

ALMA MATER STUDIORUM – UNIVERSITÀ DI BOLOGNA  
CAMPUS DI CESENA

---

Scuola di Scienze  
Corso di Laurea in Ingegneria e Scienze Informatiche

STUDIO DELL'APPLICAZIONE DEI  
DIGITAL TWIN IN AMBITO  
OSPEDALIERO

*Relazione finale in*  
SISTEMI EMBEDDED E INTERNET-OF-THINGS

*Relatore*

Prof. ALESSANDRO RICCI

*Presentata da*

FRANCESCO SALVATORE  
GRANDINETTI

---

Seconda Sessione di Laurea  
Anno Accademico 2017 – 2018



## PAROLE CHIAVE

Digital twin  
Industria 4.0  
Industrial IoT  
Mirror worlds  
Smart hospital



# Indice

<b>Introduzione</b>	<b>vii</b>
<b>1 Digital Twin</b>	<b>1</b>
1.1 Introduzione . . . . .	1
1.1.1 Origini . . . . .	1
1.1.2 Oggi . . . . .	2
1.2 Struttura di un Digital Twin . . . . .	3
1.3 Ciclo di vita di un Digital Twin . . . . .	5
1.3.1 See . . . . .	5
1.3.2 Think . . . . .	6
1.3.3 Do . . . . .	6
1.4 Vantaggi esclusivi per le aziende . . . . .	6
1.5 L'importanza dei Digital Twin per i prodotti . . . . .	7
1.5.1 Fase di design . . . . .	8
1.5.2 Fase di ingegnerizzazione . . . . .	8
1.5.3 Fase operativa . . . . .	9
1.5.4 Fase di manutenzione e potenziamento . . . . .	10
1.6 Casi di applicazioni reali . . . . .	10
<b>2 Piattaforme per i Digital Twin</b>	<b>13</b>
2.1 GE Predix . . . . .	14
2.2 SAP IoT Application Enablement . . . . .	17
2.3 AWS IoT . . . . .	18
<b>3 Internet-of-Things e Industrial IoT</b>	<b>21</b>
3.1 Definizione . . . . .	21
3.2 Architettura . . . . .	22
3.2.1 Raccolta dati . . . . .	23
3.2.2 Comunicazione dati . . . . .	25
3.2.3 Elaborazione dati . . . . .	25
3.3 Ambiti di sviluppo . . . . .	26
3.4 Uso in ambito industriale: Industrial IoT . . . . .	27

<b>4</b>	<b>Oltre il manifatturiero</b>	<b>29</b>
4.1	Utilizzo in altri ambiti di applicazione . . . . .	29
4.2	Ambito ospedaliero . . . . .	30
<b>5</b>	<b>Mirror World</b>	<b>33</b>
5.1	Cosa sono i Mirror World . . . . .	33
5.2	L'importanza assunta dai dati . . . . .	35
5.3	Le entità attive dei Mirror World: gli agenti . . . . .	35
5.4	Mirror World al giorno d'oggi . . . . .	36
<b>6</b>	<b>Caso di studio: ospedale intelligente</b>	<b>39</b>
6.1	Modello . . . . .	39
6.1.1	Rappresentazione dei pazienti . . . . .	40
6.1.2	Rappresentazione dell'attrezzatura medica . . . . .	41
6.1.3	Rappresentazione del personale medico . . . . .	41
6.1.4	Rappresentazione delle stanze . . . . .	41
6.1.5	Rappresentazione dei reparti . . . . .	42
6.1.6	Digital twin dell'ospedale . . . . .	43
6.2	Esempi di interazioni . . . . .	43
6.3	Caratteristiche del sistema proposto . . . . .	45
6.4	Difficoltà nella realizzazione del sistema . . . . .	46
	<b>Conclusioni</b>	<b>49</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>51</b>
	<b>Elenco delle figure</b>	<b>52</b>

# Introduzione

Nei vari anni che si sono succeduti dalla nascita e dallo sviluppo dell'uomo, il mondo ha visto diverse rivoluzioni tecnologiche, ognuna delle quali ha portato nella società grandissimi cambiamenti. La *prima rivoluzione industriale* è avvenuta alla fine del 1700 e ha fatto conoscere al mondo la macchina a vapore, portando in tutto il mondo conosciuto nuove tecnologie collegate ad essa, liberando il mondo agricolo dalla forza lavoro e spingendolo nel campo della metallurgia, dando una nuova spinta all'economia e migliorando le condizioni generali della gente. La *seconda rivoluzione industriale* avvenuta solo un secolo dopo ha reso possibile la scoperta dell'elettricità e ha dato il via al mondo industriale come è conosciuto oggi, con la nascita del capitalismo e con la ricerca da parte degli imprenditori dell'aumento del profitto, dando invece nuova linfa vitale alla vita in notturno e permettendo alla gente di avere nuovi mezzi di trasporto con i quali muoversi e nuovi mezzi di comunicazione per semplificare ulteriormente la vita. Nuovamente un secolo dopo, nella seconda metà del 1900 con la *terza rivoluzione industriale* si ha un ulteriore balzo nel mondo industriale, grazie all'avvento dell'elettronica e alla nascita del mondo informatico, con l'automatizzazione dei processi industriali e alla corsa verso quei dispositivi di piccole dimensioni quali i chip, che erano in grado di poter effettuare un numero molto elevato di calcoli in tempi molto brevi. Oggi siamo invece negli anni di quella che si può definire come *quarta rivoluzione industriale*, anche se a questo termine, ormai datato, si preferisce il termine Industria 4.0. Questo ulteriore balzo è stato reso possibile da una spinta del mondo delle tecnologie, con la rapida diffusione di elementi intelligenti, sensori e attuatori, e con una presenza pervasiva di internet in quasi tutti gli aspetti della società, andando a creare di fatto quello che è conosciuto come "internet delle cose", o meglio "Internet of Things (IoT)". All'interno di questa nuova realtà, l'industria 4.0, negli ultimi anni è stato introdotto un elemento molto importante che serve alle imprese per ridurre ulteriormente i costi interni e per massimizzare il profitto, il ***Digital Twin***.

Il digital twin permette di poter creare un'astrazione dell'oggetto reale all'interno del mondo digitale e con questa astrazione è possibile fare previsioni su comportamenti futuri o su possibili problematiche che potrebbero affliggere

l'elemento in questione.

Ogni rivoluzione industriale però con il tempo ha portato tutti i nuovi elementi introdotti in ambito manifatturiero o, più in generale, in quello industriale all'interno della società, portando ad un miglioramento e ad un potenziamento della società stessa.

Lo scopo principale di questo documento è seguire la logica di questo andamento naturale che è avvenuto nel tempo, cercando di studiare se i digital twin, elementi importantissimi nel campo industriale, possano essere importati negli altri ambiti della società moderna, portando effettivamente ad un potenziamento di ciò che la società attualmente offre, affrontando nello specifico l'ambito ospedaliero e proponendo un modello tramite il quale è possibile includere il digital twin all'interno di questo contesto.

# Capitolo 1

## Digital Twin

La prima volta che il termine *digital twin* è stato utilizzato risale al 2002 quando Michael Grieves, insegnante presso l'Università del Michigan, parlò di un sistema con il quale si potesse replicare tutte le condizioni e le caratteristiche di un prodotto in maniera digitale; con l'avanzare della tecnologia e con le continue necessità richieste in molti ambiti, questo concetto è stato riportato alla vita. Oggi è un concetto molto importante al punto tale da essere inserito da Gartener nella Top 10 delle tecnologie per l'anno 2017.

Lo svolgimento di questo capitolo consiste nella descrizione di cosa il digital twin sia e quali vantaggi possa portare nell'ambito odierno di utilizzazione ovvero l'ambito manifatturiero, dopo di che verranno illustrati casi reali di applicazioni del digital twin da parte di aziende molto note.

### 1.1 Introduzione

Il digital twin può essere definito come l'estensione di un oggetto fisico oppure di un processo all'interno del mondo digitale [1]; oggi giorno l'ambito in cui questa realtà è utilizzata è quello industriale, dove lo scopo per cui questa realtà è entrata in gioco è quello di migliorare le performance e i costi aziendali, anche se originariamente questo era nato in un ambito diverso.

#### 1.1.1 Origini

Le prime versioni realizzate sono ad opera della NASA che, avendo bisogno di poter lavorare con dispositivi in grado di funzionare correttamente in ambienti difficilmente replicabili sulla Terra, ha realizzato una struttura con la quale era in grado di poter creare un dispositivo in una versione completamente virtuale, sul quale poi effettuare dei test replicando le stesse identiche

condizioni che avrebbe dovuto affrontare nello spazio. Le prime versioni del digital twin quindi si concentravano principalmente sull'aspetto della simulazione.

Successivamente però si è deciso di collegare questa copia digitale con la versione fisica del prodotto aerospaziale, cercando di mantenere la copia digitale aggiornata il più possibile con i dati del prodotto fisico in modo tale da poter identificare subito la presenza di anomalie oppure di discrepanze rispetto alla previsione della versione digitale in fase di test. Da quanto detto quindi il digital twin è rappresentabile mediante tre elementi principali (Figura 1.1): la parte digitale, la parte fisica ed i dati che vengono trasmessi dalla seconda entità alla prima. Questi tre elementi sono rimasti costanti nel tempo.

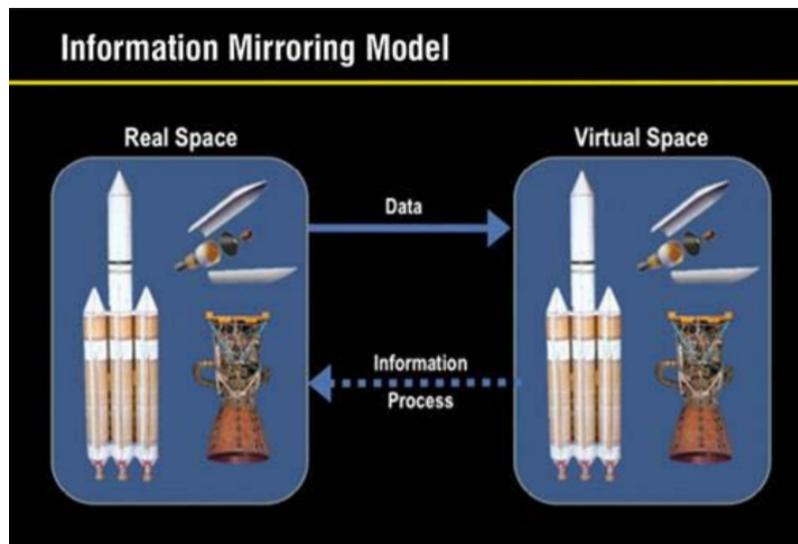


Figura 1.1: Prima rappresentazione di un digital twin

### 1.1.2 Oggi

Con un sempre più diffuso internet delle cose e con la nascita dell'industria 4.0 collegata a tutto ciò che riguarda l'Industrial internet-of-things (IIoT), le imprese hanno deciso di sfruttare certe caratteristiche insite nel concetto stesso di digital twin per poterlo usare a loro vantaggio. Utilizzare i dati raccolti per l'analisi e le previsioni future in modo tale da ridurre i costi aziendali è infatti uno dei punti cardine dell'IIoT e grazie alla mole di dati che un digital twin è in grado di raccogliere, questo obiettivo è realizzabile con maggiore facilità rispetto ad altre tecnologie utilizzate al giorno d'oggi.

Si è in grado di poter affermare quanto appena detto poiché ciò che si va a realizzare tramite il digital twin è una replica di tutto quello che sta avvenendo

all'interno di un'azienda durante il processo produttivo. Grazie al mondo elettronico e a quello dell'IoT è possibile raccogliere continuamente dati con una precisione molto elevata sia a livello di intervallo temporale, fra una rilevazione e la successiva, sia a livello di misurazione. In riferimento ad una catena di montaggio produttivo, lungo tutta la linea di produzione sono presenti una serie di sensori che continuamente raccolgono dati e li inviano ad una centrale in cui verranno aggregati, lavorati opportunamente e infine analizzati. Per questo motivo il sistema è in grado di ottenere in tempo reale una grande quantità di dati che possono essere divisi in due gruppi:

1. dati relativi alla **produzione**, come per esempio la velocità di produzione, la resistenza del prodotto a determinati sforzi, la pressione a cui questi vengono sottoposti durante il processo e molto altro ancora;
2. dati relativi all'**ambiente** in cui questi vengono prodotti, cioè temperatura, umidità, percentuale di luce e altri tipi di informazioni.

Qualunque tipo di informazione ricevuta può rivelarsi utile ai fini di un miglioramento produttivo poiché tutto ciò che viene ricevuto è continuamente analizzato e, in caso di risultati che potrebbero portare a miglorie nel mondo reale, verrà segnalato attraverso un feedback all'azienda.

Le miglorie in questione potrebbero riguardare:

- il lato produttivo, all'interno del quale determinate tecniche possono essere perfezionate grazie a calcoli che rilevano la dinamica più funzionale rispetto a quella adottata;
- il lato cliente, cambiando il design di certi prodotti per versioni future in base a problemi rilevati durante il loro utilizzo da parte dei clienti.

## 1.2 Struttura di un Digital Twin

Nella Figura 1.2 è possibile vedere come un digital twin sia dato dall'unione di realtà fisica e digitale. Esso è infatti composto da entità tangibili e da entità inesistenti nel mondo fisico che risiedono solamente in quello virtuale.

Gli elementi costitutivi di un digital twin possono essere individuati in:

- una serie di **sensori**, distribuiti lungo tutta la catena che processano i segnali e permettono al digital twin di catturare dati operazionali e ambientali, e **attuatori** che invece operano direttamente sul processo produttivo stesso con il fine di ottimizzarlo;

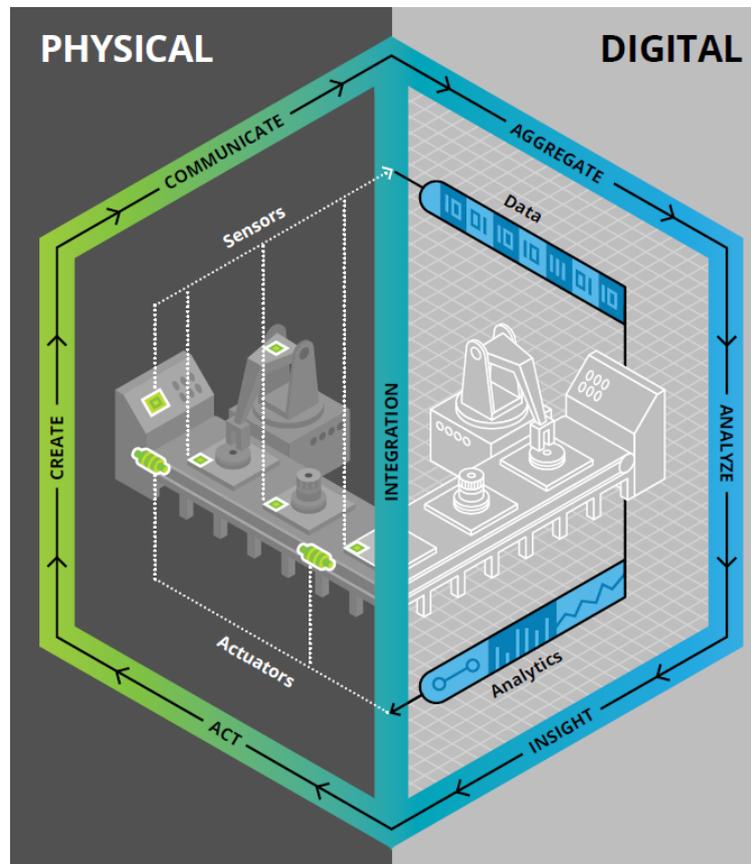


Figura 1.2: Struttura di un processo di produzione aziendale di un digital twin

- **dati** che fanno invece parte del mondo digitale e non sono altro che aggregazioni di più informazioni ricevute tramite i sensori dal mondo fisico. Possono anche essere disegni di progetto prodotti da altri programmi come CAD, connessioni a fonti esterne di dati oppure log effettuati dai dispositivi sul campo;
- **tecniche analitiche** che vengono usate per analizzare i dati e, attraverso simulazioni e visualizzazioni di routine giornaliere, producono previsioni atte a migliorare il sistema stesso.

## 1.3 Ciclo di vita di un Digital Twin

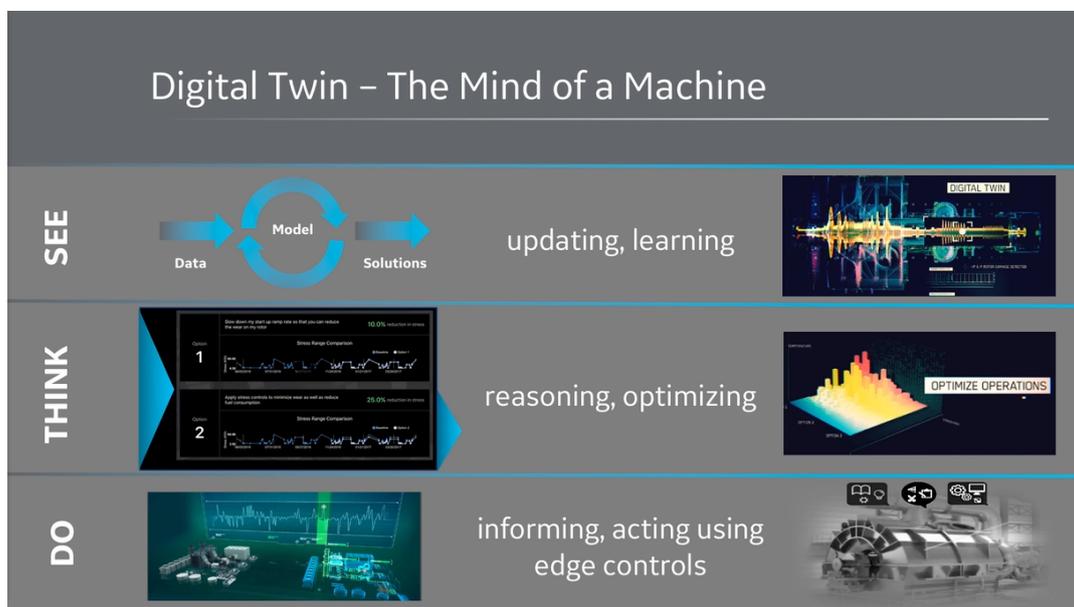


Figura 1.3: Ciclo di vita di un digital twin in macro-fasi

Il ciclo di vita di un digital twin è composto da tre macro-fasi, ciascuna delle quali è suddivisa in ulteriori passaggi, ognuno importante ai fini di una funzione particolare.

Queste informazioni sono state ricavate unendo ciò che veniva mostrato all'interno dell'articolo di Aaron Parrott [1], la cui Figura 1.2 mostra i passaggi interni alle macro-fasi, e della conferenza "Mind + Machines" effettuata dalla General Electric [2], da dove è stata ricavata la Figura 1.3

### 1.3.1 See

È la fase in cui un digital twin si aggiorna continuamente per riflettere le precise condizioni dell'ambiente; per fare ciò, se necessario, è in grado di comunicare anche con altri prodotti della linea di processo.

In questa fase si individua:

- la sottofase di **creazione**, nella quale i sensori raccolgono i dati che vengono creati nel processo; questi dati, come già detto, possono essere ambientali oppure riguardare il processo di produzione;
- la sottofase di **comunicazione** dei dati, nella quale i vari sensori inviano al server di raccolta dati tutto ciò che hanno appena rilevato.

### 1.3.2 Think

Per l'ambito in cui è prettamente utilizzato, e quindi quello dell'IIoT, è la fase più importante perché è quella dove, attraverso il machine-learning e avanzate tecniche di apprendimento, vengono calcolati tutti i possibili problemi che si potrebbero verificare in futuro.

Al termine di questa fase vengono mostrati i risultati nel mondo reale e vengono proposte soluzioni che possono essere di tipo manuale o di tipo automatico. Nel successivo punto verrà spiegata la differenza fra questi due tipi di soluzioni. In questa fase si individua:

- la sottofase di **aggregazione**, in cui su ciò che si è ricevuto viene effettuata una prima ed elementare elaborazione dopo di che viene memorizzato all'interno di un repository oppure database. La fase di elaborazione dei dati può essere fatta prima di trasmetterli, oppure nel cloud, una qual volta sono stati ricevuti in centrale;
- la sottofase di **analisi**, in cui i dati vengono analizzati e poi visualizzati;
- la sottofase di **previsione**, in cui si cerca di capire i dati ricevuti cercando di trarne delle conclusioni nel lungo periodo.

### 1.3.3 Do

È la fase finale, quella con la quale si va ad interagire sul processo produttivo. In base alla soluzione proposta dalla fase precedente si agisce in modo differente: se si è scelta la soluzione manuale allora il sistema dice cosa bisogna fare per apportare delle migliorie dopo di che gli ingegneri, sulla base dei dati ricevuti e sulla struttura del sistema, studiano la situazione proposta e trovano il modo di applicarla; se invece si è scelta la soluzione automatica allora il compito di applicare le migliorie verrà adempiuto direttamente dal digital twin, tramite gli attuatori presenti nel sistema.

È importante notare come il passaggio da mondo digitale a mondo reale avviene solamente tramite dati grezzi oppure tramite delle previsioni.

## 1.4 Vantaggi esclusivi per le aziende

Ciò che rende davvero importante il digital twin è la possibilità di pensare alla massa di dati che questo gestisce non come ad una entry in una tabella di un database dal quale si possono ottenere i dati desiderati attraverso delle query, ma di considerarla come una entità con la quale è possibile dialogare e dalla quale si possono ottenere informazioni in maniera più intuitiva senza

dover considerare la struttura che sostiene e che genera questi dati. La caratteristica di mantenere all'interno di un digital twin una certa tracciabilità di tutto ciò che è avvenuto nella storia di produzione porta, inoltre, ad una accelerazione del processo di sviluppo dei singoli prodotti, diminuendo contemporaneamente i costi di produzione.

Una volta che il prodotto è sul mercato, la quantità di dati che si continuano a ricevere da esso permettono di prevedere rotture o imperfezioni molto più facilmente e velocemente del normale, riducendo i costi di manutenzione conoscendo a priori il punto in cui bisogna operare oppure il tipo di intervento da effettuare per ripristinare il corretto funzionamento.

Per i motivi appena descritti è utile che il digital twin abbia in carico non solo il processo di produzione ma tutto il ciclo di vita di un prodotto, così da raccogliere più dati con i quali sono migliorabili possibili future versioni.

Il digital twin può comunque essere molto più di una continua verifica di dati nel processo produttivo poiché può addirittura sostituire il testing del prodotto fisico con il testing del prodotto digitale. È ciò che fanno aziende tipo la Dallara o la Boeing per tutti i nuovi prodotti ideati.

Questo permette di risparmiare considerevolmente sui costi di produzione in quanto, anziché realizzare materialmente l'oggetto in molte versioni al fine di trovare quella ottimale, si lavora su una copia digitale effettuando tutti i test necessari che si sarebbero dovuti effettuare con i vari prototipi. Tale procedura permette di eliminare l'uso di materiale nella fase intermedia. Una volta conclusa quindi la fase di design verrà prodotta la versione finale sulla quale si effettuerà un singolo test controllando l'assenza di errori commessi nella fase precedente. È questa, tra l'altro, la base di partenza del digital twin stesso, anche in considerazione del fatto che la NASA realizzava i veicoli spaziali secondo tale procedura.

Il digital twin si applica anche sul prodotto finale, creando una vera e propria copia dell'oggetto nel mondo digitale: grazie ai dati così raccolti si potrà poi operare istantaneamente per cercare di risolvere difficoltà create durante l'utilizzo.

## 1.5 L'importanza dei Digital Twin per i prodotti

Ricapitolando ciò che è stato detto nelle precedenti sezioni, il digital twin è importante per qualunque fase di realizzazione del prodotto.

Tutti i dati raccolti nel miglioramento creativo e nello sviluppo del prodotto vengono utilizzati secondo le seguenti fasi e/o procedure [3]:

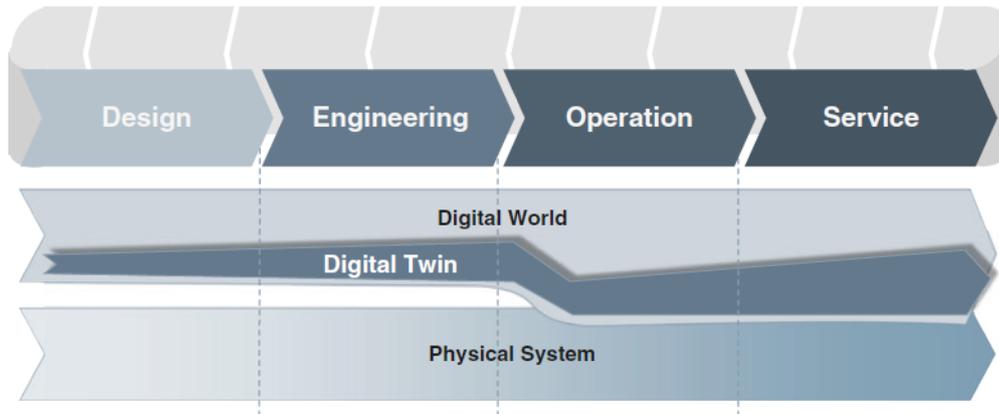


Figura 1.4: Presenza di un digital twin nello sviluppo di un prodotto

### 1.5.1 Fase di design

Il concept di un nuovo prodotto viene realizzato secondo esigenze dettate dall'utenza e da particolarità della moda del momento. Anche caratteristiche dei vecchi prodotti incidono nello sviluppo del nuovo.

In quanto concept, ossia una fase iniziale di sviluppo, rappresenta un progetto iniziale di come sarà realizzato il prodotto senza tener conto delle sue caratteristiche software o hardware. Più che altro si terrà conto delle funzionalità e di come dovrà svolgere i compiti assegnati: ad ogni ciclo ideativo verrà proposto un design e bisognerà verificare se funzionalità e compiti previsti rispettano in maniera adeguata e vantaggiosa le necessità dell'utente. È quindi utile essere in possesso di un elemento virtuale che funga da supporto a queste continue iterazioni, rapportandosi se necessario con le versioni precedenti del concept stesso. Sarà necessario quindi, man mano che il concept del prodotto si svilupperà, che il digital twin cresca di pari passo.

Un altro elemento molto importante che incide nella fase di design è l'opportunità di comunicazione del digital twin con altri gemelli digitali in modo tale da ottenere da questi informazioni loro riguardanti. Grazie a questa particolarità, è possibile così ottenere ulteriori informazioni riguardanti, ad esempio, prodotti già in commercio al fine di prevedere e correggere in anticipo problematiche ad essi connesse.

### 1.5.2 Fase di ingegnerizzazione

Così come nella fase di design, il digital twin è di grande supporto ai progettisti hardware e software. Procedendo con lo sviluppo progettuale, sono

numerose le modifiche che vengono applicate e richieste alla struttura del prodotto partendo dal materiale con cui certe parti vengono realizzate sino alla forma di alcuni componenti. Grazie ai digital twin non è necessario dover produrre fisicamente un prototipo a ciascuna iterazione, perché attraverso i vari modelli fisici presenti al suo interno è possibile ricreare la condizione operativa dello stesso e testarne le risposte, modificando quindi le sole parti che presentano problematiche. I test possono essere fatti sui singoli componenti e, una volta completati, anche sul prodotto finale.

In alcuni casi ingegnerizzazione e produzione vanno di pari passo, pertanto non sempre tutte le parti del prodotto sono effettivamente pronte nello stesso momento. Questo implica ritardi nella verifica del comportamento finale e conseguenti spese maggiori: con l'utilizzo dei digital twin le attese potranno essere ridotte drasticamente perché oltre al testing sul prodotto in maniera totalmente virtuale, è anche possibile simulare determinati componenti del prodotto fisico non completamente pronti.

La presenza del digital twin in fase progettuale, svolge anche la funzione di struttura in grado di raccogliere tutte le documentazioni sviluppate e i dati raccolti nelle fasi di testing, senza considerare la fase di testing del software stesso.

### 1.5.3 Fase operativa

All'interno di questa fase, i dati raccolti vengono utilizzati principalmente per due motivi ben distinti:

- per indagini **attuali**, per sapere quando si verifica una certa anomalia e come porvi rimedio;
- per indagini **future**: in questo caso i dati non servono per uno scopo che si riversa nel prodotto nell'immediato ma servono per cercare di anticipare ciò che potrà succedere in futuro; anticipare malfunzionamenti, migliorare con il tempo certe funzionalità che il prodotto propone sono un esempio di ciò che potrebbe riguardare queste analisi.

Fino ad oggi inoltre la fase operativa e quella di design sono sempre state concepite come due fasi totalmente slegate che non avessero bisogno di comunicare fra di loro: come già anticipato nella Sezione 1.5.1, con i digital twin questo concetto viene superato; i dati raccolti durante questa fase infatti oltre ad avere un beneficio per il futuro del prodotto stesso possono portare benefici a nuovi possibili prodotti che verranno creati.

### 1.5.4 Fase di manutenzione e potenziamento

Durante la fase di ingegnerizzazione si potrebbero identificare parti che in futuro potrebbero creare facilmente problemi alla struttura del prodotto e decidere di voler trovare una soluzione a questo problema solo una volta che il prodotto completo sia sul mercato. Grazie ai digital twin è possibile tenere d'occhio con più attenzione queste parti più deboli per poter capire dove e come effettivamente il problema potrebbe verificarsi.

Allo stesso tempo questa gran quantità di dati, correlati ai modelli di simulazione costruiti sempre nella fase di ingegnerizzazione, migliora tutti quei servizi che potrebbero essere richiesti dall'utente, come la manutenzione; in questo modo i tempi di intervento e i tempi per trovare la causa e la soluzione al problema diminuiscono drasticamente, portando benefici all'azienda sia per un risparmio evidente nei costi di manutenzione sia per la soddisfazione del cliente.

## 1.6 Casi di applicazioni reali

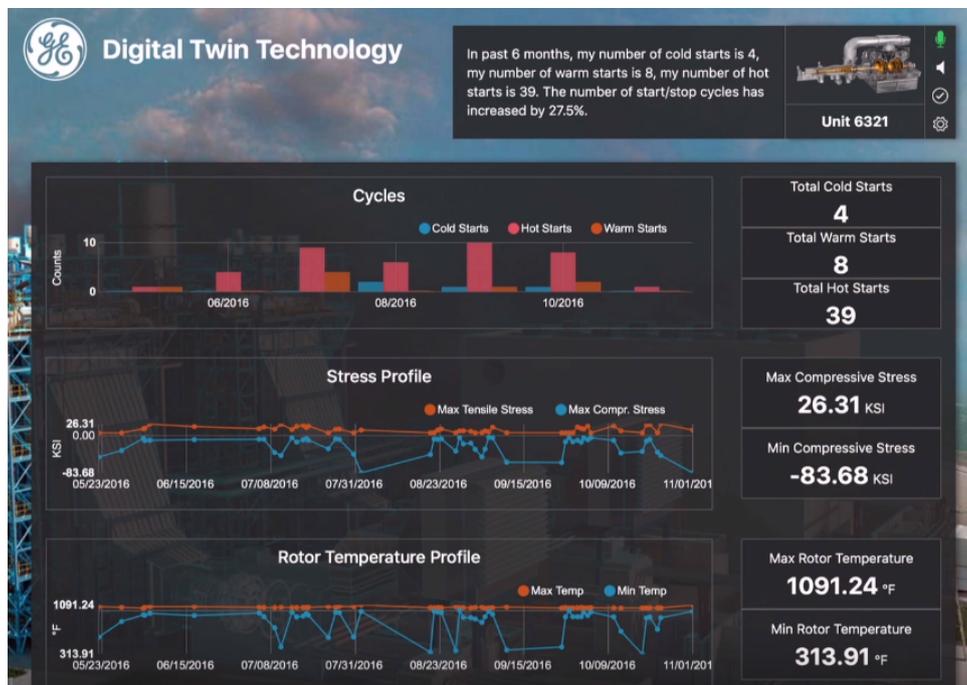


Figura 1.5: Dashboard intelligente che mostra i dati collezionati

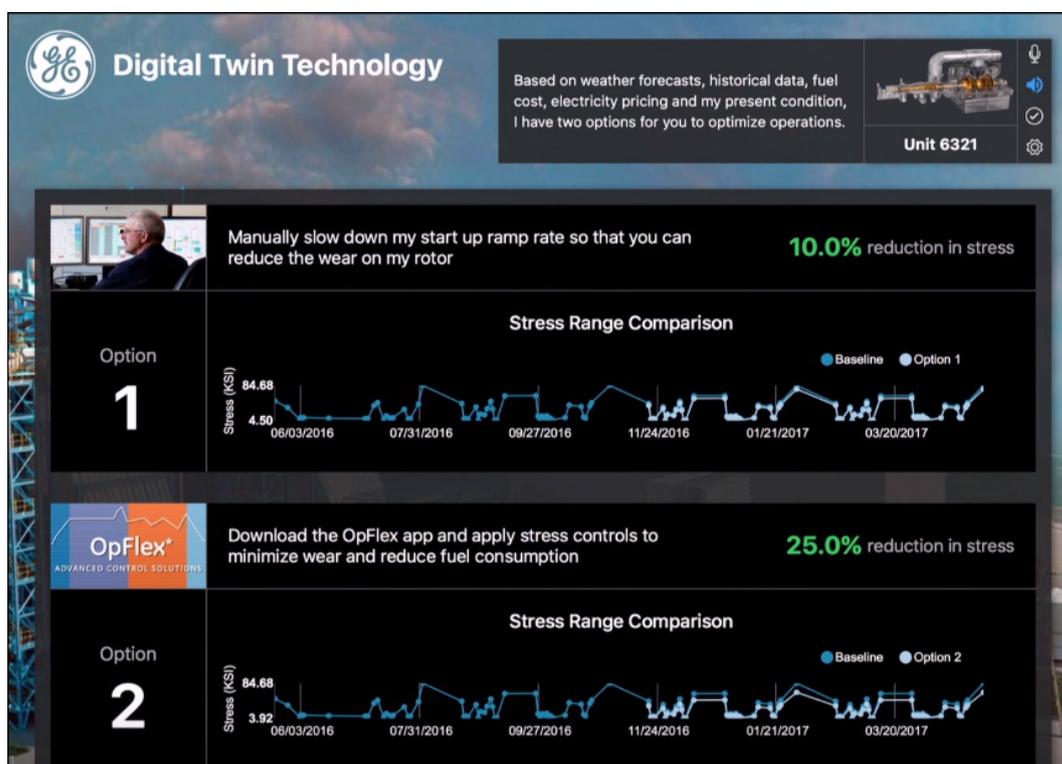


Figura 1.6: Proposte alla soluzione di un problema verificatosi

**General Electric** La General Electric è una azienda produttrice di turbine 4.0; è specializzata in molti ambiti, a partire da quello aeronautico fino a quello eolico.

In ambito aeronautico, le loro turbine producono ogni giorno in un singolo volo 500GB di dati che vengono inviati in tempo reale (approssimativamente ogni minuto) alla centrale operativa: tutte le informazioni ricevute sono molto importanti perchè consentono da un lato di simulare il comportamento del digital twin e dall'altro di rilevare difformità di funzionamento tra il digital twin e la turbina reale. Dato che il digital twin opera secondo i dati di progetto, la segnalazione di una difformità significa che molto probabilmente qualcosa non va nella turbina reale. A questo punto scattano dei meccanismi di controllo per identificare il problema (ad esempio cosa stia causando un surriscaldamento), dopo di che si pone rimedio: continuando l'esempio precedente possono essere attivati dei meccanismi di raffreddamento, oppure se per esempio avviene una spinta asimmetrica che sbilancia l'aereo, diminuire la richiesta di potenza al motore provvedendo ad aumentare, se possibile, quella dell'altro ribilanciando così l'aereo[4].

Colin Parris, nella conferenza di cui alla precedente Sezione 1.3, mostra

invece altri esempi molto importanti riguardo a cosa la General Electric sta attualmente lavorando per innovare, in generale, il mondo delle turbine 4.0. Su un qualsiasi tipo di turbina è possibile realizzare un digital twin dove attraverso una dashboard intelligente è possibile interagire per ottenere dati sulla turbina (Figura 1.5), ricavati anche da tutti i prodotti simili, sapere dove si è verificato un determinato problema e individuare come risolverlo (Figura 1.6). Oltre ciò ha dimostrato come digital twin e realtà aumentata possono entrare in contatto per aiutare l'essere umano nel rendere più agevole le operazioni di manutenzione attraverso l'uso di smart glasses come i Microsoft Hololens. In un caso pratico esposto nella conferenza appena citata, il relatore, indossando un paio di smart glasses, ha dimostrato come il loro utilizzo possa essere usato, da qualunque luogo l'operatore si trovi, per verificare una turbina eolica presentante una significativa anomalia.

**Tesla** Un altro caso reale di applicazione del digital twin è quello rappresentato dalla Tesla le cui macchine producono ogni giorno dati sui viaggi percorsi inviandoli poi alla centrale operativa. Per l'azienda la possibilità di monitorare i prodotti durante il loro utilizzo offre anche la possibilità di verificarne le funzionalità e l'utilizzo. In pratica il sistema in questione permette di continuare il testing iniziale di produzione integrandolo con dati derivanti dall'uso reale con l'affinamento del prodotto in successive versioni.

**NASA** Essendo stata una delle fautrici dei digital twin, la NASA continua a sviluppare nuove attrezzature e veicoli spaziali utilizzando il sistema in questione al fine di controllare sistemi che non sono fisicamente vicini grazie alle numerose simulazioni e alla facilità con la quale è possibile monitorare e risolvere problematiche. Una delle prime versioni dei digital twin adoperati dalla Nasa è stata di infinito aiuto nelle operazioni di rientro dell' Apollo 13.

**Esseri Umani** Grazie alla presenza dell'internet delle cose e ai dispositivi wearable, il digital twin può rappresentare una persona all'interno del mondo digitale permettendogli vantaggi quali la raccolta ed il monitoraggio di dati personali per la salute e la prevenzione di malattie. Ulteriore utilizzo è l'individuazione nel tempo di errate abitudini alimentari aventi ripercussioni sulla salute personale al fine di prevenire l'insorgenza di malattie collegate. Il sistema in questione è anche utile per la vita quotidiana come ad esempio la possibilità di valutare la tipologia di scarpe più adatte da calzare in funzione del tipo di camminata e dei parametri fisici della persona.

# Capitolo 2

## Piattaforme per i Digital Twin

Per rimarcare l'importanza in ambito industriale, ormai quando ci si riferisce a sistemi automatizzati per l'industria o più in generale quando si parla di qualunque argomento che riguardi l'industria 4.0, tutte le compagnie preferiscono il termine *IIoT*, acronimo di Industrial Internet of Things, al semplice IoT ormai usato nella vita quotidiana, a volte anche in maniera inadeguata, per tantissimi altri campi di applicazione.

Con la nascita di un nuovo ambito in cui sviluppare, e con la notevole importanza, ormai rimarcata numerose volte fino a questo momento, che i digital twin hanno acquisito, molte aziende importanti come Microsoft, General Electric, Amazon ecc.. hanno deciso di immergersi in questa nuova avventura. Partendo già da una base solida costituita dai framework sviluppati per la tecnologia IoT, hanno perfezionato il loro lavoro per poter rendere più semplice e più veloce lo sviluppo di gemelli digitali, indipendentemente dall'ambito desiderato.

Decidendo di partire da un punto così importante infatti si possono trarre molti benefici che lo stesso IoT comporta:

- è infatti possibile determinare se un dispositivo si trova in un punto in cui la connettività non è costante e ci sono momenti in cui non è contattabile;
- è possibile effettuare aggiornamenti oppure riavvii ai dispositivi senza dover essere fisicamente nei loro pressi;
- è presente in ereditarietà un supporto a tutti i protocolli IoT in grado di generare automaticamente API per connettersi a ciascun dispositivo;
- si è in grado di analizzare la situazione ad alto livello senza concentrarsi sulla struttura sottostante poiché è già funzionante e testata a lungo.

La General Electric è quella che fra tutte le Società ha deciso di investire maggiormente sull'argomento e, oltre a lei, altre Società hanno deciso di lavorare in

questo campo. Le piattaforme più conosciute in questo ambito sono AWS IoT di Amazon, IBM Watson IoT, Predix della stessa General Electric, Microsoft's Azure Service Fabric, ThingWorx della PTC e infine SAP IoT Application Enablement.

Nel suo articolo, Hammond[5] spiega come ciascuna software house quando ha progettato la sua piattaforma ha deciso di concentrarsi su determinate caratteristiche. Oggi i framework si possono catalogare in due grandi mondi:

1. il mondo IIoT in cui rientrano società come la Microsoft, la General Electric, SAP, ect.;
2. il mondo dei dispositivi interconnessi in cui rientra Amazon.

## 2.1 GE Predix

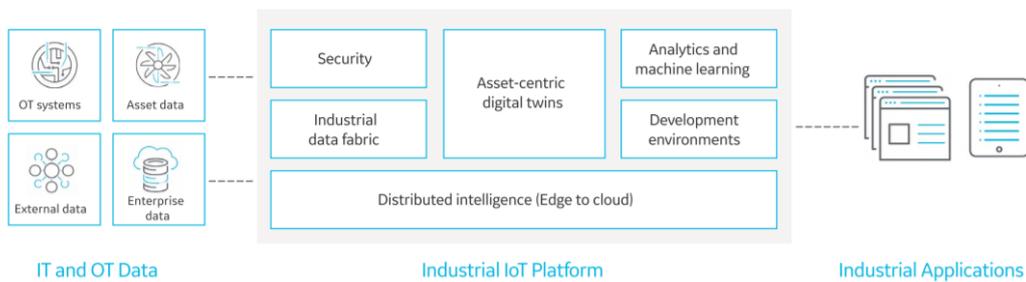


Figura 2.1: Piattaforma Predix

[6] La General Electric ha progettato Predix con lo specifico scopo di presentare una piattaforma che fosse in grado di soddisfare le aspettative del mondo industriale producendo previsioni e risultati in grado di essere validi per qualsiasi tipo di mercato fosse coinvolta una azienda. In questa piattaforma rientrano i seguenti punti chiave:

- **costruita intorno alla figura dei digital twin**, in grado di effettuare buone previsioni da dati grezzi oppure da dati ottenuti tramite operazioni analitiche;
- fornisce un'architettura edge-to-cloud che è in grado di ottimizzare i costi operazionali attraverso la suddivisione fra varie infrastrutture;
- supporta una metodologia ad alto livello per quanto concerne il controllo e la produttività aziendale in grado di supportare lo sviluppo industriale e ciò che viene detto in materia dai grandi esperti del settore;

- permette di far eseguire applicazioni SaaS (Software as a Service) come Predix Asset Performance Management che sono in grado di aumentare affidabilità e disponibilità delle risorse.

**Dispositivi edge** Predix considera i dispositivi remoti come dispositivi intelligenti in grado di poter operare direttamente sui dati oppure sulle risorse stesse a cui è vicino. Per questo motivo i dispositivi che vengono utilizzati prevedono l'uso della Predix Machine, che è in grado di garantire loro l'uso e l'organizzazione di protocolli di comunicazione e autenticazione.

Essendo dispositivi intelligenti dispongono dell'abilità di effettuare previsioni direttamente senza dover comunicare con il cloud; grazie a ciò sono in grado di rilevare autonomamente anomalie ed agire direttamente sull'ambiente. Supportati dalla possibilità di comunicare con il cloud per ottenere dati sulla storia passata, sono in grado di migliorare con il tempo le loro previsioni.

Un dispositivo Predix è in grado di comunicare bi-direzionalmente con l'ambiente e le risorse di cui si deve occupare, collezionando dati e inviando segnali, o per meglio dire eventi. Supporta protocolli come OPCUA, Modbus TCP e MQTT ma allo stesso tempo è possibile estendere questo supporto a protocolli ideati per il caso specifico.

Ad ogni oggetto inoltre può essere combinata una **posizione**. Questo perchè in certi ambiti lavorativi è normale supporre che dei prodotti siano in movimento e di questi se ne vuole tenere traccia. Predix inoltre permette di unire l'insieme degli oggetti per effettuare analisi globali sull'intera "flotta di oggetti". Anche grazie a questi dati possono essere fatte previsioni per possibili miglioramenti nei trasporti o altri processi aziendali.

**Cloud** Il lato cloud è stato ottimizzato per poter creare una struttura scalare ed elastica per l'ottenimento dei dati e che li renda disponibili al momento opportuno indipendentemente dallo stato del dispositivo coinvolto. È in grado di supportare varie tipologie di dati in ambito industriale.

La sua architettura è basata sui microservizi e grazie a questa caratteristica può supportare un approccio modulare da parte degli sviluppatori: possono essere caricati moduli parziali o interi di un programma ed effettuare delle sessioni di test senza che l'intero sistema debba andare offline, inoltre anche un futuro aggiornamento dell'applicazione risulta più facile.

Al centro della piattaforma si ha il modello delle risorse: con queste è possibile ottenere i dati, collezionarli e organizzarli per future analisi o operazioni di monitoraggio.

Su questo concetto si basa la figura del digital twin: data la loro importanza per questo tipo di struttura sono considerati come "unica fonte di verità", sia per quanto riguarda dati attuali che informazioni riguardanti la risorsa, sia

per dati passati. Come base del concetto del digital twin inoltre, ciascuno può ottenere informazioni da altri digital twin così da poter ottenere ulteriori dati con cui fare previsioni.

Data la mole di dati che riceve, ha la capacità di suddividere quelli in arrivo in vari flussi di dati, ognuno con una propria caratteristica e con tecniche di memorizzazione e analisi differenti. Una possibile tecnica per ricevere dati può essere con una struttura ad eventi, nella quale la determinata applicazione è quindi di tipo event-driven, contenente una coda di messaggi, ognuno dei quali è un dato che il flusso ha ricevuto oppure altre informazioni aggiuntive, aggiornata ad ogni evento ricevuto.

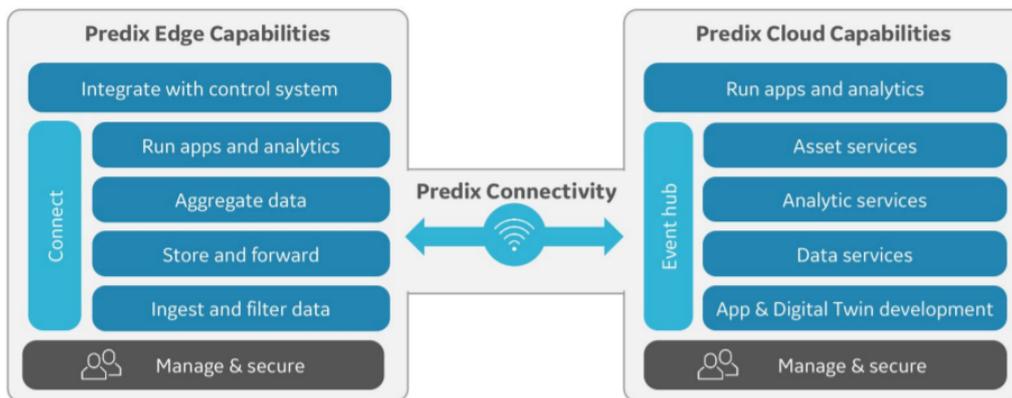


Figura 2.2: Stack per la comunicazione fra dispositivi edge e cloud

**Comunicazione fra dispositivi edge e cloud** In ambito industriale è solito che certi sensori oppure attuatori siano posizionati in posti scomodi per effettuare delle comunicazioni; allo stesso tempo per certe aziende comunicare dati importanti in maniera sicura è una operazione delicata che ancora non riescono ad effettuare in tutta sicurezza. Con Predix però queste difficoltà vengono superate perché grazie alla sua architettura permette ai dispositivi edge di lavorare direttamente sui dati, senza dover lasciare al cloud il compito di esaminare ed effettuare previsioni. Con questa particolarità si riescono a superare numerosi problemi che nascono con una architettura che si basa unicamente sul cloud, come una latenza ridotta che sarebbe molto problematica in caso di applicazioni in ambito hard real-time, oppure problemi nati da dati importanti che non possono essere dislocati altrove oppure infine costi di comunicazione elevati quando per certi casi applicativi è più economico svolgere le analisi direttamente alla fonte.

Predix ha sviluppato perciò un'architettura duale per dispositivi edge e cloud

(Figura 2.2) in grado di ottimizzare il carico di lavoro usando una varietà di casi di implementazione.

**Applicazioni industriali** Con il crescere dell'importanza dei dispositivi mobili, sta acquisendo sempre più rilevanza, all'interno di una azienda, l'opportunità per i dipendenti, che ora sono in grado di svolgere maggiori compiti avvalendosi del loro ausilio. Si inizia a parlare quindi di *digital worker*, ossia di un dipendente più connesso che mai, in grado di migliorare la propria efficienza, ridurre i costi per l'azienda ed aumentare la soddisfazione del cliente. Per poter fare tutto ciò però deve essere supportato da un'architettura molto solida, in grado di permettergli di ottenere previsioni direttamente dal proprio dispositivo; Predix fornisce tutto ciò permettendo agli operatori in campo di avvalersi del supporto dell'analitica direttamente sul luogo di operatività attraverso i propri device, grazie alla comunicazione con il cloud.

## 2.2 SAP IoT Application Enablement

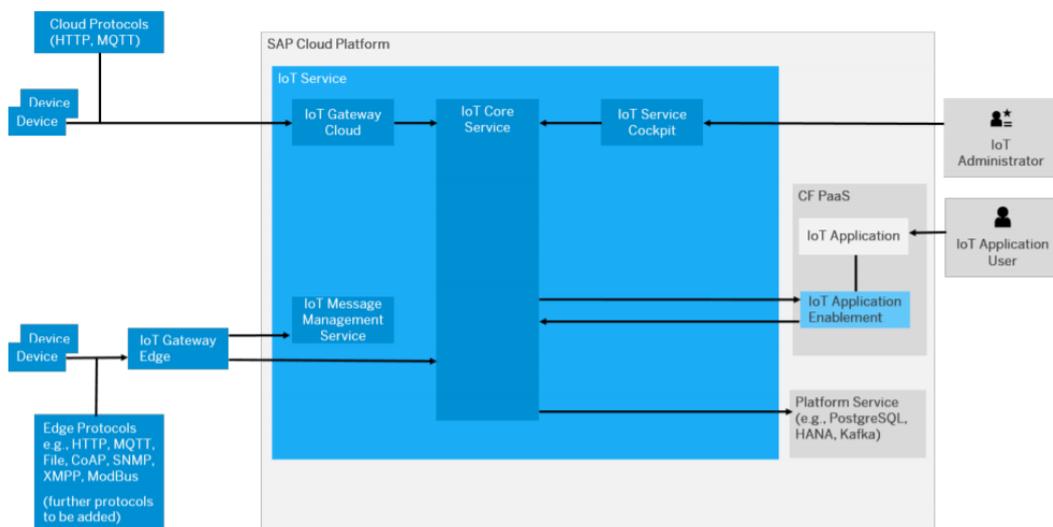


Figura 2.3: Piattaforma SAP IoT Application Enablement

La piattaforma realizzata dalla SAP come detto in precedenza rientra nella categoria delle piattaforme specializzate nel campo dell'IIoT. Presenta numerose caratteristiche per soddisfare i bisogni industriali: tra queste è presente anche la figura del digital twin con l'assenza di una sua figura centrale viceversa presente nella piattaforma Predix. Nel caso SAP il digital twin è quindi

considerato come un elemento a pari livello degli altri.

La SAP IoT Application Enablement dà l'opportunità agli sviluppatori di costruire una propria applicazione IoT che però è in grado di gestire grandi quantità di dati industriali: tramite una serie di microservizi riutilizzabili e template di applicazioni, si è in grado di approcciarsi al problema tramite uno sviluppo focalizzato sui digital twin, discendendo dalla semantica originaria di "thing" che la piattaforma stessa propone.

Il digital twin è perciò la rappresentazione di ciascuna risorsa reale: si possono collegare insieme vari dispositivi per accedervi attraverso un unico modello, oppure riutilizzare certi componenti per creare nuovi tipi di oggetto; raccoglie inoltre tutte le informazioni di una risorsa in una sua specifica istanza. Per ciascun oggetto fisico è presente un'entità denominata "*thing shadow*": il suo compito è quello di mantenere sincronizzato il mondo fisico e digitale attraverso aggiornamenti del modello digitale con dati più recenti, oppure di effettuare l'operazione inversa cioè imporre ad un determinato dispositivo di allinearsi allo stato del suo gemello digitale.

Oltre a ciò è in grado di gestire una mole di dati attraverso un immagazzinamento dinamico all'interno di un database di tipo Big Data: con queste informazioni è in grado di effettuare analisi e previsioni dello stato futuro del sistema.

## 2.3 AWS IoT

Avendo deciso di specializzarsi nel campo dei dispositivi interconnessi, Amazon ha creato la sua piattaforma (vedi Figura 2.4) riunendo insieme molti suoi precedenti prodotti derivanti dal campo dell'internet delle cose oppure dal campo dell'analitica, ponendo al centro della struttura AWS IoT Core.

**AWS Greengrass** È un modulo che permette ai dispositivi edge di collegarsi in modo sicuro con il server a cui devono inviare i dati; permette alla piattaforma di funzionare anche in caso i dispositivi abbiano una connessione intermittente al cloud. Una qual volta il dispositivo rieffettuerà la connessione, Greengrass sincronizzerà i dati sul dispositivo, fornendo una funzionalità ottimizzata indipendentemente dalla connettività. Inoltre tramite la crittografia permette che i dati possano essere inviati sulla rete senza problemi, mentre grazie alle sequenze di login che bisogna effettuare ad ogni connessione, permette che solo dispositivi conosciuti effettuano comunicazioni di alcun genere.

**AWS IoT Core** AWS IoT Core è in grado di supportare un numero molto elevato di dispositivi, così come una quantità di messaggi spaventosa, ed è in

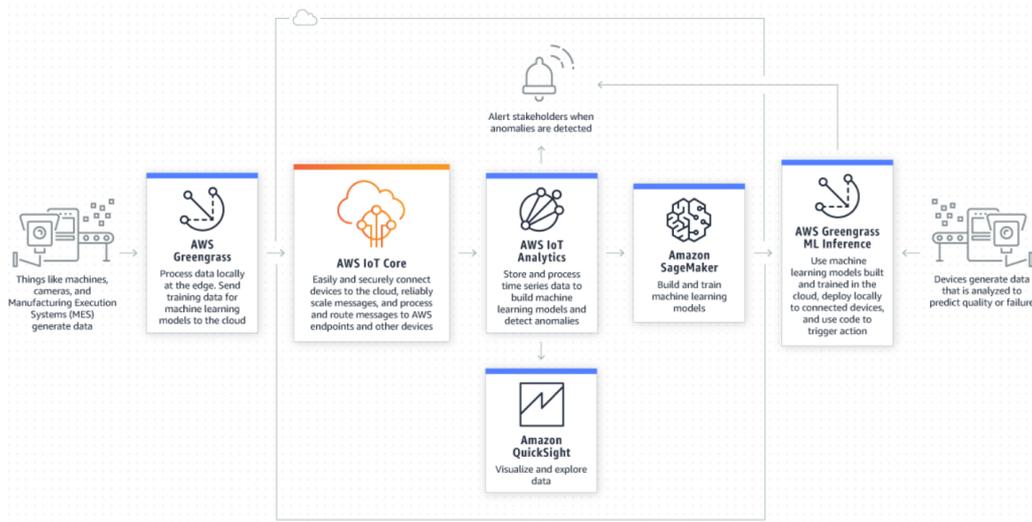


Figura 2.4: Piattaforma AWS IoT

grado di elaborare e instradare tali messaggi agli endpoint di AWS e ad altri dispositivi in modo sicuro e affidabile anche avvalendosi degli altri moduli descritti in questa sezione.

Supporta protocolli di comunicazione ad alto livello quali HTTP, WebSockets e MQTT riducendo al minimo il codice da eseguire sui dispositivi e i requisiti relativi a larghezza di banda di rete. In aggiunta si è deciso di voler dare la possibilità agli sviluppatori di poter creare protocolli personalizzati; i dispositivi potranno comunicare tra loro anche impiegando protocolli differenti.

Dato che lavora insieme ad AWS Greengrass è possibile interagire con i dispositivi più facilmente, inoltre il sistema memorizza lo stato più recente di un dispositivo connesso per verificarlo e impostarlo in qualsiasi momento, facendolo risultare alle applicazioni come se fosse online. In questo modo l'applicazione potrà consultarne lo stato anche quando è disconnesso; sarà possibile impostare sul dispositivo uno stato che sarà implementato non appena si ricollega.

Come il nome stesso fa intuire, AWS IoT Core è il cuore pulsante di tutta la piattaforma.

**AWS IoT Analytics** I dati IoT, dovendo provenire da dispositivi che non comunicano stessi tipi di informazioni, hanno la caratteristica di non essere strutturati, il che rende più difficile fare delle analisi con strumenti analitici già presenti nel mondo dell'informatica. Per risolvere a questo problema Amazon ha creato AWS Analytics, che da enormi volumi di dati IoT è in grado di filtrare le informazioni utili per poter prendere decisioni migliori e più precise per i digital twin. Dopo aver filtrato, trasformato e nel caso arricchito i dati

ricevuti, li memorizza in un datastore delle serie temporali per l'analisi. In caso di anomalie rilevate può, attraverso una notifica, informare l'utente che avrà poi il compito di controllare la difformità creatasi.

**Amazon QuickSight** È la piattaforma per la visualizzazione, l'esecuzione di analisi ad hoc e la raccolta di informazioni strategiche dai dati.

**Amazon SageMaker** Dai dati ricevuti da parte del modulo Analytics, Amazon SageMaker è in grado di ricavare dei modelli di machine learning con cui poi operare sui dati per fare previsioni a lungo termine in grado di rilevare problematiche prima che queste si verifichino.

**AWS Greengrass ML Inference** I modelli di conoscenza prodotti dal modulo al paragrafo precedente vengono utilizzati per poter installare nei dispositivi connessi alla rete questo tipo di "intelligenza" con la quale, al verificarsi di certe condizioni, dovranno reagire ed eseguire determinate azioni, comunicando anche nel caso all'utente ciò che sta avvenendo.

# Capitolo 3

## Internet-of-Things e Industrial IoT

Con l'avvento della tecnologia e della rapida diffusione di dispositivi sempre più intelligenti, il mondo va nella direzione di essere costituito da elementi sempre più interconnessi e sempre più dipendenti dall'internet. Riprova di questa affermazione è il considerare che da un paio di anni il numero di dispositivi connessi alla rete ha superato il numero di persone attualmente presenti sulla Terra. Questo ha generato ciò che da molti anni è conosciuto come l'internet delle cose, che è diffuso in maniera talmente pervasiva ad ogni livello della società, che non c'è un suo ambito che non rientri in uno degli ambiti di utilizzo dell'internet delle cose.

In questo capitolo verrà quindi inquadrato cosa sia l'Internet of Things (spesso nominato tramite la sua sigla IoT), le varie applicazioni che sono nate con la specializzazione in più ambiti e l'analisi in particolare dell'ambito industriale, dove si preferisce il termine più specifico di Industrial IoT (IIoT), per inquadrare meglio l'ambito all'interno del quale rientra il digital twin.

### 3.1 Definizione

Il termine di Internet of Things fu usato per la prima volta alla fine degli anni '90, più precisamente nel 1999 da parte di Kevin Ashton: sebbene il concetto originario era molto simile a quello odierno, l'ambito e lo scopo per cui era stato pensato differiscono dalla concezione moderna. Oggigiorno l'internet delle cose è una realtà costituita da elementi che sono in grado di essere connessi alla rete e interconnessi fra di loro: possono essere semplici sensori, attuatori, ma anche dispositivi embedded o dispositivi intelligenti, generalmente indicati con il nome di *Smart Objects*. Quest'ultima categoria di solito sono dispositivi che si compongono da più elementi: presentano uno o più sensori

con i quali ottengono informazioni, degli attuatori con i quali possono interagire in qualche modo con l'ambiente circostante ed un microprocessore con il quale sono in grado di elaborare tutte le richieste ricevute e agire tramite gli attuatori quando necessario, oppure elaborare le informazioni ricevute per svolgere tutte le funzionalità che devono fornire all'utente finale.

Lo scopo principale per cui è stato introdotto l'IoT è quello di automatizzare pratiche tediose e costanti all'interno della vita quotidiana date dalla raccolta di dati e successive elaborazioni e classificazioni. Per questo motivo l'IoT si compone in gran parte da un numero molto elevato di sensori che vanno a raccogliere dati e successivamente li inviano al server in cui dovranno essere elaborati. Considerata la quantità di informazioni che ciascun dispositivo è in grado di raccogliere e inviare su internet si potrebbe considerare l'IoT e il mondo dei BigData come mondi simili. È un paragone concettualmente sbagliato perché nell'internet delle cose i dati inviati dai dispositivi sono in parte filtrati all'origine, poiché possono essere dati generati da rumori prodotti dai sensori stessi e quindi non rilevanti ai fini dell'applicazione, o anche per diminuire il più possibile la quantità di dati che deve essere trasferita tramite la rete. Non tutti i dati raccolti necessitano di memorizzazione all'interno di un database, in quanto potrebbero essere informazioni il cui unico scopo è quello di essere utilizzati temporaneamente e, successivamente, subito cancellati.

## 3.2 Architettura

Dovendo riunire dispositivi non omogenei con caratteristiche hardware diverse e in grado di utilizzare tecnologie per trasmettere informazioni o collegarsi ad altri dispositivi differenti da loro, il mondo dell'IoT ha scelto una architettura di tipo orizzontale [8] (Figura 3.1). La particolarità della scelta consiste nella capacità di astrarre per i livelli applicativi i vari livelli inferiori, in modo tale da renderli il più indipendenti possibili dai dispositivi e dai mezzi di comunicazione da loro usati. Per fare ciò è stata introdotta una piattaforma che si occupa di tutta la parte di collegamento e dei servizi: le applicazioni lavorano su uno stesso tipo di ambiente in grado di condividere le infrastrutture e gli elementi interni ad ogni rete fra le varie applicazioni grazie ad un layer che avrà il compito di amministrare ogni funzione dei livelli inferiori, ponendosi fra il livello applicativo ed il livello comunicativo.

In Figura 3.1 vengono indicate quelle che sono le tre fasi interne a molti sistemi IoT:

1. fase di raccolta, nella quale i sensori raccolgono le informazioni nel sistema fisico di riferimento;
2. fase di comunicazione delle informazioni al punto di elaborazione;

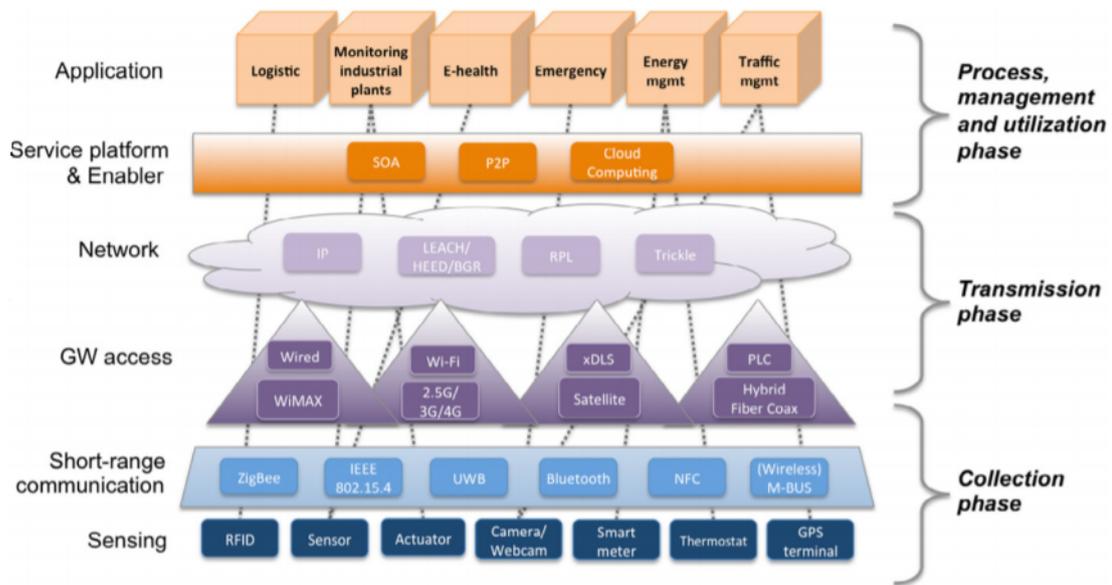


Figura 3.1: Architettura IoT

3. fase applicativa in cui ciascuna applicazione svolge il proprio compito.

### 3.2.1 Raccolta dati

La prima fase di quelle su indicate parte dai dispositivi che sono sul campo e che hanno il compito di raccogliere i dati prodotti dal sistema fisico oppure che caratterizzano altri oggetti circostanti.

Raccolti i dati il passo successivo dovrebbe essere quello dell'invio cosa però che raramente avviene considerata la varietà di dispositivi che possono essere inclusi all'interno del mondo dell'IoT e del fatto che non è sempre possibile che lo stesso abbia la capacità di collegarsi direttamente ad internet: nella maggior parte dei casi infatti il dispositivo è impossibilitato a farlo in autonomia. Per ottenere la connessione molti dispositivi si affidano ad un gateway intermedio che fungerà da tramite e con il quale gli sarà possibile accedere a internet. Ciò vuol dire che ogni dispositivo edge dovrà prima comunicare i dati al gateway, dopo di che questo farà ciò che è necessario per inviare le informazioni a chi di dovere.

Oltre alle problematiche della connessione sono da considerarsi anche le problematiche dovute al consumo della batteria che molte tecnologie standard hanno. Certi sensori possono essere in luoghi accessibili poche volte per via delle posizioni impervie in cui sono stati inseriti oppure a causa delle condizioni climatiche estreme. Pertanto avere un dispositivo che può durare il più a lungo possibile senza bisogno di essere mantenuto è un vantaggio importante.

Come soluzioni a tutte le precedenti questioni, sono state ideate varie tecnologie che permettono questo scambio di dati con pro e contro.

**NFC** È una tecnologia per trasmettere dati tra due dispositivi a corto raggio, di solito utilizzata quando essi sono in contatto fisico e/o ad una distanza massima di 10cm. Viene utilizzata per il riconoscimento o l'invio di Tag. Deriva dalla vecchia tecnologia degli RFID, con la differenza però di permettere che la comunicazione fra i dispositivi sia bidirezionale oltre a quella classica monodirezionale.

È di uso ormai commerciale ed è presente in tutti i dispositivi mobili: può essere usato per condividere informazioni personali quali contatti, foto, video o altro ancora, oppure per effettuare delle transazioni in modo molto veloce.

**Bluetooth** È una tecnologia che utilizza le onde radio per comunicare dati fra dispositivi. Negli anni sono state ideate versioni che con il tempo hanno ridotto sempre più il costo della batteria per il suo utilizzo diminuendone però allo stesso tempo la portata. Inizialmente, per via appunto della quantità di batteria richiesta, era una tecnologia che non si pensava potesse avere molto successo in questo campo, ma con l'avvento del Bluetooth Low Energy (BLE) e del Bluetooth 5.0, sviluppato principalmente per usi in ambito IoT, sembra essere diventata la tecnologia di punta viste le portate notevolmente ampliate senza aumentare allo stesso tempo il consumo di batteria.

Ha una struttura di tipo master-slave: un dispositivo master è in grado di poter reggere fino a sette connessioni con degli slave, andando a costituire reti chiamate scatternet. La comunicazione fra dispositivi può essere di due tipologie: una nella quale l'invio dei messaggi è asincrono, per cui tra le due fonti non c'è un metodo di coordinazione ed il messaggio sarà di tipo best-effort, mentre l'altra è di tipo orientato alla connessione, per cui le due entità potranno coordinarsi attraverso la struttura.

**ZigBee** Sempre in ambito di WPAN (Wireless Personal Area Network) rientra la tecnologia ZigBee, nata per proporsi come alternativa a quella Bluetooth. Rispetto al competitor permette di creare reti molto più ampie e allo stesso tempo che richiedono meno consumo di batteria grazie alle sue caratteristiche. Costruendo una rete mesh nella quale ogni nodo riceve e trasmette un messaggio, permette infatti a ciascun nodo di inviare messaggi a breve distanza limitando l'uso della batteria. All'interno di queste reti mesh si ha un coordinatore che è in grado di gestire l'intera struttura dei nodi ma che allo stesso tempo è anche un nodo trasmettitore, cioè che funge semplicemente da nodo intermedio per i messaggi che circolano nella rete mentre raggiungono la

destinazione prescelta; sono infine presenti anche i nodi terminali che hanno l'abilità di ricevere e inviare messaggi attraverso la rete.

### 3.2.2 Comunicazione dati

Una volta che i dati hanno raggiunto il gateway, possono essere inviati al server di raccolta tramite l'internet. In questa fase non ci sono tecniche particolari, vengono utilizzati tutti i mezzi di trasporto conosciuti quali la rete mobile oppure altre tecniche satellitari, connessioni via cavo oppure wireless come il WiFi.

In questa fase rientrano anche i dispositivi mobili: possono fungere sia da oggetto intelligente che invia direttamente i propri dati, sia da gateway per altri dispositivi ad esso connessi in precedenza.

### 3.2.3 Elaborazione dati

È la fase applicativa in cui l'elemento chiave è rappresentato dalle applicazioni che una volta ricevuti i dati tramite la rete li elaborano e svolgono determinati compiti sulla base dei risultati. In questo ambito acquista molta importanza il mondo del cloud, attraverso il quale è possibile ottenere una vasta gamma di *servizi* sotto forma di infrastrutture diverse. Tramite il cloud è possibile virtualizzare:

- risorse computazionali e unità di memorizzazione offrendole al cliente, conosciute con il termine di IAAS(Infrastructure as a service);
- piattaforma come database o web servers, identificandole con il termine PAAS(Platform as a service),
- applicazioni identificate con il termine SAAS(Software as a service)

Nel caso dell'IoT si fa uso del cloud per la memorizzazione e l'ottenimento dei dati: questo perché il cloud è in grado di analizzare e mantenere l'enorme quantità di informazioni che potrebbero essere prodotte dai vari dispositivi edge. Il cloud inoltre è in grado di gestire scalabilmente e facilmente situazioni in cui i dati sono presenti in quantità molto elevate, questo perché è stato realizzato al fine di gestire i Big Data.

### 3.3 Ambiti di sviluppo

Come già evidenziato in precedenza, lo scopo per cui è nato l'internet delle cose è quello di semplificare e automatizzare certe pratiche per l'uomo in modo da aiutarlo nella vita quotidiana; questa concezione è rimasta invariata negli anni a tal punto che anche oggi molte delle applicazioni dell'Internet of things sono state concepite per semplificare pratiche, riducendo il lavoro svolto con l'ausilio dei dispositivi intelligenti.

**Smart cities** Per Smart Cities si intende l'applicazione del mondo IoT in uno scenario cittadino, al fine di aumentare le funzionalità che la città stessa può offrire e per coordinare al meglio tutte le dinamiche che avvengono nel suo contesto. Grazie alla tecnologia in questione si è in grado di migliorare l'uso di molte infrastrutture cittadine, quali le strade oppure i sistemi di illuminazione, ma anche semplificare e migliorare la vita dei cittadini. Il passaggio da semplice città a smart city si ha con l'inserimento di una rete di sensori tra cui alcuni specifici con cui poter effettuare previsioni metereologiche, telecamere ed altoparlanti.

Un esempio di come una smart city rivoluzionerebbe la vita dei cittadini, è rappresentato da una applicazione per migliorare la gestione del traffico nelle ore di punta. Tramite un monitoraggio dello spostamento delle auto, considerate come smart objects, si inviano dati sulla loro posizione e destinazione, con i quali si ricostruisce una mappa della città con l'informazione di quanto ciascuna di esse è trafficata così da poter calcolare e gestire al meglio il coordinamento dei semafori per rendere il traffico il più scorrevole possibile. È anche possibile misurare l'inquinamento dell'aria, un tema molto importante per le città, così da identificare quando viene superata la soglia di inquinamento massima e avvisare le autorità cittadine.

**Domotica** È un ambito in cui avviene la trasformazione della casa di una persona in una *Smart Home*: installando dispositivi intelligenti in grado di comunicare fra di loro è possibile realizzare una casa all'interno della quale questi sono in perfetta sincronia ed agiscono per rendere al meglio la vita domestica in tutte le sue sfaccettature. Un ruolo chiave in questo ambito viene gestito dai dispositivi mobili che assumono la funzione di telecomandi universali: in applicazioni avanzate il telefono può essere usato come telecomando per accendere o spegnere i vari dispositivi ed allo stesso tempo per monitorare la routine di una persona. Il sistema usando le informazioni acquisite può memorizzare le abitudini personali e porle in atto in automatico alle ore programmate. Per esempio se una persona ha l'abitudine di fare un bagno caldo al ritorno dal lavoro, il sistema gestirà la preparazione degli elementi per il bagno caldo in

modo tale che questo sia pronto all'arrivo a casa dell'utente. È implicito che tutte le funzioni programmate possono essere resettate in qualsiasi momento da parte dell'utente.

**Ambito sanitario** Considerando gli ambiti sanitari, l'applicazione dell'IoT può essere fondamentale per velocizzare i tempi di guarigione e per rilevare problemi insorti durante la stessa fase. Una applicazione può essere l'uso attraverso una serie di sensori, molti dei quali anche wearable, per monitorare parametri vitali del paziente quali l'attività respiratoria, la temperatura corporea e la pressione sanguigna. Le informazioni verranno raccolte ed inviate al centro medico che attraverso tecniche di analisi delle informazioni potrà monitorare i pazienti da remoto e far intervenire prontamente l'assistenza sanitaria in caso di necessità per peggioramento della salute.

**Agricoltura** In ambito agricolo l'IoT può essere usato per superare tutte quelle difficoltà che nascono dall'aver a che fare con gli animali: grazie a sistemi di identificazione, come chip dotati di sensori oppure chip con tag RFID, si è in grado di monitorare l'attività del bestiame e allo stesso tempo identificare gli animali malati rispetto a quelli sani per evitare contagi. Allo stesso tempo grazie al monitoraggio continuo i chip possono memorizzare i risultati della analisi veterinarie oppure inviare informazioni riguardanti la salute dell'animale stesso.

**Sorveglianza e sicurezza pubblica** La sorveglianza può avvenire attraverso un insieme di telecamere smart che vengono posizionate sul territorio permettendo in tal modo di controllare vaste aree; questa rete di sorveglianza può essere di supporto alla Polizia durante eventi molto partecipativi, dove un controllo più efficiente sulla folla avviene proprio grazie a questa rete di videosorveglianza. Allo stesso tempo può essere d'aiuto anche in caso di sicurezza pubblica perché può monitorare certe parti della città a rischio meteorologico. È da considerare inoltre l'aiuto fornito nell'ambito della sicurezza con il monitoraggio dell'ingresso e dell'uscita delle persone dagli stabili: in caso di evacuazione per incendio è possibile essere messi al corrente di persone ancora presenti nello stabile.

### 3.4 Uso in ambito industriale: Industrial IoT

Partendo da una base consolidata quale l'IoT classico, si è deciso in ambito industriale di potenziare questa struttura, aggiungendone, alle tre fasi indicate in precedenza, due ulteriori: una prima di raccolta e organizzazione dei dati

e una seconda di analisi dei dati entrambe effettuate allorché le informazioni sono pervenute al server. Lo scopo finale del mondo dell'Industrial IoT è quello di ottimizzare il processo produttivo elaborando i dati ricevuti e portando ad un'analisi di previsione con conseguente manutenzione preventiva in grado di poter ottenere così un notevole risparmio in termini di costi di manutenzione. L'ambito industriale è un ambito molto vasto, infatti il mondo dell'IIoT si estende su molti ambiti della società civile quali:

- ambito manifatturiero;
- ambito dei trasporti;
- ambito energetico, uso di petrolio e gas;
- palazzi intelligenti (Smart Buildings) e industrie intelligenti (Smart Enterprises);
- città intelligenti (Smart Cities);
- ambito sanitario;
- telecomunicazioni.

Le aziende più innovative oggi investono sia su tecnologie IoT che IIoT, in quanto la prima consente di avere a disposizione macchine intelligenti, e la seconda di connetterle tra loro sviluppando dei dati preziosi per l'azienda e per i processi.

I dispositivi IIoT inoltre hanno caratteristiche fisiche più elevate rispetto ai semplici dispositivi IoT: sono per esempio più resistenti, perché devono operare in condizioni estreme come luoghi con temperature elevate, luoghi in cui è possibile che si corrodano oppure in condizioni subacquee. Gli oggetti IIoT inoltre sono quasi sempre applicati a gru, sonde e altri grandi macchinari. È difficile per chi esegue manutenzione raggiungere e sostituire questi dispositivi e per questo sono dotati di batteria a lunga durata.

# Capitolo 4

## Oltre il manifatturiero

Dall'inquadramento sui digital twin ottenuto grazie ai capitoli precedenti è quindi chiaro come questi al giorno d'oggi vengono utilizzati prettamente in campo manifatturiero perché si possono sfruttare le loro capacità, quali il tenere traccia di tutti i dati che ciascun prodotto oppure macchinario produce, fare analisi e predire situazioni o problematiche future, migliorare i costi di produzione e di manutenzione. Questa realtà deve però essere relegata solamente al campo prima nominato? Le sue particolarità lo rendono adatto a soddisfare certe richieste che sono poste in altri ambiti? Questo capitolo analizza i digital twin presentando i punti che potrebbero essere a favore di questa affermazione e mostrando di cosa necessiti una nuova possibile versione del digital twin che prevede un suo utilizzo in un campo di applicazione più vasto rispetto a quello odierno.

### 4.1 Utilizzo in altri ambiti di applicazione

Rientrando in un ambito prettamente industriale, il digital twin è perfetto per essere applicato anche in realtà che non siano relegate solamente al manifatturiero: la sua capacità di gestire in diminuzione i costi considerando le variabili in gioco è applicabile ed utile in qualsiasi campo venga inserito. È quindi prevedibile l'introduzione e l'espansione dei digital twin in campi come quello dei palazzi intelligenti, oppure della prevenzione della salute, o ancora in quello delle smart cities e in molti altri ancora.

Ciò che si vuole eseguire però non è una semplice esportazione del concetto di digital twin, ma l'utilizzo di questa occasione per l'ulteriore potenziamento della tecnologia in modo tale da renderlo adatto al miglior uso nei nuovi campi. È pertanto necessario focalizzare l'attenzione su un elemento che, oltre il campo manifatturiero e qualche altro campo particolare, acquista fondamentale importanza all'interno del sistema da analizzare: l'essere umano.

La differenza fondamentale fra il campo manifatturiero e gli altri è che in questi ultimi l'uomo è parte integrante ed è fondamentale nelle attività che devono essere svolte, perciò è necessario che il digital twin sia in grado di poter interagire con gli uomini per essere di supporto al loro lavoro e soddisfare di conseguenza qualunque tipo di necessità possa nascere.

L'introduzione dell'uomo quale nuovo elemento all'interno del sistema in cui il digital twin deve operare, crea delle necessità a cui il gemello digitale deve far fronte ma che allo stato attuale non può realizzare perché la sua struttura è limitata dalle applicazioni per cui è stato pensato originariamente:

- **Uso dei dati raccolti** — I digital twin per poter replicare le condizioni della controparte fisica hanno la necessità di essere aggiornati in tempo reale su tutte le informazioni che lo riguardano e questo avviene tramite i sensori installati sulla controparte oppure nell'ambiente circostante: come già spiegato i dati raccolti vengono utilizzati principalmente in funzione di un uso **futuro**, tranne nel caso di situazioni particolari come al verificarsi di un malfunzionamento. Con la presenza dell'uomo però questi dati non servono più solo in un'ottica futura ma nella maggior parte dei casi è necessario sapere determinate informazioni che si sono raccolte qualche istante precedente.
- **Ordini impartiti** — Generalmente i digital twin non devono rispondere a comandi che sono stati impartiti ma devono agire in totale autonomia, quindi non sono pronti a ricevere comandi di alcun tipo provenienti dall'uomo. Con la sua introduzione è importante perciò che i digital twin acquisiscano la capacità di poter reagire a comandi che l'uomo dà ed agire di conseguenza andando, nel caso, ad interagire anche con la sua controparte reale o con altre entità se presenti.

C'è quindi bisogno di sviluppare ulteriormente i digital twin in modo tale da adattarli alle richieste poste dai punti sopra elencati per poter introdurli in nuovi ambiti.

Per quanto riguarda questo documento si è deciso di analizzare un caso in ambito ospedaliero; nella sezione successiva verrà pertanto spiegato perché può essere utile implementare un digital twin dell'ospedale successivamente affrontando poi nel Capitolo 6 più approfonditamente il tema.

## 4.2 Ambito ospedaliero

Prima di analizzare direttamente l'ambito ospedaliero si prende come punto di partenza un progetto ideato dalla IBM [7] nel quale si è realizzato un digital twin di un palazzo andando a creare quello che può essere definito come

uno *Smart Building*. Rispetto agli esempi illustrati nei capitoli precedenti, si evidenzia in questo caso che il digital twin apporta benefici diretti all'azienda operando sull'edificio stesso e non sui prodotti finali o i macchinari utilizzati durante il processo produttivo. Per l'economia di un'azienda infatti avere un palazzo intelligente che sia in grado di poter gestire in autonomia il sistema di illuminazione oppure gli impianti di riscaldamento/raffrescamento è un gran vantaggio. In questo caso il digital twin non si ferma solo a questo: può infatti proporre nuove postazioni alternative per gli impiegati che sono soliti uscire ed entrare più frequentemente in azienda, così da far guadagnare loro tempo nel raggiungere il piano del palazzo in cui sono collocati molto più velocemente ma anche per usurare meno l'ascensore nel lungo periodo e ridurre quindi i costi di manutenzione. Può essere di supporto anche all'uomo perché sulla base delle sue azioni quotidiane può preparare una routine giornaliera personalizzata per ogni dipendente in modo tale da rendere il lavoro meno stressante ed aumentare la sua produttività.

Questo esempio può essere una base di partenza utile per lo sviluppo di un digital twin in ambito ospedaliero: il gemello digitale dell'ospedale aiuterebbe nel coordinare perfettamente le sale operatorie sapendo in anticipo le operazioni che dovranno essere svolte, cercando di ridurre il più possibile gli spostamenti dei pazienti sulla base della loro posizione all'interno dell'ospedale e cercando di ottimizzare al meglio il modo in cui avviene la suddivisione delle operazioni nelle varie sale di intervento in funzione di ciò che dovrà essere svolto. In aggiunta può essere di supporto all'attività umana perché può essere usato nella funzione di "infermiere digitale" sempre attento alle condizioni di un paziente. Monitorando continuamente i dati del ricoverato può rilevare in anticipo un'anomalia nella sua fase di recupero e informare il medico assegnatogli. Oppure può essere molto importante nel caso di un paziente per il rilevamento delle condizioni antecedenti alla formazione di una malattia grazie alla creazione di un digital twin rappresentante la sua cartella clinica.

Per poter far in modo che i digital twin siano inseribili in altre realtà non manifatturiere può essere utile che si avvalgano di altre tecnologie così da poter utilizzare certe loro caratteristiche per soddisfare alcune delle nuove necessità sorte. Proprio per questo motivo nei capitoli successivi si studieranno alcune tecnologie che sono state considerate importanti a tal fine.



# Capitolo 5

## Mirror World

Il voler creare una copia digitale di un'entità reale con la quale poter effettuare delle operazioni non è un'innovazione sviluppata per la prima volta dai digital twin, ma deriva in gran parte da ciò che venne introdotto con i *Mirror World*. Il termine *Mirror World* venne utilizzato per la prima volta nel 1991 da David Gelernter [9], in una società nella quale per via di una diffusione di internet non ancora paragonabile a quella odierna, le informazioni si diffondevano in modo molto ridotto: i *Mirror World* nascono perciò per cercare di superare questo muro, per rendere ancora più accessibili e pubblici quelle informazioni che erano pubbliche ma che di fatto non venivano diffuse alla folla. Nel capitolo corrente viene affrontato questo tema, spiegando come era inizialmente concepito e come invece è interpretato al giorno d'oggi.

### 5.1 Cosa sono i Mirror World

Il Mirror World non venne concepito come un programma classico, ovvero una serie di istruzioni sequenziali dove è facile identificare un punto di inizio ed un punto nel quale il programma termina e viene restituito un risultato ma come una entità continuamente accessibile, un mondo in costante movimento e aggiornamento. Il suo scopo era quello di restare il più possibile simile all'originale, al quale in aggiunta dovevano unirsi tutti i vantaggi attinti dal mondo digitale quali la facilità di accesso e la sua presenza in qualunque parte del mondo.

Il Mirror Word è un mondo che come dice il termine stesso è lo "specchio" di quello che viviamo tutti i giorni, quindi ciascun elemento ha la sua controparte digitale che lo rappresenta. Esattamente come accade nella realtà, anche nei Mirror World ogni elemento è individuato attraverso delle coordinate geografiche all'interno del sistema; questa posizione deve essere rispettata per ogni elemento in accordo con la posizione che ciascuno di essi ha nel mondo reale

per mantenere il rapporto di uguaglianza che è alla base del collegamento fra i due sistemi.

Non è importante che ciascun elemento digitale venga riproposto con lo stesso aspetto estetico della controparte originale, però è fondamentale che ciascun elemento possa essere riconosciuto facilmente e che fra elementi dello stesso genere ci sia coerenza nella rappresentazione.

Il Mirror World può essere analizzato da punti di vista diversi per ciò che riguarda il suo utilizzo; a primo acchitto può essere percepito come un punto dove i dati vengono raccolti e possono essere visualizzati quindi con un utilizzo che li paragonerebbe ad un database affiancato per la visualizzazione da una dashboard. Al reale il sistema però può essere molto di più di quanto sino ad ora illustrato.

Grazie alla raccolta di dati in tempo reale da tutto il mondo, è possibile vedere l'intera società su più livelli di astrazione: facendo l'esempio di una città, grazie ai Mirror World si possono ottenere informazioni generali su cosa sta accadendo in un determinato istante all'interno del suo perimetro, come per esempio informazioni sul traffico, temperatura per i diversi quartieri, posizione geografica di una determinata metropolitana, il numero di aziende correntemente aperte in base all'orario di lavoro e molto altro ancora, ma allo stesso tempo si può accedere a informazioni relative al singolo quartiere, come al singolo palazzo oppure al proprio appartamento.

A queste funzionalità se ne aggiungono anche altre che privilegiano il rapporto umano: questi mondi infatti possono servire come punti di incontro fra le persone, dove è possibile conoscere gente ed intrattenersi con conversazioni di qualsiasi tipo, dando anche luogo alla nascita di gruppi interessati alla risoluzione di problemi importanti usando il Mirror World stesso come fonte di trasmissione delle informazioni fra le persone e come fonte di testimonianza a loro favore. Sempre in quest'ottica una persona in visita in quella città può trarre vantaggio da questi punti di incontro per poter essere aiutato facilmente da altri visitatori che invece necessitano di informazioni diverse.

Tutto quanto descritto in precedenza può essere riassunto da una frase usata dallo stesso David Gelernter che per descrivere i Mirror World scrisse:

*The Mirror World isn't a mere information service. It's a place. You can "stroll around" inside a Mirror World. You can meet and (electronically) converse with your friends, or random passers-by, chat with a policeman or a teacher or a politician, discover likeminded fellow-citizens; form some idea of the public mood.*

## 5.2 L'importanza assunta dai dati

I vantaggi del Mirror Word però non si limitano a quanto detto in precedenza poiché non memorizza dati e li conserva per breve tempo, ma è in grado di mantenere al proprio interno tutti i dati raccolti dal momento della sua accensione, come una sorta di registro storico.

Questo può tornare utile in moltissime situazioni poiché è possibile verificare dati di qualsiasi epoca storica che hanno visto spettatore il Mirror World. Con queste informazioni si possono effettuare indagini statistiche, ma allo stesso modo anche studiare e capire tutti i passaggi culturali, economici e politici che hanno portato ad un certo specifico evento, capirne le cause e le conseguenze, costituendo questi contenuti le migliori informazioni di quel periodo.

Una tale quantità di informazioni è però impossibile da memorizzare indifferentemente dalla tecnologia utilizzata, soprattutto se si vuole mantenere nel tempo una specificità molto elevata nelle informazioni. Di ciò se ne rese conto anche David Gelernter che proprio per questo spiegò come nel lungo termine le informazioni che rimangono memorizzate per ciascun Mirror World diventano sempre meno specifiche, come conseguenza è importante mantenere solo ciò che è strettamente necessario per ricostruire l'andamento economico, culturale e politico di una epoca.

Sono inoltre da tenere in considerazione tutte le problematiche nascenti da un mondo in cui le informazioni sono ipoteticamente visibili da chiunque: per ovviare a ciò ciascun dato richiede un certo diritto di privilegio per l'accesso alle informazioni contenute, così che i Mirror World possano filtrare le informazioni facendo visualizzare a ciascun utente quanto richiesto in base al loro diritto di privilegio analogamente a quanto avviene nella società in cui viviamo. Per questo motivo se un utente qualsiasi volesse visualizzare informazioni relative ad un ospedale potrebbe vedere solamente le informazioni generali e i risultati degli interventi che ha lì eseguito mentre nel caso di un medico saranno visibili informazioni più importanti come le cartelle cliniche di tutti i pazienti del suo reparto.

## 5.3 Le entità attive dei Mirror World: gli agenti

Essendo il Mirror World un mondo complesso bisogna che alla sua base ci siano degli elementi molto semplici che però, cooperando tra loro, gli permettano di eseguire qualunque tipologia di compito gli venga affidato. Gli elementi semplici del complesso, al pari delle fondamenta di un edificio, sono rappresentati dagli agenti. Gli agenti sono delle entità attive in grado di svolgere

compiti di qualsiasi genere e che coesistono all'interno di un mirror world. Tali agenti non sono eterni, perciò non devono poter esistere per sempre, ma possono nascere dalla richiesta di un altro agente per svolgere un compito, dopo di che terminare una volta che hanno completato ciò che gli era stato assegnato. Ci sono però certi agenti che invece persistono per lungo tempo a fronte dell'importanza del compito che devono svolgere all'interno del sistema. Non è fondamentale che un agente sia sempre attivo e svolga sempre il compito che gli è stato assegnato, ma è importante che sia sempre pronto ad agire nonostante quanto tempo debba passare prima che sia effettivamente richiesto il suo intervento.

*If a particular hyper-specialized agent runs patiently for thirty years without so much as clearing its throat, and on day 16951 prints a message that prevents a serious medical mistake, we are satisfied.*

Essendo però entità molto semplici, è possibile che non riescano a completare compiti complessi da soli, perciò è richiesto che in talune circostanze questi interagiscano fra di loro. L'interazione fra agenti non è sincrona per il motivo spiegato in precedenza, ovvero che un agente non è sempre attivo oppure deve completare un compito molto importante prima di dedicarsi ad altri compiti assegnatigli. Quindi se un agente ha bisogno dell'aiuto di un altro agente per terminare il suo compito è molto probabile che il suo interlocutore non sia al momento disponibile oppure, nel caso peggiore, non esista. Per ovviare a questa problematica la comunicazione avviene tramite messaggi che possono essere diretti ad un singolo destinatario o a più di uno, i quali possono essere conosciuti o meno, oppure essere diretto ad una qualunque entità che sia in suo ascolto. Infine il messaggio non è legato al concetto di tempo, questo vuol dire che certi messaggi possono avere un limite temporale come altri possono essere disponibili per sempre, fino a che non ci sia qualcuno che li legga. Nel momento in cui un certo agente ha terminato il suo compito di importanza massima ed è disponibile, può verificare se ha ricevuto un messaggio nella propria coda messaggi e nel caso in cui la risposta è affermativa, effettuerà ciò che gli è stato chiesto nonostante il mittente possa non essere più attivo.

## 5.4 Mirror World al giorno d'oggi

Oggigiorno la visione dei Mirror World, per quanto ancora abbia molti punti in comune con quanto detto da Gelernter, è cambiata notevolmente. Questo perché alcuni elementi che erano inclusi originariamente nei mirror world con il tempo sono stati implementati in altri sistemi, basta pensare ai social media come soluzione d'incontro nel mondo digitale attraverso i quali è possibile

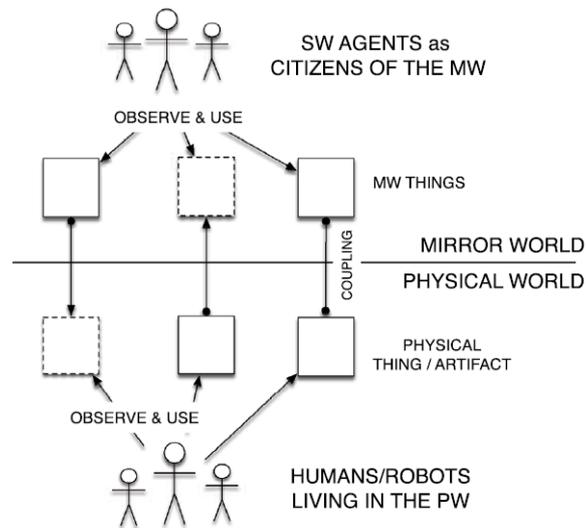


Figura 5.1: Rappresentazione della interattività fra il mondo digitale e reale

conoscere gente nuova e fare nuove amicizie, mentre con la nascita di nuove necessità sono state sviluppate oppure ampliate altre funzionalità. Ci sono state alcune funzioni che invece hanno avuto un depotenziamento: in quest'ultima categoria rientra l'abilità dei mirror world di poter essere in grado di mantenere i dati di tutta la **storia** "vissuta" dal mondo digitale. L'insieme di tali informazioni sarebbe un insieme molto grande tale da richiedere una notevole quantità di memoria per il suo mantenimento. In più anche le **dimensioni** di un mirror world sono state largamente diminuite: nonostante si parli di altre entità di dimensioni simili, un esempio sono le Smart Cities, al momento quando si parla di qualcosa relativo al concetto di mirror world, oppure anche di gemello digitale, si pensa ad elementi di dimensioni ridotte. Ciò che però ha subito un notevole ampliamento e una notevole attenzione sono gli agenti e più in generale tutto ciò che riguarda il concetto di **interazione** fra il mondo digitale e quello reale: non è più sufficiente infatti che il mondo digitale si limiti ad *imitare* ciò che succede nel mondo reale senza che possa avere una qualche influenza su di lui, ma si vuole che il mondo digitale sia la naturale *estensione* di quello fisico, migliorandolo dove possibile. Proprio per questo motivo qualunque elemento fisico, indifferentemente dal suo essere un oggetto oppure un essere vivente, che abbia una propria controparte nel mondo digitale, oltre ad essere osservato costantemente da uno o più agenti, ha la possibilità di ricevere certi input da parte di essi i quali sono in grado di alterare il suo stato. Allo stesso modo gli agenti possono avere una rappresentazione nel mondo reale, attraverso oggetti inanimati come elementi ambientali oppure oggetti predisposti, ed è possibile interagire con loro oppure osservarli (Figura

5.1). Grazie a ciò si ha una sorta di accoppiamento più tangibile e percepibile tra i due mondi visto che qualunque sorta di azione svolta nel mondo digitale da parte di agenti, che siano la versione digitale di una persona o meno, potrebbe portare a dei cambiamenti che possono essere osservati anche in quello fisico e viceversa.

Di questi elementi ne parlano Ricci, Tummolini e Castelfranchi nel loro articolo [10], dove spiegano come una possibile evoluzione ulteriore dei mirror world potrebbe nascere grazie all'introduzione della **realtà aumentata** per ampliare ulteriormente l'interazione e l'osservazione degli agenti nel mondo fisico, i quali grazie a certi dispositivi potrebbero anche ottenere un aspetto fisico.

Ciò che interessa il grande cambiamento fra i mirror world originari e quelli odierni è il fatto che non siano più composti solamente da elementi che semplicemente raccolgono dati oppure inviano informazioni, e cioè hanno quindi un ruolo *passivo*, ma che questi siano una gran minoranza in confronto a tutte le entità *attive* che lo popolano le quali, oltre a poter interagire con qualunque tipo di elemento, possono effettivamente apportare delle modifiche al sistema.

# Capitolo 6

## Caso di studio: ospedale intelligente

In questo documento, come già anticipato al Capitolo 4.2, si vuole analizzare come un digital twin possa essere realizzato nel caso di uno sviluppo in ambito ospedaliero. Dopo aver dimostrato nel Capitolo 4 che i digital twin possono essere utili anche all'infuori di un ambito manifatturiero, e dopo aver analizzato nel Capitolo 5 una tecnologia con la quale è possibile potenziare l'attività e le funzioni di un digital twin classico, in questo capitolo si vuole illustrare un modello attraverso il quale è possibile realizzare a livello teorico la struttura di un digital twin di un ospedale intelligente in cui è presente la concezione di mirror world.

### 6.1 Modello

Per poter realizzare un modello basato sulla figura del digital twin è importante che nel realizzare i gemelli digitali di ciascuna parte dell'ospedale, venga mantenuta corrispondenza con i rapporti che l'oggetto fisico stesso ha nella realtà: per questo motivo un digital twin di un elemento reale deve avere le stesse relazioni con gli altri digital twin che la sua controparte fisica ha con i relativi elementi reali. In base al ragionamento appena esposto:

- così come l'ospedale ha al proprio interno numerosi reparti, il digital twin dell'ospedale si comporrà di più digital twin rappresentanti ciascun reparto;
- così come ciascuno dei reparti ha assegnato un certo numero di dipendenti e nel suo interno ha numerose stanze, ognuno dei digital twin dei reparti avrà assegnato un certo numero di digital twin relativi ai dipendenti e

avrà in carico i digital twin delle stanze contenute all'interno della sua controparte reale;

- così come in ciascuna stanza sono allocate delle attrezzature mediche e dei pazienti, il digital twin della stanza conterrà i digital twin delle attrezzature mediche e dei pazienti ospitati nel mondo reale.

Di seguito verrà elencato ciascuno degli elementi nominati in precedenza e illustrati nel modello in Figura 6.3, spiegando cosa rappresentano e quali sono le loro funzionalità.

Grazie alla Figura 6.4 inoltre si può notare come ciascuna di queste entità sia un digital twin e ne possenga quindi tutte le caratteristiche, nonostante non sia indicato nel modello. Questo vuol dire che ciascuna entità ha uno stato passato che è osservabile, e può essere interpellato per effettuare una predizione basata sui dati in suo possesso oppure gli si può assegnare il compito di seguire l'andamento della sua controparte reale per rilevare anomalie sull'andamento previsto.

### 6.1.1 Rappresentazione dei pazienti

Ciascuno dei pazienti di cui l'ospedale dovrà occuparsi avrà la propria rappresentazione nel mondo digitale tramite il *PatientDt*. Questa entità è una cartella clinica digitale avanzata che sfrutta le particolarità del digital twin: raccogliendo continuamente dati sul paziente tramite i sensori presenti sul paziente stesso, è in grado di formare una cartella clinica completa sulle sue **condizioni presenti e passate**; in questo modo è molto facile da parte di chiunque sia autorizzato poter ottenere lo stato corrente e/o passato del paziente per poter vedere come procede il recupero a seguito di un intervento, oppure ottenere un profilo basato su ciascun paziente in grado di mostrare come potrebbe reagire a seguito di un qualsiasi tipo di intervento. Sempre sfruttando le caratteristiche base del digital twin si è inoltre in grado di abilitare una certa funzione capace di monitorare le condizioni di un paziente e compararle con quelle previste, potendo così intervenire in tempo per possibili cambiamenti improvvisi segnalati da un allarme del digital twin stesso diretto verso il personale oppure verso il dottore che lo ha in carico attraverso l'interazione con i loro corrispettivi digital twin.

Ciascun gemello digitale di un paziente potrà essere identificato attraverso un **nome** corrispondente a quello del paziente reale, e localizzato all'interno dell'ospedale attraverso una **posizione**, inoltre all'occorrenza potrà essere contattato per aggiornare le informazioni contenute riguardo alla persona fisica.

### 6.1.2 Rappresentazione dell'attrezzatura medica

Così come ogni paziente ha un proprio digital twin che lo rappresenta nel sistema digitale, anche ciascuna attrezzatura medica ha a sé collegato un digital twin in grado di monitorare costantemente il suo operato e di verificare se c'è malfunzionamento, rappresentato nel modello dalla entità *EquipmentDt*. Potrà verificarsi inoltre che, in aggiunta a quanto illustrato, altri digital twin successivamente meglio descritti nel corso della presente sezione, abbiano necessità di interagire con il gemello digitale collegato all'attrezzatura medica. E' possibile che con qualcuna delle comunicazioni in arrivo venga alterato lo stato di tale digital twin. In tal caso il gemello in questione deve essere in grado di poter comunicare con la sua controparte fisica, in modo tale da alterare anche il suo di stato e mantenere fedele la rappresentazione del mondo digitale.

Qualora invece l'attrezzatura effettui una rilevazione di informazioni su un paziente, quindi nel caso dovesse trattarsi di uno strumento di diagnostica, verrà prodotto un dato che verrà usato per aggiornare lo stato corrente del paziente: questo significa che il digital twin di una attrezzatura medica dovrà essere in grado di comunicare direttamente con i digital twin dei pazienti per inserire le nuove informazioni appena raccolte.

È infine in grado di poter comunicare con la stanza nella quale è situato per inviare dati di diagnostica e di funzionamento.

Come nel caso precedente ciascun *EquipmentDt* è in grado di memorizzare lo stato corrente del dispositivo ed è identificato da un nome ed una posizione nella quale si trova.

### 6.1.3 Rappresentazione del personale medico

Il digital twin del personale medico, identificato da *EmployerDt*, è la rappresentazione digitale di un qualunque dipendente interno all'ospedale: si può trattare di un dottore, come di un'infermiera oppure di un'assistente. Ciascuno di questi elementi è in grado di interagire con altre entità dello stesso tipo per risolvere task comuni oppure complessi, mentre può interagire con i digital twin dei pazienti per poter osservare il loro stato attuale o passato, come anche per aggiornare determinati dati in seguito ad una visita avvenuta nel mondo reale. Allo stesso tempo è in grado di comunicare con i reparti in cui sono inseriti per impartire determinati comandi oppure per ottenere informazioni generali. Viene identificato esattamente come i casi precedenti.

### 6.1.4 Rappresentazione delle stanze

Con *RoomDt* si identificano le entità caratterizzanti i digital twin delle stanze ospedaliere presenti all'interno dei vari reparti: ciascuna di esse quindi

rappresenterà una stanza, e raccoglierà dati tramite una serie di sensori che sono presenti al suo interno. Queste informazioni possono riguardare lo stato attuale della stanza, che è osservabile da entità esterne, come possono però riguardare dati relativi alle condizioni attuali dei pazienti che sono presenti al loro interno. Questi dati sono ottenuti tramite le attrezzature presenti, che possono essere di qualunque tipo: sotto quest'ottica anche un letto è un attrezzatura medica intelligente in grado di raccogliere dati sul paziente che lo utilizza. Di conseguenza se i digital twin delle attrezzature non si occupano di aggiornare lo stato corrente del paziente, questo compito verrà assolto dal digital twin della stanza, che è in grado di interagire con i gemelli digitali dei pazienti presenti al loro interno. Tra le loro funzionalità è anche contenuta quella di poter comunicare con i reparti al fine di trasmettere eventi importanti, oppure dialogare con il personale medico, sempre interagendo con i rispettivi digital twin.

### 6.1.5 Rappresentazione dei reparti

Ciascun reparto ha la sua rappresentazione tramite *WardDt*, un digital twin in grado di organizzare la logistica e la tempistica del determinato reparto sulla base dei dati reperiti dalle stanze e dalle attrezzature presenti al loro interno. Svolge quindi la sua funzione di digital twin analizzando tutti i vecchi dati dello stesso reparto, contenuti in un suo stato passato osservabile, e sui dati descritti in precedenza, ottimizzando le dinamiche che possono avvenire internamente al reparto; interagendo inoltre con digital twin di altri reparti può reperire altri dati su cui massimizzare i risultati. Ha perciò l'abilità di interagire con altri reparti e con le stanze a lui assegnate, oltre a considerare la possibilità di comunicare con il personale medico addetto. Oltre ciò può interagire anche con i pazienti, creando nuovi digital twin qualora si presenti un paziente che non era mai stato registrato nel sistema, oppure aggiornare alcuni suoi dati sulla base di eventi legati al reparto stesso come un trasferimento in un altro reparto. Nel caso di un reparto molto grande, questo può essere suddiviso in sottoreparti, ognuno dei quali è presente al suo interno con coordinamento effettuato dal reparto contenitore.

Sfruttando la caratteristica dei digital twin di dover creare una struttura software che abbia le stesse proprietà della realtà, si possono andare ad inserire elementi in più all'interno del mondo digitale per ottenere un grande vantaggio sulla progettazione grazie ai principi dell'ingegneria del software: analizzando infatti le caratteristiche dei vari reparti è possibile ricreare la concezione di reparto da un punto di vista generico che racchiude al suo interno gli elementi che ciascun reparto ha in comune. In tal caso per ciascuno di essi sarà poi

possibile creare un reparto specializzato con caratteristiche specifiche proprie di quello preso in considerazione.

### 6.1.6 Digital twin dell'ospedale

Come per tutti gli elementi di cui si compone, anche l'ospedale è rappresentato da una entità di tipo digital twin: la sua caratteristica di massimizzare i profitti e i processi è utile per coordinare i reparti sottostanti, tramite i dati raccolti da loro. In determinate occasioni è anche in grado di interagire con il personale, per comunicazioni importanti.

Analizzando l'ospedale all'interno di un'ottica mirror world applicata all'intera città, se non in un futuro prossimo applicato all'intero mondo, sarà il digital twin dell'ospedale ad occuparsi di richieste relative ad agenti esterni all'ospedale, mettendolo in comunicazione con i dovuti reparti sottostanti. Anche per questo motivo l'ospedale come tutte le entità precedentemente descritte ha uno stato osservabile e una posizione, per inquadrarlo all'interno del mondo replicato digitalmente.

## 6.2 Esempi di interazioni

In questa sezione si esaminano alcune situazioni tipo che possono accadere all'interno di un ospedale al fine di valutare le tipologie di interazioni che si creano fra le parti prima introdotte.

Nel caso di esame diagnostico effettuato su un paziente, ad esempio una TAC (Figura 6.1), le interazioni che avvengono sono molto semplici da analizzare: la prima interazione che avverrà sarà quella di un operatore sanitario che, tramite il proprio gemello digitale, impartirà al digital twin dello strumento collegato alla TAC comandando l'effettuazione dell'esame. A seguito di questa operazione che il digital twin del dispositivo farà effettuare al dispositivo fisico, verrà prodotta una informazione relativa al paziente, informazione che verrà inserita nel suo stato corrente e memorizzata all'interno del suo digital twin presente nella struttura tramite un'interazione compiuta dal digital twin del macchinario.

Altro caso è invece l'arrivo di un paziente al pronto soccorso.

A seguito dell'arrivo del paziente in ospedale, il reparto di pronto soccorso effettua una ricerca nel sistema del digital twin della persona appena arrivata; qualora questo non fosse mai stato registrato è fondamentale creare il suo digital twin. In seguito il reparto, basandosi su operazioni di analisi possibili grazie al suo stato corrente o passato, si occuperà di trovare la migliore sala per il pronto soccorso e di informare il medico più adatto al tipo di emergenza da

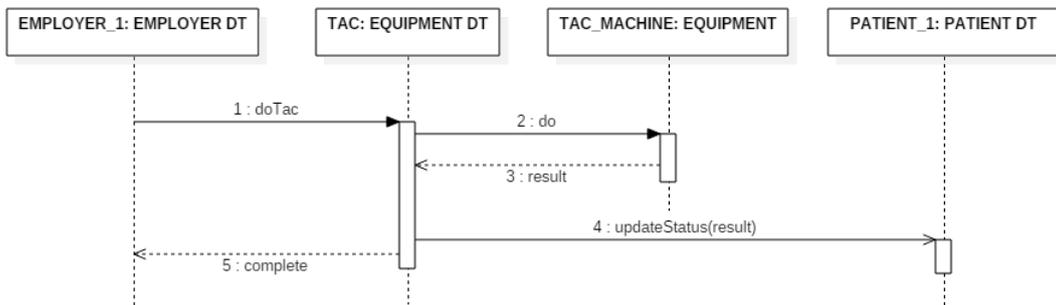


Figura 6.1: Interazioni per una TAC di un paziente

affrontare. Grazie a queste interazioni svolte si potrà successivamente operare il paziente nel mondo fisico. Una volta terminata l'operazione il digital twin del dottore si occuperà di aggiornare lo stato attuale del digital twin del paziente al fine di avere le stesse condizioni del paziente sia nel mondo reale che in quello digitale. Terminato il tutto, quando il paziente verrà trattenuto in una stanza per la fase di osservazione e recupero, il digital twin del reparto informerà il digital twin della stanza per informarlo che dell'arrivo di un nuovo paziente.

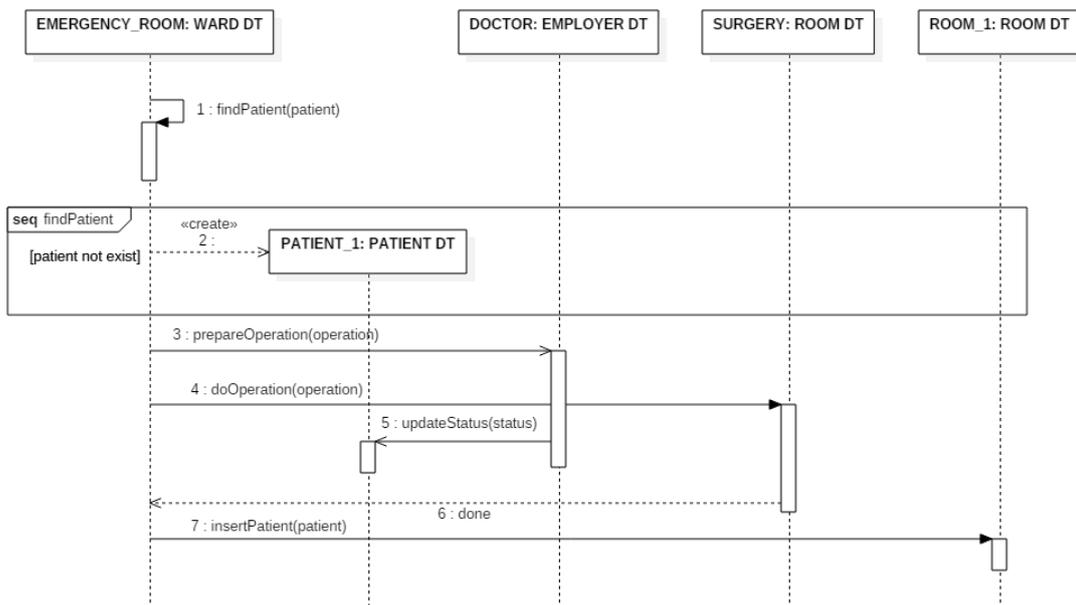


Figura 6.2: Interazioni a seguito di un evento di pronto soccorso

### 6.3 Caratteristiche del sistema proposto

**Costante raccolta di dati** Dovendo realizzare un digital twin per ciascuno degli elementi che è interno all'ospedale, si dovrà realizzare una fitta rete di sensori, che potranno essere anche di tipo wearable, per poter effettuare controlli direttamente sui pazienti oppure sulle persone all'interno della struttura. Questa rete deve essere aggiornata in real time al fine di replicare al meglio le condizioni attuali di ciascun elemento fisico. È normale in tale condizione che venga raccolta una enorme quantità di dati. Considerate le caratteristiche base del digital twin, la raccolta dati ha lo scopo principale di anticipare ciò che potrà accadere in **futuro**, con l'esclusione di situazioni particolari come il verificarsi di un malfunzionamento. Grazie inoltre alla realizzazione di un mirror world questi dati potranno essere sempre consultabili perché potrebbe essere necessario usarli dopo poco tempo dalla raccolta o dopo una quantità di tempo rilevante.

**Mantenimento dei dati** I dati rilevati possono essere sempre consultabili, questo poiché verranno memorizzati in strutture che li manterranno nel tempo. In questo modo è possibile consultare informazioni sul passato in qualsiasi momento ed utilizzarle per studiare come mai un certo fenomeno sia accaduto. Nel nostro caso se per esempio le condizioni di salute di un paziente dovessero degenerare per una causa sconosciuta, il poter usare i suoi dati passati è fondamentale poiché potrebbe essere utile per scoprire una patologia del paziente che è nata in seguito ad un intervento. Questo vuol dire che i dati memorizzati potrebbero servire sia dal punto di vista delle analisi pregresse per ciò che comporta il normale funzionamento dei digital twin sia per supporto all'attività lavorativa.

**Interazione fra mondo digitale e fisico** Per come è realizzato il sistema è fondamentale che vengano mantenute al meglio le condizioni di similarità fra i due mondi: questo vuol dire che se un'azione del mondo reale ha un effetto su un altro elemento fisico, questa azione deve essere replicata anche nel mondo digitale per poter mantenere l'equilibrio. È vero però anche il contrario, quindi se si ha un'operazione che provoca un cambiamento in una entità del mondo digitale che ha a sé collegato un elemento fisico, allora è necessario che provochi un qualche tipo di cambiamento anche nella sua controparte reale, per poter tenerla aggiornata con il suo stato del mondo digitale.

## 6.4 Difficoltà nella realizzazione del sistema

Introdurre un sistema del genere all'interno di una struttura quale quella ospedaliera non è una operazione facile poiché il sistema deve necessariamente fare i conti con una serie di problematiche nascenti dalle soluzioni attualmente in uso: all'interno degli ospedali infatti non sono presenti sistemi omogenei e organizzati ma la maggior parte dei programmi con cui la nuova soluzione dovrà confrontarsi sono diversi fra loro e considerano parametri molto diversi fra loro stessi. Per questo motivo il nuovo modello si deve porre come layer che è in grado di garantire l'**interoperabilità** fra i vari programmi e/o sistemi già presenti e funzionanti all'interno di ciascun ospedale, dovendo garantire quindi il corretto funzionamento di ciò che è già presente. Oltre a ciò è importante che vengano trasferiti sulla nuova piattaforma i vecchi dati, creando se possibile delle versioni di digital twin relativi ai pazienti con ciò che è presente negli archivi cartacei e digitali attuali, così da avere una base di partenza buona per le funzionalità proposte dal digital twin.

Potrebbero anche nascere problematiche non dovute alla parte software del sistema. L'inserimento di sensori e dispositivi wearable per monitorare lo stato dei pazienti potrebbe infatti risultare molto invasivo per gli stessi. È perciò necessario che questa parte di sistema venga implementata a step evolutivi diluiti nel tempo tali da permettere all'utenza di abituarsi a questo nuovo sistema.

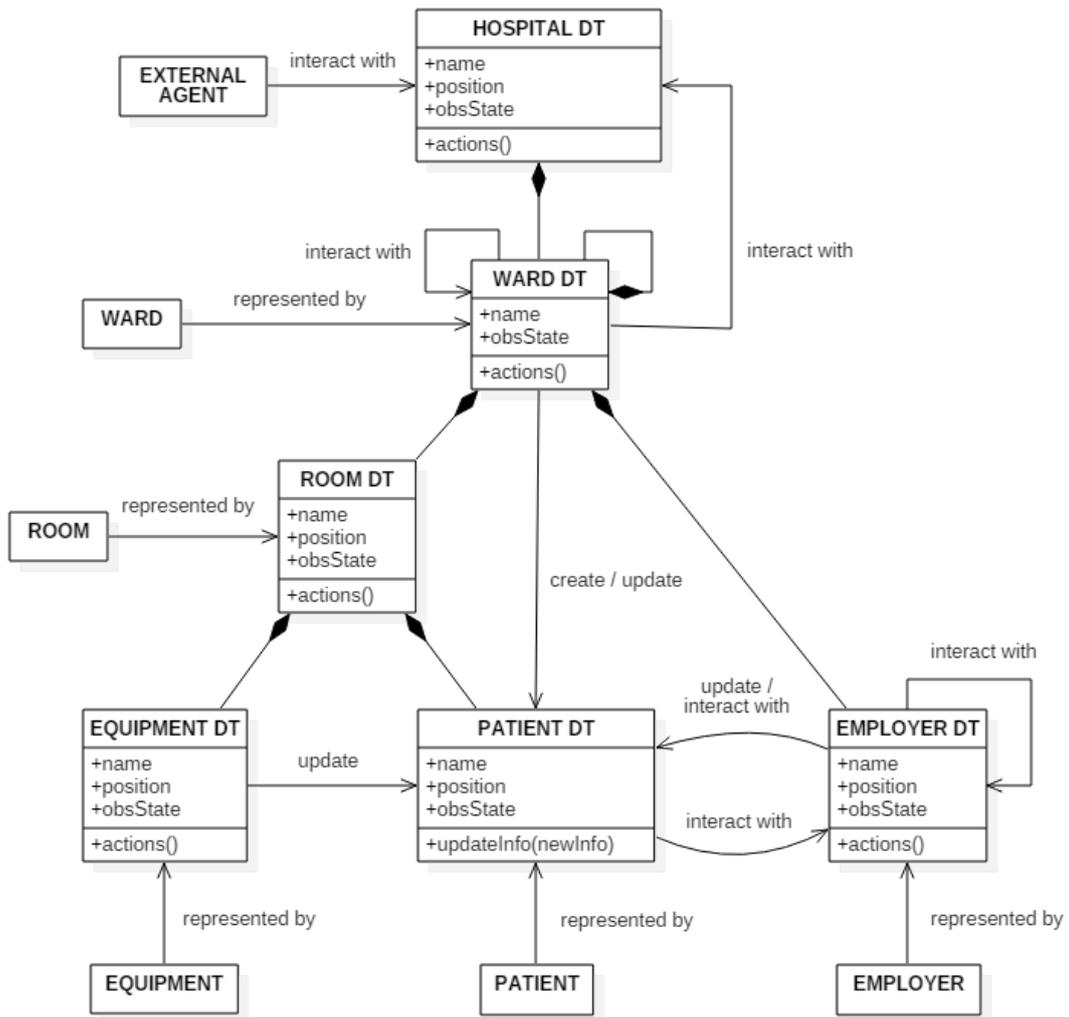


Figura 6.3: Modello rappresentativo

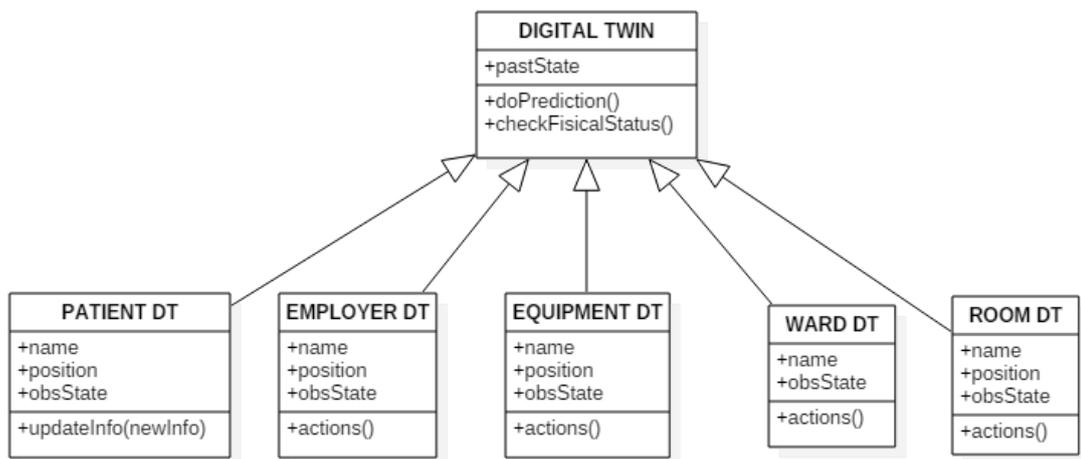


Figura 6.4: Estensione degli elementi del modello rispetto al digital twin classico

# Conclusioni

Esportare la conoscenza dei digital twin in ambiti esterni a quelli manifatturieri sembra essere una direzione molto importante e significativa, anche in virtù del fatto che sono già presenti sul mercato delle software house come la General Electric che stanno sperimentando questo passaggio.

L'integrazione con i mirror world sembra essere inoltre un punto a favore di questo passaggio perché, ponendo al centro del sistema l'uomo e le sue azioni, favorisce anche per gli stessi digital twin un uso più orientato ai bisogni personali e non solo a questioni aziendali.

Nel caso di studio dell'ospedale ancor di più si nota come è importante e innovativo, e come può essere di grande aiuto per supportare il lavoro dell'uomo anche in campi nei quali l'imprevedibilità gioca un fattore chiave.

Ci si augura che le argomentazioni trattate in questo documento possano essere utili per l'ulteriore sviluppo di digital twin e mirror world in sempre più numerosi ambiti virando verso un mondo sempre più connesso e digitalizzato.



# Bibliografia

- [1] Aaron Parrott, Lane Warshaw, *Industry 4.0 and the digital twin, Manufacturing meets its match*, Deilotte University Press, 2017
- [2] Colin J. Parris, *Conferenza Mind + Machines: Meet a Digital Twin*, URL: <https://www.youtube.com/watch?v=2dCz3oL2rTw>, 2016
- [3] Stefan Boschert, Roland Rosen, *Digital Twin - The Simulation Aspect*, 2016
- [4] Roberto Saracco, *Industry 4.0, come il modello "digital twin" migliora sviluppo e prodotti*, URL: <https://www.agendadigitale.eu/industry-4-0/industry-4-0-modello-digital-twin-migliora-sviluppo-prodotti/>, 2018
- [5] Jeffrey S.Hammond, *The Digital Twin Accelerates IoT Development*, Forrester, 2017
- [6] *Predix Platform Brief*, Predix, 2018
- [7] IBM, *Creating a building's "digital twin"*, URL: <https://www.ibm.com/blogs/internet-of-things/creating-buildings-digital-twin/> , 2017.
- [8] Eleonora Borgia, *The Internet of Things vision: Key features, applications and open issues*, 2014
- [9] David Gelernter, *Mirror Worlds or the Day Software Puts the Universe in a Shoebox... How It Will Happen and What It Will Mean*, Oxford University Press Inc., 1991.
- [10] Alessandro Ricci, Luca Tummolini, Cristiano Castelfranchi, *Augmented societies with mirror worlds*, 2017.

# Elenco delle figure

1.1	Prima rappresentazione di un digital twin . . . . .	2
1.2	Digital twin: struttura di un processo . . . . .	4
1.3	Ciclo di vita di un digital twin in macro-fasi . . . . .	5
1.4	Presenza di un digital twin nello sviluppo di un prodotto . . . . .	8
1.5	Dashboard di un digital twin della GE . . . . .	10
1.6	Dashboard di un digital twin della GE, parte 2 . . . . .	11
2.1	Piattaforma Predix . . . . .	14
2.2	Predix - stack per la comunicazione edge-to-cloud . . . . .	16
2.3	Piattaforma SAP IoT Application Enablement . . . . .	17
2.4	Piattaforma AWS IoT . . . . .	19
3.1	Architettura IoT . . . . .	23
5.1	Mirror world - interattività fra i due mondi . . . . .	37
6.1	Interazioni per una TAC di un paziente . . . . .	44
6.2	Interazioni a seguito di un evento di pronto soccorso . . . . .	44
6.3	Modello rappresentativo di un digital twin di un ospedale . . . . .	47
6.4	Estensione degli elementi rispetto al digital twin classico . . . . .	48