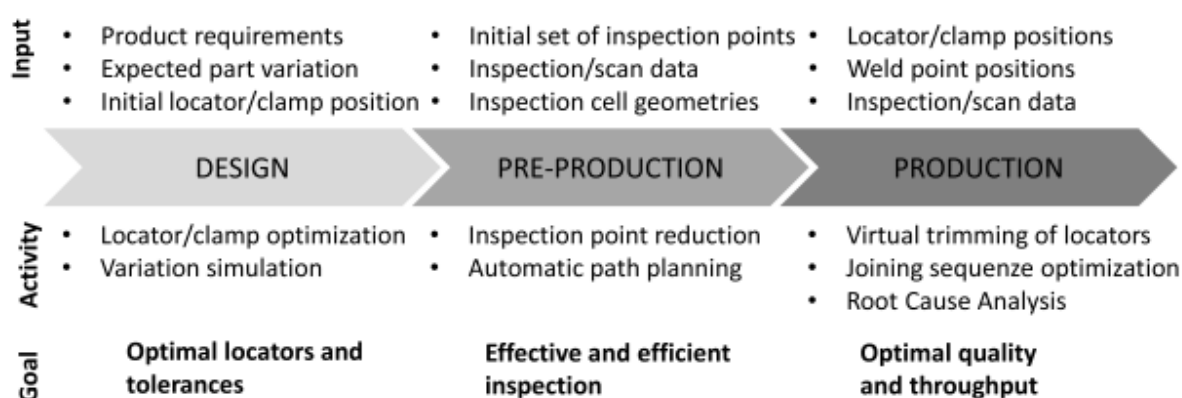


Figura 28 - Digital Twin input and functionality (Söderberg et al., 2017)

Nella fase di progettazione, in cui vengono definite le tolleranze del prodotto e i requisiti, il DT riesce a supportare le analisi di robustezza e tolleranza utilizzando le rappresentazioni geometriche e le relazioni cinematiche. Nella fase di preproduzione il DT viene utilizzato per la programmazione *off-line* (OLP) delle ispezioni attraverso le macchine CMM e gli scanner, sfruttando anche il collegamento con banche dati e la conoscenza dei punti di ispezione finali (Söderberg et al., 2017). In altre parole, il DT permette di creare una linea totalmente automatica capace di programmare e aggiornare in tempo reale i programmi di ispezione. Nella fase di produzione, il modello di assemblaggio virtuale (*variation simulation model*) viene confrontato con i dati di ispezioni per effettuare il controllo e la correzione del processo produttivo con la possibilità di riuscire a migliorare significativamente il controllo massivo dei prodotti.

Lo schema del modello proposto da Söderberg et al. (2017) è illustrato nella figura riportata di seguito:

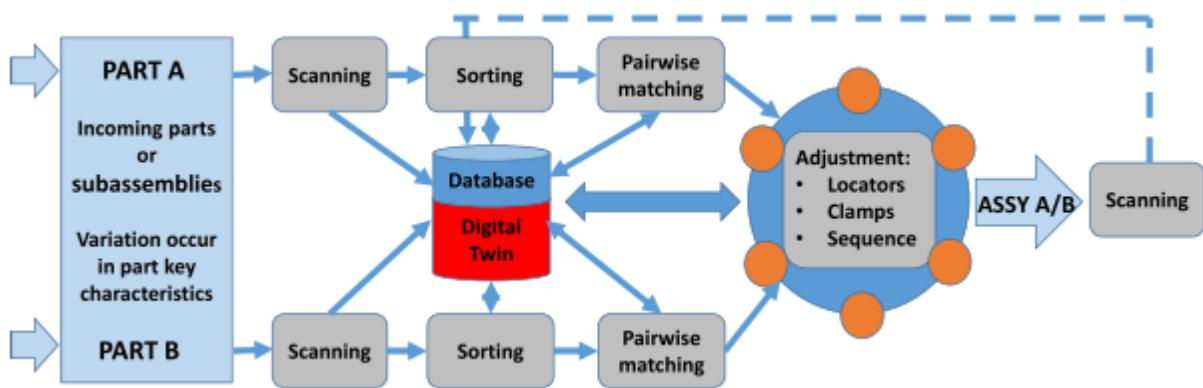


Figura 29 -Self-compensating assembly line (Söderberg et al., 2017)

Si tratta di una stazione autonoma di saldatura robotizzata self-optimizing il cui concetto si fonda sull'idea di un DT contenente tutte le informazioni circa le geometrie nominali delle parti e le attrezzature di produzione come robot e strumenti di saldatura. Inoltre, il DT contiene anche le condizioni di accoppiamento (e modellazione dei contatti), la funzionalità per ottimizzare lo schema di localizzazione (*Virtual Trimming*) e riesce a simulare gli scostamenti della saldatura reale e ad ottimizzarla. Il concetto di catena di montaggio auto compensante è costruito dai seguenti passaggi (si veda Fig. 30):

1. Le singole componenti A e B vengono scansionate in modo tale da immagazzinare i dati scostamento dai valori nominali;
2. Ogni componente viene riordinato in una classe affinché possa essere trovata una corrispondenza a coppie;
3. Sulla base dei dati di scansione per ogni componente, viene effettuata la corrispondenza a coppie seguendo il criterio di minimizzazione dello scarto della misura nominale;
4. Sulla base dei dati di scansione per i componenti A e B, lo scostamento a seguito dell'assemblaggio è ulteriormente ridotto (schemi di localizzazione).
5. Sulla base dei dati di scansione per la parte A e la parte B viene selezionata la sequenza di saldatura ottimale;
6. Il sottoinsieme A/B è ispezionato e confrontato con la geometria simulata (comprese le fasi 2-4). La variazione tra la geometria simulata e quella rilevata da ispezione viene definita dai dispositivi e localizzatori che utilizzano Root Cause Analysis (AI può essere utilizzata per prevedere situazioni non previste) (Söderberg et al., 2017).

3.2.7 Digital Twin for laser welding

Papacharalampopoulos et al. (2020) hanno proposto un modello bidimensionale a differenza finita (FD) del monitoraggio della temperatura delle parti del prodotto nei processi di fusione su letto di polvere in *Additive Manufacturing* (AM). Il lavoro consiste in uno studio dell'equazione di primo grado tramite serie di Taylor e, nel caso in cui fosse necessario, anche di un'equazione differenziale di secondo grado, tramite equazione di Poisson. Questa metodologia di descrizione del modello risulta utile per l'applicazione del DT nel processo di saldatura. Infatti, questo studio consentirebbe al DT di poter lavorare e modificare il sistema con maggiore precisione e in real-time con geometrie complesse, trattandosi di processi *physics-based*; la loro risoluzione permetterebbe al DT di riuscire a stimare la temperatura in scenari diversi rispondendo ai casi "*what-if*"; grazie alla soluzione trovata dovrebbe essere possibile ridurre i tempi di risposta permettendo al DT di ottimizzare in tempo reale il processo e, modificando localmente le proprietà del materiale, di prevedere vari scenari che, attraverso metodi di Machine Learning, possono offrire un insieme di valutazioni volte a migliorare la qualità in tempo reale (Papacharalampopoulos et al., 2020).

3.2.8 Processo di Quality Management per l'assemblaggio di velivoli aerospaziali

Zhuang et al. (2022) hanno proposto un modello di applicazione del DT per la gestione del controllo qualità nel processo di assemblaggio di veicoli aerospaziali.

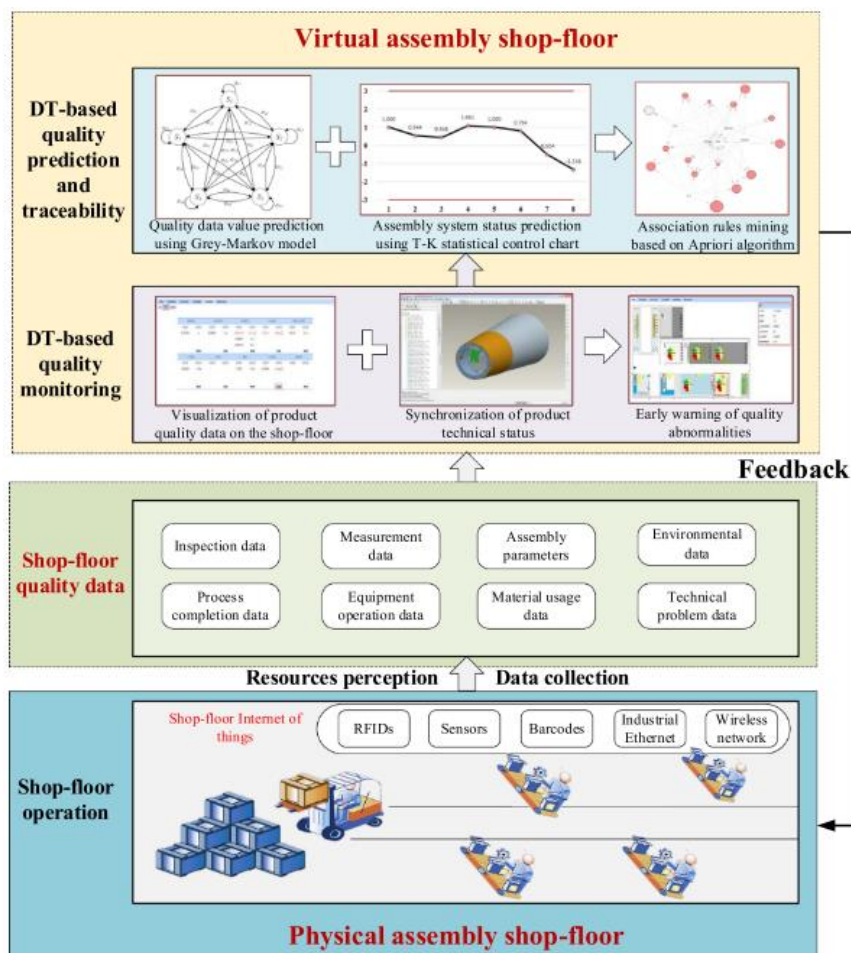


Figura 30 - DT-based quality management framework for the assembly process of aerospace products (Zhuang et al., 2022)

In Figura 31 è stata proposta una struttura su tre livelli in cui, nel livello più basso, è possibile osservare la fabbrica di assemblaggio fisica dove compare un'officina IoT (composta da RFID, sensori, codici a barre, Ethernet industriale e rete wireless) che riesce a raccogliere dati di qualità e riesce a mantenere la percezione delle risorse utilizzate; tra il fisico e il virtuale si trova un'officina dei dati di qualità che raccoglie dinamicamente e in tempo reale i dati inviati da IoT e li gestisce sulla base delle BOM dei prodotti (compaiono dati di ispezione, di misura, parametri di processo, dati di ambiente, dati di completamento dei processi, dati delle macchine, dati di utilizzo dei materiali e dati di problemi tecnici).

Attraverso le stesse apparecchiature di ispezione, i dati di misurazione come il baricentro, peso e momento di inerzia vengono inviati in tempo reale per garantire la qualità degli stessi;

per quanto riguarda i dati relativi al funzionamento delle apparecchiature, dati ambientali e parametri di assemblaggio, i dati vengono ricavati tramite sensori di spostamento, temperatura, velocità e umidità. I dati di completamento di processo e i dati relativi ai problemi tecnici vengono invece raccolti tramite interazione uomo-macchina mentre i dati del materiale vengono recepiti tramite tecnologia RFID (*Radio Frequency Identification*) e tramite scansione del codice a barre (Zhuang et al., 2022).

L'officina virtuale di assemblaggio è costituita da due aree, una per il monitoraggio dei dati e della qualità e l'altra per effettuare previsioni di qualità e per mantenere la tracciabilità dei dati a supporto del processo decisionale. Nel livello di monitoraggio il DT, tramite azioni di visualizzazione dei dati basati sui prodotti ricavati dall'officina fisica e tramite una sincronizzazione dei vari stati del prodotto, riesce ad inviare avvisi di anomalie in corso. Per quanto riguarda la tracciabilità dei dati e le previsioni qualitative, è stato creato un DT basato su un modello di Grey-Markov che utilizza dati storici e attuali. A questo punto, nel caso in cui il modello preveda un'anomalia, questo restituirà la segnalazione delle anomalie stesse al sistema fisico; mentre, nel caso di previsione di valore nel range di controllo, questo non restituirà nessuna segnalazione continuando il suo lavoro di monitoraggio. A seguito delle previsioni del modello, il campionamento viene effettuato su lotti diversi mentre il controllo statistico e i relativi cambiamenti di media e deviazione standard viene controllato tramite un grafico T-K sulla base dei dati del campionamento (Zhuang et al., 2022).

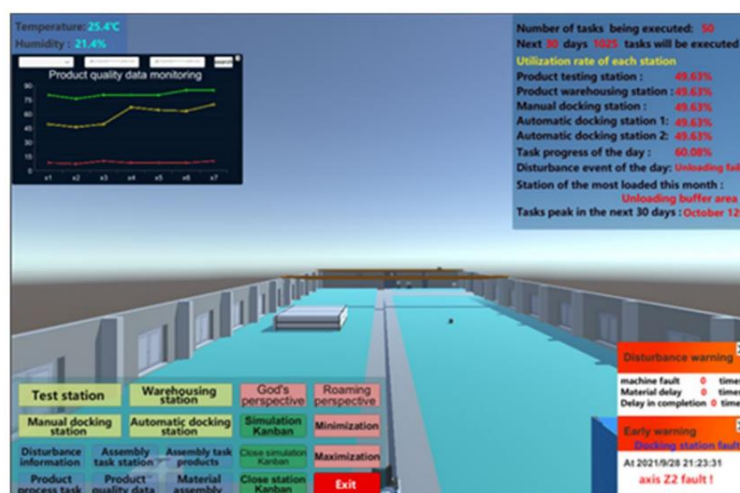


Figura 31 - Assembly quality monitoring diagram of the assembly shop-floor based on the DT (Zhuang et al., 2022)

In Figura 32 è possibile vedere l'interfaccia per il monitoraggio della qualità del processo di assemblaggio basato sul DT. Il quadrante in alto a sinistra permette di visualizzare

l'andamento dei dati durante il processo di assemblaggio, il quadrante in basso a sinistra mostra una dashboard per monitorare lo stato operativo del DT mentre il quadrante in basso a destra è uno spazio dedicato agli avvisi di warning tramite popup. L'ultimo quadrante in alto a destra è lo spazio dedicato ai risultati di previsione di lavoro delle workstation e percentuali di utilizzo (Zhuang et al., 2022).

3.2.9 DT per una metodologia Zero Defect Manufacturing (ZDM)

Psarommatis (2021) ha proposto una metodologia che può permettere a chi la applica di poter programmare una strategia *Zero Defect Manufacturing* (ZDM) in ogni fase della produzione. La differenza tra lo ZDM e le altre strategie del controllo qualità consiste nel migliorare il controllo azzerando i difetti fin da subito per evitare di dover mitigare i problemi in futuro. Le quattro strategie principali che compongono lo ZDM sono individuare (Dt), prevedere (Pd), prevenire (Pv) e riparare (Rp); queste vengono classificate e accorpate in due categorie, che sono "fattori scatenanti" e "azioni"; le prime due strategie appartengono alla prima categoria, le ultime due alla seconda categoria (Figura 33).

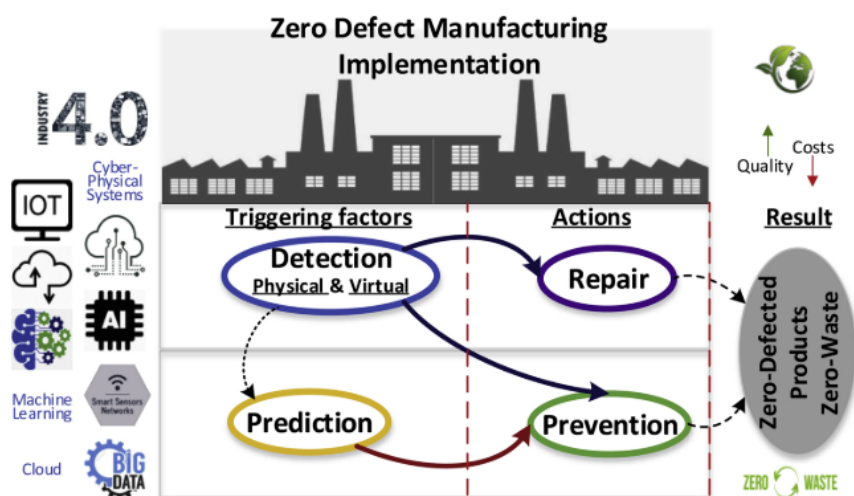


Figura 32 - ZDM implementation strategies and connections (Psarommatis et al., 2020)

Nel caso in cui venisse rilevato un difetto a seguito di un'ispezione, esso può essere riparato (rileva e ripara) e i dati acquisiti dal modulo di rilevamento dei difetti possono essere utilizzati o per inviare un segnale di warning ed eseguire azioni preventive per evitare difetti futuri (rilevare – prevenire) o, addirittura, per alimentare degli algoritmi progettati appositamente in modo da prevedere quando un difetto può verificarsi (prevedere – prevenire).

L'introduzione al concetto di ZDM è utile alla comprensione del caso studio discusso di seguito.

Si riporta la metodologia utilizzata per implementare la strategia ZDM (Figura 34):

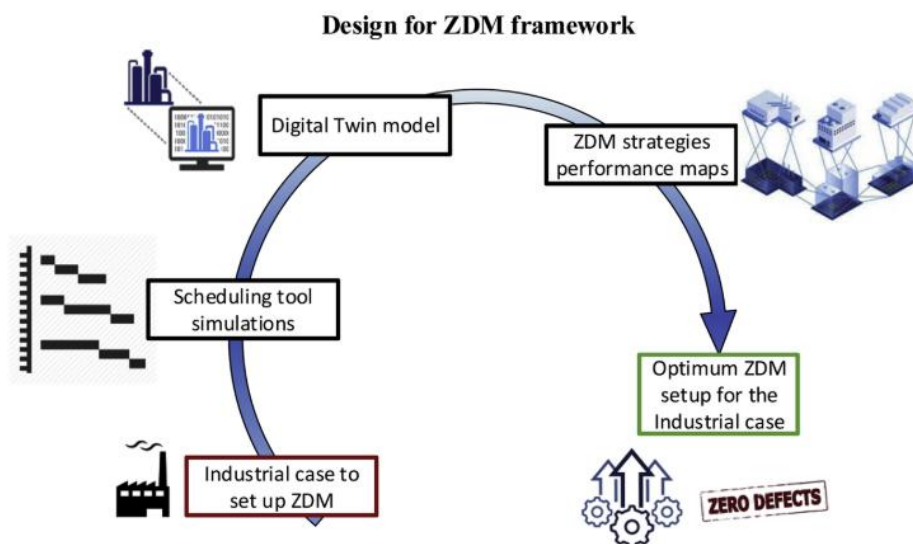


Figura 33 - Framework of the proposed approach and logical steps (Psarommatis et al., 2021)

Il modello inizia con la definizione dei parametri di controllo per la fase di pianificazione, tali parametri sono stati utilizzati per eseguire una serie di esperimenti utilizzando uno strumento per la pianificazione e schedulazione orientato allo ZDM; lo strumento di pianificazione viene utilizzato per simulare vari scenari al fine di valutare le prestazioni di ciascuna strategia tramite specifici KPI. Finita questa fase, grazie ai risultati, viene implementato un DT applicato ad un caso specifico industriale con l'obiettivo di valutare approfonditamente le prestazioni delle varie strategie ZDM.

Il DT, creato sulla base della metodologia statistica del *Design of Experiments* (DoE) tramite approccio Taguchi, ha lo scopo di prevedere l'utilità derivante dalla scelta di determinati parametri di controllo ZDM senza la necessità di utilizzare lo strumento di pianificazione. La scelta di tale metodo risiede nella possibilità di produrre un numero di esperimenti tale da poter avere risultati statisticamente rilevanti e, soprattutto, nel fatto che tale modello è in grado di definire gli esperimenti da eseguire (Psarommatis, 2021).

L'applicazione della metodologia proposta riguarda un caso d'uso reale nel settore della produzione di semiconduttori per apparecchiature mediche; tali apparecchiature, presentando dei costi molto elevati, richiedono un processo di controllo qualità efficiente. I

risultati sono stati proibitivi dal punto di vista del timing di elaborazione delle simulazioni (in media 2,5h per ogni simulazione per 1125 simulazioni totali), mentre sono stati molto positivi circa la previsione dell'output dello strumento di pianificazione (circa 1 secondo per ogni parametro ZDM), permettendo la costituzione di mappe di prestazione ZDM.

3.2.10 DT per l'analisi delle prestazioni di accoppiamento di una valvola a cursore

Tang et al. (2021) propongono un nuovo metodo di analisi delle prestazioni di assemblaggio dei distributori di precisione, che tiene conto degli errori di topografia della superficie, basandosi sul Digital Twin. L'obiettivo finale è quello di soddisfare l'esigenza di un creare un modello per determinare in modo accurato le tolleranze geometriche dei componenti del distributore per ottenere prestazioni ottimali. Un distributore di precisione è il componente principale del servocomando elettroidraulico. A livello strutturale una valvola a spola di precisione consiste in un foro formato dal cursore e dal manicotto della valvola, attraverso un assemblaggio di precisione. L'elemento fondamentale per studiare le prestazioni di assemblaggio di una valvola a cursore è la caratterizzazione degli errori sulla superficie geometrica e sull'accoppiamento geometrico microscopico.

Riprendendo il modello a cinque dimensioni del DT proposto da Tao et al., il framework utilizzato è composto da:

- Valvola a cursore fisico: che possiede una superficie reale che riflette gli errori di lavorazione;
- Valvola a cursore virtuale: che consiste in una mappatura virtuale del cursore fisico replicandone in maniera fedele, i comportamenti geometrici e fisici;
- Servizio di sistema: che analizza le prestazioni di accoppiamento del cursore utilizzando quello fisico e quello digitale e i dati pertinenti.
- Dati del DT: che vengono ricavati dal cursore fisico e da quello del DT per supportare il processo di interazione reale-virtuale.
- Link: che collega gli elementi presentati sopra in un insieme dinamico, in modo che le diverse parti possano interagire tra loro.

La modellazione dei DT ai fini di rappresentare la topografia geometrica dell'interfaccia di assemblaggio viene implementata seguendo i seguenti tre aspetti:

1. Con il modello CAD, è stato estratto il modello geometrico ideale e le informazioni sui vincoli dell'interfaccia di assemblaggio;
2. Analizzando la tolleranza di progettazione delle parti, è stata creata una zona di tolleranza che vincola la variazione della topografia;
3. Sulla base della curva NURBS, gli errori di altezza vengono fusi con i campi geometrici originali;

Tenendo conto dell'influenza degli errori topografici, lo studio ha analizzato il comportamento di accoppiamento dei distributori di precisione, stabilendo la relazione quantitativa tra il gioco di assemblaggio non uniforme e il tasso di perdita di olio e ha valutato quantitativamente le prestazioni di assemblaggio dei distributori di precisione. Pertanto, il modello quantitativo sviluppato, potrà essere utilizzato per valutare le prestazioni dei distributori di precisione in fase di progettazione o di produzione.

In generale, il lavoro Tang et al. (2021) ha combinato i dati del Digital Twin con la modellazione della topografia geometrica e del comportamento di accoppiamento di precisione, nonché l'analisi delle prestazioni di accoppiamento del cursore di precisione per simulare, e analizzare le prestazioni di accoppiamento del cursore di precisione e le prestazioni delle loro entità fisiche, che contribuiscono all'ottimizzazione delle decisioni per quanto riguarda la progettazione, la lavorazione, l'assemblaggio e la regolazione dei distributori di precisione.

Conclusione

Oggi giorno il concetto di *Digital Transformation* continua a ripetersi e a diffondersi a macchia d'olio, impattando il tessuto socioeconomico sotto tutti i punti di vista. Tale "trasformazione" è guidata dal concetto di Industria 4.0 e dalle sue tecnologie e dai nuovi paradigmi informatici, i quali la abilitano e la rendono il punto di riferimento di questo processo *Smart*. È proprio il concetto di "intelligenza" la rivoluzione che traina la diffusione *dell'Industry 4.0* e che ha permesso negli ultimi anni l'emergere del concetto di *Digital Twin*, ovvero una copia fedele e digitale di un oggetto fisico capace di migliorare performance del business per rispondere alle richieste complesse del mercato globale.

È stata proposta un'analisi della letteratura per mostrare come l'interesse riguardo il DT sia in costante aumento negli ultimi anni e come i settori maggiormente dediti alla ricerca siano principalmente quelli di natura scientifica, in particolar modo *Engineering, Computer Science* e *Mathematics*.

Si ritiene doveroso citare come negli ultimi anni stiano comparando ricerche in ambiti molto lontani da quelli scientifici, come *Arts and Humanities, Pharmacology, Toxicology and Pharmaceutics, Psychology* e, a seguito dei recenti eventi riguardati il COVID, sono aumentate le applicazioni del DT in ambito *Immunology and Microbiology*; tutti questi ambiti di applicazione incidono sulla ricerca globale con un peso del 10%.

Continuando l'analisi della letteratura emerge come l'attenzione principale sia rivolta al mondo *Manufacturing* con una percentuale di pubblicazioni del 57% sul totale; inoltre, si è constatato come una parte consistente delle pubblicazioni in ambito *Manufacturing* affrontino la fase di *Design* e di *Production* e un buon 18% tratti il tema della qualità. Risultano ancora poche le pubblicazioni che trattano le applicazioni del DT per il PLC. Infine, si è notato un crescente aumento delle applicazioni in Additive manufacturing, anche se ancora il livello di ricerca non è molto alto.

Altra considerazione da aggiungere riguarda lo scopo di applicazione del DT. La maggior parte dei casi studio si pongono come obiettivo l'implementazione di modelli per elaborare dati in tempo reale e per effettuare simulazioni in funzione di analisi predittive. In fine l'ultima considerazione riguarda lo stato della ricerca e la relativa applicabilità degli specifici casi d'uso a casi d'uso più generali; infatti, i vari modelli di DT proposti hanno quasi tutti il limite di poter

essere applicati in quei determinati casi d'uso e a determinate condizioni, il che limita moltissimo la sua adattabilità.

Grazie al lavoro di tesi svolto è stato possibile vedere come il DT permetta di migliorare le prestazioni di diversi processi industriali e la sua capacità di adattarsi alle diverse fasi del ciclo di vita del prodotto, dalla progettazione alla produzione, fino alla fase di servizio. Si è visto come la sua applicazione possa portare benefici in termini predittivi, riuscendo a determinare diversi scenari di produzione e guasti o anomalie e come le risposte a tali warning avvengano in tempi brevi; è stato possibile osservare come le attività di scambio costante di dati in tempo reale, la possibilità di conoscere i dati storici e la possibilità di previsione abbiano un forte impatto a livello strategico ed economico. Questo si riflette in un supporto al processo decisionale continuo e tempestivo, permettendo di prendere decisioni sulla base di analisi mirate ed efficaci.

L'analisi della letteratura svolta all'interno della presente tesi si è concentrata sui casi applicativi del DT in ambito *Manufacturing* e in ambito *Quality*, per analizzare lo stato attuale dell'arte. I risultati derivanti da questa analisi consentono di dire che l'applicabilità del DT è fortemente dipendente da una serie di tecnologie che altrimenti lo renderebbero inutilizzabile, si fa riferimento a sensori e attuatori per la rilevazione dei dati in tempo reale; i metodi di *Big Data Analytics* per l'analisi e l'elaborazione dei dati; *IoT* per il trasferimento e la comunicazione verso piattaforme di *Cloud* per facilitare l'accesso alle informazioni. Si è visto come si punti alla collaborazione tra il DT e il *Manufacturing Execution System* (MES) per monitorare la produzione e lo stato dei macchinari presenti lungo la linea di produzione tramite collegamento con i sensori stessi. Si è inoltre osservato come il DT riesca a simulare lo stato dei macchinari e a prevedere percentuali di completamento di produzione e di errore. Sono stati analizzati casi di applicazione in ambito aerospaziale, i quali si confermano i casi di applicazione più frequenti. Un altro campo di ricerca molto frequente riguarda *l'Additive Manufacturing*: molti studi si concentrano sull'ottimizzazione di questi processi al fine di migliorare la qualità delle geometrie prodotte in termini di tolleranze e rugosità delle superfici. Si è anche potuto notare come il DT stia emergendo anche in ambito qualità e come alcuni studi stiano puntando alla strategia Zero Defect Manufacturing (ZDM) con l'obiettivo di raggiungere un'efficienza "perfetta"; inoltre, è stato mostrato come il DT riesca, in maniera del tutto autonoma, a definire e schedulare piani di ispezione sia delle componenti sia delle

parti finite. Inoltre, sono stati analizzati studi riguardanti l'accoppiamento di parti assemblate e di come il DT riesca a contribuire all'efficacia di questo complicato processo.

In conclusione, ciò che risulta evidente dall'analisi condotta, è che negli ultimi anni la ricerca sta sempre più spostando la sua attenzione verso le applicazioni del DT, perdendo il focus sulla definizione caratterizzazione, nonostante pare che ancora non sia stata trovata una definizione univoca per l'accademia. Questo pare sia dovuto al fatto che, nonostante la mancanza univoca di definizione, il concetto di DT sia comunque stato recepito positivamente spingendo la ricerca ad una fase successiva. Risulta difficile da giudicare l'espansione che il DT possa avere in settori non scientifici, e si ritiene che la maggiore applicazione sarà rivolta al campo manifatturiero, soprattutto nei settori in cui ha mosso i primi passi. Inoltre è importante sottolineare come il DT sia un paradigma che difficilmente sia applicabile in mancanza di alcune tecnologie abilitanti, pertanto la sua implementazione richiede dei costi da sostenere elevati e quindi la relativa inaccessibilità da parte delle piccole e medie imprese.

Il DT sta già mostrando il suo potenziale e i suoi possibili benefici, quello che ci si aspetta maggiormente dalla futura ricerca è la standardizzazione di alcuni processi di implementazione per facilitare l'accesso a una tecnologia che si presta ad impattare pesantemente l'industria dei prossimi decenni.

Bibliografia

- Abramovici, M., Göbel, J. C., & Savarino, P. (2016). Virtual twins as integrative components of smart products. *IFIP Advances in Information and Communication Technology*, 492, 217–226. https://doi.org/10.1007/978-3-319-54660-5_20
- Alam, K. M., & Saddik, A. El. (2017). C2PS: A Digital Twin Architecture Reference Model for the Cloud-Based Cyber-Physical Systems. *IEEE Access*, 5, 2050–2062. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2657006>
- Autiosalo, J. (2018). Platform for industrial internet and digital twin focused education, research, and innovation: Ilmatar the overhead crane. *2018 IEEE 4th World Forum on Internet of Things (WF-IoT)*, 241–244. <https://doi.org/10.1109/WF-IoT.2018.8355217>
- Bahrin, M., Othman, M. F. bin, Azli, N. H. N., & Talib, M. F. (2016). *INDUSTRY 4.0: A REVIEW ON INDUSTRIAL AUTOMATION AND ROBOTIC*.
- Boschert, S., & Rosen, R. (2016). Digital Twin—The Simulation Aspect. In P. Hehenberger & D. Bradley (Eds.), *Mechatronic Futures: Challenges and Solutions for Mechatronic Systems and their Designers* (pp. 59–74). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-32156-1_5
- Breque, Maija., De Nul, Lars., Petridis, Athanasios., & European Commission. Directorate-General for Research and Innovation. (2021). *Industry 5.0 : towards a sustainable, human-centric and resilient European industry*.
- Brodav, E. E. (2022). The evolution of quality: from inspection to quality 4.0. In *International Journal of Quality and Service Sciences* (Vol. 14, Issue 3, pp. 368–382). Emerald Group Holdings Ltd. <https://doi.org/10.1108/IJQSS-09-2021-0121>
- Bruynseels, K., de Sio, F. S., & van den Hoven, J. (2018). Digital Twins in health care: Ethical implications of an emerging engineering paradigm. *Frontiers in Genetics*, 9(FEB). <https://doi.org/10.3389/fgene.2018.00031>
- Canedo, A. (2016). Industrial IoT lifecycle via digital twins. *2016 International Conference on Hardware/Software Codesign and System Synthesis (CODES+ISSS)*, 1.
- Castanedo, F. (2013). A Review of Data Fusion Techniques. *The Scientific World Journal*, 2013, 704504. <https://doi.org/10.1155/2013/704504>
- Ciavotta, M., Bettoni, A., & Izzo, G. (2018). Interoperable meta model for simulation-in-the-loop. *2018 IEEE Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS)*, 702–707. <https://doi.org/10.1109/ICPHYS.2018.8390793>
- Cimino, C., Negri, E., & Fumagalli, L. (2019). Review of digital twin applications in manufacturing. *Computers in Industry*, 113. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2019.103130>
- Deloitte. (2020). *Reshaping the cybersecurity landscape*. <https://www2.deloitte.com/us/en/insights/industry/financial-services/cybersecurity-maturity-financial-institutions-cyber-risk.html>
- Demkovich, N., Yablochnikov, E., & Abaev, G. (2018). Multiscale modeling and simulation for industrial cyber-physical systems. *2018 IEEE Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS)*, 291–296. <https://doi.org/10.1109/ICPHYS.2018.8387674>

- Esmailian, B., Behdad, S., & Wang, B. (2016). The evolution and future of manufacturing: A review. *Journal of Manufacturing Systems, 39*, 79–100.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2016.03.001>
- Fletcher, S., Johnson, T. L., & Adlon, T. (2019). *Human-centered factories from theory to industrial practice. Lessons learned and recommendations*.
<https://www.researchgate.net/publication/337102988>
- Gabor, T., Belzner, L., Kiermeier, M., Beck, M. T., & Neitz, A. (2016). *A Simulation-Based Architecture for Smart Cyber-Physical Systems*.
- Gereald, M., & Peter, Z. (2017). INDUSTRIAL ROBOTS MEET INDUSTRY 4.0 IPARI ROBOTOK AZ IPAR 4.0 ÍGÉNYEIHEZ. In *Hadmérnök (XII)*.
- Getting Digitally Connected to Transform Quality Management QUALITY 4.0 IMPACT AND STRATEGY HANDBOOK CONNECT*. (2017).
- Glaessgen, E. H., & Stargel, D. S. (2012). *The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force Vehicles*.
- Govindaraju, R., & Putra, K. (2016). A methodology for Manufacturing Execution Systems (MES) implementation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 114*(1).
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/114/1/012094>
- Grieves, M., & Vickers, J. (2017). Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. In *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems: New Findings and Approaches* (pp. 85–113). Springer International Publishing.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7_4
- Hu, L., Nguyen, N. T., Tao, W., Leu, M. C., Liu, X. F., Shahriar, M. R., & Al Sunny, S. M. N. (2018). Modeling of Cloud-Based Digital Twins for Smart Manufacturing with MT Connect. *Procedia Manufacturing, 26*, 1193–1203. <https://doi.org/10.1016/J.PROMFG.2018.07.155>
- Industry 5.0 Towards a sustainable, human-centric and resilient European industry*. (n.d.).
<https://doi.org/10.2777/308407>
- i-Scoop. (2022). *Digital twins and digital twin technology in an industrial context*. <https://www.i-scoop.eu/internet-of-things-iiot/industrial-internet-things-iiot-saving-costs-innovation/digital-twins/>
- Jin, W., Liu, Z., Shi, Z., Jin, C., & Lee, J. (2017). CPS-enabled worry-free industrial applications. *2017 Prognostics and System Health Management Conference (PHM-Harbin)*, 1–7.
- Jones, D., Snider, C., Nassehi, A., Yon, J., & Hicks, B. (2020). Characterising the Digital Twin: A systematic literature review. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 29*, 36–52.
<https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2020.02.002>
- Knapp, G. L., Mukherjee, T., Zuback, J. S., Wei, H. L., Palmer, T. A., De, A., & DebRoy, T. (2017). Building blocks for a digital twin of additive manufacturing. *Acta Materialia, 135*, 390–399.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.actamat.2017.06.039>
- Kraft, E. M. (2016). The Air Force Digital Thread/Digital Twin - Life Cycle Integration and Use of Computational and Experimental Knowledge. In *54th AIAA Aerospace Sciences Meeting*. American Institute of Aeronautics and Astronautics. <https://doi.org/doi:10.2514/6.2016-0897>

- Kunath, M., & Winkler, H. (2018). Integrating the Digital Twin of the manufacturing system into a decision support system for improving the order management process. *Procedia CIRP*, 72, 225–231. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.03.192>
- Lee, J., Bagheri, B., & Kao, H.-A. (2015). A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, 3, 18–23. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2014.12.001>
- Lee, J., Lapira, E., Bagheri, B., & Kao, H. (2013). Recent advances and trends in predictive manufacturing systems in big data environment. *Manufacturing Letters*, 1(1), 38–41. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2013.09.005>
- Leng, J., Zhang, H., Yan, D., Liu, Q., Chen, X., & Zhang, D. (2019). Digital twin-driven manufacturing cyber-physical system for parallel controlling of smart workshop. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 10(3), 1155–1166. <https://doi.org/10.1007/s12652-018-0881-5>
- Li, C., Mahadeven, S., Ling, Y., Wang, L., & Choze, S. (2017). A dynamic Bayesian network approach for digital twin. *19th AIAA Non-Deterministic Approaches Conference, 2017*. <https://doi.org/10.2514/6.2017-1566>
- Liu, M., Fang, S., Dong, H., & Xu, C. (2021a). Review of digital twin about concepts, technologies, and industrial applications. *Journal of Manufacturing Systems*, 58, 346–361. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.06.017>
- Liu, M., Fang, S., Dong, H., & Xu, C. (2021b). Review of digital twin about concepts, technologies, and industrial applications. *Journal of Manufacturing Systems*, 58, 346–361. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.06.017>
- Liu, Q., Zhang, H., Leng, J., & Chen, X. (2019). Digital twin-driven rapid individualised designing of automated flow-shop manufacturing system. *International Journal of Production Research*, 57(12), 3903–3919. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1471243>
- Lutters, E. (2018). Pilot production environments driven by digital twins. *South African Journal of Industrial Engineering*, 29(3 Special Edition), 40–53. <https://doi.org/10.7166/29-3-2047>
- Mabkhot, M. M., Al-Ahmari, A. M., Salah, B., & Alkhalefah, H. (2018). Requirements of the smart factory system: A survey and perspective. In *Machines* (Vol. 6, Issue 2). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/MACHINES6020023>
- Madni, A. M., Madni, C. C., & Lucero, S. D. (2019). Leveraging digital twin technology in model-based systems engineering. *Systems*, 7(1). <https://doi.org/10.3390/systems7010007>
- Michael Grieves. (2014). *Digital Twin - Whitepaper*.
- Monostori, L. (2015). *Cyber-physical production systems: roots from manufacturing science and technology*. 63(10), 766–776. <https://doi.org/doi:10.1515/auto-2015-0066>
- Negri, E., Fumagalli, L., & Macchi, M. (2017). A Review of the Roles of Digital Twin in CPS-based Production Systems. *Procedia Manufacturing*, 11, 939–948. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.198>

- Papacharalampopoulos, A., Stavropoulos, P., & Petrides, D. (2020). Towards a digital twin for manufacturing processes: Applicability on laser welding. *Procedia CIRP*, *88*, 110–115. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.05.020>
- Power Digital Solutions, G. (2016). *GE Power Digital Solutions GE Digital Twin*.
- Psarommatis, F. (2021). A generic methodology and a digital twin for zero defect manufacturing (ZDM) performance mapping towards design for ZDM. *Journal of Manufacturing Systems*, *59*, 507–521. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.03.021>
- Psarommatis, F., May, G., Dreyfus, P.-A., & Kiritsis, D. (2020). Zero defect manufacturing: state-of-the-art review, shortcomings and future directions in research. *International Journal of Production Research*, *58*(1), 1–17. <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1605228>
- Reifsnider, K., & Majumdar, P. (2013). Multiphysics Stimulated Simulation Digital Twin Methods for Fleet Management. In *54th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*. American Institute of Aeronautics and Astronautics. <https://doi.org/doi:10.2514/6.2013-1578>
- Riedelsheimer, T., Dorfhuber, L., & Stark, R. (2020). User centered development of a Digital Twin concept with focus on sustainability in the clothing industry. *Procedia CIRP*, *90*, 660–665. <https://doi.org/10.1016/J.PROCIR.2020.01.123>
- Ríos, J., Hernández, J. C., Oliva, M., & Mas, F. (2015). Product avatar as digital counterpart of a physical individual product: Literature review and implications in an aircraft. *Advances in Transdisciplinary Engineering*, *2*, 657–666. <https://doi.org/10.3233/978-1-61499-544-9-657>
- Rosen, R., von Wichert, G., Lo, G., & Bettenhausen, K. D. (2015). About The Importance of Autonomy and Digital Twins for the Future of Manufacturing. *IFAC-PapersOnLine*, *48*(3), 567–572. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.141>
- Roy, R., Tiwari, A., Stark, R., & Lee, J. (2017). Editorial for the Special Issue on Through-Life Engineering Services. In *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* (Vol. 231, Issue 13, p. 2241). SAGE Publications Ltd. <https://doi.org/10.1177/0954405417733604>
- Saenz de Ugarte, B., Artiba, A., & Pellerin, R. (2009). Manufacturing execution system – a literature review. *Production Planning & Control*, *20*(6), 525–539. <https://doi.org/10.1080/09537280902938613>
- Schleich, B., Anwer, N., Mathieu, L., & Wartzack, S. (2017). Shaping the digital twin for design and production engineering. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, *66*(1), 141–144. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.04.040>
- Schluse, M., & Rossmann, J. (2016). From simulation to experimentable digital twins: Simulation-based development and operation of complex technical systems. *2016 IEEE International Symposium on Systems Engineering (ISSE)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/SysEng.2016.7753162>
- Schroeder, G. N., Steinmetz, C., Pereira, C. E., & Espindola, D. B. (2016). Digital Twin Data Modeling with AutomationML and a Communication Methodology for Data Exchange. *IFAC-PapersOnLine*, *49*(30), 12–17. <https://doi.org/10.1016/J.IFACOL.2016.11.115>

- Schumann, C. A., Baum, J., Forkel, E., Otto, F., & Reuther, K. (2017). Digital transformation and industry 4.0 as a complex and eclectic change. *2017 Future Technologies Conference*, 645–650. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85080124780&partnerID=40&md5=c0a30dd6c9d5cf7baca79463e85f7070>
- Söderberg, R., Wärmefjord, K., Carlson, J. S., & Lindkvist, L. (2017). Toward a Digital Twin for real-time geometry assurance in individualized production. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 66(1), 137–140. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.04.038>
- Stackowiak, R. (2019). Azure IoT Solutions Overview. In R. Stackowiak (Ed.), *Azure Internet of Things Revealed: Architecture and Fundamentals* (pp. 29–54). Apress. https://doi.org/10.1007/978-1-4842-5470-7_2
- Strandhagen, J. W., Alfnes, E., Strandhagen, J. O., & Vallandingham, L. R. (2017). The fit of Industry 4.0 applications in manufacturing logistics: a multiple case study. *Advances in Manufacturing*, 5(4), 344–358. <https://doi.org/10.1007/s40436-017-0200-y>
- Talkhestani, B. A., Jazdi, N., Schloegl, W., & Weyrich, M. (2018). Consistency check to synchronize the Digital Twin of manufacturing automation based on anchor points. *Procedia CIRP*, 72, 159–164. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.03.166>
- Tang, W., Xu, G., Zhang, S., Jin, S., & Wang, R. (2021). Digital twin-driven mating performance analysis for precision spool valve. *Machines*, 9(8). <https://doi.org/10.3390/MACHINES9080157>
- Tao, F., Cheng, J., Qi, Q., Zhang, M., Zhang, H., & Sui, F. (2018). Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 94(9), 3563–3576. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0233-1>
- Tao, F., Sui, F., Liu, A., Qi, Q., Zhang, M., Song, B., Guo, Z., Lu, S. C. Y., & Nee, A. Y. C. (2019). Digital twin-driven product design framework. *International Journal of Production Research*, 57(12), 3935–3953. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1443229>
- Tao, F., & Zhang, M. (2017a). Digital Twin Shop-Floor: A New Shop-Floor Paradigm Towards Smart Manufacturing. *IEEE Access*, 5, 20418–20427. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2756069>
- Tao, F., & Zhang, M. (2017b). Digital Twin Shop-Floor: A New Shop-Floor Paradigm Towards Smart Manufacturing. *IEEE Access*, 5, 20418–20427. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2756069>
- Vachálek, J., Bartalský, L., Rovný, O., Šišmišová, D., Morháč, M., & Lokšík, M. (2017). The digital twin of an industrial production line within the industry 4.0 concept. *2017 21st International Conference on Process Control (PC)*, 258–262. <https://doi.org/10.1109/PC.2017.7976223>
- VanDerHorn, E., & Mahadevan, S. (2021). Digital Twin: Generalization, characterization and implementation. *Decision Support Systems*, 145. <https://doi.org/10.1016/j.dss.2021.113524>
- Vogel-Heuser, B., & Hess, D. (2016). Guest Editorial Industry 4.0-Prerequisites and Visions. In *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering* (Vol. 13, Issue 2, pp. 411–413). Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. <https://doi.org/10.1109/TASE.2016.2523639>
- Vrabič, R., Erkoyuncu, J. A., Butala, P., & Roy, R. (2018). Digital twins: Understanding the added value of integrated models for through-life engineering services. *Procedia Manufacturing*, 16, 139–146. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.10.167>

- Wang, X. V., & Wang, L. (2019). Digital twin-based WEEE recycling, recovery and remanufacturing in the background of Industry 4.0. *International Journal of Production Research*, 57(12), 3892–3902. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1497819>
- Werthmann, H. (2017). *Erskin Blunck INDUSTRY 4.0-AN OPPORTUNITY TO REALIZE SUSTAINABLE MANUFACTURING AND ITS POTENTIAL FOR A CIRCULAR ECONOMY*.
- Xiang, F., Zhang, Z., Zuo, Y., & Tao, F. (2019). Digital Twin Driven Green Material Optimal-Selection towards Sustainable Manufacturing. *Procedia CIRP*, 81, 1290–1294. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.04.015>
- Xu, X., Lu, Y., Vogel-Heuser, B., & Wang, L. (2021). Industry 4.0 and Industry 5.0—Inception, conception and perception. *Journal of Manufacturing Systems*, 61, 530–535. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.10.006>
- Xu, Y., Sun, Y., Liu, X., & Zheng, Y. (2019). A Digital-Twin-Assisted Fault Diagnosis Using Deep Transfer Learning. *IEEE Access*, 7, 19990–19999. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2890566>
- Zhang, L., Chen, X., Zhou, W., Cheng, T., Chen, L., Guo, Z., Han, B., & Lu, L. (2020). Digital twins for additive manufacturing: A state-of-the-art review. In *Applied Sciences (Switzerland)* (Vol. 10, Issue 23, pp. 1–10). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/app10238350>
- Zheng, Y., Yang, S., & Cheng, H. (2019). An application framework of digital twin and its case study. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 10(3), 1141–1153. <https://doi.org/10.1007/s12652-018-0911-3>
- Zhou, K., Liu, T., & Zhou, L. (2015). Industry 4.0: Towards future industrial opportunities and challenges. *2015 12th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD)*, 2147–2152. <https://doi.org/10.1109/FSKD.2015.7382284>
- Zhuang, C., Liu, Z., Liu, J., Ma, H., Zhai, S., & Wu, Y. (2022). Digital Twin-based Quality Management Method for the Assembly Process of Aerospace Products with the Grey-Markov Model and Apriori Algorithm. *Chinese Journal of Mechanical Engineering (English Edition)*, 35(1). <https://doi.org/10.1186/s10033-022-00763-8>