

Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale Ingegneria Gestionale
ICT Data Analytics per il management
A.a. 2023-2024



**Politecnico
di Torino**

**Adozione dei gemelli digitali nei sistemi di
controllo della produzione: revisione della
letteratura esistente**

Relatore:

Prof. Alfieri Arianna

Candidato:

Paolo Giuseppe Boccardo

Correlatore:

Prof. Pastore Erica

Prof. Castiglione Claudio

Abstract

Nel contesto economico attuale, le industrie manifatturiere devono personalizzare i prodotti secondo le richieste dei clienti, gestire sistemi di produzione complessi e adattarsi rapidamente ai cambiamenti della domanda e delle condizioni di mercato. In risposta a tali sfide i gemelli digitali emergono come una delle tecnologie di ausilio sia al contesto di realizzazione del prodotto che alla produzione di esso, generando simulazioni virtuali dei prodotti e degli impianti produttivi allo scopo di supportare il processo di risoluzione dei problemi, riflettendosi positivamente sui tempi di produzione, sui costi e sulla qualità dei prodotti. L'obiettivo di questa tesi è fornire una revisione della letteratura sui contributi relativi all'implementazione dei gemelli digitali nell'ambito manifatturiero, focalizzandosi sulla fase di monitoraggio e controllo della produzione. I paper selezionati sono stati categorizzati nei due livelli che costituiscono la struttura del gemello digitale: fisico e virtuale. Nell'analisi comparativa, per il livello fisico, sono stati esaminati i motivi per cui alcuni autori preferiscono l'utilizzo di sensori e protocolli di comunicazione specifici rispetto ad altri mentre, per il livello virtuale, sono state confrontate le tipologie di simulazione adottate e gli algoritmi di ottimizzazione impiegati. Dall'analisi dei paper emerge che, nel contesto dei gemelli digitali per il controllo della produzione, l'utilizzo di sensori, protocolli di comunicazione e tipi di simulazione specifici è consolidato. Tuttavia, ciò non vale per gli algoritmi di ottimizzazione, suggerendo che questo campo è ancora in fase di sviluppo o che non esista un algoritmo di ottimizzazione preminente.

Parole-chiave: Digital twin, Manufacturing, Cyber Physical, Virtual System

Indice

Lista delle figure	5
Lista delle tabelle	5
Introduzione	6
1. Digital Twin	11
1.1 Definizione del Digital Twin	11
1.2 Applicazioni del Digital Twin nell'industria manifatturiera	12
1.3 Struttura e funzionamento del Digital Twin nel Manufacturing	14
2. Analisi comparativa dei paper categorizzati per livello fisico e virtuale	16
2.1 Livello Fisico: Sensori - Settore, Focus del processo e funzionalità	18
2.2 Livello Fisico: Protocolli di comunicazione - Architettura di rete e obiettivi.....	20
2.3 Livello virtuale: Tipologia di simulazione in base alla tecnica - Ambito applicativo e Software	23
2.4 Livello virtuale: Algoritmi - Classe di appartenenza, Obiettivo, dettagli del processo e indicatori di performance	25
Conclusioni	30
Bibliografia	32
Sitografia	35
Tools	35
Ringraziamenti	36

Lista delle figure

Figura 1:Distribuzione delle pubblicazioni dei paper nel tempo	8
Figura 2: Diagramma di flusso che spiega la procedura di filtraggio di un paper	9
Figura 3: Esempio di applicazione del Digital Twin della progettazione di una bicicletta, [2]	13

Lista delle tabelle

Tabella 1:Paper selezionati per il livello fisico	16
Tabella 2:Paper selezionati per il livello virtuale	17
Tabella 3:Riepilogo del confronto sull'uso dei sensori nei paper revisionati	20
Tabella 4:Riepilogo del confronto sull'uso dei protocolli di comunicazione	22
Tabella 5:Riepilogo del confronto sull'uso delle tipologie di simulazione nei paper revisionati.....	24
Tabella 6:Riepilogo del confronto sull' utilizzo degli algoritmi nei paper revisionati.	29

Introduzione

Nell'attuale contesto economico, le aziende manifatturiere affrontano diverse sfide legate alla personalizzazione di massa e alla flessibilità produttiva [4]. La crescente concorrenza globale spinge le imprese a rispondere a consumatori sempre più esigenti, che richiedono prodotti personalizzati secondo le loro preferenze ed esigenze specifiche, e a rispondere rapidamente ai cambiamenti del mercato e alle fluttuazioni della domanda. Il raggiungimento della personalizzazione di massa dipende da una progettazione ottimizzata del prodotto, mentre la capacità di adattarsi alle variazioni della domanda richiede una gestione efficiente della produzione comprendente la gestione delle risorse, la pianificazione e il controllo della produzione [2].

Con il progresso delle tecnologie digitali, le aziende investono sempre più in soluzioni quali i Gemelli Digitali, detti anche Digital Twins [1]. Secondo Global Market Insight, il mercato dei Gemelli Digitali, stimato a 8 miliardi di dollari nel 2022, è destinato a crescere con un tasso di crescita annuale composto (CAGR) del 25% dal 2023 al 2032. Un altro recente rapporto di una ricerca tecnologica globale prevede una crescita del mercato di quasi 32 miliardi di dollari dal 2021 al 2026. Questo rapido sviluppo evidenzia l'importanza crescente dei Gemelli Digitali per le aziende che desiderano migliorare l'efficienza e l'adattabilità delle loro operazioni. Infine, un rapporto del 2022 rivela che quasi il 60% dei dirigenti industriali prevede di integrare i Gemelli Digitali nelle loro operazioni entro il 2028, sottolineando ulteriormente il potenziale di questa tecnologia [1].

I Gemelli Digitali permettono di supportare non solo la progettazione dei prodotti, ma anche la progettazione dei processi e la pianificazione della produzione, grazie della sua capacità di generare controparti virtuali di prodotti e processi reali, che

consentono una simulazione del loro comportamento sotto diverse condizioni operative [2].

I Gemelli Digitali supportano, inoltre, il monitoraggio e controllo dei processi in quanto consentono di ottenere una visione dettagliata e in tempo reale dello stato del sistema di produzione [2]. Grazie all'integrazione con sensori e altri dispositivi di raccolta dati, i Gemelli Digitali possono raccogliere informazioni in modo continuo su vari parametri operativi come, ad esempio, temperature, pressioni, velocità di produzione, consumo energetico e stato delle macchine. Questo flusso di dati in tempo reale è utilizzato per aggiornare costantemente il modello virtuale, rendendolo una rappresentazione fedele e aggiornata del sistema reale [1].

L'obiettivo di questa tesi è quello di fornire una revisione della letteratura sui contributi relativi al Gemello Digitale nel settore manifatturiero, con un focus sul monitoraggio e controllo della produzione. I contributi sono stati classificati in base ai due livelli del Digital Twin: il livello fisico e il livello virtuale. Il livello fisico rappresenta il reparto produttivo reale, dove tecnologie quali sensori e protocolli di comunicazione sono utilizzati per raccogliere i dati e trasferirli alla controparte virtuale. Il livello virtuale, invece, è in grado di riprodurre digitalmente il processo produttivo, simulandolo e successivamente ottimizzandolo attraverso l'utilizzo di algoritmi [2].

L'analisi di revisione dei paper è composta da due fasi distinte. Nella fase iniziale, è stata effettuata una revisione della letteratura concernente la teoria del Gemello Digitale e la sua implementazione nel contesto manifatturiero [1,2,3,4]. Nella seconda fase, invece, sono state analizzate le pubblicazioni che trattano l'implementazione tecnica del Gemello Digitale nel contesto del monitoraggio e controllo della produzione.

Le parole-chiave utilizzate per la prima fase comprendono "Digital Twin" e "Digital Twin and Manufacturing", mentre per la seconda fase sono state utilizzate "Digital

twin and Manufacturing and Cyber and Physical" per indagare il livello fisico e "Digital Twin and Manufacturing and Virtual and System" per il livello virtuale. In entrambe le fasi, i paper sono stati raccolti sul database Scopus. È stato successivamente applicato un filtro temporale dal 2017 al 2024, in virtù del fatto che è proprio in questo periodo che si è notato un incremento delle pubblicazioni, con un picco nel 2023, come mostrato nella Figura 1. In seguito, sono stati selezionati i paper in lingua inglese e a libero accesso.

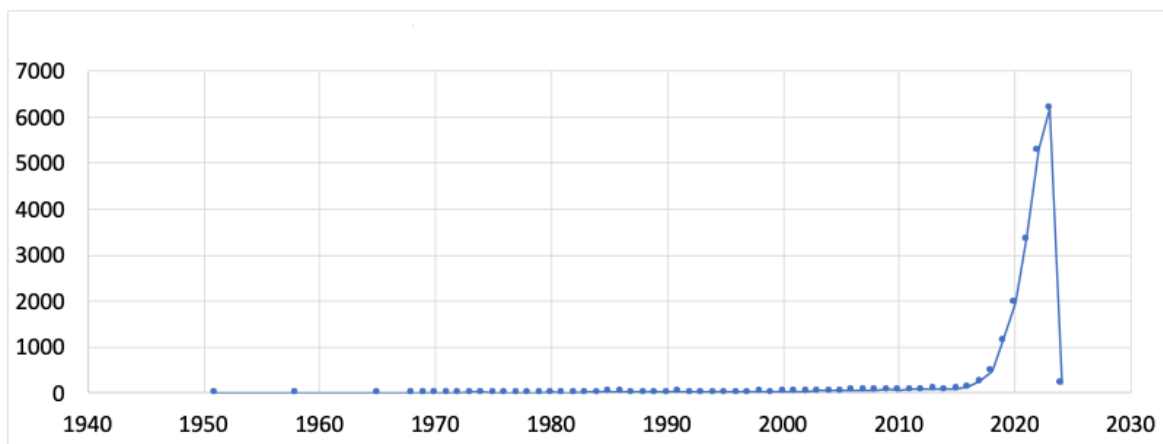


Figura 1: Distribuzione delle pubblicazioni dei paper nel tempo

Nell'ambito delle categorie relative ai livelli fisico e virtuale, sono stati introdotti ulteriori filtri: sono stati esclusi tutti i paper che non erano focalizzati sul monitoraggio e controllo della produzione, ritenuti non allineati con gli obiettivi del presente studio. Dopo aver applicato il processo di filtraggio, dei 736 paper inizialmente selezionabili, 297 rimangono dopo l'applicazione di filtri di lingua, anno e accesso aperto. In seguito, filtrando per argomento, il numero si riduce a 12 per il livello fisico. Analogamente, per il livello virtuale, partendo da 886 paper, ne restano 313 dopo l'applicazione dei filtri, e anche in questo caso il filtraggio sull'argomento porta a una selezione finale di 12 paper.

Il processo di selezione dei paper è illustrato in Figura 2.

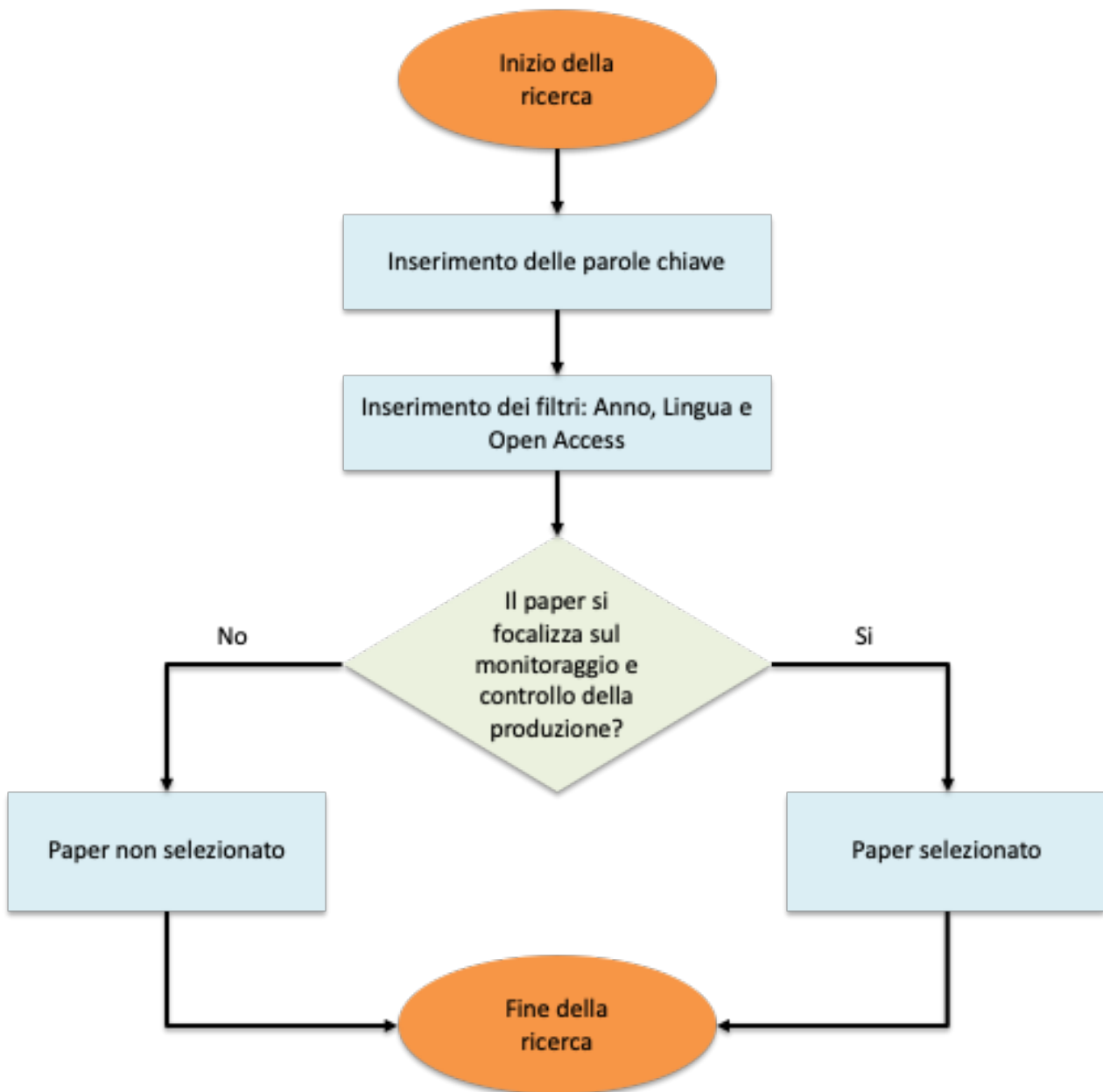


Figura 2: Diagramma di flusso che spiega la procedura di filtraggio di un paper

Il resto della tesi si articola nel seguente modo.

Nel capitolo 1 viene introdotto il concetto di Digital Twin, illustrando le definizioni e le diverse applicazioni in ambito manifatturiero. In questo capitolo verrà, inoltre, descritto il funzionamento del Digital Twin all'interno del processo di produzione, esplorando i vari livelli che lo compongono e come questi interagiscono tra loro per creare una rappresentazione fedele e dinamica dei processi reali.

Nel capitolo 2, è presentata l'analisi comparativa dei paper revisionati. Nel livello fisico, verranno presentate le analisi effettuate in base ai sensori e ai protocolli di comunicazione utilizzati, mentre nel livello virtuale sono stati confrontati l'utilizzo di tecniche di simulazione e di algoritmi di ottimizzazione.

Infine, la tesi si conclude con un riepilogo dei principali risultati ottenuti individuando, inoltre, i limiti della revisione condotta e le possibili indicazioni per ulteriori studi e applicazioni.

1. Digital Twin

1.1 Definizione del Digital Twin

La definizione di Digital Twin è stata introdotta per la prima volta dal Professore Michael Grieves nel 2003, nell'ambito del corso "Product Life Cycle Management" (PLM) presso l'Università del Michigan (Grieves, 2003) [3]. Secondo Grieves, il Digital Twin costituisce un componente fondamentale per la gestione del ciclo di vita dei prodotti manifatturieri [3]. La letteratura successiva ha esplorato varie sfaccettature di questo concetto, fornendo diverse definizioni e applicazioni. Tao et al. [2], nel 2014, hanno evidenziato che il Digital Twin rappresenta una metodologia per la gestione e la certificazione della durata operativa dei veicoli che si basa su modelli e simulazioni, i quali integrano le specificità costruttive, le sollecitazioni e gli ambienti incontrati, nonché la storia individuale del veicolo [2].

Stargel, nel 2012, ha fornito una definizione comprensiva e ormai largamente accettata nella comunità accademica. Secondo tale definizione, *"Il Digital twin è una simulazione probabilistica che impiega modellazioni multi-fisiche e multiscala di un prodotto complesso, utilizzando i migliori modelli fisici disponibili, aggiornamenti in tempo reale dai sensori e altro ancora, per rappresentare accuratamente la vita del suo analogo fisico"* [1,2,3].

1.2 Applicazioni del Digital Twin nell'industria manifatturiera

Nel contesto dell'industria manifatturiera, il Digital Twin è applicato in due fasi distinte: la progettazione del prodotto e il processo di produzione. L'integrazione mediante il Digital Twin migliora l'intero ciclo di vita di un prodotto, dall'ideazione alla produzione [2].

Per quanto riguarda la progettazione del prodotto, essa è costituita da tre fasi.

Nella prima fase di progettazione concettuale, avviene la raccolta dei dati dei clienti e delle loro preferenze. Durante tale processo, il Digital Twin offre una rappresentazione virtuale del prodotto, permettendo ai progettisti di valutarlo e modificarlo in un ambiente digitale prima di realizzare il primo prototipo fisico. Questo processo anticipa e soddisfa le necessità dei clienti, adattando il prodotto a misura delle loro aspettative [2].

Successivamente, nella fase di progettazione dettagliata, si fa in modo che le performance del prodotto richieste siano soddisfatte. Tramite l'utilizzo di simulazioni e test virtuali, il Digital Twin rende possibile identificare e apportare miglioramenti senza lavorare direttamente sul prodotto fisico [2].

Infine, nella fase di verifica virtuale, sono eseguiti i controlli di qualità. Utilizzando il Digital twin, è possibile verificare virtualmente se tutte le caratteristiche del prodotto sono state rispettate, eliminando la necessità di produrre un piccolo lotto per la verifica fisica, riducendo gli sprechi e ottimizzando il sistema di produzione [2].

La Figura 2, riportata in basso, illustra un esempio di progettazione di una bicicletta in base alle preferenze dei clienti. Il processo per la progettazione della bicicletta inizia con la progettazione concettuale e termina con la verifica virtuale.

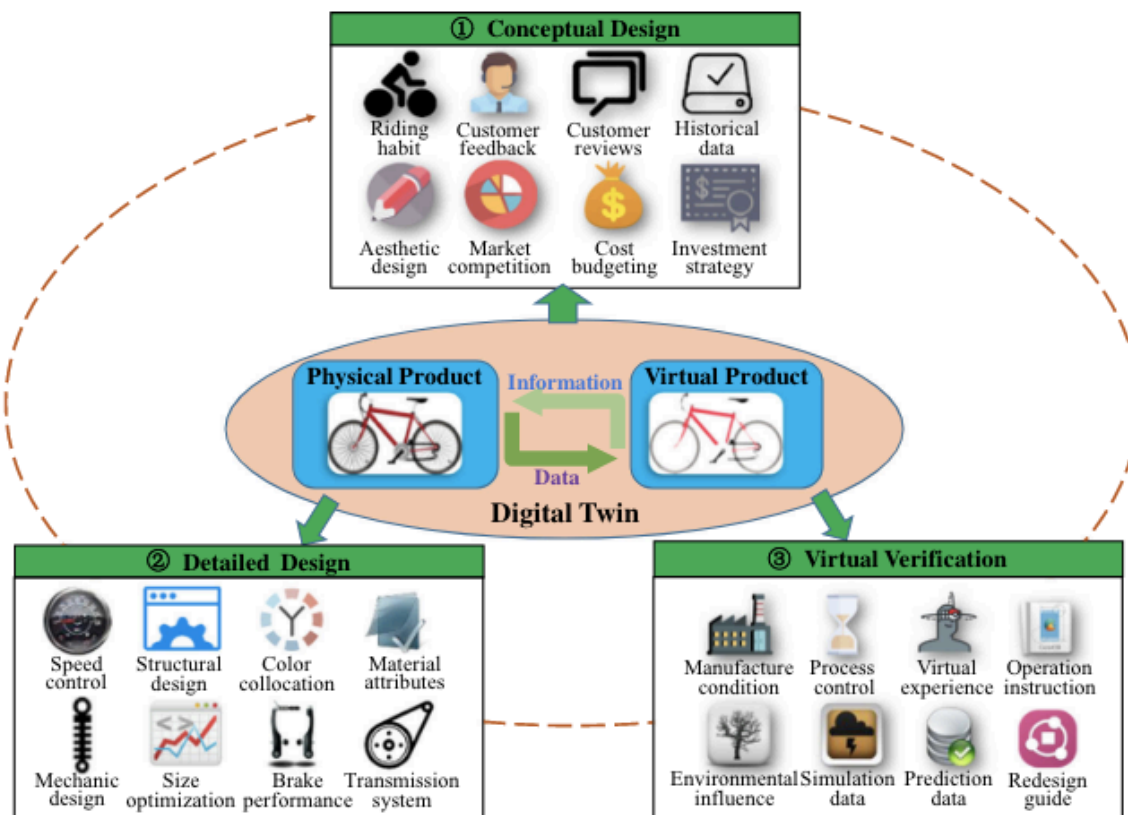


Figura 3: Esempio di applicazione del Digital Twin della progettazione di una bicicletta, [2]

Nel contesto del processo di produzione il Digital Twin interviene su tre aspetti.

La gestione delle risorse rappresenta uno dei punti chiave. Per eseguire tale compito, il Digital Twin analizza sia le risorse fisiche che materiali, prevedendo eventuali guasti sulle macchine e fornendo consigli sulla disposizione ottimale delle risorse all'interno del layout produttivo [2]. Ciò si traduce in un'ottimizzazione dell'efficienza e della disponibilità delle risorse, con una conseguente riduzione dei tempi di fermo macchina e un miglioramento della produttività complessiva.

Altrettanto importante è la pianificazione della produzione, nella quale il Digital Twin mira a ridurre i costi e massimizzare l'efficienza della produzione. Interagendo con le modalità di lavorazione dei prodotti attraverso l'utilizzo di simulazioni, il Digital Twin ha l'obiettivo di ottimizzare la programmazione delle attività, consentendo una migliore pianificazione delle risorse e dei tempi e portando, quindi, alla riduzione degli sprechi e dei ritardi durante il processo produttivo.

Infine, nell'aspetto del controllo della produzione, Il Digital Twin si occupa di monitorare in tempo reale le attività di produzione. In questo modo, il sistema è in grado di individuare eventuali inefficienze e di intervenire prontamente [2,3].

1.3 Struttura e funzionamento del Digital Twin nel Manufacturing

La struttura del Digital Twin all'interno del settore del manufacturing si compone di quattro livelli principali: il livello fisico (Physical Shop Floor - PS) che rappresenta il reparto produttivo fisico, responsabile dell'esecuzione degli ordini di produzione per generare i prodotti finali.

Il livello virtuale (Virtual Shop Floor – VS) è una replica digitale del Physical Shop Floor utilizzato per eseguire simulazioni del sistema di produzione [2].

Il livello di Servizio (Shop Floor Service System - SSS) che rappresenta l'insieme di sistemi di servizio che forniscono supporto per la produzione di prodotti e infine il livello dei Dati (Shop Floor Digital twin Data - SDTD) che raccoglie e rappresenta tutti i dati relativi al Physical Shop Floor (PS), al Virtual Shop Floor (VS) e al Shop Floor Service System (SSS) [2].

Attraverso la convergenza dei dati raccolti dai PS, VS e SSS nel SDTD, i quattro livelli interagiscono tra di loro per ottimizzare la gestione delle risorse, il piano di produzione e il monitoraggio e controllo della produzione. Il processo operativo del Digital Twin nel Manufacturing è il seguente:

1. Generazione dei piani di gestione delle risorse:

Quando viene assegnato un nuovo compito di produzione, sono generati i primi piani di allocazione delle risorse per attrezzature, materiali, utensili, persone, ecc. Questi piani sono creati in modo completo, considerando una vasta gamma di dati presenti nel SDTD. I piani sono successivamente ottimizzati in maniera iterativa per adattarsi ai cambiamenti in tempo reale nel PS [2].

2. Generazione dei piani di produzione:

Sulla base dei piani di allocazione delle risorse, i servizi all'interno del SSS generano piani di produzione predefiniti che definiscono il processo di produzione del prodotto. Questi piani sono quindi trasmessi al VS, dove sono simulati. Il VS identifica potenziali conflitti e inefficienze e fornisce strategie di ottimizzazione ai servizi nel SSS [2].

3. Esecuzione, monitoraggio e controllo del processo di produzione:

Il PS esegue il processo di produzione in conformità con i piani verificati dal VS. Durante la produzione, il PS trasmette costantemente i dati di stato in tempo reale al VS, consentendo al sistema di aggiornarsi in base ai cambiamenti fisici. Il VS confronta il processo di produzione reale con i piani virtuali e interviene se si verificano eventuali problemi [2].

4. Conclusione del compito di produzione:

Una volta completata la produzione, i prodotti finali vengono generati e il reparto si prepara per il compito successivo.

In basso, la Figura 4 illustra la struttura del Digital twin nel settore manifatturiero, come si può osservare nella parte superiore è rappresentato il livello di servizio, al centro il livello dedicato alla raccolta dei dati, mentre a sinistra è presente il livello fisico e a destra quello virtuale [2].



Figura 4: Struttura del Digital twin nel manufacturing, [2]

2. Analisi comparativa dei paper categorizzati per livello fisico e virtuale

Il seguente capitolo offre un'analisi comparativa dei paper selezionati sull'uso delle tecnologie impiegate per il livello fisico e le metodologie per quello virtuale nella fase di esecuzione, monitoraggio e controllo della produzione. Nell'analisi dei paper revisionati relativi al livello fisico il 50% sono Conference Paper [5,8,9,10,13,14] mentre l'altro 50% sono articoli su rivista [6,7,11,12,15,16]. Per quanto riguarda il livello virtuale, il 40% sono Conference Paper [17,19,20,22,26], mentre il 60% da articoli su rivista [18,21,23,24,25,27,28]. La tabella (1,2) riassume i paper revisionati, specificando per ogni colonna l'autore del paper, la tecnologia o metodologia in base al livello corrispondente e il tipo di pubblicazione.

Autore	Protocollo di Comunicazione	Sensori Utilizzati	Tipo di pubblicazione
Vogt et al. [5]	Non menzionato	RFID	Conference Paper
Tao et al. [6]	Non menzionato	RFID	Articoli su rivista
Monek et al.[7]	Non menzionato	RFID	Articoli su rivista
Mieth et al [8]	Non menzionato	RFID, UWB	Conference Paper
Hinchy et al. [9]	OPC-UA	Sensori di forza, Sensori con telecamera	Conference Paper
Centomo et al. [10]	Non menzionato	Sensori di angolo, sensore a codice barre, sensori di verifica	Conference Paper
Caiza e Sanz [11]	OPC-UA	Non menzionato	Articoli su rivista
Jbair et al. [12]	OPC-UA	Non menzionato	Articoli su rivista
Al-Ali et al. [13]	MQTT, CoAP, AMQP, WebSocket	Non menzionato	Conference Paper
Volkman et al. [14]	OPC-UA	Non menzionato	Conference Paper
Roque Rolo et al. [15]	OPC-UA	Non menzionato	Articoli su rivista
Wu et al. [16]	OPC-UA	Non menzionato	Articoli su rivista

Tabella 1: Paper selezionati per il livello fisico

Autore	Tipo di simulazione in base alla tecnica	Algoritmo	Tipo di pubblicazione
Ján Vachálek et al. [17]	Simulazione basata su eventi discreti	Non menzionato	Conference Paper
Hu et al. [18]	Metodo degli elementi finiti	Markov Chain Monte Carlo	Articoli su rivista
Karanjkar et al.[19]	Simulazione basata su eventi discreti	Non menzionato	Conference Paper
Beregi et al.[20]	Simulazione basata su eventi discreti	Non menzionato	Conference Paper
Gutmann et al. [21]	Simulazione basata su eventi discreti	Non menzionato	Articoli su rivista
Damiani et al [22]	Simulazione basata su eventi discreti	Non menzionato	Conference Paper
Khdoudi et al. [23]	Non menzionato	Twin Delayed Deep Deterministic Policy Gradient	Articoli su rivista
Cao et al. [24]	Non menzionato	Algoritmo Genetico Multi-Obiettivo	Articoli su rivista
Lee et al. [25]	Non menzionato	Algoritmo di apprendimento per rinforzo basato sul Q-Learning e Algoritmo Genetico Multi-Obiettivo	Articoli su rivista
Assad et al. [26]	Non menzionato	Algoritmo di Machine Learning che ha come modello la regressione multipla	Conference Paper
Zhang et al. [27]	Non menzionato	Particle Swarm Optimization	Articoli su rivista
Park et al. [28]	Non menzionato	Dueling network (Q-learning avanzato)	Articoli su rivista

Tabella 2: Paper selezionati per il livello virtuale

Nei successivi paragrafi, sono confrontati i paper revisionati in base all'utilizzo dei sensori e protocolli di comunicazione per il livello fisico.

Per il livello virtuale, invece, sono stati revisionati i paper in base all'utilizzo del tipo di tecniche di simulazione e degli algoritmi.

2.1 Livello Fisico: Sensori - Settore, Focus del processo e funzionalità

L'analisi dei paper revisionati ha fatto emergere delle differenze sull'uso dei sensori in base al settore industriale e al processo in cui sono impiegati, mettendo in luce le funzionalità e i benefici di ciascuno di essi.

Nel settore automobilistico, caratterizzato da un gran numero di componenti [5], la tecnologia RFID è ideale per l'identificazione di ogni singolo elemento. Ogni pezzo ha un tag RFID unico, che viene letto dagli scanner RFID per registrare informazioni quali il numero di serie o il fornitore del componente [5]. Nel paper di Vogt et al. [5] la tecnologia RFID è utilizzata prima delle operazioni di assemblaggio dei motori elettrici. Analogamente, Tao et al. [6] e Monek et al. [7] utilizzano i sensori RFID per monitorare il flusso dei componenti lungo la linea di produzione, evidenziando le stesse funzionalità proposte da Vogt et al. [5].

Mieth et al. [8] si distinguono da Tao et al. [6], Monek et al. [7] e Vogt et al. [5] per l'uso dei sensori RFID in un contesto industriale diverso, quello metallurgico, con particolare attenzione alla produzione di lamiera. Oltre alla tecnologia RFID, Mieth et al. [8] utilizzano anche i sensori UWB. Mentre i sensori RFID garantiscono l'identificazione, la tecnologia UWB offre una localizzazione dei componenti con un'accuratezza nell'ordine dei centimetri [8]. L'uso combinato di questi sensori (RFID, UWB) migliora la qualità dei dati raccolti, fornendo una visione completa del processo produttivo [8].

Sempre nel contesto metallurgico, Hinchy et al. [9] e Centomo et al. [10] si occupano della produzione di lamiera metalliche, focalizzandosi su processi produttivi diversi. Hinchy si concentra sul processo di V-bending, ovvero la piegatura a V di una lamiera metallica. I sensori utilizzati per tale processo includono sensori di forza, che misurano

la forza di compressione applicata durante la piegatura, e una telecamera per registrare visivamente il processo [9].

Centomo et al. [10], invece, si concentrano su un processo più ampio che riguarda tre fasi principali: analisi delle lamiere, piegatura e verifica. Utilizzano sensori di angolo per misurare l'angolo di piegatura, un sensore a codice barre per leggere le informazioni di piegatura e sensori di verifica per assicurare che le lamiere piegate rispettino le tolleranze dimensionali e le specifiche di resistenza richieste [10].

Il sensore più utilizzato dai paper revisionati è l'RFID, a dimostrazione della sua versatilità, adattabilità e facilità di installazione [5,6,7,8]. Il sensore RFID si distingue per la velocità di acquisizione dei dati, permettendo di raccogliere rapidamente un gran numero di informazioni, favorendo la sincronizzazione tra il livello fisico e quello virtuale.

Al contrario, i sensori di forza e i sensori di angolo risultano meno versatili in quanto sono utilizzati in settori manifatturieri e all'interno di processi specifici.

Infine, l'uso combinato di sensori RFID e UWB consente di migliorare la qualità dei dati raccolti, supportando il monitoraggio dei processi produttivi.

La tabella 3 riassume i punti trattati. La tabella è organizzata come segue: la prima colonna indica l'autore, seguita dal sensore utilizzato, dal settore di applicazione e dal focus del processo. Nell'ultima colonna è descritta la funzionalità di ciascun sensore. Per gli autori che non menzionano i parametri è stata utilizzata la dicitura "non specificato".

Autore	Sensore Utilizzato	Settore	Focus del Processo	Funzionalità
Vogt et al. [5]	RFID	Automobilistico	Assemblaggio di motori elettrici	Tracciamento e identificazione dei componenti
Tao et al. [6]	RFID	Non specificato	Non specificato	Tracciamento e identificazione dei componenti
Monek et al. [7]	RFID	Non specificato	Non specificato	Tracciamento e identificazione dei componenti
Mieth et al. [8]	RFID, UWB	Metallurgico	Non specificato	Tracciamento, identificazione e localizzazione accurata dei componenti
Hinchy et al. [9]	Sensori di forza, Sensori con telecamera	Metallurgico	Piegatura a V di lamiere metalliche	Raccolta dei dati sulla forza di compressione e registrazione visiva del processo
Centomo et al. [10]	Sensori di angolo, sensore a codice barre, sensori di verifica	Metallurgico	Piegatura lamiere metalliche	Raccolta dei dati sull'angolo di piegatura e verifica dimensionale delle lamiere

Tabella 3:Riepilogo del confronto sull'uso dei sensori nei paper revisionati

2.2 Livello Fisico: Protocolli di comunicazione - Architettura di rete e obiettivi

I dati acquisiti dai sensori sono trasferiti dal livello fisico a quello virtuale tramite l'utilizzo di protocolli di comunicazione [9]. I protocolli di comunicazione operano secondo diverse architetture di rete, di cui la più comune è quella Client-Server. In questo modello, il server rappresenta il nodo per la memorizzazione dei dati raccolti dai sensori, mentre il client è l'applicazione che invia richieste al server per accedere ai dati e utilizzarli per scopi di analisi nel livello virtuale [13]. Dall'analisi di confronto

emerge che i documenti revisionati differiscono nell'uso dei protocolli di comunicazione in funzione degli obiettivi e dei modelli di architettura di rete adottati. Hinchy et al. [9], Caiza e Sanz [11], Volkmann et al [14], Wu et al [16] e Jbair et al [12] utilizzano il protocollo OPC-UA poiché non solo consente la comunicazione tra dispositivi di diversi produttori [9,11,14,16], ma anche in quanto è la soluzione ideale per applicazioni che richiedono comunicazioni sicure e standardizzate, superando le limitazioni dei protocolli proprietari e proteggendo i dati da attacchi informatici come, ad esempio, il Denial of Service (DoS)¹ e il Man-in-the-Middle (MitM)² [12].

Roque Rolo et al. [15] utilizzano il protocollo OPC-UA con gli stessi obiettivi di Hinchy et al. [9] e Wu et al. [16] adottando, tuttavia, un'architettura di rete a tre livelli. Questo tipo di architettura è strutturata in tre componenti. Il client non comunica direttamente con il server del database ma con un server dell'applicazione. In questo modo il client svolge solo il compito di interfaccia utente e la logica dell'applicazione è inserita nel server applicativo, rendendo questo tipo di soluzione più modulare rispetto all'architettura Client-Server [30].

D'altro canto, Al-Ali et al. [13] adottano un'architettura a più livelli, combinata con il modello publish-subscribe (pub/sub). Utilizzano protocolli di comunicazione leggeri come MQTT, CoAP, AMQP e WebSocket per facilitare la trasmissione di grandi volumi di dati [13].

Emerge che il protocollo OPC-UA è quello maggiormente utilizzato, spiegabile considerando diversi fattori. In primo luogo, gli obiettivi degli autori giocano un ruolo primario; solo nel paper di Al-Ali et al. [13] viene evidenziata la necessità di trasferire rapidamente un grande volume di dati. Questo potrebbe indicare che, nonostante

¹ Denial of Service: è un tipo di attacco informatico che rende indisponibili le risorse del sistema sovraccaricandole con un'enorme quantità di richieste o traffico, impedendo in questo modo agli utenti di accedere ai servizi [12]

² Man-in-the-Middle: Nel seguente attacco, l'Hacker si potrebbe inserire nella trasmissione proprio dei dati tra il livello fisico e virtuale [12]

l'attuale contesto Big Data, la mole di dati da elaborare non è ancora tale da richiedere protocolli di comunicazione più leggeri nella maggior parte dei casi. Un altro aspetto importante è legato ai rischi di sicurezza dei dati, poiché i protocolli più veloci spesso non dispongono delle funzionalità necessarie per gestire tali rischi in modo adeguato. La tabella 3 riassume i punti trattati. La tabella è organizzata come segue: la prima colonna indica l'autore, seguita dal protocollo di comunicazione utilizzato, dall'architettura di rete e dall'obiettivo.

La tabella 4 riassume i punti trattati. La tabella è organizzata come segue: la prima colonna indica l'autore, seguita dal protocollo utilizzato, dall'architettura di rete e obiettivo. Per gli autori che non menzionano i parametri è stata utilizzata la dicitura "non specificato".

Autore	Protocollo di Comunicazione	Architettura di rete	Obiettivo
Hinchy et al. [9]	OPC-UA	Client-Server	Sicurezza dei dati e interoperabilità tra i dispositivi
Caiza e Sanz [11]	OPC-UA	Non specificata	Interoperabilità tra i dispositivi
Jbair et al. [12]	OPC-UA	Non specificata	Sicurezza dei dati
Al-Ali et al.[13]	MQTT, CoAP, AMQP, WebSocket	Pub-Sub a più livelli	Gestione di un grande volume di dati
Volkman et al. [14]	OPC-UA	Client-Server	Interoperabilità tra i dispositivi
Roque Rolo et al. [15]	OPC-UA	Client -Server su tre livelli	Sicurezza dei dati e interoperabilità tra i dispositivi
Wu et al [16]	OPC-UA	Client-Server	Interoperabilità tra dispositivi e sicurezza

Tabella 4:Riepilogo del confronto sull'uso dei protocolli di comunicazione

2.3 Livello virtuale: Tipologia di simulazione in base alla tecnica - Ambito applicativo e Software

Le simulazioni sono strumenti che consentono di riprodurre il sistema produttivo e analizzarne il comportamento in contesti diversi [29].

La simulazione basata su eventi discreti (DES) è una tecnica di modellazione che rappresenta il funzionamento di un sistema come una sequenza di eventi discreti nel tempo. Questa tecnica è particolarmente utile per simulare processi come la produzione, l'assemblaggio e altre operazioni di manufacturing. Ján Vachálek et al. [17] utilizzano la DES per la produzione di auto con il software Tecnomatix Plant Simulation, dimostrando come questa tecnica sia adatta a modellare complessi sistemi produttivi. Anche Karanjkar et al. [19] applicano la DES al processo di assemblaggio per schede a circuito stampato utilizzando SimPy, mentre Beregi et al. [20] adottano questa tecnica con Tecnomatix Plant Simulation. Gutmann et al. [21] impiegano la DES per la produzione di palline da floor-ball con Tecnomatix Plant Simulation, e Damiani et al. [22] per la produzione di piastre di supporto per dischi freno utilizzando AnyLogic Tool.

Il Metodo degli Elementi Finiti (FEM) è una tecnica di analisi numerica utilizzata per risolvere problemi complessi di ingegneria e fisica. Il metodo FEM è scelto in contesti dove è necessaria un'analisi precisa e dettagliata delle proprietà fisiche e strutturali dei prodotti, dimostrando la sua utilità in applicazioni specifiche quali Hu et al. [18], che impiegano il metodo FEM per il processo di rifilatura dei rivestimenti di aerei, utilizzando il software Abaqus.

In sintesi, la simulazione basata su eventi discreti (DES) è quella maggiormente utilizzata in quanto modulare e adatta all'utilizzo in processi produttivi diversi tra loro, con una varietà di software impiegati come SimPy, Tecnomatix Plant Simulation, e AnyLogic Tool. Diversamente, il Metodo degli Elementi Finiti (FEM) ha un campo di

applicazione più ristretto ed è impiegato in contesti che richiedono un'analisi dettagliata delle proprietà fisiche, come il processo di rifilatura dei rivestimenti di aerei.

Inoltre, la scelta del software di simulazione varia in base alle specifiche esigenze e alla complessità del compito di simulazione dimostrando che, oltre alla tecnica di simulazione, il software scelto gioca un ruolo primario nel successo della simulazione. La tabella 5 riassume i punti trattati. La tabella è organizzata come segue: la prima colonna indica l'autore, seguita dal tipo di simulazione, dall'ambito applicativo e software utilizzato per la simulazione.

Autore	Tipo di simulazione in base alla tecnica	Ambito applicativo della simulazione	Software utilizzato per la simulazione
Ján Vachálek et al. [17]	Simulazione basata su eventi discreti	Produzione di auto	Tecnomatix Plant Simulation
Hu et al. [18]	Metodo degli elementi finiti	Processo di rifilatura dei rivestimenti di aerei	Abaqus
Karanjkar et al.[19]	Simulazione basata su eventi discreti	Processo di assemblaggio per schede a circuito stampato	SimPy
Beregi et al.[20]	Simulazione basata su eventi discreti	Processo generico	Tecnomatix Plant Simulation
Gutmann et al. [21]	Simulazione basata su eventi discreti	Produzione di palline floor-ball	Tecnomatix Plant Simulation
Damiani et al [22]	Simulazione basata su eventi discreti	Produzione di piastre di supporto per dischi freno	AnyLogic tool

Tabella 5: Riepilogo del confronto sull'uso delle tipologie di simulazione nei paper revisionati

2.4 Livello virtuale: Algoritmi - Classe di appartenenza, Obiettivo, dettagli del processo e indicatori di performance

Dopo aver analizzato il comportamento del sistema con le tecniche di simulazione è necessario ottimizzare, in base ai risultati, gli indicatori di performance stabiliti utilizzando algoritmi specifici [29].

L'algoritmo Twin Delayed Deep Deterministic Policy Gradient (TD3), descritto nel paper di Khoudi et al. [23], ottimizza i parametri del processo di stampaggio a iniezione di plastica, focalizzandosi su misure come il tempo di riempimento dello stampo, la temperatura dello stampo, la pressione di iniezione e la durata del ciclo di iniezione [23]. L'ottimizzazione di tali parametri migliora la qualità del prodotto, riducendo difetti come bolle d'aria, vuoti, deformazioni e variazioni di colore. Di conseguenza, si ottiene una diminuzione del numero di prodotti difettosi, migliorando l'efficienza produttiva [23]. Analogamente, nel paper di Hu [18] si ha una riduzione dei prodotti difettosi grazie a una maggiore conformità del pezzo rispetto alle specifiche richieste, sebbene il focus sia su un processo e un prodotto differente. Nel paper Hu [18] utilizza l'algoritmo Markov chain Monte Carlo, il quale ottimizza i sistemi di fissaggio nel processo di rifinitura di rivestimenti di aerei. Questa ottimizzazione garantisce che il pezzo di lavoro sia saldamente e correttamente posizionato durante il taglio, riducendo le vibrazioni e assicurando un allineamento preciso [18]. Cao et al. [24], diversamente da Khoudi [23] e Hu [18], si focalizzano sull'ottimizzazione del processo di assemblaggio di componenti di trasmissione di veicoli lungo una linea di produzione con undici stazioni di lavoro [24]. Gli autori utilizzano un algoritmo multi-obiettivo per ottimizzare la distribuzione del carico di lavoro tra le diverse stazioni e identificare i colli di bottiglia [24], riducendo così il tempo ciclo totale e migliorando il bilanciamento della linea di produzione, rendendo

la produzione più efficiente e uniforme [24]. Analogamente a Cao et al [24], Lee et al. [25] e Assad et al. [26] ottimizzano i processi di una linea di assemblaggio, ma differiscono per la tipologia di componenti, le modalità di esecuzione dei processi, gli algoritmi implementati e gli indicatori di performance della produzione; Lee et al. [25] si occupano di componenti per frigoriferi mentre Assad et al. [26] di moduli di batterie. Nel paper di Lee et al. [25] il processo è eseguito su due piani: il primo piano consiste di una linea di produzione con undici stazioni di lavoro, mentre il secondo ne ha dieci. Nel paper di Assad et al. [26], invece, il processo è eseguito su una linea di produzione con quattro stazioni. L'ottimizzazione dei processi in Lee et al. [25] avviene con la combinazione di due algoritmi: un algoritmo di apprendimento per rinforzo basato sul Q-Learning e un algoritmo genetico multi-obiettivo, come in Cao et al. [24]. La combinazione di questi due algoritmi è dovuta al fatto che il primo si occupa di trovare il migliore design delle linee, mentre il secondo svolge le stesse funzionalità presentate in Cao et al [24]. Dopo l'applicazione dei due algoritmi la produzione risulta molto più efficiente in termini di tempo ciclo, tasso di bilanciamento della linea, throughput e working rate. Assad et al. [26], invece, utilizzano un algoritmo di regressione multipla per migliorare il consumo energetico allo scopo di rendere la produzione più sostenibile.

Zhang et al. [27], invece, utilizzano il Particle Swarm Optimization per ottimizzare il processo di saldatura ad arco. Questo processo è svolto in una stazione di una linea di produzione, e l'ottimizzazione mira a ridurre il tempo ciclo [27].

Park et al. [28] invece, utilizzano un algoritmo avanzato di Q-learning, il Dueling Network, per ottimizzare i processi in una Micro Smart Factory. I processi sono eseguiti su una linea di produzione con sette stazioni di lavoro, ciascuna delle quali esegue un processo diverso, con l'obiettivo di ridurre il tempo ciclo [28].

Dall'analisi dei paper revisionati emerge che il sessanta per cento degli algoritmi appartiene alla classe del Machine Learning. Questi algoritmi offrono dei vantaggi,

come la capacità di gestire grandi quantità di dati e di apprendere dalle esperienze passate [23,25,26,28], permettendo di migliorare continuamente le performance dei processi. Ad esempio, analizzando dataset storici, gli algoritmi possono identificare pattern e tendenze utili per ottimizzazioni future [23,25,26,28]. Tuttavia, presentano anche degli svantaggi in quanto richiedono un grande volume di dati per l'addestramento, e questo processo può essere lungo poiché è necessario iterare ripetutamente sui dati per raggiungere buone performance [23].

Gli algoritmi statistici come l'Hidden Markov Model sono, invece, utili per processi con stati nascosti, ovvero di variabili che non sono direttamente osservabili [18].

Gli algoritmi multi-obiettivo sono ideali per gestire diversi criteri di ottimizzazione contemporaneamente. Tuttavia, possono risultare complessi per bilanciare i vari obiettivi [24,25].

Gli algoritmi di ottimizzazione come il Particle Swarm Optimization sono efficaci nel trovare soluzioni globali, ovvero le migliori soluzioni possibili in un ampio spazio di ricerca, ma necessitano di un'attenta parametrizzazione iniziale per funzionare correttamente [27].

In generale, dall'analisi dei paper emerge una notevole diversità negli algoritmi utilizzati, senza che nessuno prevalga sugli altri. Sebbene, in termini di classe di appartenenza, gli algoritmi evolutivi e di machine learning siano più frequentemente impiegati, è interessante osservare che gli algoritmi esatti utilizzati sono tutti differenti. Questo fenomeno può essere spiegato sia dalla varietà dei contesti aziendali, che comportano l'uso di processi con caratteristiche diverse, sia dalla diversità degli indicatori di performance considerati, che richiedono algoritmi specifici per l'ottimizzazione. Ciò potrebbe anche suggerire che la ricerca sugli algoritmi di ottimizzazione sia ancora in evoluzione e che non sia ancora emersa una soluzione standard.

La tabella 6 riassume i punti trattati. La tabella è organizzata come segue: la prima colonna indica l'autore, seguita dal nome dell'algoritmo, obiettivo, dettagli del processo e indicatori di performance della produzione.

Autore	Nome dell'algoritmo	Classe di appartenenza	Obiettivo	Dettagli del processo	Indicatori di performance della produzione
Khdoudi et al. [23]	Twin Delayed Deep Deterministic Policy Gradient	Machine Learning (Reinforcement Learning)	Ottimizzazione del processo di stampaggio a iniezione di plastica.	Il processo è eseguito su una macchina	Numero di prodotti difettosi
Hu [18]	Markov chain Monte Carlo	Statistica	Ottimizzazione del processo di rifilatura delle pelli degli aerei.	Il processo è eseguito tramite una macchina di fresatura a cinque assi (controllo numerico)	Numero di prodotti difettosi
Cao et al. [24]	Algoritmo Genetico Multi-Obiettivo	Algoritmi evolutivi	Ottimizzazione del processo di assemblaggio di componenti di trasmissione per veicoli	Il processo è eseguito su una linea di produzione con undici stazioni di lavoro	Tempo ciclo e tasso di bilanciamento
Lee et al. [25]	Algoritmo di apprendimento per rinforzo basato sul Q-Learning e Algoritmo Genetico Multi-Obiettivo	Machine Learning (Reinforcement Learning) e Algoritmi evolutivi	Ottimizzazione del processo di assemblaggio di componenti dei frigoriferi	Il processo è eseguito su due piani. Il primo piano è costituito da undici stazioni mentre il secondo da dieci.	Tempo ciclo, tasso di bilanciamento della linea, throughput, working rate

Assad et al. [26]	Algoritmo di Machine Learning che ha come modello la regressione multipla	Machine Learning	Ottimizzazione del processo di assemblaggio di una linea di produzione di moduli di batterie, focalizzandosi in particolar modo sull'ottimizzazione di una stazione di saldatura a punti.	Il processo è svolto in quattro stazioni di lavoro di una linea di produzione	Consumo energetico e Tempo ciclo
Zhang et al. [27]	Particle Swarm Optimization	Algoritmo di ottimizzazione	Ottimizzazione del processo di saldatura ad arco	Il processo è svolto in una stazione di una linea di produzione	Tempo ciclo
Park et al. [28]	Dueling network (Q-learning avanzato)	Machine Learning (Reinforcement Learning)	Ottimizzazione dei processi in una Micro Smart Factory	I processi sono eseguiti su una linea di produzione con sette stazioni di lavoro. Ogni stazione ha un processo diverso	Tempo ciclo

Tabella 6: Riepilogo del confronto sull' utilizzo degli algoritmi nei paper revisionati

Conclusioni

L'adozione dei Gemelli Digitali nei sistemi di controllo della produzione rappresenta un'innovazione per l'industria manifatturiera moderna. L'integrazione dei Gemelli Digitali nel sistema di produzione apporta benefici in termini di tempi, qualità del prodotto e costi, rispondendo in modo ottimale ai cambiamenti del mercato e alla fluttuazione della domanda.

È stata quindi condotta una revisione della letteratura sull'implementazione dei Gemelli Digitali nel settore manifatturiero, con un focus sul monitoraggio e controllo della produzione. La revisione è stata suddivisa in due fasi principali: revisione della teoria e delle applicazioni dei Gemelli Digitali, e analisi delle pubblicazioni riguardanti l'implementazione tecnica dei Gemelli Digitali nel monitoraggio e controllo della produzione.

Dalla revisione dei paper è emerso un consolidamento nell'utilizzo dei sensori e dei protocolli di comunicazione, poiché la maggior parte degli autori dei paper revisionati utilizza sensori RFID e il protocollo di comunicazione OPC-UA per il livello fisico. Per il livello virtuale, la tecnica di simulazione maggiormente utilizzata nei paper revisionati è la DES (Discrete Event Simulation). Lo stesso non si può dire per quanto riguarda l'uso degli algoritmi di ottimizzazione dei processi produttivi. La revisione dei paper selezionati suggerisce che gli algoritmi di ottimizzazione rappresentano un'area di ricerca ancora in evoluzione, non essendoci un algoritmo predominante.

La presente revisione ha alcune limitazioni. Una di queste è la mancata esplorazione di parametri che avrebbero potuto fornire confronti più incisivi tra i diversi studi esaminati. Ad esempio, nel contesto del livello fisico, non è stata esaminata la specifica natura dei dati trasferiti tramite i protocolli di comunicazione. Un altro aspetto riguarda la concentrazione della ricerca sulle fasi di controllo e monitoraggio della produzione. Sebbene questo focus abbia contribuito a definire i confini entro cui

confrontare i vari paper, avrebbe arricchito l'analisi includere anche la pianificazione della produzione e il monitoraggio del controllo delle macchine per prevedere eventuali guasti. Un ulteriore aspetto che ha limitato la revisione è l'utilizzo esclusivo di paper open access presenti sul singolo database Scopus. Questo approccio introduce un rischio di bias, poiché potrebbe escludere studi rilevanti pubblicati su altri database o in riviste non open access, limitando così la completezza e la rappresentatività della revisione.

Dato che non esiste un algoritmo predominante per l'ottimizzazione dei processi, ulteriori ricerche potrebbero focalizzarsi sul confronto e lo sviluppo di nuovi algoritmi. Si potrebbe, inoltre, ampliare la ricerca includendo anche il monitoraggio e il controllo delle macchine per la previsione dei guasti, provando a fare un confronto tra gli algoritmi utilizzati per quest'ultimo scopo e quelli che ottimizzano i processi di produzione.

Bibliografia

1. Attaran, Mohsen, e Bilge Gokhan Celik. «Digital twin: Benefits, Use Cases, Challenges, and Opportunities». *Decision Analytics Journal* 6 (marzo 2023): 100165. <https://doi.org/10.1016/j.dajour.2023.100165>. [1]
2. Tao, Fei, Jiangfeng Cheng, Qinglin Qi, Meng Zhang, He Zhang, e Fangyuan Sui. «Digital Twin-Driven Product Design, Manufacturing and Service with Big Data». *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 94, fasc. 9–12 (febbraio 2018): 3563–76. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0233-1>. [2]
3. Kritzinger, Werner, Matthias Karner, Georg Traar, Jan Henjes, e Wilfried Sih. «Digital twin in Manufacturing: A Categorical Literature Review and Classification». *IFAC-PapersOnLine* 51, fasc. 11 (2018): 1016–22. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.474>. [3]
4. Steindl, G.; Stagl, M.; Kasper, L.; Kastner, W.; Hofmann, R. Generic Digital Twin Architecture for Industrial Energy Systems. *Appl. Sci.* 2020, 10, 8903. <https://doi.org/10.3390/app10248903> [4]
5. Vogt, Anna, Philipp Heiner Schmidt, Sebastian Mayer, e Rainer Stark. «Production in the Loop – the Interoperability of Digital Twins of the Product and the Production System». *Procedia CIRP* 99 (2021): 561–66. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.03.077>. [5]
6. Tao, F., et al. "Digital twins and cyber–physical systems toward smart manufacturing and Industry 4.0: correlation and comparison. *Engineering*, 5 (4), 653–661." (2019). [10.1016/j.eng.2019.01.014](https://doi.org/10.1016/j.eng.2019.01.014) [6]
7. Monek, Gergő Dávid, and Szabolcs Fischer. "DES and IIoT fusion approach towards real-time synchronization of physical and digital components in manufacturing processes." *Reports in Mechanical Engineering* 4.1 (2023): 161-174. [7]
8. Mieth, Carina, Anne Meyer, e Michael Henke. «Framework for the Usage of Data from Real-Time Indoor Localization Systems to Derive Inputs for Manufacturing Simulation». *Procedia CIRP* 81 (2019): 868–73. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.03.216>.
9. Hinchy, E.P., N.P. O’Dowd, e C.T. McCarthy. «Using Open-Source Microcontrollers to Enable Digital twin Communication for Smart Manufacturing». *Procedia*

Manufacturing 38 (2019): 1213–19. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.212>, [9]

10. S. Centomo, M. Panato and F. Fummi, "Cyber-Physical Systems Integration in a Production Line Simulator," 2018 IFIP/IEEE International Conference on Very Large-Scale Integration (VLSI-SoC), Verona, Italy, 2018, pp. 237-242, doi: 10.1109/VLSI-SoC.2018.8644836. keywords: {Production; Libraries; Tools; Reactive power; Standards; Hardware design languages; Computational modeling}, [10]
11. Caiza, Gustavo, and Ricardo Sanz. "Digital twin to control and monitor an industrial cyber-physical environment supported by augmented reality." *Applied Sciences* 13.13 (2023): 7503. [10.3390/app13137503](https://doi.org/10.3390/app13137503) [11]
12. Jbair, Mohammad, Bilal Ahmad, Carsten Maple, e Robert Harrison. «Threat Modelling for Industrial Cyber Physical Systems in the Era of Smart Manufacturing». *Computers in Industry* 137 (maggio 2022): 103611. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2022.103611>. [12]
13. Al-Ali, A. R., Ragini Gupta, e Ahmad Al Nabulsi. «Cyber Physical Systems Role in Manufacturing Technologies», 050007. Lakeland, FL, USA, 2018. <https://doi.org/10.1063/1.5034337> [13]
14. Volkmann, M., A. Sidorenko, A. Wagner, J. Hermann, T. Legler, e M. Ruskowski. «Integration of a Feasibility and Context Check into an OPC UA Skill». *IFAC-PapersOnLine* 54, fasc. 1 (2021): 276–81. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2021.08.196>. [14]
15. Roque Rolo, Gonçalo, Andre Dionisio Rocha, João Tripa, e Jose Barata. «Application of a Simulation-Based Digital twin for Predicting Distributed Manufacturing Control System Performance». *Applied Sciences* 11, fasc. 5 (3 marzo 2021): 2202. <https://doi.org/10.3390/app11052202>. [15]
16. Wu, Qingcai, et al. "Application research of digital twin-driven ship intelligent manufacturing system: Pipe machining production line." *Journal of Marine Science and Engineering* 9.3 (2021): 338. [16]
17. Vachálek, Ján, et al. "The digital twin of an industrial production line within the industry 4.0 concept." 2017 21st international conference on process control (PC). IEEE, 2017. [17]

-
18. Hu, Fuwen. "Digital twin-driven reconfigurable fixturing optimization for trimming operation of aircraft skins." *Aerospace* 9.3 (2022): 154. [18]
 19. Karanjkar, Neha, et al. "Digital twin for energy optimization in an SMT-PCB assembly line." 2018 IEEE international conference on Internet of Things and intelligence system (IOTAIS). IEEE, 2018. [19]
 20. Beregi, Richárd, Ádám Szaller, and Botond Kádár. "Synergy of multi-modelling for process control." *IFAC-PapersOnLine* 51.11 (2018): 1023-1028. [20]
 21. Gutmann, Tobias, et al. "A Digital Twin-Based Approach for the Optimization of Floor-Ball Manufacturing." *Electronics* 12.24 (2023): 4979. [21]
 22. Damiani, L., et al. "Simulation and Digital Twin Based Design of a Production Line: A Case Study. The International MultiConference of Engineers and Computer Scientists. IMECS 2018, Hong Kong, Newswood Limited." International Association of Engineers, IAENG (2018). [22]
 23. Khoudi, Abdelmoula, et al. "A Deep-Reinforcement-Learning-Based Digital Twin for Manufacturing Process Optimization." *Systems* 12.2 (2024): 38. [23]
 24. Cao, Xianfeng, et al. "Digital Twin Modeling and Simulation Optimization of Transmission Front and Middle Case Assembly Line." *CMES-Computer Modeling in Engineering & Sciences* 139.3 (2024). [24]
 25. Lee, Donggun, et al. "Digital twin-based analysis and optimization for design and planning of production lines." *Machines* 10.12 (2022): 1147. [25]
 26. Assad, Fadi, et al. "Utilising web-based digital twin to promote assembly line sustainability." 2021 4th IEEE International Conference on Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS). IEEE, 2021. [26]
 27. Zhang, Qinglei, et al. "Process simulation and optimization of arc welding robot workstation based on digital twin." *Machines* 11.1 (2023): 53. [27]
 28. Park, Kyu Tae, et al. "Digital twin and reinforcement learning-based resilient production control for micro smart factory." *Applied Sciences* 11.7 (2021): 2977. [28]

Sitografia

29. <http://www.diag.uniroma1.it/~roma/didattica/SSS14-15/parteD.pdf> [29]

30. <https://www.sci.unich.it/~amato/teaching/old/labdati10/lezioni/serverweb/serverweb.php> [30]

Tools

Word

Excel

Zotero

Ringraziamenti

“Ho fallito più e più volte nella mia vita. E alla fine, è per questo che ho avuto successo” - Michael Jordan

A conclusione di questo percorso, sento l'esigenza di rivolgere i miei più sentiti ringraziamenti alle persone che ho avuto modo di conoscere in questa importante fase della mia vita e che mi hanno aiutato ad avviarmi alla mia futura attività professionale, arricchendo allo stesso tempo, di profonda umanità la mia formazione.

Un ringraziamento ai professori del Politecnico di Torino, la cui eccellenza nell'insegnamento ha costituito il fondamento della mia educazione ingegneristica.

Ai miei amici e colleghi - Andrea, Diego, Vittorio, Umberto, Matteo, Federico, Simone ed Emil - va la mia riconoscenza per la profonda amicizia e per il sostegno reciproco nei progetti condivisi.

Un tributo particolare lo riservo ad Alin e Luigi, per l'amicizia, il sostegno e le numerose lezioni apprese: entrambi mi hanno trasmesso la passione per il miglioramento continuo e la forza di credere in sé stessi. Desidero estendere i miei ringraziamenti a Simone, il mio coinquilino, per il suo sostegno durante questi anni; a Daniele, Emilio, Edoardo, Marco, Stefano, Domenico, Riccardo, Enrico e Nicolò per la loro continua vicinanza.

Infine, ma di fondamentale importanza, desidero ringraziare la mia famiglia: mio padre, mia madre, mia sorella e i miei nonni, per il loro incrollabile sostegno e il loro amore incondizionato, che hanno rappresentato il mio punto di forza.

A tutti voi, la mia più profonda gratitudine per aver reso questa esperienza unica e indimenticabile.