



**UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA**



DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA INFORMATICA

“DIGITAL TWIN PER RETI CELLULARI 6G”

Relatore: Prof. Stefano Tomasin

Laureando: Alfonso Montana

ANNO ACCADEMICO 2023 – 2024

Data di laurea 25/09/2024

*Dedicato alla mia ragazza
che ha sempre saputo che ce l'avrei fatta.
Ti amo piccola.*

Indice

Premessa	3
1 Introduzione ai digital twin	5
1.1 Storia del digital twin	7
1.2 Architettura.....	8
1.3 Funzionamento	10
1.4 Obiettivi.....	10
1.5 Esperimenti e prototipi.....	11
2 Digital twin per le reti	13
2.1 Architettura.....	13
2.2 Requisiti funzionali	16
2.3 Requisiti di servizio.....	16
2.4 Utilizzo nel 6G	18
2.5 Tecnologie per potenziare il digital twin.....	19
2.6 Funzionamento	19
3 Sostenibilità	21
3.1 Analisi dei nodi della rete.....	21
3.2 Impatto della frequenza del flusso dati	22
4 Tecnologie Usate	25
4.1 Blockchain.....	25
4.2 Intelligenza artificiale	27
4.3 Algoritmi di gestione dati.....	28
4.4 Sensori.....	29

5	Problemi e Sfide	31
5.1	Gestione dei dati.....	31
5.2	Sicurezza	33
5.3	Privacy.....	34
6	Casi d'uso	35
6.1	Medicina	35
6.2	Smart Cities.....	36
6.3	Industria 4.0.....	36
6.4	Veicoli autonomi.....	37
	Conclusione	39

PREMESSA

“Il giorno in cui il software mette l'universo in una scatola da scarpe.”

Questa citazione del libro “Mirror Worlds” di Galanter esprime l’interesse e l’inquietudine sull’avanzamento tecnologico che porterà a rappresentare una realtà all’interno di un monitor.

In questo report si analizza come l’idea digital twin è nata e si è sviluppata nel corso della storia, poi si definisce la sua architettura e il suo funzionamento. In seguito nel corpo principale della tesi si studia il digital twin applicato alle reti cellulari, lo standard digital twin network, i suoi requisiti e le tecnologie che lo supportano. Si prosegue dando importanza al tema della sostenibilità e alle sfide che contribuiscono a far avanzare questa tecnologia. Infine si illustrano molteplici casi d’uso in cui il digital twin aiuta a perfezionare sistemi già esistenti o partecipa a crearne di nuovi.

Nel capitolo 1 si procede alla definizione di cosa è il digital twin, la sua architettura proposta, il suo funzionamento, gli obiettivi a cui punta e i prototipi sviluppati di recente.

Il capitolo 2 illustra il digital twin applicato alle reti cellulari, iniziando con il definire la sua architettura standard Y.3090, elencando poi i requisiti che in quanto simulazione di una rete deve adempiere e il suo funzionamento. In seguito si mostra il collegamento con la rete di sesta generazione e le tecnologie usate per potenziare il digital twin.

Il capitolo 3 è una finestra su un importante obiettivo che il digital twin raggiunge, ovvero la sostenibilità. Si analizzano due modi per cui il digital twin contribuisce a ottimizzare l’impatto energetico della rete cellulare: gestione delle small cells e gestione delle frequenze di flusso dati.

Il capitolo 4 elenca e studia le tecnologie usate e necessarie per la costituzione del digital twin: blockchain, intelligenza artificiale, algoritmi di gestione dati e sensori.

Il capitolo 5 mostra le sfide attuali a cui il digital twin deve far fronte: gestione dei dati, sicurezza, privacy. Ognuno contiene le proposte per contrastare queste problematiche.

Il capitolo 6 esprime quattro esempi di applicazione del digital twin in diversi ambiti. Di ognuno viene mostrato la ricerca attuale e i prototipi in funzione.

CAPITOLO 1

Introduzione ai digital twin

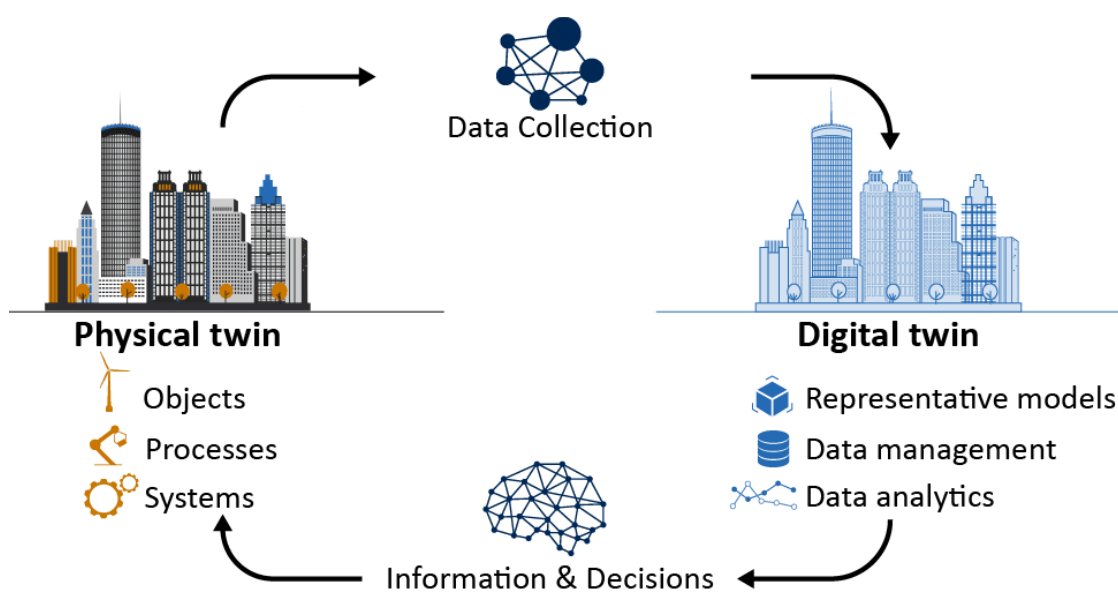


Fig.0 Rappresentazione concettuale di come funziona il digital twin.

Tra le tendenze emergenti che guideranno l'innovazione tecnologica per il prossimo decennio un ruolo importante va dato al digital twin. Le continue ricerche ed esperimenti stanno evidenziando la sua potenzialità e soprattutto la sua adattabilità che spazia in diversi ambiti dell'IoE (Internet of Everything). Questa potente tecnologia può essere utilizzata per la progettazione, la diagnosi, la simulazione, l'analisi di scenari what-if, il training di intelligenza artificiale, l'ottimizzazione basata sul machine learning e il controllo di reti cellulari di sesta generazione. Secondo gli analisti della società di ricerca il mercato mondiale del digital twin, valutato 8 miliardi di dollari l'anno 2022, è destinato a crescere a un tasso medio annuo di oltre il 25% nel periodo che va dal 2023 al 2032, al termine del quale toccherà quota 90 miliardi di dollari. In questo elaborato si studia come il digital twin viene applicato alle reti per ottimizzarne le funzioni e migliorare la qualità del servizio (QoS).

Il digital twin è una rappresentazione virtuale di un modello fisico nel quale però questa viene aggiornata dinamicamente per mantenere la sincronizzazione con il corrispettivo reale. Sia la generazione del virtuale che i successivi aggiornamenti si basano sui dati prodotti da

sensori posti che monitorano in tempo reale l'andamento e i cambiamenti della realtà. Questi creano un collegamento dato dal un flusso stabile di dati che manterrà legato il sistema virtuale con quello fisico. Si crea così un perfetto gemello digitale che verrà usato come strumento per applicare modifiche, studiare la progressione, predire problemi di varia natura con lo scopo di ottimizzare al meglio il gemello reale. Un esempio: grazie al mirroring virtuale gli ingegneri riescono a simulare il comportamento di sistemi complessi riuscendo a prevedere e prevenire guasti meccanici, riducendo così inefficienze e costi. Il solo programma di twinning però non basta, per comprendere lo stato del sistema e produrre informazioni utili per agire, il digital twin si serve di algoritmi di intelligenza artificiale e di machine learning. Ecco perché con il recente e continuo sviluppo delle reti neurali si è reso possibile anche la realizzazione di nuove tecnologie tra cui il digital twin.

Un'altra definizione recente di digital twin viene proposta da Rodney Dreisbach, un ingegnere aerospaziale membro del consiglio NAFEMS, ed è la seguente: “il digital twin è una rappresentazione computerizzata dinamica basata sulla fisica di un oggetto reale e che sfrutta la gestione distribuita delle informazioni e le tecnologie dalla realtà virtuale alla aumentata, per monitorare l'oggetto, per condividere ed aggiornare dati discreti tra prodotti virtuali e reali”. Questo modello esprime anche che il digital twin non è un sistema data-driven, ma porta a risultati che sono equivalenti ad una misurazione di quantità.[13]

In questa tesi verranno trattati i digital twin applicati alle reti cellulari, mostrando il modello architetturale proposto, il funzionamento e gli obiettivi raggiunti. Inoltre si è approfondito il tema della sostenibilità e dei casi d'uso. Ogni topic è ripreso dalle fonti citate nella bibliografia a fine tesi e riassunte graficamente nella tabella successiva.

Rif. Articolo	Digital twin	Digital twin per le reti	Sostenibilità	Tecnologie applicate	Casi d'uso
[1]	X				
[2]	X		X		X
[3]	X				X
[4]	X				X
[5]		X			
[6]			X		
[7]	X				
[8]		X		X	
[9]			X		
[10]			X		
[11]		X		X	X
[12]	X			X	
[13]	X			X	X
[14]	X	X			X

X: topic trattato nel survey

Tab.1 Temi principali toccati da ogni riferimento citato nel documento.

1.1 Storia del digital twin

La prima idea di digital twin nacque nel 1960 alla NASA come “modello vivente” delle missioni Apollo. Impiegarono molti simulatori ognuno per valutare un preciso tipo di malfunzionamento che avrebbe potuto portare al fallimento della missione. In seguito l’idea di gemello virtuale venne espressa nel libro “Mirror Worlds” di David H. Gelernter [7], professore informatico dell’Univeristà di Yale, pubblicato nel 1992 dove scriveva che in un futuro la tecnologia ci avrebbe permesso di guardare la realtà attraverso i computer. Mentre il concetto “digital twin” fu formalizzato nel 2001 da Michael Grieves, un ricercatore e attuale direttore del Digital Twin Institute, che durante un suo corso di Product Lifecycle Management (PLM) presso l’università del Michigan descriveva il gemello digitale come l’equivalente virtuale di un prodotto fisico. Nel 2010 John Vickers, un informatico della NASA, ha coniato il termine “digital twin” inteso come simulazione virtuale di un modello fisico. Negli anni successivi questa tecnologia emergente si diffuse inizialmente nell’industria 4.0 manifatturiera dove si applicavano software di repliche virtuali di parti meccaniche per la

produzione di prodotti ad alta qualità, avente come risultato la riduzione degli sprechi di materia prima e l'efficienza energetica. [2]

Tutti questi tentativi però erano semplici simulazioni virtuali, l'evoluzione ultima di questa tecnologia era creare un collegamento biunivoco con il modello fisico e interagire con esso. Questo passo è ancora in corso d'opera nel nostro decennio, grazie soprattutto allo sviluppo di nuove reti cellulari con prestazioni superiori. Concludendo con la diffusione della tecnologia digital twin in vari ambiti tra cui la sanità, le smart cities e sistemi autonomi. Possiamo notare la crescita della ricerca sui digital twin attraverso il numero di pubblicazioni scientifiche avvenute negli anni recenti, come mostra la Fig.1

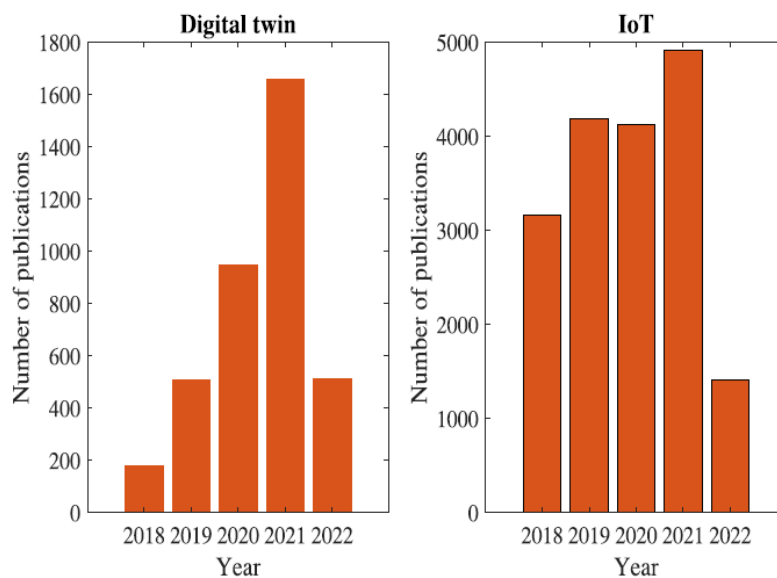


Fig.1 Numero di pubblicazioni scientifiche sul digital twin in relazione alle pubblicazioni su IoT

1.2 - Architettura

L'architettura del digital twin è piuttosto semplice, il sistema complessivo si divide in 3 livelli: il livello fisico, il livello virtuale, e un'interfaccia applicativa per collegarli.[1] Altre pubblicazioni usano termini diversi ma descrivono la medesima suddivisione.

i.)Il livello fisico (o piano reale) racchiude la realtà fisica in esame e i sensori che costantemente collezionano dati sullo stato del sistema. Questi dati verranno poi trasmessi al livello virtuale tramite la Southbound interface, un'interfaccia che si occupa del traffico dati nella direzione considerata.

ii.)Il livello virtuale rappresenta il digital twin di riferimento ricco di algoritmi e tecniche per la gestione dei dati, la creazione e il mantenimento del modello digitale. Possiamo infatti comporre questo livello di 3 domini: data, modello e gestione.

-Il dominio dei dati viene gestito dal data repository che colleziona i dati ricevuti, li memorizza e provvede ad un'interfaccia integrata per trasformare questi in una mappa per la creazione del modello.

-Il dominio del modello si occupa della creazione del prototipo virtuale partendo dai dati che ha in memoria e al termine effettuerà un confronto con il sistema fisico per renderlo il più simile possibile.

-Il dominio dedicato alla gestione comprende strumenti e algoritmi di sistema per la gestione del modello virtuale in modo che sia sincronizzato con il corrispettivo fisico per tutta la durata del ciclo di vita.

iii.)Infine l'interfaccia applicativa si occupa di gestire l'interscambio di informazioni tra i due livelli e inoltre rappresenta un collegamento diretto tra l'utente esterno e il sistema del digital twin. E' divisa in due sotto-interfacce che descrivono la direzione del flusso dati. L'interfaccia Southbound gestisce il flusso dati dal livello fisico al livello virtuale: il flusso è costante e trasporta una grande quantità di informazioni. L'interfaccia Northbound si occupa del flusso di dati dal livello virtuale al livello fisico: questo collegamento non ha un traffico costante ma bensì verranno trasportate informazioni risultato di elaborazioni in risposta ad eventi e/o richieste.

1.3 - Funzionamento

Il modello reale sarà fornito di uno o più sensori che monitorano costantemente parametri utili al gemello virtuale e collezionerà i dati in una parte di memoria dedicata. Facciamo un esempio: dei sensori di temperatura collezioneranno dati numerici che indicano i gradi celsius, utili per monitorare il clima ma non forniscono informazioni legate alle dimensioni dell'ambiente. Ogni dato ha quindi un proprio dominio legato al tipo di sensore e al tipo di informazione che deve trasmettere. In seguito i dati verranno classificati e poi trasferiti al digital twin di riferimento attraverso l'interfaccia applicativa. Essi verranno integrati nel data repository del sistema virtuale e confrontati con il modello già esistente o saranno la base della sua creazione, in caso di modifiche saranno apportati gli eventuali aggiornamenti. La frequenza di collezione e invio di dati dal modello reale al modello virtuale dipende dal tipo di sistema con cui sto lavorando. Eseguire il twinning di oggetti fisici comporta una frequenza di invio dati minore rispetto al twinning di un sistema dinamico come una rete mobile o una smart city. Inoltre è da considerare che l'efficienza di questa trasmissione frequente di alte quantità di dati è strettamente legata alla potenza della rete. I requisiti per garantire questo tipo di trasmissione sono espressi dalla comunicazione Terahertz [2] propria della rete 6G.

1.4 - Obiettivi

Avere a disposizione un gemello virtuale connesso al modello reale permette di analizzare con più dettaglio lo stato del sistema per tutta la durata del suo ciclo vitale. Permette di testare configurazioni direttamente sul modello virtuale, così da poter controllare le conseguenze e in seguito applicarle al livello fisico. Permette di osservare i colli di bottiglia delle prestazioni e a predire possibili fallimenti del sistema. Tutto ciò porta ad un'ottimizzazione dei costi del sistema e del suo mantenimento e ad un aumento delle performance in qualsiasi condizione. In conclusione quindi il digital twin di un' entità fisica permette di ottenere la versione migliore possibile dell'entità stessa e perdurare la sua condizione per tutto il suo tempo di utilizzo.

La capacità del digital twin di monitorare la produzione nelle industrie 4.0, permette di ridurre gli sprechi abbattendo i costi e aumentando qualità e precisione nel prodotto finale. Questo concetto espresso già da Michael Grieves, rimane un obiettivo importante per migliorare l'efficienza produttiva e ottimizzare i costi.

Un ulteriore obiettivo, oggi sensibilizzato dalla crisi climatica, è la sostenibilità. Il digital twin, protagonista dell'abbattimento dei costi e dell'ottimizzazione di sistemi fisici, porta come conseguenza l'efficienza energetica del sistema stesso, riducendo l'impatto ambientale a livello di impronta CO2 e minimizzando il consumo energetico.

1.5 - Esperimenti e Prototipi

Uno dei tanti esperimenti riusciti sul digital twin è Omniverse, la piattaforma realizzata da NVIDIA, azienda americana guidata da Jensen Huang e leader tecnologico che negli ultimi anni ha investito sul digital twin, scalabile e multi-GPU che permette di ricreare applicazioni metaverse, eseguirle e monitorarle in tempo reale [3]. Il cuore del modello è un sistema operativo potenziato dall'intelligenza artificiale che percepisce il mondo grazie ad un meccanismo end-to-end. Un esempio è il prototipo di Ericsson che ha costruito un digital twin network di una rete 5G all'interno della stessa piattaforma Omniverse, e ha potuto monitorarne il funzionamento e il suo traffico.

Un altro prototipo è Eclipse Ditto [4], un software open source per la creazione di “gemelli digitali” di IoT. Consiste in una serie di microservizi in cui ognuno agisce come un client, con memoria dedicata e un'interconnessione tra essi.

Un altro esperimento è Mago3D [4], un programma che modella oggetti del mondo reale e li processa in ambiente web. Consiste in un server geospaziale, un data server di conversione, un web server e una piattaforma core server per realizzare un'architettura basata sul digital twin.

Però c'è da sottolineare che nessuna di queste proposte considera gli effetti dei canali wireless sulle performance dei digital twins. Questo perché le piattaforme lavorano su un piano ideale

con il fine di dare un'idea architettuale e di testare le potenzialità di questa tecnologia ancora in fase di crescita. La realizzazione concreta sarà affrontata con il proseguimento della ricerca.

CAPITOLO 2

Digital Twin per le reti

Introduciamo adesso una particolare forma di digital twin ovvero il digital twin network, un'esatta replica virtuale aggiornata in tempo reale di una rete fisica. In questo caso verrà eseguito il twinning di ogni componente della rete quali stazioni base, stazioni ripetitrici e centri di commutazione. Essendo un derivato del digital twin, la sua architettura riprende la divisione dei tre livelli, fisico, digitale e interfaccia, come mostrato in Fig.2. I dati che verranno trasmessi dal livello fisico daranno informazioni riguardo lo stato della rete, utenti connessi e relativo traffico di richieste. Queste saranno elaborate poi dal digital twin network per aggiornare la rete virtuale e apportare poi eventuali modifiche per ottimizzare il sistema reale e risolvere problemi di performance. Quindi l'obiettivo ultimo del digital twin network è quello di analizzare, fare diagnosi e monitorare lo stato della rete durante tutto il suo ciclo vitale e intervenire con opportune configurazioni già precedentemente testate in ambiente virtuale.

2.1 – Architettura

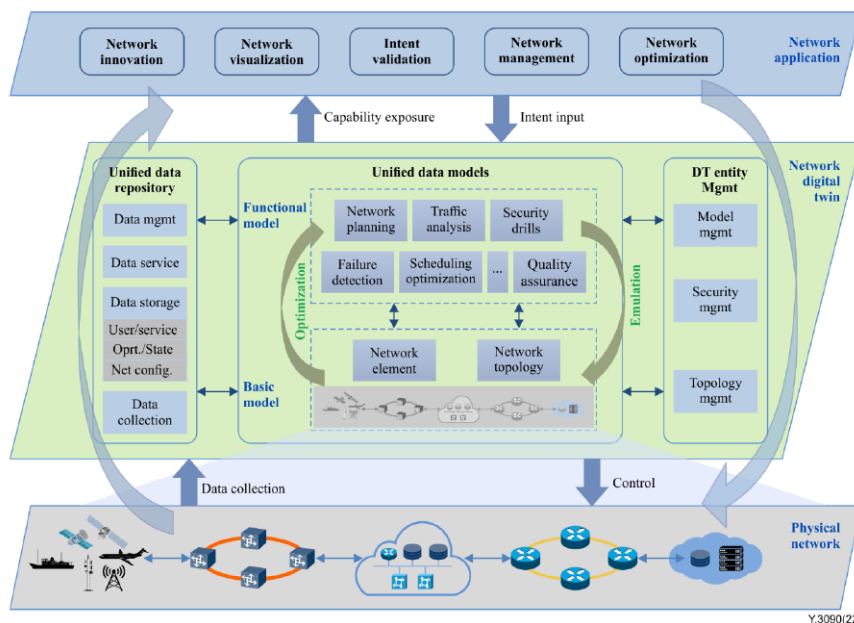


Fig.2 Proposta di architettura del digital twin network del ITU-T (Y.3090)

Il digital twin network dovrà quindi creare una copia virtuale dell'intera rete e questa dovrà essere eseguita in un ambiente protetto sempre connesso con il livello fisico. Nel caso di twinning di oggetti fisici i quali producono una bassa quantità di dati il digital twin potrà essere in esecuzione su un edge computing, ovvero nell'elaboratore più vicino possibile all'origine dei dati. Per eseguire il twinning di un'intera rete mobile, si necessita maggiori risorse e in questo caso il programma del digital twin verrà eseguito su un cloud protetto dedicato con un canale di comunicazione diretto con il gemello reale.

Il digital twin network è composto principalmente da 4 caratteristiche chiave come mostrato nella Fig.3: data, modelli, interfaccia e mappatura. [5] Sia la Fig.2 che la Fig.3 sono rappresentazioni prese dal documento Y.3090 dell'ITU ovvero l'Unione Internazionale delle Telecomunicazioni. Si tratta di un'organizzazione internazionale specializzata delle Nazioni Unite responsabile per i temi legati alle tecnologie dell'informazione e delle comunicazioni, e si occupa di definire gli standard nelle telecomunicazioni e nell'uso delle onde radio. Nella recommendation Y.3090 del 02/2022 propone i requisiti e l'architettura dei digital twin network alla comunità scientifica che approverà questo modello come standard.

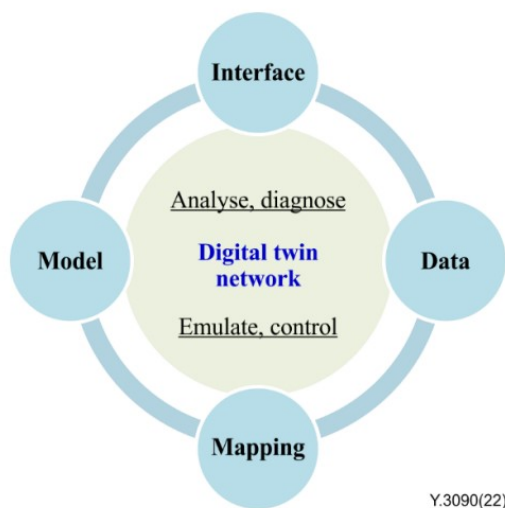


Fig.3 Schema delle 4 caratteristiche chiave del digital twin network del ITU-T (Y.3090)

i.)Data: il digital twin network mantiene in memoria nel cloud una cronologia di dati e/o dei dati in tempo reale del modello fisico. Questi sono necessari per rappresentare e comprendere lo stato e il comportamento della rete durante il suo ciclo di vita. Si tratta di una grande mole

di dati che rende difficile la trasmissione e la gestione in memoria infatti vi saranno opportuni algoritmi di caching e di comunicazione.

ii.)Modelli: ci sono tecniche che collezionano dati da uno o più fonti del mondo reale e da essi sviluppano una rappresentazione partendo da modelli specifici. Questi verranno poi confrontati e corretti per assomigliare quanto più possibile al corrispettivo fisico. In seguito saranno usati per emulare ed eseguire diagnostiche per osservare la dinamica della rete e generare informazioni per il decision-making, applicabili nel sistema reale.

iii.)Interfaccia: le interfacce standardizzate possono garantire l'interoperabilità dei digital twin networks facilitandone la sua adattabilità a varie tipologie di reti. Ci sono due tipi di interfacce:

1. Un'interfaccia tra la piattaforma digital twin network e la struttura della rete fisica per gestire l'interscambio di informazioni. Come descritto in precedenza è suddiviso a sua volta in due sotto-interfacce: la southbound e la northbound.
2. Un'interfaccia tra la piattaforma digital twin network e altre applicazioni di servizio per semplificare l'uso da parte dell'utente e interagire direttamente con il piano virtuale.

iv.)Mappatura: è un procedimento usato per identificare il digital twin network e sottolinearne le entità che la compongono. Inoltre stabilisce una relazione in tempo reale tra la rete fisica e la rete virtuale. Può essere di due tipologie:

1. Uno ad uno: mappatura in continua sincronizzazione tra la rete fisica e la rete virtuale caratterizzata da un flusso frequente di dati.
2. Uno a molti: mappatura di sincronizzazione occasionale determinata dallo scambio di dati tra le reti solo in occasioni rilevanti.

2.2 – Requisiti Funzionali

Il digital twin network (DTN) presenta alcuni requisiti di sistema. Il più complesso è la gestione dei dati. Questa deve essere efficiente in quanto deve gestire tipi di dati diversi e in totale una grande mole di essi che vengono costantemente memorizzati e mantenuti in apposite repository. Dovranno inoltre essere monitorati e aggiornati qualora vi fossero versioni più recenti.

Un'altra problematica è la gestione dei digital twin networks che essendo sistemi in continuo funzionamento, hanno dei costi energetici rilevanti e devono smaltire tutti i dati ritenuti obsoleti.

Infine le interfacce applicative sono un requisito da cui dipende la comprensione utente-DTN ma anche DTN-DTN. Queste verranno implementate in modo che siano user-friendly e che permettano di visualizzare ogni informazione utile per il monitoraggio della rete. Dovranno infine supportare la comunicazione tra digital twin networks distinti.

2.3 – Requisiti di Servizio

Il digital twin network è uno strumento applicato ad una rete mobile reale e perciò dovrà offrire servizi legati alla sua gestione. Nel survey [8] il digital twin network esegue il twinning delle funzioni di rete chiamate network function e definendole network function virtualization. In pratica in questo modello la rete virtuale viene rappresentata in parte dalle sue funzioni reali e in parte nella sua struttura fisica.

i.)Compatibilità: i digital twin networks devono essere in larga parte compatibili con la varietà di tipologia di rete, di tipi di venditori e di tipi di applicazioni. Per integrare questo principio si sviluppano le interfacce applicative per rendere il sistema quanto più adattabile possibile.

ii.)Scalabilità: i digital twin networks nel momento del twinning della rete assumeranno approssimativamente la sua stessa dimensione, che può richiedere una grande allocazione di risorse. Ma dovrà anche supportare i cambiamenti dovuti alla crescita o alla riduzione del

sistema reale lungo tutto il suo ciclo di vita. Quindi avrà una parte di memoria allocabile dinamicamente.

iii.)Affidabilità: i digital twin networks devono rimanere sistemi stabili alle interferenze e affidabili agli errori e ai fallimenti per poter garantire costantemente accuratezza in relazione al modello reale. Ogni errore potrebbe far deviare il gemello virtuale da quello reale e quindi inficiare lo scopo finale.

iv.)Sicurezza: i digital twin networks essendo sistemi che vengono eseguiti sul cloud, possono essere di facile accesso. Ecco perchè devono proteggersi da ogni tipo di attacco esterno che potrebbe sfruttare il sistema del digital twin per alterare il sistema fisico. Ogni situazione deve essere prevista e testata grazie anche agli algoritmi di IA e agli scenari what-if e prendere le dovute precauzioni.

v.)Privacy: i digital twin networks sempre per l'attributo del facile accesso, devono garantire protezione per i dati privati dei consumatori, soprattutto quelli sensibili e ad alto rischio secondo la politica dello stato di appartenenza.

vi.)Flessibilità: i digital twin networks devono provvedere a servizi on-demand secondo le applicazioni di rete, ovvero fornire all'utente ogni servizio che viene espresso dalla sua interfaccia applicativa e in tempi di risposta tollerabili.

vii.)Visualizzazione: i digital twin networks devono avere un accesso user-friendly per la gestione dei servizi e il controllo di tutti gli elementi del sistema. Ovvero l'interfaccia usata dall'utente per interagire con il digital twin network deve essere intuitiva e mostrare informazioni utili per la manutenzione della rete.

viii.)Sincronizzazione: i digital twin networks devono sincronizzarsi con la rete reale e mantenere il sistema aggiornato per uno scarto di tempo accettabile. Nessun sistema gemello potrà essere perfettamente simultaneo, ma i ritardi e i tempi di latenza delle reti verranno ridotti al minimo grazie all'avvento delle future reti 6G.

2.4 - Utilizzo nel 6G

Con la crescita dei dispositivi IoT complessi come la Realtà Aumentata, la Realtà Estesa e la Guida Autonoma, è cresciuta la necessità di avere una rete più potente per soddisfare i requisiti di queste tecnologie e di tecnologie avanzate di uso nelle industrie 4.0. L'attuale rete 5G non è sufficiente e quindi si pensa già alla rete 6G e ai suoi obiettivi. Per iniziare dovrà aumentare la capacità di rete, supportare molti più dispositivi e di conseguenza gestirne il traffico. Supportare la modalità URLLC ovvero Ultra Reliability Low-Latency Communication, una comunicazione dove ci si aspetta un 99.9999% di affidabilità, con un data rate superiore a 100 Mbps e una latenza end-to-end di massimo 50 ms. Inoltre la rete 6G si pone come obiettivo quello di essere un'infrastruttura digitale con un impatto energetico ottimizzato, anche per abbattere la sua impronta di CO2.

Confrontiamo le key performance indicator della rete 5G con la rete 6G[14]:

	5G	6G
Data rate	10+ Gbs	100 Gbs
Delay	1 ms	0.5 ms
Precisione nella localizzazione	~1 metro	~1 centimetro
Affidabilità	99.9%	99.9999%
Intensità di device	1 Mln/km ²	10 Mln/km ²
Efficienza Spettrale	/	x3 più del 5G
Efficienza energetica	/	x10 più del 5G

La tecnologia digital twin viene usata nelle reti 6G per far fronte alla necessità di una valutazione costante dell'efficienza e adeguatezza delle politiche di Qualità del Servizio (QoS). Attraverso gli strumenti che offre, si possono monitorare e analizzare in tempo reale le reti, comprenderne lo stato e l'andamento attraverso la sua interfaccia e sfruttare queste informazioni per migliorare l'efficienza per tutto il ciclo di funzionamento.

2.5 – Tecnologie per potenziare il Digital Twin

Una volta creato il modello virtuale noi possiamo predire l'andamento del sistema fisico grazie ai dati ricevuti fino a quel momento. Questo grazie agli algoritmi Intelligenza Artificiale e di Machine Learning che saranno precisi tanto è maggiore la quantità di dati usati per il loro training. Qualora i dati ricevuti non fossero sufficienti o vogliamo ottenere una precisione superiore, il digital twin network essendo una simulazione potrà generare dati "sintetici" da aggiungere al training set. La predizione del sistema può aiutare la rete a gestire il traffico e a raggiungere l'efficienza energetica.

2.6 - Funzionamento

L'istanziamento e il funzionamento complessivo del digital twin network possono essere riassunti in 5 fasi [5]:

1-Acquisizione dei dati: in questa fase si esegue una profonda raccolta dati di ogni aspetto del modello fisico e in seguito verranno classificati e inviati al digital twin network che li memorizzerà in un'allocazione di memoria dedicata.

2-Modelling: qui si crea il modello virtuale partendo dai dati in memoria e usando modelli standardizzati, fino ad ottenere una rappresentazione semantica della rete che sia il più simile possibile all'originale. Il risultato finale di questa fase sarà un primo prototipo di modello semplificato.

3-Adattamento: in questa fase il modello deve adattarsi ad un formato compatibile con il Network Function Virtualization, ossia il formato virtuale che rappresenta le varie funzioni di rete, affinché si comporti esattamente come la rete fisica.

4-Interconnessione: questa fase presenta due sfide, la sicurezza della connessione e la gestione della comunicazione. In una trasmissione, la rete fisica e il digital twin fungeranno da due gateways che saranno locati nell'edge della rete, e lo scambio di dati verrà protetto da protocolli di messaggistica come MQTT e Kafka. Per gestire la comunicazione e renderla più

granulare si assume idealmente che il modello digital twin è meno complesso del corrispettivo reale e usare protocolli di comunicazione che inviano dati tramite messaggi permette di processare più flussi di dati e gestire la comunicazione in tempo reale tra due digital twins.

5-Feedback: consiste nel collegamento che lega il digital twin network con la rete fisica, da esso passeranno informazioni da entrambe le direzioni. Se il modello digitale è appena stato creato, il primo feedback sarà un confronto approfondito con il modello fisico. Nel caso in cui il digital twin network è già compiuto, il feedback sarà un confronto per rilevare cambiamenti nello stato o configurazione che andranno ad aggiornare la rete virtuale.

Capitolo 3

Sostenibilità

“Il digital twin per le reti e le reti per il digital twin” è la frase che si sente spesso nelle ultime pubblicazioni scientifiche per esprimere la complementarità tra la tecnologia del digital twin e le future reti cellulari di sesta generazione. Che sia chiaro, le reti cellulari possono funzionare anche senza il loro gemello digitale e non sono obbligati ad essere monitorati costantemente. Però il digital twin nasce per legarsi ad un modello fisico e renderlo migliore, efficiente e soprattutto ecosostenibile. Ed ecco il motivo del digital twin per le reti: la futura rete di sesta generazione, implementando la tecnologia digital twin riuscirà ad essere efficiente, autosufficiente e con un ridotto impatto energetico, che ad oggi è un tasto sensibile.

3.1 – Analisi dei nodi della rete

Un report dell'Università degli Studi della Campania Luigi Vanvitelli ha analizzato e pubblicato nel settimanale di Quotidiano Energia, il dispendio energetico dell'attuale rete 5G. Il consumo medio giornaliero indipendentemente dalla localizzazione, tecnologia e tipologia dell'impianto, è stato calcolato essere di 96,9 kWh/giorno per un valore medio annuo di circa 35 MWh di energia elettrica consumata. Tenendo conto del numero delle stazioni radio base presenti sul territorio nazionale, circa 70.000, avremo un consumo di circa 2,5 TWh/anno. Valore che rappresenta circa l'1% del consumo energetico elettrico del paese e circa il 55% del consumo delle telecomunicazioni.[6]

Per ridurre l'impegno delle esose stazioni base, si stanno impiegando le cosiddette “small cells”: nodi di accesso radio cellulare a bassa potenza che operano in uno spettro che ha una portata da 10 metri a pochi chilometri, vedi Fig.4. Seguendo questa copertura, si distribuiscono più celle lungo tutta l'area di interesse e ognuna gestirà le richieste di ogni utente nel proprio raggio d'azione. Risultano una scelta migliore alle stazioni base in quanto

sono a basso consumo energetico e a basso costo, inoltre un maggior numero di celle permette di liberare la banda larga della rete migliorandone l'esperienza. Il digital twin può gestire il funzionamento di ogni cellula in base al traffico e alle richieste. Può disattivare cellule in caso di penuria di richieste riducendo lo spreco di energia, o predire i momenti di picco e sfruttare al massimo le risorse disponibili, o ancora selezionare determinate celle per un collegamento ottimale con l'utente finale in base alla sua posizione. A questo sistema si aggiungono anche i "nomadic nodes": varianti delle small cells integrati a veicoli come taxi o macchine private che contribuiscono a soddisfare la domanda di rete comprendo un'area mobile, anch'esse gestite dal digital twin.[6]

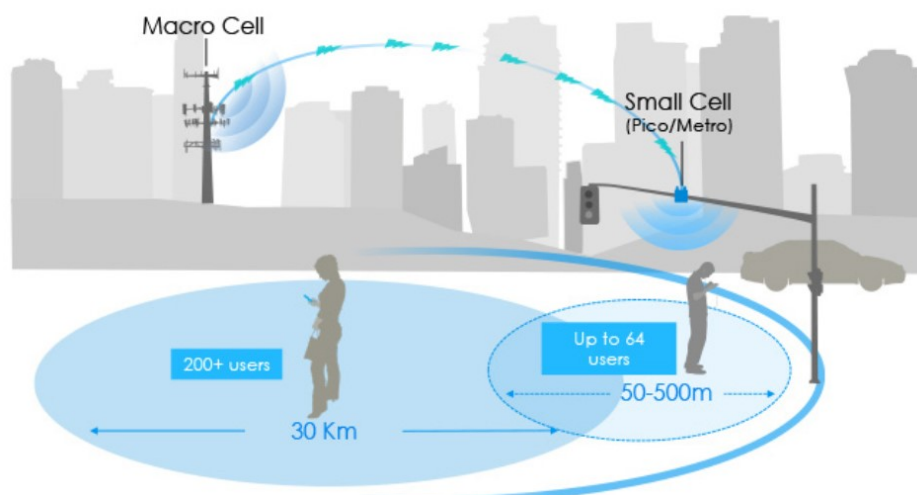


Fig.4 Differenza del raggio di azione delle base stations(chiamate anche macro cells) e delle small cells.

3.2 – Impatto della frequenza del flusso dati

Il consumo energetico è legato anche alle frequenze delle operazioni degli edge/cloud servers. Se questa frequenza aumenta, aumenterà di conseguenza il dispendio energetico e in questo senso la sostenibilità non dipende solo dal consumo di energia, ma anche dalle emissioni di CO2 per l'alimentazione e il raffreddamento dei server. D'altro canto la trasmissione dei dati dipende dall'efficienza e dalle caratteristiche del collegamento della rete. I requisiti della rete

6G e la gestione del digital twin cooperano a ridurre al minimo il dispendio energetico e avere un minor impatto possibile sull'ambiente. I motivi dunque di applicare la tecnologia digital twin alla rete 6G è di renderla sostenibile. Inoltre applicare il digital twin anche alla produzione e consumo, come analizzato nel documento [10], ottimizzerebbe il ciclo di vita del prodotto e ridurrebbe lo spreco di risorse.

Nel report [9] una sfida futura del digital twin è quella di sviluppare metodologie di collezione dati adattive per sostituire la frequenza periodica di flusso dati con una frequenza "event-triggered" ovvero attivata da un evento o richiesta. Questo permetterebbe di ridurre il dispendio energetico della rete e alleviare la banda dal traffico di dati. Secondo questa fonte sarebbe possibile realizzare questo metodo grazie allo sviluppo di tecniche basate sull'intelligenza artificiale, che permettono di controllare il volume e frequenza di dati senza compromettere la performance o la precisione dei modelli. E' quindi necessario raggiungere un equilibrio tra la precisione del modello e il costo per il suo mantenimento, anche questo viene gestito dinamicamente da un algoritmo di intelligenza artificiale.[2]

Inoltre il ciclo di vita e i tempi del digital twin vengono dettati da vari algoritmi tra cui quelli di intelligenza artificiale e di blockchain, e la loro efficienza dal punto di vista del costo computazionale è un requisito fondamentale per la connessione wireless delle reti di nuova generazione.

Capitolo 4

Tecnologie usate

4.1 - Blockchain

Essendo il digital twin una tecnologia “on-cloud” presenta un punto debole per attacchi da parte di chi vuole rubare i dati o manipolare i parametri, incidendo poi direttamente sul sistema fisico. Ecco perché la questione sicurezza è un nodo fondamentale per la costituzione di un digital twin, anche applicato alle reti, sicuro e a prova di hacking. La semplice crittografia non basta, quindi vi sono varie proposte alternative, tra queste c'è la blockchain.

La blockchain è fondamentalmente una struttura a catena di blocchi di dati disposti cronologicamente, che funge da database distribuito a prova di manomissione che garantisce la sicurezza di ogni collegamento tramite crittografia in modo decentralizzato. Comprende reti peer-to-peer, storage distribuito, meccanismi di consenso, crittografia e contratti intelligenti, offrendo vari vantaggi come decentralizzazione, resistenza alla manomissione, anonimato, verificabilità pubblica e tracciabilità.[8]

Tuttavia, per un'integrazione fluida della blockchain nei digital twin networks, è essenziale considerare che i processi ad alta intensità di calcolo possono introdurre latenza nella tecnologia blockchain. Ciò solleva una seria preoccupazione su come le caratteristiche di sicurezza intrinseche della blockchain possano essere sfruttate senza compromettere le caratteristiche critiche del digital twin network come la bassa latenza e l'efficienza computazionale. Attualmente, le tecnologie digital twin network tendono a essere centralizzate con centro un cloud server, il che porta a carenze nel garantire la provenienza e la tracciabilità dei dati. Inoltre, introduce vulnerabilità in termini di sicurezza dei dati e il potenziale di manomissione non autorizzata, in particolare per quanto riguarda transazioni, registri e record storici.

L'approccio proposto nel rif.[8] ha utilizzato contratti intelligenti per governare e monitorare le transazioni avviate dai partecipanti coinvolti durante il processo di creazione di digital twin. In questo viene impiegato un archivio decentralizzato utilizzando file system di sistemi

diversi per ottimizzare la sicurezza e l'accessibilità dei dati. Gli autori hanno condotto un'analisi dell'approccio proposto utilizzando lo strumento SmartCheck e i risultati indicano chiaramente un elevato livello di soddisfazione per la sicurezza. Inoltre, questo approccio innovativo introduce miglioramenti nella gestione dei processi, conserva registri completi dei proprietari registrati e fornisce un resoconto dettagliato della cronologia dei processi.

Nel rif.[11] viene proposto uno schema simile dove il possesso di dati dimostrabile sincronizzato (PDP) è basato sulla tecnologia blockchain, che ha rappresentato il primo servizio di sincronizzazione blockchain in grado di consentire a tutte le entità di accedere nello stesso istante di clock. È stato progettato per garantire anonimato, non falsificazione e alta probabilità di rilevamento. Inoltre, è verificato come sicuro poiché è basato su sistema RSA, l'algoritmo di crittografia asimmetrica.

Un altro modo differente di usare la blockchain per il medesimo scopo è presentato nel rif.[12] dove si usano le base station come nodi della catena. I gemelli digitali sono archiviati nella blockchain e i loro dati vengono aggiornati man mano che cambia lo stato dell'utente corrispondente. Inoltre, anche i modelli locali delle base station sono archiviati nella blockchain, il che può essere verificato da altre base station per garantire la qualità dei modelli locali, come mostrato nella Fig.5.

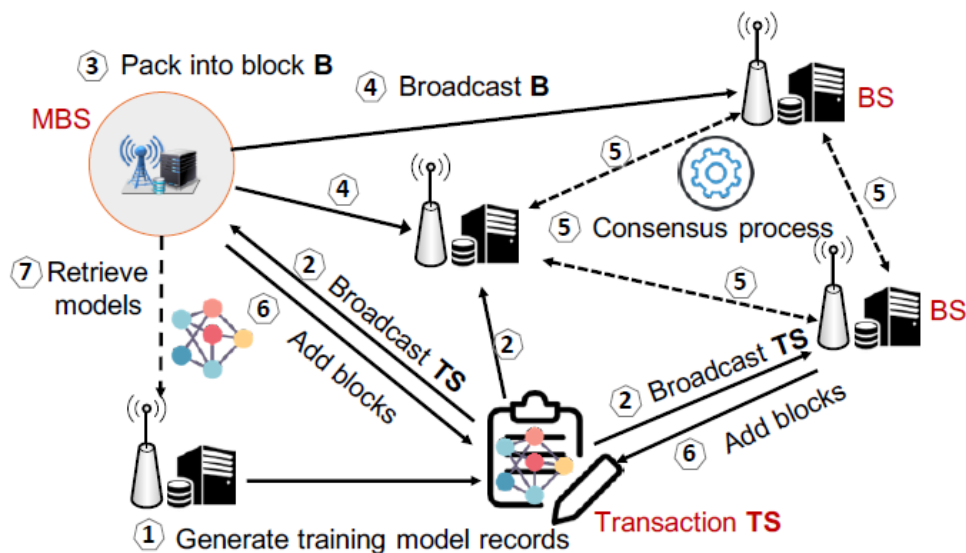


Fig.5 Schema del sistema di blockchain proposto.

4.2 - Intelligenza artificiale

Lo scopo di usare la tecnologia digital twin nelle reti di sesta generazione è quello di migliorare le performance e la sostenibilità per tutto il suo ciclo vitale. Attraverso analisi e monitoraggi, il digital twin deve essere costantemente capace di intervenire nel modo corretto, si potrebbe pensare quindi che il modello virtuale permetta l'autogestione della rete fisica. Ma per farlo bisogna introdurre algoritmi di intelligenza artificiale che inferiscano le giuste conclusioni, e agendo in modo razionale.

Il digital twin network impiega quindi tecniche di intelligenza artificiale come algoritmi supervisionati, semi-supervisionati e altri algoritmi avanzati assistiti da machine learning per creare in modo accurato, affidabile ed efficiente i digital twin corrispondenti per i componenti fisici nella rete 6G. Successivamente, la rete 6G utilizza questi digital twin e le informazioni fornite dal digital twin network per prevedere e testare in anticipo varie condizioni di rete, per valutare vari scenari e algoritmi di distribuzione della rete e per analizzare vari metodi di miglioramento delle prestazioni.

L'intelligenza artificiale non viene applicata solo agli algoritmi, questa tecnologia ha la potenzialità di ricreare scenari what-if per allenare un sistema di sicurezza ad affrontare minacce alla sicurezza e alla privacy. Un digital twin che cattura dettagli intricati e dinamiche della rete può aiutare a studiare gli effetti di diversi scenari che possono causare danni e degradazione del sistema. Aiuta a ideare i passaggi per garantire un sistema operativo sicuro nonostante una situazione avversa.

Inoltre con l'integrazione di algoritmi avanzati di intelligenza artificiale e apprendimento automatico nella tecnologia digital twin, la precisione e le prestazioni dei sistemi di comunicazione 6G aumentano notevolmente, poiché la digital twin network raccoglie ed elabora dati in tempo reale e successivamente produce raccomandazioni e previsioni sui corrispondenti componenti fisici. Quanti più dati ha a disposizione, tanto è più elevata l'affidabilità delle predizioni. E' compito dell'ingegnere però trovare il trade-off ottimale per la relazione quantità di dati/precisione in modo da non compromettere le performance[2].

Restando sempre in tema dati, per la creazione del modello digitale che avviene all'inizio della formazione del digital twin, vengono usati i dati e parametri del modello fisico. Ma

grazie agli algoritmi di machine learning, opportunamente preallentati da parametri del gemello fisico, si possono produrre dati sintetici per aumentare l'efficienza delle predizioni e la precisione del modello stesso.[3] Questi dati non alterano la performance della rete in quanto vengono prodotti dal digital twin stesso e non trasmessi dal modello fisico.

4.3 – Algoritmi di gestione dati

Il digital twin come osservato è un sistema che si crea e funziona attraverso i dati e anche in grande quantità. Una sfida aperta è quella di trovare il miglior meccanismo di collezione dati che funziona in tempo reale. Ancora, trovare il modo più efficiente per catalogare i dati e tradurli per costruire i modelli digitali. Questi dati devono essere accumulati con un timestamp (insieme di caratteri che rappresentano una data e/o un orario per verificare l'avvenimento di un evento), in modo che i suoi componenti in tempo reale e storici possano essere facilmente mantenuti e resi accessibili. La raccolta di dati completi è necessaria e un prerequisito affinché i dati siano utilizzati come fonte di verità. Questi dati dovrebbero essere accumulati con un timestamp, in modo che i suoi componenti in tempo reale e storici possano essere facilmente mantenuti e accessibili. Inoltre, dovrebbe essere fornito anche il supporto per dati con diverse frequenze di raccolta, misurazioni complesse e da diverse fonti. Una raccolta di dati così dettagliata richiede che gli strumenti siano il più possibile leggeri (ad esempio, veloci e facili da usare) per garantire che non influiscano sulla normale funzionalità della rete e delle applicazioni.

Inoltre, i dati raccolti devono essere attentamente valutati e selezionati in base al valore di scadenza temporale: i dati sono utili nella costruzione di un digital twin solo quando sono di qualità soddisfacente, ad esempio privi di rumore o con un flusso di dati coerente. Al contrario, i dati con scarsa qualità ridurranno solo le prestazioni di un digital twin. Pertanto, è necessario non solo sviluppare soluzioni affidabili che consentano di unire dati diversi di tipi diversi e provenienti da varie fonti in un singolo digital twin, ma anche stabilire soluzioni efficaci in grado di valutare e filtrare i dati con costi ragionevoli.

Queste problematiche vengono ad ora gestite da algoritmi di big data atti per la gestione di dati e che hanno il compito di stabilire: cosa collezionare, quando collezionarlo, dove conservarlo, come accedervi e come mantenerli[2](Vedi Cap.5.1). L'efficienza di questi rappresenta un collo di bottiglia nelle performance del sistema, che dovrà essere trattato con la continua ricerca e sviluppo dell'ambito dei big data.

Un ruolo fondamentale è coperto anche dall'interfaccia che collega i due gemelli del sistema e che gestirà il flusso dati e gli header necessari per classificarli. Gli algoritmi di sistema sono facilitati dallo sviluppo di un'interfaccia sviluppata semplice e completa per la gestione dei dati e il loro mantenimento nel tempo.

4.4 – Sensori

Essendo i dati la struttura principale per la costituzione dei digital twin, i sensori che li generano sono altrettanto fondamentali. Ogni sistema per il quale si vuole realizzare un gemello digitale necessita una costellazione di sensori sufficiente da poter replicare in modo dettagliato la sua conformazione e il suo comportamento in tempo reale.

I sensori raccolgono dati in tempo reale dall'oggetto fisico o dal sistema. Includono dettagli come dimensioni, forma, materiale e metriche di prestazioni come vibrazione, pressione e temperatura. Ogni tipo di sensore produce un proprio dominio di dati ognuno con informazioni diverse.

I sensori sono collegati con il cloud dove risiede il digital twin corrispettivo e attraverso questa connessione si trasmettono i dati operativi in tempo reale. È importante studiare l'affidabilità dei sensori, gli errori di misurazione e i malfunzionamenti dato che un errore nei dati porterebbe ad una incongruenza nel modello digitale.

Capitolo 5

Problematiche

Attualmente i primi prototipi di digital twin sono ancora in fase di sviluppo e di miglioramento. Alcuni dettagli tecnici come il ritardo dovuto alla propagazione delle onde non è considerato, avendo come risultato dei modelli puramente ideali. Nonostante ciò, la loro funzione ha permesso di analizzare una serie di problematiche che la tecnologia sfida di risolvere per ottenere un modello perfettamente operativo.

5.1 – Gestione dei dati

Come già visto i dati sono fondamentali per la tecnologia digital twin. Essi sono la base per la costruzione dei modelli e attraverso essi si possono rappresentare i comportamenti che evolvono nel tempo. Essendo un sistema in costante funzionamento, questi dati nella totalità sono una grande mole di informazioni da trattare. Trovare il giusto equilibrio tra qualità e quantità dei dati è essenziale per costruire una digital twin network sostenibile e affidabile.

Una repository di dati unificato è fondamentale per gestire e amministrare l'enorme quantità di dati di rete. Tale repository di dati dovrebbe avere la capacità di archiviare vari tipi di dati insieme alla capacità di supportare estrazione, trasferimento, caricamento e archiviazione efficienti e in tempo reale con latenze specifiche dell'applicazione. La repository dovrebbe anche essere in grado di gestire un'elevata concorrenza, in altre parole più richieste da più modelli, abilitando l'elaborazione parallela. I componenti hardware e software necessari per supportare tali operazioni dovrebbero essere disponibili a costi minimi. Cosa più importante, questa repository dovrebbe garantire che i dati siano accurati, coerenti e sicuri.[2]

Dati dettagliati e aggiornati in tempo reale consentono la costruzione di modelli ad alta precisione nella digital twin network. Ecco perché gli stessi dati devono essere ricchi di tag e

header per l'utilità nel sistema. Di seguito s' illustra il tipo di informazione che il dato può esprimere:

- Tipologia del dato: il set di dati deve essere sufficientemente completo da costituire una rappresentazione olistica della rete fisica. Un'analisi della topologia di rete per determinare il tipo di dati richiesto è fondamentale per evitare una raccolta dati ridondante.

- Tempo/Frequenza: Per adattarsi rapidamente alla variazione dinamica di una rete, la digital twin network richiede un monitoraggio costante, una rivalutazione delle prestazioni e un adeguamento tempestivo. La frequenza e il modello delle serie temporali di raccolta dati dipendono principalmente dal tipo di dati. Alcuni tipi di dati che variano statisticamente in periodi di tempo più brevi richiedono una frequenza di raccolta più elevata. D'altro canto, altri tipi di dati che sono critici per la salute operativa della rete (ad esempio, stato del flusso e guasti dei collegamenti) devono essere raccolti in modo tempestivo.

- Meccanismi/Strumenti: Mentre alcuni tipi di dati possono essere raccolti utilizzando strumenti tradizionali, altri tipi di acquisizione dati richiedono misurazioni di rete più avanzate. Ridurre al minimo la raccolta di dati ridondanti, utilizzare tecniche avanzate di compressione dei dati per ottimizzare i costi di raccolta e archiviazione dei dati e tecnologie che consentono la raccolta di dati simultanea e collaborativa da nodi di rete eterogenei in modo efficiente e sincronizzato nel tempo sono fondamentali per stabilire un processo di raccolta dati di alta qualità che funga da solida base per una digital twin network ultra affidabile.

- Accesso: L'elaborazione parallela è necessaria per accelerare il trattamento dei dati in tre fasi che sono l'estrazione, la trasformazione e il caricamento. Sfruttando le capacità di elaborazione parallela massiccia e la larghezza di banda della memoria delle GPU, gli utenti possono interagire con il repository di dati digital twin network a una velocità molto più elevata rispetto all'utilizzo di soluzioni standard basate su unità di elaborazione centrale per interrogare gli stessi dati. Sfruttare soluzioni e strumenti come GPU che consentono l'elaborazione parallela dei dati è particolarmente importante quando le operazioni sui dati devono essere in tempo reale per sincronizzare il digital twin network con la sua controparte fisica, derivare analisi dei dati rapidissime e ottenere decisioni immediate a ciclo chiuso.

- **Mantenimento:** La stabilità a lungo termine, l'adattabilità e le prestazioni di una digital twin network dipendono dall'efficacia del framework di gestione dei dati sottostante, incluso il processo di raccolta, archiviazione, manutenzione e recupero dei dati.

La gestione dei dati può essere parte integrante del framework di gestione del digital twin complessivo o può essere un'entità indipendente nel twin layer. L'automazione è probabilmente la caratteristica più desiderata della gestione dei dati, insieme con altre capacità come la sicurezza, l'archiviazione, il deposito e la distruzione di dati di rete sensibili, la tracciabilità e i registri accurati delle transazioni di dati storici e la garanzia dell'integrità dei dati.[5]

5.2 – Sicurezza

Il modello digital twin network è un sistema che è in funzione all'interno di un cloud server, ed essendo questo uno snodo di rete, presenta vari punti deboli e può essere esposto ad attacchi dall'esterno. La sicurezza risiede nel verificare l'autorizzazione e concedere l'accesso solo ai verificati, che potranno richiedere le informazioni.

Gli attacchi alla sicurezza nei sistemi wireless basati sul digital twin possono essere classificati in due tipi: sicurezza dei dispositivi fisici e sicurezza dell'interfaccia. Sono necessari efficaci schemi di autenticazione per evitare l'accesso non autorizzato a dispositivi, server edge/cloud e blockchain. Le minacce alla sicurezza includono la vulnerabilità dei controller di rete, l'iniezione di pacchetti di controllo falsificati, l'applicazione di policy non configurate correttamente e l'autenticazione debole dei dispositivi di rete. Interfacce non configurate correttamente e protocolli imprecisi determinano ulteriori vulnerabilità nella sicurezza. Schemi di autenticazione deboli o impropri e canali di testo normale possono portare ad attacchi alla sicurezza.

Per i sistemi wireless basati su digital twin devono essere utilizzati schemi di sicurezza efficaci. Prima di svilupparli però, sono richiesti schemi forensi per investigare le tipologie di attacchi nei sistemi basati su digital twin. Le tecniche forensi per un sistema basato su digital twin possono essere schemi basati sulla blockchain e sull'analisi di prove video. D'altro canto,

potrebbero esserci delle difficoltà nell'implementare schemi forensi a causa della mobilità dei nodi, per tale motivo si deve implementare la concezione della mobilità.

Per i dispositivi sono richiesti schemi di autenticazione leggeri ed efficaci. Per il trasferimento wireless di dati e segnali di controllo, devono essere utilizzati schemi di crittografia complessi e veloci. I sistemi wireless basati su digital twin hanno un'architettura a tre livelli che comunica tra loro tramite interfacce. Potrebbero esserci interfacce configurate per il twinning che sono vulnerabili agli attacchi di sicurezza. Inoltre, le istruzioni di controllo del twinning contraffatte degraderanno significativamente le prestazioni dei sistemi basati su digital twin.[4]

5.3 – Privacy

In uno scenario di apprendimento centralizzato, potrebbe verificarsi una perdita di privacy durante l'addestramento dei digital twin. Per mitigare questo problema, i modelli digitali possono essere addestrati in modo distribuito, basato sull'addestramento sul dispositivo. Sebbene i dispositivi finali non inviino i propri dati al server cloud/edge remoto per l'addestramento, richiedono comunque tecniche di conservazione della privacy. Un server di aggregazione dannoso può dedurre le informazioni sensibili dei dispositivi finali utilizzando gli aggiornamenti del modello di apprendimento locale e quindi causare perdite di privacy.

Per risolvere questo problema, possono essere utilizzati schemi basati sulla privacy differenziale e sulla crittografia omomorfa. Nella privacy differenziale, il rumore è aggiunto agli aggiornamenti del modello di apprendimento locale prima di inviarli al server di aggregazione. Sebbene questa possa migliorare la conservazione della privacy, può rallentare il tasso di convergenza dell'apprendimento globale. Per evitare ciò, è possibile utilizzare la crittografia omomorfa, che si basa sulla crittografia dei modelli di apprendimento locale prima di inviarli al server di aggregazione. Similmente alla privacy differenziale, la crittografia omomorfa funziona a scapito del sovraccarico di comunicazione.[4]

Capitolo 6

Casi d'uso

La tecnologia digital twin è destinata ad essere onnipresente in tutti i settori. La sua funzionalità nel pianificare e valutare simulazioni ne permette l'applicazione in ogni campo in cui si mira all'efficienza del sistema. Per ogni diverso utilizzo, il digital twin assume un aspetto diverso strettamente legato al modello fisico a cui si è legato.

6.1 – Medicina

Poiché il settore sanitario sta crescendo in modo esponenziale grazie all'uso di dispositivi IoT, l'implementazione del digital twin network consente di condividere la grande quantità di dati raccolti dai dispositivi IoT a una velocità molto elevata, cosa che le reti tradizionali non sono in grado di fare con la stessa accuratezza e rapidità. In secondo luogo, il digital twin può anche essere utilizzato per simulare gli effetti dei farmaci sul corpo umano, nonché per pianificare ed eseguire terapie mediche. È anche utile nell'assistenza sanitaria abilitata dall'intelligenza artificiale per il processo decisionale e predittivo, soprattutto nelle situazioni in cui sembra difficile per i medici prendere decisioni su qualsiasi trattamento medico per qualsiasi paziente poiché il digital twin ha la capacità di prendere decisioni basate su situazioni di vita reale.

Un esempio riuscito è la compagnia General Electric che usa il digital twin per simulare e monitorare operazioni ospedaliere. In futuro si prevede di applicare il digital twin per analizzare lo stato del singolo paziente e conseguire le cure adatte.

6.2 – Smart Cities

Le smart cities sono ambienti che sfruttano le tecnologie avanzate e soluzioni data-driven per potenziare l'efficienza, migliorare la qualità della vita e risolvere sfide ambientali. La tecnologia del digital twin applicato alle smart cities viene definito Urban Digital Twin (UDT). Le UDT rappresentano una replica virtuale dinamica e dettagliata della città fisica, aggiornata in tempo reale.

Il digital twin può aiutare nella pianificazione delle città intelligenti utilizzando tecniche di intelligenza artificiale usate per modellare edifici intelligenti, per gestire il traffico dei mezzi pubblici, per l'agricoltura intelligente ed ecosostenibile e per gestire l'illuminazione cittadina solo su necessità, riducendo gli sprechi.

Zurigo, Helsinki, Rotterdam e Singapore si caratterizzano per avere indirizzato le loro politiche di mitigazione e adattamento climatico attraverso la tecnologia innovativa del digital twin. Sempre in Europa, il programma LEAD porterà alla sperimentazione dei digital twins in 6 città: Madrid, L'Aia, Budapest, Lione, Oslo e Porto. L'obiettivo è quello di testare soluzioni innovative per migliorare la logistica, la mobilità e le infrastrutture delle smart city.

In Italia, a Genova, si stanno facendo diverse sperimentazioni sul campo. In particolare, sono in fase di sviluppo tre casi interessanti legati alla riqualificazione di alcune infrastrutture che vedono il coinvolgimento di alcune istituzioni e centri tecnologici di eccellenza, come Start 4.0, Leonardo e l'Istituto Italiano di Tecnologia.

6.3 – Industria 4.0

Al giorno d'oggi, l'industria manifatturiera è alla ricerca di un sistema che possa fornire un'elevata connettività e che sia in grado di tenere traccia dei prodotti. Queste applicazioni all'industria 4.0 sono supportate dal digital twin. Il gemello digitale ha la capacità di tracciare le prestazioni delle macchine in un ambiente in tempo reale e anche di prevedere la durata e l'efficienza future della macchina, il che è molto importante per la misurazione delle

prestazioni e dell'affidabilità per lo sviluppo del prodotto. I prodotti possono essere facilmente testati impostando un ambiente di simulazione da parte del digital twin e ottenere la configurazione migliore possibile.

Un esempio virtuoso di come il digital twin migliora la produttività industriale e la sostenibilità ambientale è quello di Unilever. L'azienda sta utilizzando il modello in uno stabilimento in Brasile per impostare nuovi parametri di produzione. Un parametro è la temperatura alla quale il sapone viene espulso prima di essere tagliato in barrette. L'adozione del digital twin: ha fatto risparmiare all'azienda 2,8 milioni di dollari, ha aumentato la produttività dall'1% al 3% e ha ridotto notevolmente il consumo di energia e il relativo impatto ambientale.

6.4 – Veicoli autonomi

Anche in questo caso il digital twin applicato in questo settore assume un nome diverso: Vehicular Digital Twin (VDT).

Le problematiche a cui si fa fronte sono: campo di rilevamento miope (i sensori LiDAR raggiungono solo i 200 metri) e la capacità di elaborazione locale limitata (far fronte tempestivamente a condizioni di traffico complesse e ad imprevisti). Di conseguenza, i veicoli autonomi dovrebbero cercare una capacità di elaborazione esterna per supportare l'elaborazione dei dati e analizzare al meglio la situazione. Il digital twin, ricreando un modello digitale del veicolo e del suo contesto grazie ai tanti sensori, riesce a prendere decisioni con bassi tempi di reazione.

Un esempio è l'azienda MobileDrive, figlia della casa automobilistica Stellantis e della produttrice di componenti elettrici taiwanese Foxconn, ha adottato un approccio di tipo model-based systems engineering per il supporto dello sviluppo dei propri sistemi chiamati Advanced Driver Assistance Systems, utilizzando il portfolio di prodotti Siemens Xcelerator e la sua tecnologia per digital twin estremamente completi.

CONCLUSIONI

La tecnologia digital twin, che agli inizi di questo decennio era ancora poco conosciuta, adesso è sulla bocca di molte comunità scientifiche. In tanti settori diversi, ognuno applica il modello digitale per ottenere gli stessi obiettivi: efficienza, ottimizzazione dei costi e sostenibilità. Vi sono varie proposte di architettura del digital twin e varie implementazioni, ma ognuno rispecchia il cuore della tecnologia: creare una simulazione virtuale connessa con il sistema fisico in tempo reale per esprimere al massimo le sue potenzialità e sfruttare al meglio le sue risorse.

BIBLIOGRAFIA

- [1] H. Shin, S. Oh, A. Isah, I. Aliyu, J. Park e J. Kim, “*Network Traffic Prediction Model in a Data-Driven Digital Twin Network Architecture*”, Department of ICT Convergence System Engineering, Chonnam National University, Gwangju 61186, Republic of Korea, 2023
- [2] N. P. Kuruvatti, M. A. Habibi, S. Partani, B. Han, A. Fellan e H. D. Schotten, “*Empowering 6G Communication System with Digital Twin Technology: A Comprehensive Survey*”, Division of Wireless Communication and Radio Navigation, Department of Electrical and Computer Engineering, Technische Universitat Kaiserslautern, 2022
- [3] X. Lin, L. Kundu, C. Dick, E. Obiodu, T. Mostak e M. Flaxman, “*6G Digital Twin Networks: From Theory to Practice*”, IEEE Communication Magazine, November 2023
- [4] L. U. Khan, Z. Han, W. Saad, E. Hossain, M. Guizani e C. S. Hong, “*Digital Twin of Wireless Systems: Overview, Taxonomy, Challenges and Opportunities*”, 1553-877X, IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol.24, No.4, 2022
- [5] M. S. Rodrigo, D. Rivera, J. I. Moreno, M. Alvarez-Campana e D. R. Lopez, “*Digital Twin for 5G Networks: A Modelling and Deployment Methodology*”, Departamento de Ingegneria de Sistemas Telematicos, ETSI de Telecomunicacion, Universidad Politecnica de Madrid, IEEE Access, Vol.11, 2023
- [6] Articolo di e7, il settimanale di Quotidiano Energia
- [7] David H. Gelernter, “*Mirror Worlds*”, 1992
- [8] L. U. Khan, W. Saad, D. Niyato, Z. Han e C. S. Hong, “*Digital-twin-enabled 6G: Vision, Architectural Trends, and Future Directions*”, IEEE Communication Magazine, 13 Novembre 2021
- [9] M. Sheraz, T. C. Chua, Y. L. Lee, M. M. Alam, A. Al-Habashna e Z. Han, “*A Comprehensive Survey on Revolutioning Connettivity Through Artificial Intelligence-Enabled Digital Twin Network in 6G*”, IEEE Access, Vol.12, 25 Marzo 2024

- [10] M. A. Uusitalo, P. Rugeland, M. R. Boldi, E. C. Strinati, P. Demestichas, M. Ericson, G. P. Fettweis, M. C. Filippou, A. Gati, M. Hamon, M. Hoffman, M. Latva-aho, A. Parssinen, B. Richerzhagen, H. Schotten, T. Svensson, G. Wikstrom, H. Wymeersch, V. Ziegler e Y. Zou, “*6G Vision, Value, Use Cases and Technologies from European 6G Flagship Project Hexa-X*”, IEEE Access, Vol.9, 15 Novembre 2021
- [11] A. Masaracchia, V. Sharma, B. Canberk, O. A. Dobre e T. Q. Duong, “*Digital Twin for 6G: Taxonomy, Research Challenges and the Road Ahead*”, IEEE Open Journal, Vol.3, 2022
- [12] Y. Lu, X. Huang, K. Zhang, S. Maharjan e Y. Zhang, “*Low-latency Federated Learning and Blockchain for Edge Association in Digital Twin empowered 6G Networks*”, IEEE Access, 17 Novembre 2020
- [13] L. Wright e S. Davidson, “*How to tell the difference between a model and a digital twin*”, Adv. Model. And Simul. in Eng. Sci., 2020
- [14] H. Ahmadi, A. Nag, Z. Khan, K. Sayrafian e S. Rahadrja, “*Networked Twins and Twins of Networks: an Overview on the Relationship Between Digital Twins and 6G*”, IEEE Access, 12 Agosto 2021

RINGRAZIAMENTI

Ringrazio mia madre, che con i suoi modi mi ha sempre protetto e cresciuto e ora dovrà abituarsi a non dirmi più che devo studiare ogni volta che mi vede in giro per casa.

Ringrazio mio padre, che ha avuto sempre la parola giusta nel momento giusto, che mi ha regalato la libertà di costruirmi il mio futuro e che sapeva (in fondo) che ci sarei riuscito.

Ringrazio la famiglia Campaci, che nel mio quadro non l'ho mai considerato uno sfondo, ma una splendida cornice, parte integrante della mia famiglia allargata e sono felice di condividere con loro questo mio traguardo.

Ringrazio i miei amici, che mi sono sempre stati affianco, che mi hanno strappato un sorriso quando serviva, che non mi hanno mai messo fretta e che sanno più di me quanto valgo.

Ragazzi, da quando vi conosco la mia vita è più bella. Mi tocca portarvi in Sicilia.

Ringrazio il mio relatore il prof. Tomasin, che mi ha dato la possibilità di scrivere la tesi con lui e mi ha concesso la fiducia di cui avevo bisogno. Senza dimenticare che è stato oggettivo e critico, qualità che hanno reso la mia tesi migliore.

Da ingegnere ringrazio il mio pc, un huawei argentato che non ha mai fatto i capricci e che mi ha insegnato una cosa: non importa la marca, il colore o la forma, ciò che conta è che giri bene League of Legends.

Ringrazio la mia Alessandra, che mi ha riempito i quaderni degli appunti con post-it aventi le migliori dediche, e nel periodo più difficile con la scritta "mai mollare". Che festeggiava ogni mio successo e che era più in ansia di me per i risultati. Che mi ha scelto quando ero ancora uno scapestrato e che ora si ritrova con un ingegnere scapestrato.