
DIGITAL TWINS E IOT

PANORAMA DEGLI STANDARD ATTUALI

RELAZIONE D'ESAME PER
INSEGNAMENTO DI SISTEMI PER L'IOT TENUTO DAL PROF. LUCA ROMANELLI

STILATO DA
STEFANO ZIZZI

*Università degli Studi di Urbino
Corso di Laurea in Informatica Applicata*



MATRICOLA: 312793

Indice

1	Introduzione	5
1.1	Applicazioni	6
1.1.1	Sensori Virtuali	6
1.1.2	Il Paziente Digitale	7
1.1.3	La Città Digitale	7
2	Aspetti Tecnici	11
2.1	Architettura	11
2.2	Sfide	12
3	Caso Studio	15
3.1	Metodologia di Sviluppo del DT	15
3.2	Benefici	16
4	Conclusioni	19

Capitolo 1

Introduzione

Il concetto di *Digital Twin* (DT) ha catturato un crescente interesse per la sua capacità di creare una controparte software di un *oggetto fisico* (PO). Originariamente concepito da Michael Grieves e presentato nel 2003 all'Università del Michigan, il modello DT ha suscitato notevole interesse sia nel mondo accademico che in quello industriale. L'uso dei DT è iniziato nell'ambito manifatturiero e si è poi esteso alle comunità legate all'Internet of Things (IoT) e ai sistemi cyber-fisici (CPS), attirando l'attenzione di altre comunità tecniche e professionisti di vari settori.

Il DT è stato applicato ed esteso in modi diversi, a seconda del dominio di applicazione e dell'uso previsto. La sua definizione è passata da essere un artefatto o un prodotto industriale a un concetto più generico applicabile a **quasi ogni oggetto fisico** e, in teoria, anche a oggetti intangibili. Come mostrato nella figura 1.1 il DT è descritto come una rappresentazione software completa di un PO singolo, includendo proprietà, condizioni e comportamenti dell'oggetto reale attraverso modelli e dati. È un insieme di modelli realistici che possono simulare il comportamento dell'oggetto nell'ambiente in cui è impiegato, rappresentando e riflettendo il suo gemello fisico per l'intero ciclo di vita dell'oggetto.

Il DT ha un ruolo doppio nell'IoT: da un lato, è implementato e riconosciuto come un approccio importante per la creazione di applicazioni IoT; dall'altro, è naturalmente associato alla sua capacità di rilevamento e attuazione.

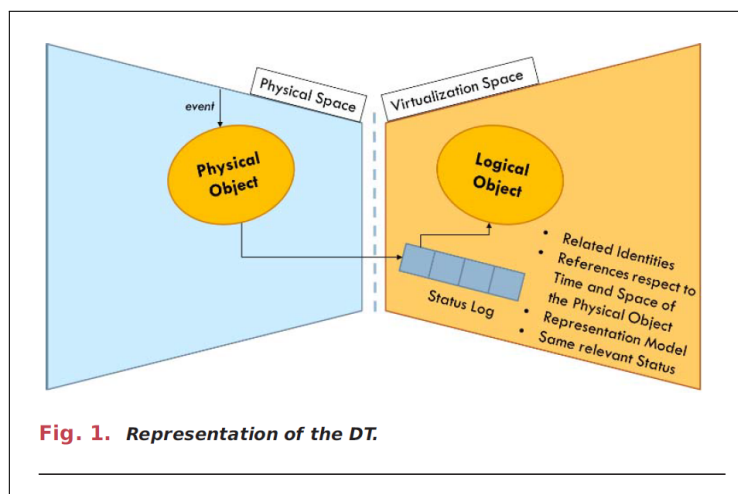


Figura 1.1: Rappresentazione Digital Twins

Attualmente, la discussione sull'IoT è concentrata principalmente sulla **fase operativa**. Questo include il comportamento, il funzionamento, la comunicazione e l'interazione di un dispositivo IoT con altri dispositivi durante l'operatività. Tuttavia, i dispositivi e i sistemi IoT hanno altre fasi del ciclo di vita prima e dopo l'operatività.

1.1 Applicazioni

1.1.1 Sensori Virtuali

Il concetto di Digital Twin (DT) può essere esplorato attraverso lo scenario di creare una *rappresentazione logica* (LO) di un sensore, offrendo diverse possibilità tecniche. Consideriamo prima un singolo sensore e poi un insieme di sensori per fornire una panoramica di una possibile soluzione.

Nel caso di un singolo sensore, sono presentate due opzioni di implementazione:

- Creare una **singola istanza** del LO associata al sensore fisico per formare il DT; oppure
- Creare **diversi LO** associati al sensore fisico per fornire un'entità logica specializzata a diverse applicazioni richiedenti.

Ogni applicazione potrebbe avere requisiti specifici: una potrebbe richiedere l'accesso ai valori del sensore entro intervalli di tempo ristretti, un'altra potrebbe richiedere i valori interrogando l'oggetto, e così via. L'associazione tra l'LO e un'applicazione è rappresentata tramite API specializzate. Esistono anche diverse opzioni di distribuzione che possono essere implementate, ad esempio, la distribuzione e l'istanziatura degli LO solo nello spazio di virtualizzazione e sulla piattaforma di supporto, o nei domini dei fornitori di applicazioni.

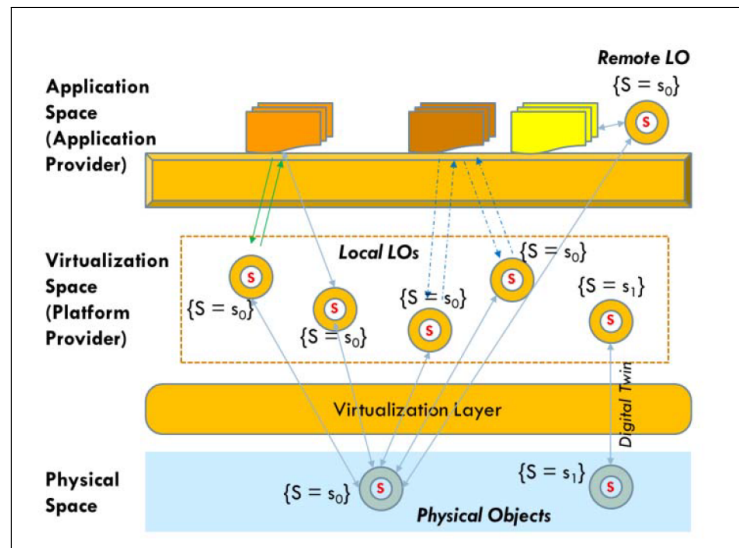


Figura 1.2: Virtualizzazione e replica di LO

Nella figura 1.2, un *sensore fisico* (PO) viene rappresentato insieme a diverse repliche software, ovvero gli LO. Ogni replica è istanziata per offrire informazioni e funzionalità a un set limitato di applicazioni, soddisfacendo pienamente i requisiti specifici delle applicazioni in termini di raccolta dati o politiche di gestione. Se il PO è programmabile, gli LO possono eseguire comandi sul dispositivo fisico, in questo caso un attuatore, per un caso di applicazione specifico.

Tuttavia, si notano alcune possibili problematiche. La più comune è che il PO spesso dispone di **capacità limitate di elaborazione**, archiviazione e comunicazione. Aumentare il numero di LO correlati può richiedere livelli di elaborazione, comunicazione e capacità di archiviazione che potrebbero facilmente e rapidamente superare le capacità del PO. Inoltre, mantenere **diversi collegamenti di comunicazione** può essere difficile e costoso. Inoltre, diversi LO dovrebbero essere fortemente sincronizzati con il PO per mantenere la sua coerenza, ad esempio evitando comandi in conflitto o cambiamenti di stato.

I diversi LO non devono necessariamente essere sincronizzati tra loro, ma devono essere **sincronizzati con il PO**. La necessità di sincronizzazione può portare a una situazione in cui lo stato delle diverse repliche viene costantemente aggiornato anche se ogni LO rappresenta sostanzialmente lo stesso stato. Se è necessaria una forte coerenza tra lo stato di tutti gli LO e il PO, dovrebbe essere introdotto

un **sistema transazionale**¹ per sincronizzare tutti gli oggetti. Tuttavia, ciò potrebbe risultare ingombrante e, in alcuni casi, non utile se gli LO possono essere aggiornati indipendentemente.

In casi dove più di un sensore viene virtualizzato, l'insieme aggregato di sensori può essere utilizzato da una o più applicazioni. Alcune relazioni tra i sensori possono essere determinate nel tempo dalla piattaforma di virtualizzazione, ad esempio, tramite tecniche di machine learning, e sfruttate per migliorare il funzionamento dei sensori.

1.1.2 Il Paziente Digitale

Nel settore sanitario, il DT si concentra sul miglioramento dell'assistenza al paziente tramite un monitoraggio preciso e la raccolta di dati sanitari. Il "Paziente Digitale" è rappresentato da un insieme di sensori sul corpo del paziente e nell'ambiente circostante, che raccolgono dati fisiologici, interazioni con l'ambiente e altre informazioni rilevanti. Questo approccio permette un **monitoraggio efficace** del paziente nel suo contesto quotidiano, migliorando la qualità della vita e riducendo la necessità di ospedalizzazione. La sicurezza e la privacy dei dati diventano aspetti cruciali, data la sensibilità delle informazioni sanitarie personali raccolte.

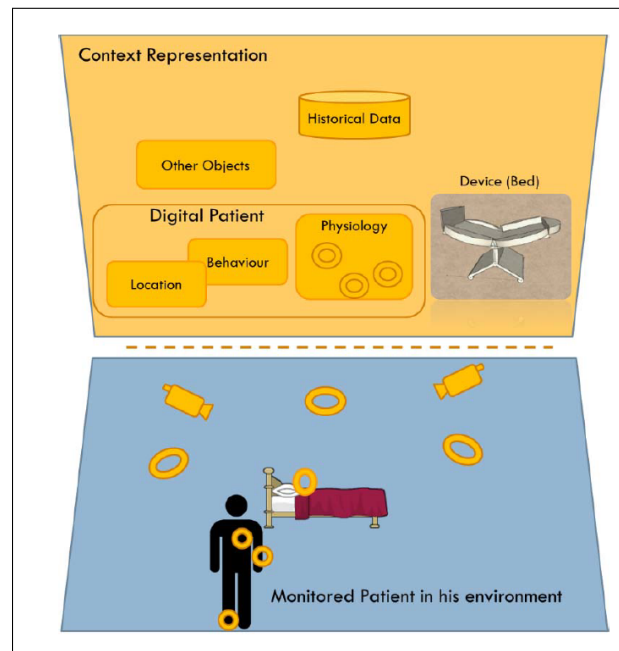


Figura 1.3: Paziente Digitale

1.1.3 La Città Digitale

Il concetto di Digital Twin (DT) è strettamente legato allo studio delle smart city. Questo approccio è notevole per la sua capacità di composizione, memorizzazione, rappresentazione e contestualizzazione, oltre che per l'**augmentazione**² e la **servitizzazione**³. L'utilizzo del DT, partendo da oggetti semplici fino a complesse aggregazioni come un ospedale, consente una gestione efficace della città attraverso il monitoraggio continuo, la programmabilità, l'analisi di grandi quantità di dati, e la previsione di fenomeni quali il traffico o le congestioni.

Il DT si allinea bene con l'idea di smart city come sistemi complessi, mostrando comportamenti real-time e emergenti a lungo termine. L'applicazione pratica del DT inizia con parti piccole della città per poi espandersi gradualmente. Può essere adottato sia per singoli elementi urbani sia per interi quartieri,

¹Un'unità logica di elaborazione che corrisponde a una serie di operazioni fisiche elementari (di lettura o scrittura) sul database che quindi generano una variazione del suo stato.

²Tecnica di aumento artificiale del set di addestramento creando copie modificate di un set di dati utilizzando dati esistenti

³Il passaggio dalla vendita di un prodotto alla fornitura di servizi con l'obiettivo di creare maggior valore per il cliente

seguendo approcci bottom-up o top-down.

Il concetto di DT supera il problema dei silos applicativi⁴ nelle smart city, consentendo una migliore composizione e aggregazione di funzionalità a prescindere dal dominio applicativo. Grazie all'approccio bottom-up del DT, ogni oggetto può essere accessibile tramite API e integrato in strutture più complesse. Ciò garantisce una composizione flessibile e programmabilità.

Infine, una piattaforma smart city deve gestire un gran numero di oggetti e le loro istanze, richiedendo funzionalità di autogestione per evitare l'intervento umano. Le proprietà del DT sono dunque cruciali per analizzare e influenzare il comportamento della città:

1. *Rappresentatività e contestualizzazione* nello spazio e nel tempo: determinati oggetti, ad esempio, un sistema semaforico, un incrocio, un edificio, possono avere caratteristiche e comportamenti specifici che possono avere un impatto su altre attività cittadine.
2. *Componibilità*: è importante per la capacità di aggregare oggetti più semplici in oggetti più complessi e di aumentare le dimensioni mantenendo comunque il controllo sui componenti e sull'intera aggregazione.
3. *Memorizzazione*: per studiare il comportamento di una città o di una parte di essa. È fondamentale raccogliere dati storici ed essere in grado di analizzarli per determinare modelli e problemi e prevedere comportamenti futuri.
4. *Augmentazione*: la capacità di aggiungere funzionalità e di programmare il DT sono capacità salienti per incidere sul comportamento della città e per meglio adattarsi alla situazione attuale o per cercare di modificarla intervenendo su oggetti cruciali.

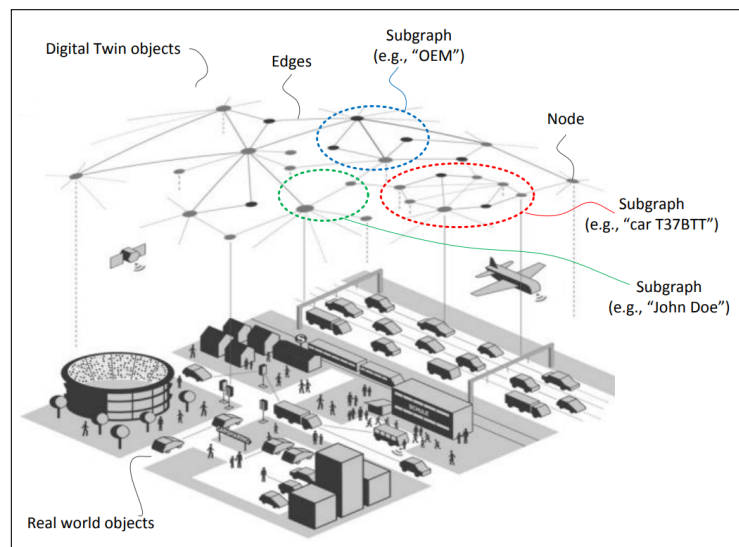


Figura 1.4: Esempio Digital Twins

La Figura 1.4 mostra come gli oggetti del mondo reale come auto, persone, edifici, aerei, autostrade, case, sistemi di trasporto sono rappresentati digitalmente come Digital Twins [1]. Un oggetto del mondo reale non è rappresentato da un singolo nodo, ma da un sottoinsieme di nodi e archi. Ad esempio, un'auto "T37BTT" è rappresentata da diversi nodi e archi in un sottoinsieme. I nodi nel sottoinsieme rappresentano, ad esempio, il design CAD dell'auto, i record di servizio, il suo stato attuale (dove si trova, la sua velocità, ecc.), le informazioni sulla sua produzione (dove è stata prodotta, da quali macchine, ecc.). Allo stesso modo, un altro sottoinsieme rappresenta una persona, "John Doe", e i suoi nodi e archi contengono la sua identità, i record medici, l'agenda, ecc. Notare che c'è un arco che collega "John" all'auto "T37BTT", e questo potrebbe rappresentare, ad esempio, che "John sta attualmente guidando l'auto T37BTT". Non appena John arriva a destinazione e spegne la sua auto, questo arco "guida"

⁴Applicazioni che non interagiscono con altre applicazioni o sistemi informativi

scomparirà dal grafo. Va notato che, nonostante il cambiamento nel grafo, tutte le transazioni vengono registrate dal middleware sottostante per ulteriori analisi.

Servizio: con le informazioni storiche tra "*John*" e la sua auto "*T37BTT*", possiamo, ad esempio, prevedere quando John si sveglierà la mattina successiva per guidare la sua auto al lavoro e l'OEM (Original Equipment Manufacturer) può utilizzare queste informazioni per inviare un aggiornamento software all'auto attraverso l'aria mentre John dorme.

Design: il feedback fornito dai Digital Twins su come le istanze del prodotto vengono utilizzate sul campo da migliaia di utenti e su come si deteriorano in ambienti diversi (ad esempio, Europa vs Nord America) può guidare le specifiche del prodotto di prossima generazione.

Capitolo 2

Aspetti Tecnici

2.1 Architettura

Il modello architetturale funzionale generale per le piattaforme Digital Twin (DT)[5] è illustrato in dettaglio nelle figure di riferimento, mostrando un'ampia gamma di approcci nello sviluppo e nell'implementazione di queste piattaforme. La figura 2.2, in particolare, presenta un modello architetturale dettagliato che enfatizza un **approccio stratificato**, fondamentale per la comprensione tecnica e l'implementazione delle piattaforme DT.

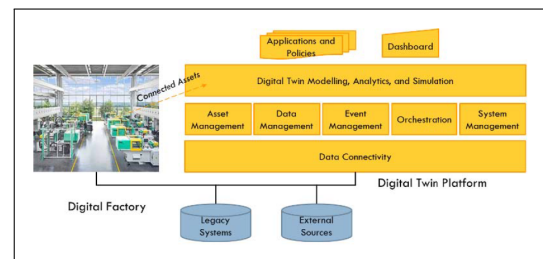


Figura 2.1: Modello di un architettura industriale che supporta i DT derivato da PREDIX

Le piattaforme DT emergenti si distinguono per il background delle aziende e dei gruppi di ricerca coinvolti nel loro sviluppo. Alcuni, con una forte esperienza nel settore manifatturiero e focalizzati sull'Industria 4.0, sviluppano piattaforme basate sulle esigenze delle grandi aziende manifatturiere. La figura 2.1 mostra un esempio di un'architettura di piattaforma industriale che supporta il concetto di DT, integrando dispositivi IoT, servizi cognitivi, simulazione e visualizzazione, oltre all'integrazione con l'infrastruttura IT esistente.

Iniziative come quella di Microsoft[3] e IBM [2] si concentrano sul fornire soluzioni IoT per l'Internet industriale e il DT, con architetture che si basano sul collegamento dei dispositivi alle funzionalità di base della piattaforma.

SAP e Amazon rappresentano approcci che si concentrano maggiormente sull'IoT e vedono le loro piattaforme come base per supportare il DT. Questi approcci includono funzionalità come l'integrazione **twin-to-device** e **twin-to-twin**¹, e la figura 2.2 mostra come questi elementi siano integrati nell'architettura complessiva.

La figura 2.2 mostra una rappresentazione dettagliata del modello architettonico precedentemente presentato. Essa considera molte delle capacità e funzioni identificate come proposte dall'accademia e dall'industria. La stratificazione è coerente con le tendenze generali nello sviluppo di grandi middleware ed è in linea con l'ampiezza di portata di una piattaforma DT e le sue esigenze in termini di separazione delle preoccupazioni.

¹**twin-to-device:** il Digital Twin raccoglie dati dal dispositivo reale, come sensori o sistemi integrati, e li utilizza per aggiornare il suo modello virtuale.

twin-to-twin: più Digital Twin possono scambiare informazioni, sincronizzarsi o collaborare per ottenere una visione più ampia o un'analisi più complessa.

I *livelli inferiori* sono quelli che interagiscono con i dispositivi, l'edge e le risorse cloud, e prendono in considerazione come utilizzarli, come virtualizzarli e come sfruttarne le caratteristiche. Alcune funzioni sono necessarie per allocare le risorse giuste e per virtualizzare funzioni/oggetti nell'infrastruttura. Inoltre, a causa delle esigenze rigorose di alcuni LOs, la comunicazione deve essere ottimizzata, specialmente per supportare efficacemente l'intreccio. La stratificazione è essenzialmente derivata dagli sviluppi attuali nella virtualizzazione delle risorse di rete..

I *livelli superiori* si occupano delle principali proprietà del DT, il *livello oggetto* è dedicato al ciclo di vita degli LOs e alla loro esistenza. Ciò comprende funzioni per la modellazione di oggetti, istanziazione, auto-gestione, orchestrazione, intreccio e altro.

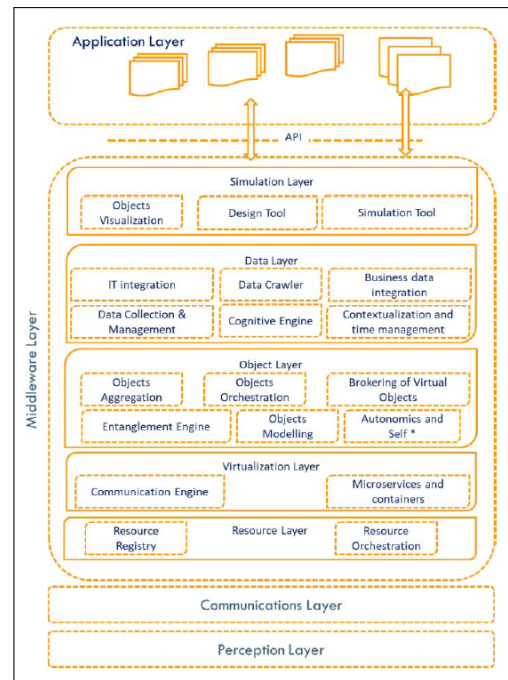


Figura 2.2: Framework Generale per DT

Il *livello dei dati* si occupa di raccogliere e contestualizzare i dati, nonché di eseguire analisi dei dati e inferenze informative. Inoltre, ci sono funzioni di crawling ² per raccogliere informazioni esterne non fornite direttamente dai POs.

Il *livello di simulazione* supporta la visualizzazione dei DTs, la loro simulazione così come strumenti per la progettazione e la definizione di essi. Tutta questa infrastruttura si basa su API aperte in modo da essere programmabile a diversi livelli e con diverse capacità di astrazione. Le applicazioni saranno in grado di interagire con tutte le funzioni della piattaforma necessarie tramite API ben formate e dati strutturati.

2.2 Sfide

Il concetto del gemello digitale, che crea una replica virtuale di un asset fisico, presenta alcune sfide significative. Innanzitutto, esiste sempre una **discrepanza tra la realtà fisica e la sua replica digitale**, poiché la trasmissione dei dati dipende dai dispositivi IoT che possono subire malfunzionamenti o disconnessioni. Inoltre, i gemelli digitali richiedono il contributo di professionisti del settore, che devono essere qualificati per fornire feedback accurati, modificare e conservare i dati.

Un'altra sfida riguarda l'**uso dell'intelligenza artificiale** e la **precisione dei modelli di machine learning**. La domanda fondamentale è quanto possiamo fidarci delle loro previsioni. Pertanto, è cruciale costruire fiducia a ogni livello e per ogni componente del sistema di gemelli digitali. Questo richiede l'istituzione di standard, la sensibilizzazione e il miglioramento delle tecnologie, processi che necessitano di tempo e sforzi.

In termini di **sicurezza e privacy**, proteggere i sistemi di gemelli digitali da accessi non autorizzati, abusi, modifiche o divulgazioni rappresenta una sfida significativa. Poiché questi sistemi elaborano grandi volumi di dati possibilmente sensibili e personali, diventano un bersaglio per attori malevoli e attacchi informatici. Inoltre, l'uso di dispositivi e sensori IoT aggiunge complessità nella realizzazione di adeguate misure di sicurezza, soprattutto perché i controlli di sicurezza tradizionali potrebbero non essere adeguati. Il trattamento dei dati personali degli utenti potrebbe inoltre sollevare rischi normativi, richiedendo la conformità a regolamenti sulla privacy come il GDPR in Europa o leggi nazionali pertinenti.

²Un web crawler è uno strumento per indicizzare e scaricare contenuti da Internet, quindi vengono archiviati nei database dei motori di ricerca

La **mancaanza di standardizzazione** è un'altra sfida critica [4]. Questo fattore influenza la sicurezza, la privacy, le interazioni, i ruoli, i protocolli di contributo, la trasmissione dei dati e la sincronizzazione tra il mondo virtuale e quello fisico. Impostare standard globali aiuterebbe a diffondere più rapidamente il trend dei gemelli digitali e a renderlo una realtà più velocemente.

Infine, un problema che affrontano i gemelli digitali è la **diversità dei dati** e le loro molteplici fonti. Questo si verifica a causa delle diverse fonti attraverso le quali i dati vengono catturati, nonché della diversità dei tipi di dati, che causano problemi nel loro trattamento e nella costruzione di modelli di machine learning a causa della loro eterogeneità.

Capitolo 3

Caso Studio

Questo caso di studio rappresenta applicazioni concrete del concetto di Digital Twin (DT). L'obiettivo è mostrare l'efficacia e la versatilità di questo approccio, per eventualmente stimolare ulteriori investimenti e adozioni nelle infrastrutture industriali esistenti.

Il caso riguarda la **fabbrica intelligente cyber-fisica di Festo** [6], basato su strutture dell'Università di Sheffield e riflette le realtà dell'industria manifatturiera.

Le sue risorse sono state interconnesse e monitorate su un'infrastruttura di **rete TCP/IP/Ethernet/OPC-UA** utilizzando sensori e tecnologie **RFID**. Ha adottato un controllo distribuito con ciascun modulo dotato del proprio controllore logico programmabile (PLC). Il sistema è gestito utilizzando il **Manufacturing Execution System (MES)** collegato ad un **database (ACSE 2018)**.

È composto da due Isole produttive e da una rete logistica di trasportatori, trasportatori per il trasporto dell'entità flusso e un veicolo autonomo (Robotino). Le postazioni di lavoro sono realizzate con sei stazioni e due ponti di trasferimento. Ulteriori dettagli sulla fabbrica intelligente Festo CP sono disponibili in (ACSE 2018). Gli ordini di produzione vengono effettuati dal MES. Un pezzo viene introdotto nella stazione "Top case". Questo viene ispezionato nella stazione "Misura" e poi trasportato attraverso le restanti stazioni: "Bottom case", "Pressa", "Tunnel termico", "Ponti" e "Output" in quest'ordine. Nella stazione di "Output" il prodotto finito/scartato viene rimosso dalla linea di produzione.

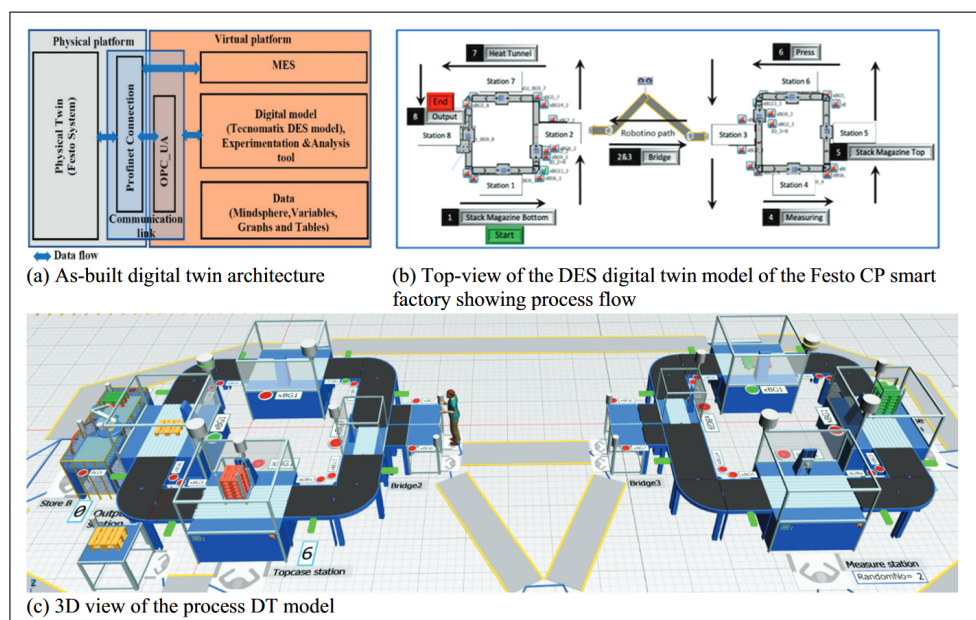


Figura 3.1: Panoramica del gemello digitale sviluppato della Smart Factory Festo CP.

3.1 Metodologia di Sviluppo del DT

Il processo di sviluppo del DT della fabbrica intelligente di Festo ha incluso diverse fasi chiave:

- *Progettazione del Modello Concettuale*: questa fase iniziale ha definito l'obiettivo del progetto, la descrizione del sistema e la costruzione di un modello concettuale. Si è trattato di identificare i processi e gli attributi del prodotto da digitalizzare, definendo dati fisici, comportamenti dei processi e funzionalità da modellare o visualizzare;
- *Sviluppo dei Modelli Virtuali*: in questa fase sono stati costruiti i modelli 3D e i modelli di simulazione dei processi. L'attenzione è stata posta sulla creazione di interfacce OPC-UA per stabilire una comunicazione bidirezionale tra il sistema fisico e la piattaforma virtuale;
- *Sviluppo del Pannello di Controllo*: questa fase ha aggiunto elementi di controllo come pulsanti e algoritmi di controllo del modello virtuale, oltre a elementi di input e output per i dati;
- *Sviluppo del Livello dei Dati*: ha incluso l'inclusione di elementi di archiviazione dei dati e interfacce per la visualizzazione delle informazioni,
- *Sviluppo del Livello Intelligente*: ha coinvolto l'inclusione di algoritmi per generare dati virtuali e processare dati per fornire informazioni necessarie durante esperimenti controllati,
- *Verifica e Validazione del Modello*: questi passaggi finali sono stati eseguiti in modo intermittente durante le fasi di sviluppo per garantire che le operazioni modellate fossero prive di errori e aderissero al design del progetto.

Il prodotto è una semplice composizione di una custodia superiore e inferiore per un telefono. L'analisi del flusso del processo ha fornito dettagli sui servizi e il loro peso sugli attributi del prodotto. Queste informazioni vengono convogliate lungo la linea di produzione utilizzando la tecnologia RFID montata sui supporti. Il chip RFID sul supporto consente una trasmissione progressiva dei dati del prodotto man mano che il prodotto fisico viene elaborato. Ciò consente un aggiornamento sincronizzato in tempo reale del gemello digitale del prodotto. La figura 3.2 presenta le immagini del gemello digitale del prodotto: un modello geometrico ed estratti del suo modello informativo.

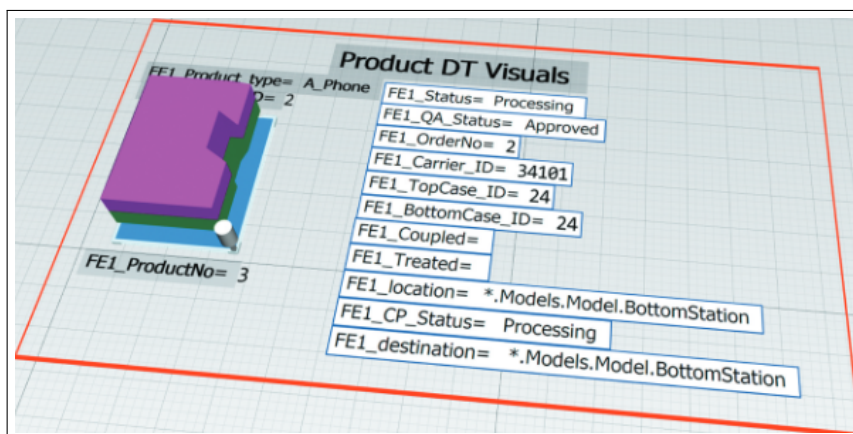


Figura 3.2: Visuale del gemello digitale del prodotto.

3.2 Benefici

L'implementazione del DT ha portato diversi benefici significativi:

- *Capacità di Ricerca e Sperimentazione*: Il DT ha ampliato le capacità di ricerca e sperimentazione del sistema, consentendo analisi diagnostiche e predittive.
- *Flessibilità nell'Insegnamento e Formazione*: Il DT ha introdotto flessibilità nell'insegnamento e nella formazione, superando i limiti di spazio e accessibilità al sistema fisico.
- *Ottimizzazione della Produzione*: Gli esperimenti hanno rivelato colli di bottiglia e permesso l'adozione di strategie correttive per migliorare la produzione.

- *Monitoraggio e Gestione:* Il DT fornisce strumenti per il monitoraggio e la gestione efficace dei processi produttivi, con la possibilità di simulare diversi scenari e configurazioni.

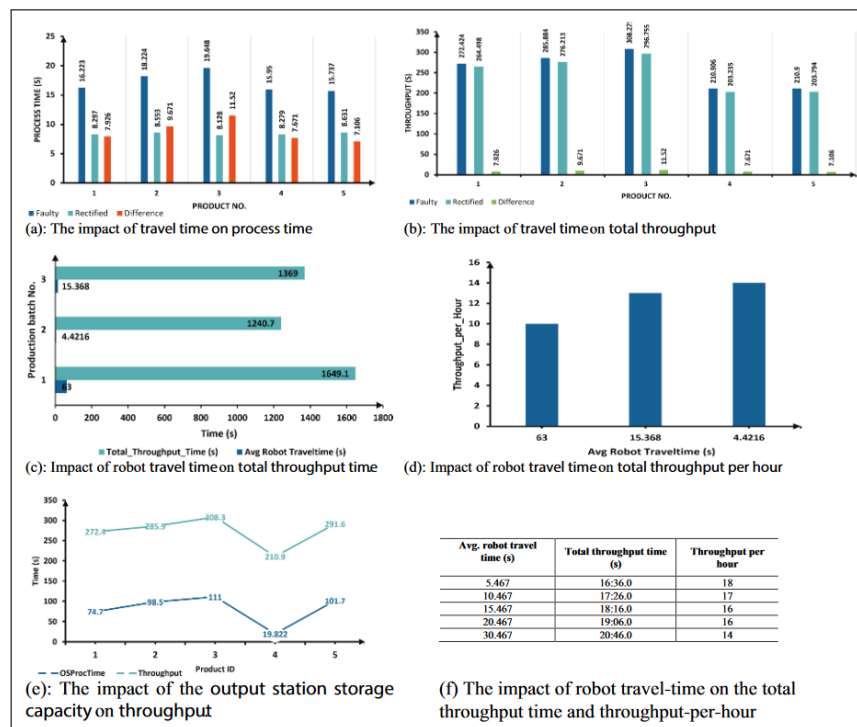


Figura 3.3: Risultati sperimentali che rivelano maggiori dettagli sui colli di bottiglia identificati e sul comportamento del sistema.

Capitolo 4

Conclusioni

La presente relazione ha esplorato in modo approfondito il concetto di Digital Twin all'interno dell'ecosistema dell'IoT, evidenziando come questa tecnologia sia divenuta una pietra angolare nella trasformazione digitale di numerosi settori. I Digital Twins, con la loro capacità di creare un legame sinergico tra il mondo fisico e quello digitale, hanno aperto nuove prospettive nella gestione dei dati, nel monitoraggio, nella simulazione e nell'ottimizzazione dei processi.

Le applicazioni dei DT spaziano dalla virtualizzazione dei sensori all'assistenza sanitaria, fino alla pianificazione urbana nelle smart cities. Questa versatilità dimostra la loro capacità di adattarsi e di fornire soluzioni specifiche per diverse esigenze, migliorando l'efficienza operativa e la qualità della vita. Nel settore sanitario, ad esempio, i DT offrono modelli personalizzati per il monitoraggio dei pazienti, mentre nelle smart cities contribuiscono a ottimizzare la gestione delle risorse urbane.

Tuttavia, la tecnologia DT non è priva di sfide. La necessità di garantire la sicurezza e la privacy dei dati, di superare la discrepanza tra modello digitale e realtà fisica, e di affrontare la mancanza di standardizzazione rimangono ostacoli significativi. Queste sfide richiedono un impegno concertato da parte degli sviluppatori, degli utenti e delle autorità di regolamentazione per assicurare che i DT siano implementati in modo sicuro ed efficace.

Il caso studio sulla fabbrica intelligente di Festo illustra in modo esemplare come i DT possano essere efficacemente utilizzati in un ambiente industriale. Questo esempio evidenzia i benefici tangibili che i DT possono offrire in termini di ottimizzazione dei processi produttivi, miglioramento della manutenzione predittiva e potenziamento della ricerca e dello sviluppo.

Guardando al futuro, i DT sono destinati a svolgere un ruolo sempre più centrale nell'IoT. Con l'evoluzione delle tecnologie di raccolta dati, come i sensori avanzati e l'intelligenza artificiale, i DT diventeranno più accurati, reattivi e interconnessi. Questo sviluppo non solo potenzierà le applicazioni attuali ma aprirà anche la strada a nuove opportunità, come ambienti completamente integrati tra fisico e digitale e sistemi avanzati di gestione delle emergenze.

In conclusione, i Digital Twins nell'IoT rappresentano una svolta fondamentale nella digitalizzazione, offrendo strumenti potenti per il monitoraggio, la simulazione e l'ottimizzazione in vari ambiti. Mentre affrontiamo le sfide inerenti a questa tecnologia, possiamo anche anticipare un futuro in cui i DT saranno ancora più integrati e influenti, guidando l'innovazione e migliorando la qualità della vita in modi attualmente inimmaginabili.

Bibliografia

- [1] Arquimedes Canedo. “Industrial IoT lifecycle via digital twins”. In: *Proceedings of the Eleventh IEEE/ACM/IFIP International Conference on Hardware/Software Codesign and System Synthesis. CODES '16*. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2016, p. 1. ISBN: 978-1-4503-4483-8. DOI: 10.1145/2968456.2974007. URL: <https://doi.org/10.1145/2968456.2974007>.
- [2] Mukesh Dialani. “Digital Twins — Transforming Supply Chains and Operations”. In: (mar. 2022), p. 9. URL: <https://www.ibm.com/downloads/cas/LVJKXXNA>.
- [3] *Gemelli digitali – Modellazione e simulazioni — Microsoft Azure*. URL: <https://azure.microsoft.com/it-it/products/digital-twins>.
- [4] Michael Jacoby e Thomas Usländer. “Digital Twin and Internet of Things—Current Standards Landscape”. In: *Applied Sciences* 10.18 (gen. 2020). Number: 18 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute, p. 6519. ISSN: 2076-3417. DOI: 10.3390/app10186519. URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/18/6519> (visitato il 30/12/2023).
- [5] Roberto Minerva, Gyu Myoung Lee e Noël Crespi. “Digital Twin in the IoT Context: A Survey on Technical Features, Scenarios, and Architectural Models”. In: *Proceedings of the IEEE* 108.10 (ott. 2020). Conference Name: Proceedings of the IEEE, pp. 1785–1824. ISSN: 1558-2256. DOI: 10.1109/JPROC.2020.2998530. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9120192>.
- [6] Igiri Onaji et al. “Digital twin in manufacturing: conceptual framework and case studies”. In: *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 35.8 (3 ago. 2022). Publisher: Taylor & Francis _eprint: <https://doi.org/10.1080/0951192X.2022.2027014>, pp. 831–858. ISSN: 0951-192X. DOI: 10.1080/0951192X.2022.2027014. URL: <https://doi.org/10.1080/0951192X.2022.2027014> (visitato il 30/12/2023).

