



**UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI BERGAMO**

Dipartimento di Ingegneria Gestionale,
dell'Informazione e della Produzione

Corso di Laurea Triennale in
Ingegneria Informatica

Classe n. L-8

Una valutazione qualitativa di alcune piattaforme di ingegnerizzazione di Digital Twin

Candidato:
Diego Rossi

Relatore:
Prof.ssa Patrizia Scandurra

Matricola n.
1073945

Anno Accademico
2022/2023

Sommario

Abstract	6
Introduzione.....	7
1. Nozioni preliminari	8
1.1 Definizione e schema concettuale	8
1.2 Piattaforma di ingegnerizzazione di DT.....	10
1.2.1 AWS IoT TwinMaker	10
1.2.2 INTO-CPS toolchain.....	10
1.2.3 DTaaS.....	11
1.3 Criteri di valutazione	12
2. Definizione del framework di classificazione	13
2.1 Sincronizzazione DT-PT	13
2.2 Modellazione virtuale e rappresentazione della conoscenza	14
2.3 Monitoraggio e linguaggio di query	14
2.4 Metriche di qualità e strumenti di amministrazione.....	15
2.5 Modelli analitici e analisi formale.....	16
2.6 Tecniche di analisi what-if/if-what.....	16
2.7 Visualizzazione e realtà aumentata	17
2.8 Hosting, condivisione e formati di interscambio	17
2.9 Collaborazione con diverse piattaforme DT	18
3. Valutazione AWS IoT TwinMaker.....	19
3.1 Sincronizzazione DT-PT	19
3.2 Modellazione virtuale e rappresentazione della conoscenza	20
3.3 Monitoraggio e linguaggio query	21

3.4	Metriche di qualità e strumenti di amministrazione.....	22
3.5	Modelli analitici e di analisi formale.....	22
3.6	Tecniche di analisi what-if/if-what.....	23
3.7	Visualizzazione e realtà aumentata	23
3.8	Hosting, condivisione e formati di interscambio	24
3.9	Collaborazione con diverse piattaforme.....	24
3.10	Tabella di valutazione.....	25
3.11	Esempi	26
4.	Valutazione piattaforma DTaaS.....	30
4.1	Sincronizzazione DT-PT	30
4.2	Modellazione virtuale e rappresentazione della conoscenza	30
4.3	Monitoraggio e linguaggio query	32
4.4	Metriche di qualità e strumenti di amministrazione.....	32
4.5	Modelli analitici e di analisi formale.....	33
4.6	Tecniche di analisi what-if/if-what.....	34
4.7	Visualizzazione e realtà aumentata	34
4.8	Hosting, condivisione e formati di interscambio	34
4.9	Collaborazione con diverse piattaforme DT	35
4.10	Tabella di valutazione.....	35
4.11	Esempi	36
	Conclusioni.....	41
	Bibliografia.....	42
	Ringraziamenti	43

Elenco delle figure

Figura 1: Schema concettuale di un DT basato sull'architettura MODA [1].....	8
Figura 2: Servizi connessi alla piattaforma DTaaS [4].	11
Figura 3: Tabella di valutazione di AWS IoT TwinMaker	25
Figura 4: Schema edificio intelligente [8].....	26
Figura 5: Workspace di AWS IoT TwinMaker	27
Figura 6: Esempio di modifica di un'entità dal workspace	28
Figura 7: Query con risultato grafico	29
Figura 8: Esempio Scena	29
Figura 9: Valutazione DTaaS	35
Figura 10: Schema Ammortizzatore a molla di massa [10].	36
Figura 11: Filesystem del digital twin [4]	37
Figura 12: Spazio di lavoro utente.....	38
Figura 13: Terminale dello spazio di lavoro	39
Figura 14: Directory dei risultati dell'esecuzione del DT.....	39

Abstract

L'obiettivo del lavoro di tesi è la valutazione di alcune piattaforme di ingegnerizzazione di DT (digital twin) secondo un framework di classificazione esistente.

Tale framework è una sorta di matrice di requisiti/aspetti da considerare quando si progetta e sviluppa un DT che consenta analisi what-if e if-what usando modelli formali e analitici.

Le piattaforme valutate nel lavoro di tesi sono due:

- La prima è la piattaforma AWS IoT TwinMaker fornita dalla piattaforma cloud AWS.
- La seconda invece, è la piattaforma DTaaS (Digital Twin as a Service) sviluppata da INTO-CPS ASSOCIATION.

Introduzione

I gemelli digitali sono una tecnologia che negli ultimi anni sta prendendo sempre più piede. Il loro impiego spazia numerosi settori come ingegneria, medicina, automotive, edilizia, settore manifatturiero, agricoltura e altri ancora. Questi gemelli vengono sviluppati per testare e monitorare sistemi fisici e digitali, per analizzarli e ottimizzarli, o anche semplicemente per supportare le fasi di progettazione e sviluppo di sistemi complessi. Recentemente, diverse piattaforme hanno introdotto servizi per creare e gestire digital twin, semplificandone così il loro processo di sviluppo.

Nel primo capitolo viene fornita una descrizione tecnica di un DT e una panoramica generale delle piattaforme valutate nella tesi. Il secondo capitolo presenta il framework di classificazione descrivendo ogni requisito presente all'interno. I capitoli tre e quattro invece, presentano l'analisi e la valutazione effettuata delle due piattaforme.

1. Nozioni preliminari

1.1 Definizione e schema concettuale

Un digital twin è una rappresentazione virtuale di un sistema reale che viene continuamente aggiornata con dati in tempo reale per tutta la sua durata, e allo stesso tempo, può interagire e influenzare il sistema fisico.

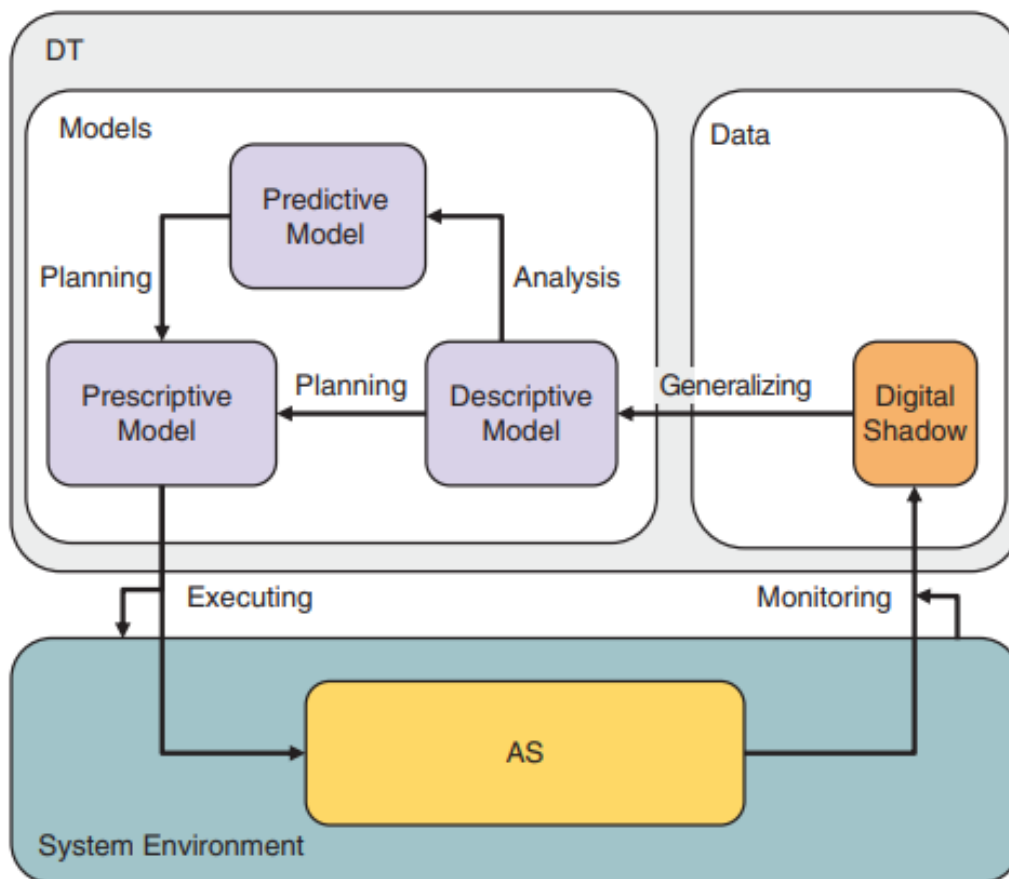


Figura 1: Schema concettuale di un DT basato sull'architettura MODA [1].

Nella figura 1 viene presentato un possibile schema concettuale di un DT. Il sistema AS si riferisce al sistema reale collegato al digital twin. Il collegamento tra il gemello e il sistema fisico è bidirezionale, infatti, il gemello fisico può inviare dati al gemello digitale e allo stesso tempo può ricevere dei comandi o delle istruzioni da eseguire.

Il gemello digitale è suddiviso in due componenti principali: Data e Models.

Il componente Data si occupa di salvare e rappresentare i dati provenienti dal sistema reale. Alcuni esempi possono essere dati rilevati dai sensori del sistema fisico, dati storici del sistema, oppure dati tecnici di alcuni componenti. Il concetto di Digital Shadow fa riferimento a delle strutture dati astratte che rappresentano un flusso di dati unidirezionale tra il sistema AS e la sua rappresentazione digitale.

Il componente Models è rappresentato da uno o più modelli, i quali svolgono diverse funzioni del sistema. In questo caso vengono presentati tre modelli: il modello descrittivo, il modello predittivo e il modello prescrittivo. Il modello descrittivo rappresenta degli aspetti attuali o passati del sistema fisico. Attraverso la sua analisi il modello predittivo è in grado di fare delle previsioni su informazioni che non sono ancora state misurate. Infine, il modello prescrittivo è una descrizione del sistema da realizzare e sfrutta le informazioni prese dagli altri due modelli per modificare il sistema fisico tramite istruzioni e comandi [1].

1.2 Piattaforma di ingegnerizzazione di DT

1.2.1 AWS IoT TwinMaker

AWS IoT TwinMaker è un servizio AWS IoT che può essere usato per costruire gemelli digitali operativi di sistemi fisici e digitali. Esso crea visualizzazioni digitali utilizzando misurazioni e analisi da una varietà di sensori, telecamere e applicazioni del mondo reale. È possibile utilizzare questi dati per monitorare, ottimizzare le operazioni e diagnosticare errori.

TwinMaker fornisce strumenti per modellare dispositivi, spazi e processi in un grafico della conoscenza. Utilizza connettori integrati per AWS IoT SiteWise, Kinesis Video Stream e si possono creare anche connettori personalizzati per i dati archiviati in altre posizioni. È disponibile uno strumento per creare scene in 3D del proprio gemello digitale ed è presente anche un plug-in per Grafana che si può utilizzare per creare applicazioni dashboard per gli utenti finali [2].

1.2.2 INTO-CPS toolchain

INTO-CPS è una raccolta di strumenti sviluppati per aiutare lo sviluppo di sistemi cyber-fisici. Simulare tali sistemi richiede algoritmi speciali per via dei diversi formalismi utilizzati per modellare i componenti di tali sistemi. Ciò è possibile utilizzando una tecnica di simulazione nota come co-simulazione, resa possibile dall'uso di uno standard di scambio di modelli Functional Mock-up Interface (FMI).

INTO-CPS fornisce gli strumenti necessari per:

- Modellare i singoli componenti.
- Eseguire una co-simulazione.
- Valutare l'impatto di diverse decisioni progettuali.
- Validare e testare i modelli FMU.
- Abbinare la simulazione con prototipi reali [3].

1.2.3 DTaaS

La piattaforma Digital Twin as a Service (DTaaS) è utile per creare, utilizzare e condividere gemelli digitali. I DT vengono creati sulla piattaforma software utilizzando i componenti riutilizzabili disponibili o caricandone dei propri.

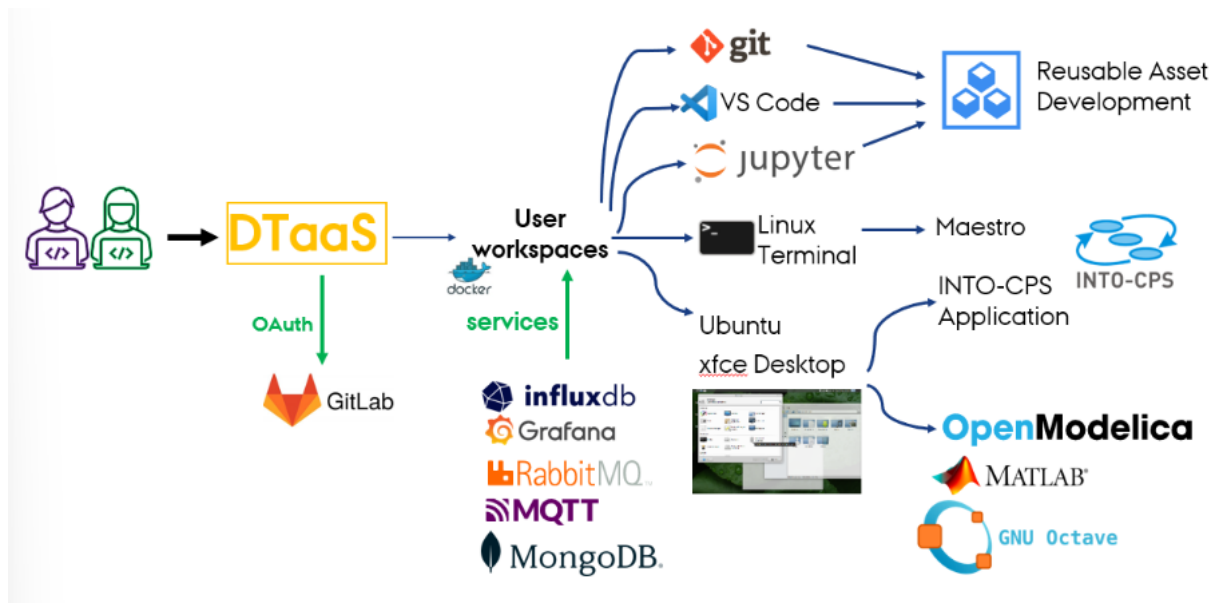


Figura 2: Servizi connessi alla piattaforma DTaaS [4].

La figura 2 mostra l'architettura dei servizi offerti dalla piattaforma. Per accedere a DTaaS bisogna disporre di un provider OAuth in esecuzione che viene utilizzato per l'autenticazione. Una volta eseguita l'autenticazione si

entra nella propria area di lavoro, la quale è una versione dockerizzata di un desktop Linux. Ogni area di lavoro è poi fornita di servizi preinstallati per creare e utilizzare al meglio i propri gemelli digitali [4].

1.3 Criteri di valutazione

La valutazione delle piattaforme è stata effettuata visionando la documentazione proposta e svolgendo dei piccoli esempi.

Per ogni requisito del framework è stato assegnato un colore:

- Verde: il requisito viene supportato dalla piattaforma in modo efficace e agevole per l'utente.
- Giallo: il requisito viene parzialmente supportato dalla piattaforma oppure è supportato ma non in modo efficiente.
- Rosso: la piattaforma non supporta il requisito.

2. Definizione del framework di classificazione

2.1 Sincronizzazione DT-PT

Per rendere possibile la sincronizzazione, un prerequisito fondamentale è la presenza di una connessione bidirezionale tra il PT (physical twin) e il DT.

È importante che il sistema fisico sia in grado di inviare dati al DT e che, allo stesso tempo, il DT sia in grado di inviare comandi e istruzioni per controllare il sistema fisico.

Una piattaforma di digital twin dovrebbe automatizzare il più possibile la sincronizzazione DT-PT, senza richiedere profonde conoscenze tecniche di comunicazione o dei modelli che compongono il gemello digitale. Il digital twin deve essere in grado di aggiornare il proprio stato con gli ultimi dati ricevuti, in modo da essere un'affidabile rappresentazione in tempo reale dell'entità fisica.

In generale la piattaforma dovrebbe offrire diversi meccanismi di sincronizzazione, fornendo anche la possibilità di personalizzarli. Ad esempio, l'utente dovrebbe poter modificare gli intervalli di connessione tra i due gemelli. Infatti, in alcuni casi, potrebbe essere sufficiente un aggiornamento periodico (orario, giornaliero ecc.), in altri invece potrebbe però essere richiesta una sincronizzazione real-time e near real-time. Nel primo caso la sincronizzazione è continua e nel secondo invece la frequenza di sincronizzazione è dettata dal twinning rate (frequenza di sincronizzazione tra gli stati di DT e PT).

2.2 Modellazione virtuale e rappresentazione della conoscenza

Una fase importante nel processo di creazione di un gemello digitale è la modellazione. Il modello è il cuore del DT, ne descrive le proprietà, le relazioni e il comportamento, infatti da esso dipendono la maggior parte delle funzionalità offerte dalla piattaforma.

Esistono molti metodi di modellazione, uno tra questi è il system modeling, ossia la modellazione del sistema fisico come un insieme di sottosistemi interconnessi. Sarebbe opportuno che una piattaforma disponesse di un ambiente e di un linguaggio di modellazione applicabile a qualsiasi dominio, con la possibilità di creare i propri costrutti e la propria ontologia. Le ontologie sono gli schemi concettuali che definiscono i termini e i concetti usati in uno specifico dominio. Un linguaggio di modellazione che supporta le ontologie permette di modellare un sistema di un dato dominio sfruttando le ontologie già consolidate e disponibili in rete.

2.3 Monitoraggio e linguaggio di query

Un requisito fondamentale per una piattaforma di ingegnerizzazione è la possibilità di offrire all'utente degli strumenti per monitorare il proprio DT in tempo reale. Alcuni digital twin possono essere molto complessi e possono contenere una grande quantità di dati.

È importante quindi, che una piattaforma offra anche la possibilità di eseguire delle interrogazioni sul gemello digitale, così da poter estrarre

facilmente le informazioni d'interesse per l'utente. Le query rendono il monitoraggio di sistemi complessi più efficace e meno dispendioso a livello di tempistiche.

2.4 Metriche di qualità e strumenti di amministrazione

Nei digital twin, come in tutti i sistemi software, è fondamentale monitorare i requisiti di qualità. In alcuni sistemi potrebbe essere di vitale importanza garantire requisiti come la sicurezza, l'affidabilità, la performance e altri ancora.

Per questo motivo si vorrebbe che una piattaforma esponesse la qualità di un DT attraverso delle metriche, con la possibilità di associare loro delle condizioni e delle istruzioni da eseguire in caso queste non venissero rispettate.

La qualità di un digital twin dipende fortemente dal modello utilizzato e durante il suo ciclo di vita potrebbe essere necessario modificarlo. Ad esempio, quando si vuole apportare delle modifiche per potenziare o migliorare il sistema reale, diventa necessario dover modificare il modello del DT.

Perciò, si ritiene importante che una piattaforma fornisca degli strumenti di manutenzione e gestione dei modelli che permettano di modificare con facilità il gemello digitale.

2.5 Modelli analitici e analisi formale

Per rappresentare un sistema complesso in modo efficace, la soluzione migliore è quella di dividere la modellazione dell'intero sistema in più modelli analitici (o matematici) e di analisi formale. Ogni modello matematico rappresenta il comportamento di un sottosistema e per poterlo utilizzare come strumento di monitoraggio del comportamento del DT è necessario che sia eseguibile e quindi collegato al suo risolutore.

Una piattaforma DT deve perciò implementare modelli analitici e di analisi formale per rappresentare il DT dal punto di vista comportamentale e deve essere responsabile dell'esecuzione dei medesimi.

2.6 Tecniche di analisi what-if/if-what

Un digital twin, oltre a strumenti per rappresentare e monitorare il sistema fisico, deve anche fornire degli strumenti per compiere delle analisi sui dati. In particolare, la piattaforma dovrebbe dar la possibilità all'utente di poter effettuare delle tecniche di analisi what-if e if-what.

Le prime, attraverso metodi di previsione, forniscono suggerimenti in merito all'evoluzione di alcuni parametri o misurazioni. Così facendo è possibile guidare il sistema reale in modo da mantenerlo in buone condizioni. Tuttavia, trattandosi sempre di previsioni non certe al cento per cento, potrebbe essere necessario scomporre il sistema in sottosistemi più piccoli e richiederne la co-simulazione.

Le analisi if-what permettono di rilevare eventuali violazioni dei requisiti di qualità e sicurezza. Queste tipo di analisi, rispetto alle precedenti che si

concentravano sugli scenari futuri ipotetici, pongono l'attenzione sul presente, garantendo la Quality of Services (QoS) in fase di esecuzione.

al verificarsi di un determinato evento (per esempio la violazione di un vincolo) è possibile compiere delle azioni influenzando l'entità fisica, ad esempio inviando un comando o inviando una notifica ad un operatore.

2.7 Visualizzazione e realtà aumentata

La visualizzazione dei dati di un DT può migliorare significativamente l'esperienza di un utente. Essa potrebbe essere un semplice grafico, un modello 3D, oppure anche una rappresentazione in realtà aumentata.

La realtà aumentata proietta i dati del digital twin sugli oggetti del mondo fisico attraverso proiezioni di luce sulle superfici o con un visore indossabile con lenti trasparenti.

Una piattaforma quindi, dovrebbe offrire degli strumenti di visualizzazione delle risorse, dando la possibilità personalizzare la loro presentazione in base al ruolo dell'utilizzatore.

2.8 Hosting, condivisione e formati di interscambio

La capacità di una piattaforma di ospitare un DT rendendolo accessibile ai suoi utenti dalla rete internet, è definita "Hosting". Il trasferimento di un digital twin da una piattaforma ad un'altra non è un'operazione molto semplice, in alcuni casi infatti, potrebbe anche implicare il fatto di dover ricostruire da capo il gemello. È fondamentale per una piattaforma favorire

l'hosting, così da permettere agli ingegneri di collaborare tra di loro senza troppi sforzi durante l'intero ciclo di vita del gemello digitale.

È importante tenere presente che l'accesso al DT tramite internet comporta una maggiore attenzione sulle misure di sicurezza, come ad esempio l'autenticazione e la crittografia dei dati trasmessi.

Perciò, una piattaforma DT deve permettere l'accesso a tutte le sue funzionalità da qualunque postazione senza trascurare gli aspetti riguardanti la sicurezza.

2.9 Collaborazione con diverse piattaforme DT

L'aumento della complessità nei sistemi industriali sta portando le aziende ad investire maggiormente nei digital twin per digitalizzarsi e rimanere competitive nel mercato.

Nei settori caratterizzati da collaborazioni tra aziende diverse, sarebbe molto comodo avere la possibilità di collaborare anche a livello di piattaforme DT, ciò renderebbe più agevoli le fasi di sviluppo e i processi decisionali legati ad esse.

Risulta necessario implementare dei protocolli comuni e degli standard di comunicazione, in modo da consentire alle piattaforme di scambiare dati in modo efficiente e indipendentemente dalle loro architetture. È importante anche implementare delle misure di sicurezza per garantire la privacy e la protezione di dati sensibili.

3. Valutazione AWS IoT

TwinMaker

3.1 Sincronizzazione DT-PT

Una fonte dati per un gemello digitale è il luogo da cui esso ottiene i suoi dati. TwinMaker fornisce due tipi di fonti dati:

- Connettori gerarchici: consentono di sincronizzare continuamente un modello esterno con il DT.
- Connettori per serie temporali: consentono di connettersi a database di serie temporali come AWS IoT SiteWise.

Dato che AWS utilizza un'architettura basata su connettori non serve migrare i dati prima dell'utilizzo di TwinMaker. Vengono supportati connettori proprietari per AWS IoT SiteWise, quindi, se si archiviano i dati in SiteWise non serve implementare dei propri connettori. Diversamente, se i dati vengono salvati in altri archivi come DynamoDB, TimeStream o Snowflake bisogna implementare dei lambda connettori che consentano di richiamare il connettore quando necessario.

AWS IoT SiteWise è un servizio di AWS che permette di raccogliere, modellare, analizzare e visualizzare i dati da provenienti apparecchiature industriali [5].

TwinMaker supporta la sincronizzazione delle risorse SiteWise mettendo a disposizione un componente “`iotsitewise.resourcesync`” che sincronizza automaticamente gli asset e i modelli di asset convertendoli in entità, componenti e tipi di componenti.

Questa sincronizzazione è di sola lettura, infatti, per effettuare delle azioni di modifica bisogna eseguirle direttamente in AWS IoT SiteWise. AWS permette inoltre di analizzare e monitorare lo stato dei processi di sincronizzazione [2].

3.2 Modellazione virtuale e rappresentazione della conoscenza

AWS permette di modellare il proprio DT tramite un entity-component-based Knowledge Graph, con cui è possibile utilizzare l'architettura entità-componente per rappresentare il proprio sistema fisico. Questa architettura si basa su tre elementi principali: entità, componenti e relazioni.

Le entità sono rappresentazioni digitali degli elementi fisici che catturano le funzionalità di quell'elemento, il quale può essere un oggetto, un processo o un concetto. I componenti sono elementi che forniscono contesto e dati per le entità e sono definiti da documenti JSON che descrivono la connessione tra una fonte dati e TwinMaker.

AWS fornisce diversi tipi di componenti per casi d'uso comuni, come ad esempio documenti, serie temporali, allarmi, video e altri ancora.

Le proprietà sono i valori contenuti nei componenti che descrivono i dettagli sullo stato corrente dell'entità [2].

3.3 Monitoraggio e linguaggio query

AWS IoT TwinMaker mette a disposizione tre strumenti di monitoraggio del proprio DT:

- Amazon CloudWatch.
- Amazon CloudWatch Logs.
- Amazon CloudTrail.

Amazon CloudWatch monitora in tempo reale le risorse, tramite esso è possibile: raccogliere parametri e tenerne traccia, creare pannelli di controllo personalizzati, creare allarmi, inviare notifiche oppure eseguire azioni quando un parametro raggiunge una soglia.

Amazon CloudWatch Logs monitora, archivia e fornisce l'accesso ai file di registro.

Amazon CloudTrail, invece, acquisisce le chiamate API e gli eventi correlati effettuati da o per conto del tuo account AWS e fornisce i file di log a uno specifico bucket S3.

All'interno dello spazio di lavoro è presente un editor di query con cui è possibile scrivere, eseguire, salvare e modificare le interrogazioni.

Il linguaggio utilizzato è il linguaggio di interrogazione flessibile PartiQL con il supporto della sintassi Graph Match. I risultati delle query vengono poi presentati come una tabella o come un grafico e possono anche essere esportati in formato JSON o CSV.

È possibile scrivere ed eseguire query anche all'interno della dashboard di Grafana collegata al DT [2].

3.4 Metriche di qualità e strumenti di amministrazione

AWS TwinMaker è organizzato in spazi di lavoro. Ogni spazio di lavoro quando viene creato, viene collegato a un bucket S3 in cui vengono archiviate le informazioni e un ruolo di esecuzione, il quale consente a TwinMaker di accedere alle risorse di altri servizi di AWS per conto dell'utente.

All'interno dello spazio di lavoro, vengono messi a disposizione controlli e funzioni per aggiungere, modificare ed eliminare le risorse collegate al gemello digitale.

La gestione della qualità può essere parzialmente gestita tramite i seguenti parametri offerti da CloudWatch:

- `ComponentTypeCreationFailure`: indica se la creazione del tipo di componente ha avuto successo.
- `ComponentTypeUpdateFailure`: indica se l'aggiornamento del tipo di componente ha avuto successo.
- `EntityCreationFailure`: indica se la creazione dell'entità ha avuto successo.
- `EntityUpdateFailure`: indica se l'aggiornamento dell'entità ha avuto successo.
- `EntityDeletionFailure`: indica se l'eliminazione dell'entità ha avuto successo [2].

3.5 Modelli analitici e di analisi formale

Nella documentazione di AWS IoT TwinMaker non c'è nessun riferimento alla possibilità di definire ed eseguire modelli matematici o modelli di analisi formale.

3.6 Tecniche di analisi what-if/if-what

La dashboard di Grafana offre la possibilità di creare modelli di machine learning per fare previsioni sullo stato attuale o futuro dei sistemi. Dopo la configurazione del modello, il sistema lo addestrerà in background, e una volta addestrato si potranno eseguire query per prevedere il valore dei parametri [6]. Tramite CloudWatch è possibile impostare allarmi che inviano una notifica o intraprendano azioni sulle risorse che si stanno monitorando quando un parametro specifico raggiunge una determinata soglia [2].

AWS mette a disposizione anche il servizio AWS IoT Events, il quale permette di monitorare i dispositivi per rilevare e gestire eventuali guasti o malfunzionamenti attivando specifiche azioni quando si verificano tali eventi [7].

3.7 Visualizzazione e realtà aumentata

AWS mette a disposizione il Knowledge Graph che organizza tutte le informazioni presenti all'interno dello spazio di lavoro e poi le presenta in un formato grafico visivo tramite le query.

AWS IoT TwinMaker fornisce uno strumento per creare scene in 3D.

Le scene sono delle visualizzazioni tridimensionali del proprio gemello digitale che vengono create utilizzando un singolo modello 3D (formato gltf o glb) per l'intero ambiente o utilizzando una composizione di più modelli. Una scena è formata da uno o più nodi che vanno a rappresentare tag, luci e risorse.

I tag sono dei nodi che rappresentano dati provenienti da un componente. È possibile utilizzare un tag per configurare il comportamento o l'aspetto visivo di un elemento nella scena.

Le luci vengono utilizzate per mettere a fuoco determinati elementi o proiettare ombre sugli oggetti per indicarne la posizione fisica.

Una volta importati i modelli, AWS mette a disposizione un set di controlli e strumenti con cui è possibile navigare e interagire con lo spazio 3D.

Inoltre, vi è la possibilità di collegare delle viste fisse alle varie entità, in modo da spostare facilmente il focus da un oggetto all'altro [2].

3.8 Hosting, condivisione e formati di interscambio

Il gemello digitale viene creato all'interno di uno spazio di lavoro, e tutte le informazioni connesse vengono salvate nel cloud, più precisamente in un bucket di Amazon S3, il quale viene creato o scelto dall'utente in fase di creazione del workspace.

Si possono concedere autorizzazioni diverse ai vari utenti per accedere allo spazio di lavoro. Inoltre, AWS fornisce un plug-in per Grafana e Amazon Managed Grafana, con cui si possono creare applicazioni dashboard da condividere poi con altri utenti.

AWS IoT TwinMaker permette di esportare le risorse da uno spazio di lavoro TwinMaker verso un bucket S3 oppure in locale [2].

3.9 Collaborazione con diverse piattaforme

Nella documentazione di AWS IoT TwinMaker non c'è alcun riferimento a collaborazioni con altre piattaforme DT.

3.10 Tabella di valutazione










REQUISITI	AWS IOT TWINMAKER
DT-PT SYNCHRONISATION	
VIRTUAL MODELING AND KNOWLEDGE RAPRESENTATION	
MONITORING AND QUERY LANGUAGE	
DT QUALITY METRICS AND ADMINISTRATION TOOLS	
MATHEMATICAL AND/OR FORMAL ANALYSIS	
WHAT-IF/IF-WHAT ANALYSIS	
VISUALIZATION AND AUGMENTED REALITY	
HOSTING, SHARING AND INTERCHANGE FORMAT	
COLLABORATION WITH DIFFERENT DT-PLATFORMS	

Figura 3: Tabella di valutazione di AWS IoT TwinMaker

3.11 Esempi

Gli esempi sono stati sviluppati seguendo i workshop proposti nella console di AWS IoT TwinMaker.

Come esempio iniziale, ho sviluppato un gemello digitale di un edificio intelligente [8].

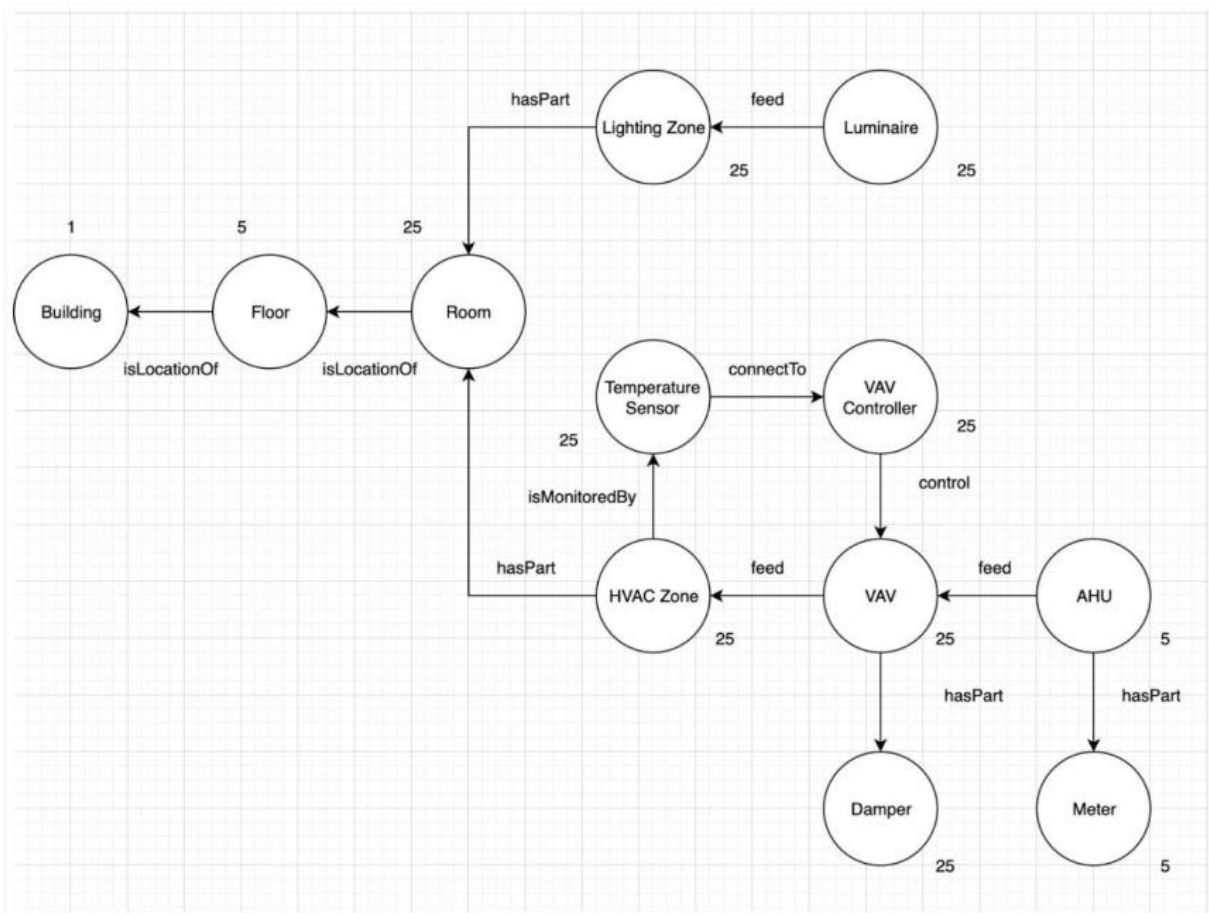


Figura 4: Schema edificio intelligente [8].

Inizialmente ho creato un ambiente IDE cloud con il servizio Cloud9 per eseguire i comandi CLI (AWS CLI è uno strumento che consente di interagire con servizi AWS tramite riga di comando).

In seguito ho creato uno stack in CloudFormation (servizio di Infrastruttura as Code), il quale è stato utilizzato poi per creare lo spazio di lavoro in TwinMaker e per importare tutte le entità al suo interno.

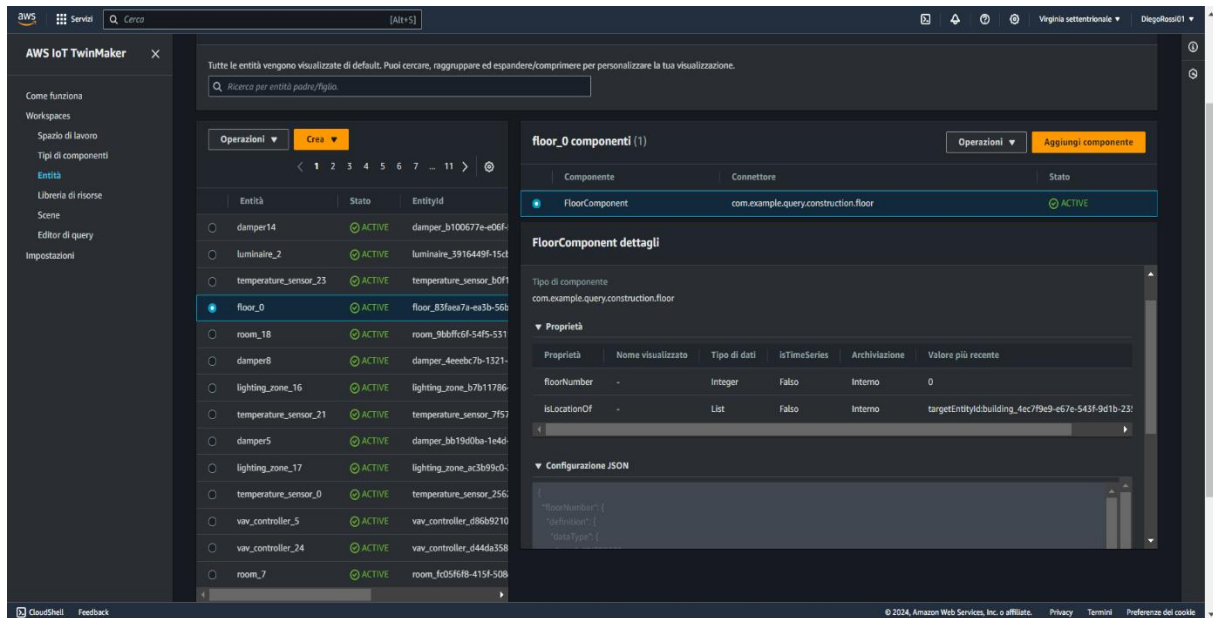


Figura 5: Workspace di AWS IoT TwinMaker

Ogni entità è caratterizzata da un documento JSON, modificando il documento è possibile modificare le caratteristiche dell'entità. La modifica si può effettuare direttamente dal workspace di TwinMaker oppure AWS mette a disposizione anche delle api (CreateEntity e UpdateEntity) da eseguire sul terminale di Cloud9 o nella console di AWS.

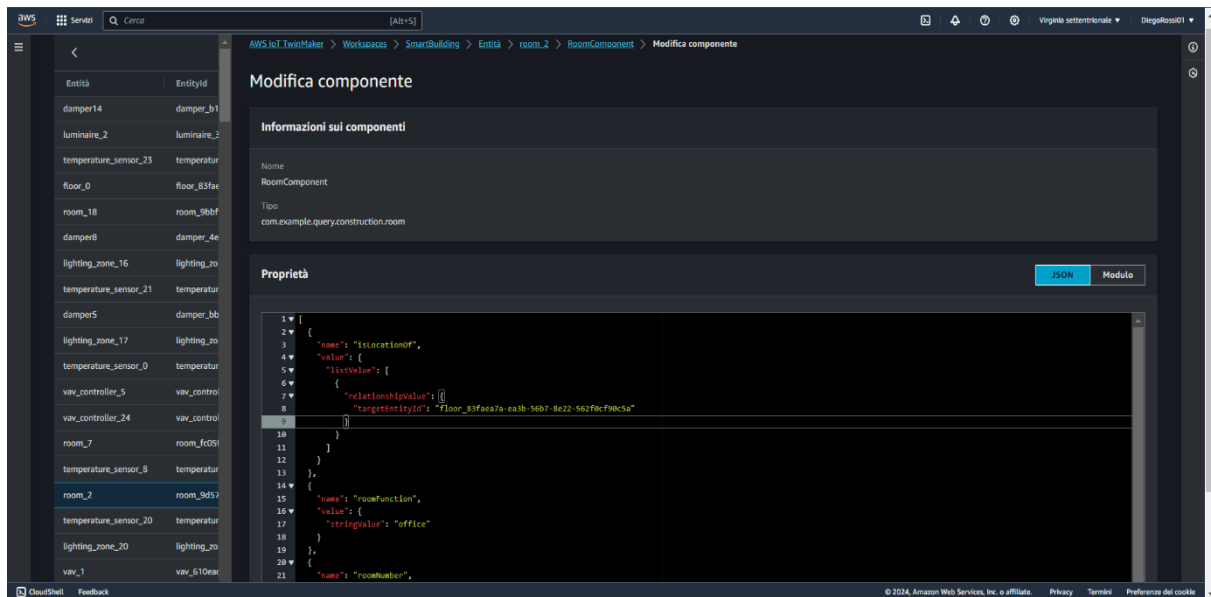


Figura 6: Esempio di modifica di un'entità dal workspace

All' interno dello spazio di lavoro è presente l'editor di query con cui è possibile eseguire query per interrogare il digital twin. Il linguaggio utilizzato è PartiQL.

È possibile eseguire query anche tramite l'API ExecuteQuery nella console di AWS oppure anche nel terminale di Cloud9. Inoltre, quando nell'interrogazione si selezionano dei nodi e delle relazioni nella query, TwinMaker mostra il risultato grafico.

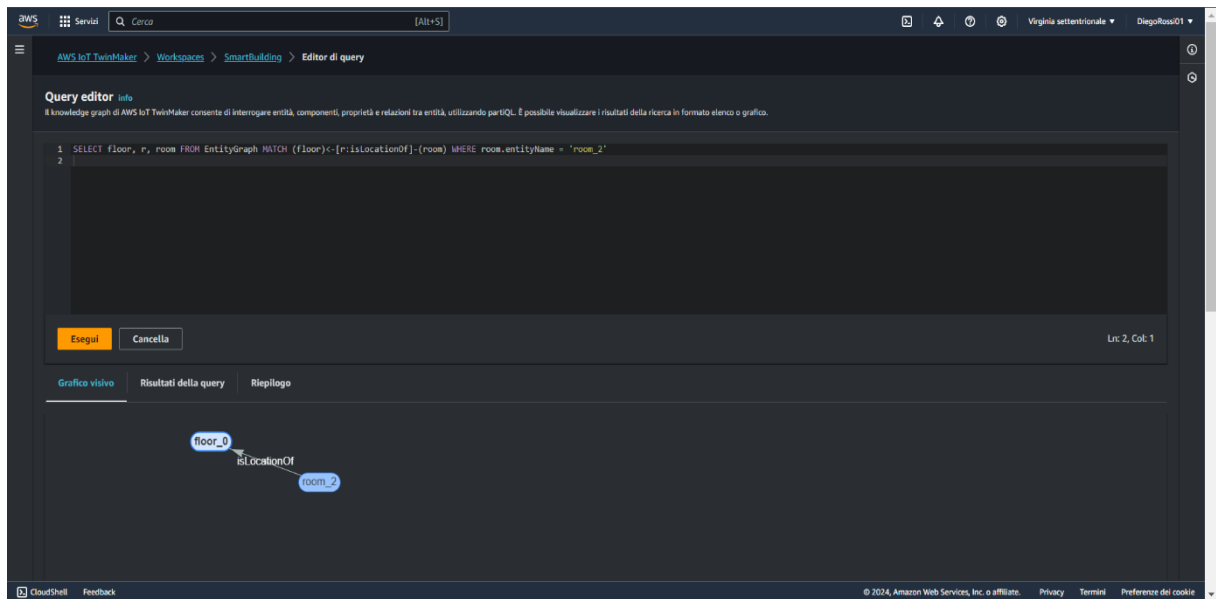


Figura 7: Query con risultato grafico

Nella figura ho eseguito una query dove viene selezionato il piano dell'edificio in cui si trova la stanza numero 2.

Nella sezione Scene si possono caricare dei modelli 3D che rappresentano il nostro digital twin.

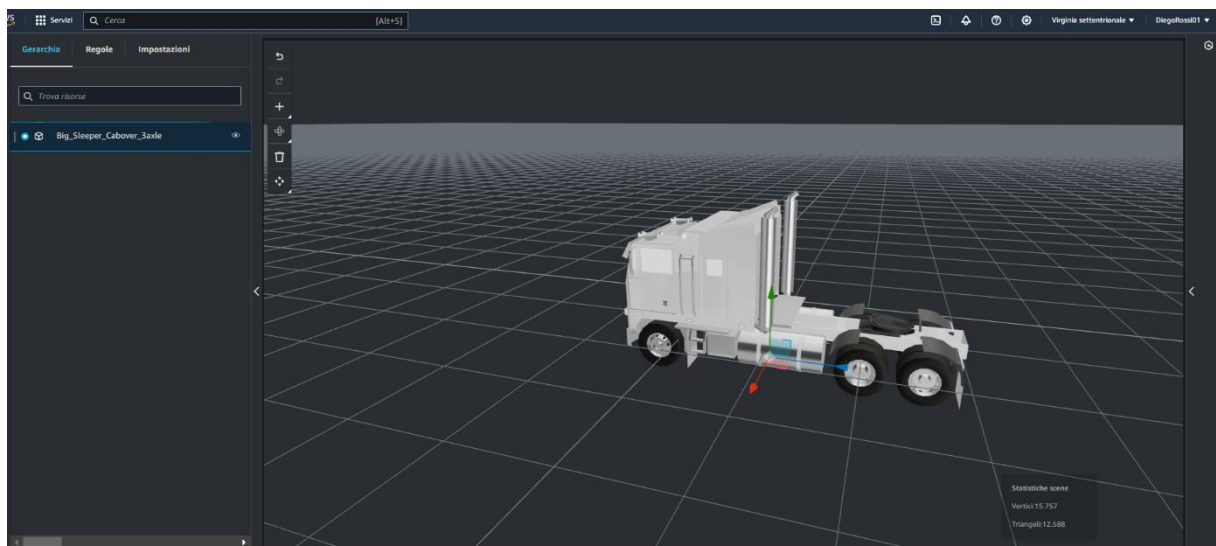


Figura 8: Esempio Scena

La figura 8 mostra la scena di un modello 3D di un camion che fa parte del digital twin di un insieme di semirimorchi connessi [9].

4. Valutazione piattaforma DTaaS

4.1 Sincronizzazione DT-PT

Le misurazioni reali vengono effettuate sul gemello fisico e vengono poi comunicate al gemello digitale. DTaaS offre servizi come:

- influxDb: Database per serie temporali provenienti dai gemelli fisici.
- RabbitMq: Broker di comunicazione per la comunicazione tra gemelli fisici e digitali.
- Mosquitto: Broker di trasferimenti di dati per dispositivi IoT che utilizza il protocollo MQTT.
- MongoDB: Database NoSql per archiviare di metadati di dati provenienti da gemelli fisici [4].

4.2 Modellazione virtuale e rappresentazione della conoscenza

DTaaS dispone di cinque tipi di risorse : funzioni, dati, modelli, strumenti e gemelli digitali. Le funzioni sono responsabili della parte di pre e post elaborazione di dati in input e output e delle uscite di controllo. Esse hanno anche il compito di elaborare i dati dei sensori e degli attuatori del gemello fisico.

La risorsa dati si riferisce alle fonti e alle destinazioni dei dati disponibili per i gemelli digitali. Alcuni esempi di fonti dati sono le misurazioni dei sensori

dei Physical Twins oppure i dati di test forniti dai produttori per la calibrazione dei modelli. Le destinazioni dei dati sono ad esempio i software di visualizzazione, utenti esterni e servizi di archiviazione dati.

I modelli vengono utilizzati per descrivere diversi aspetti dei gemelli fisici e del loro ambiente a diversi livelli di astrazione. Pertanto, è possibile avere più modelli per lo stesso gemello digitale. Per esempio, un gemello digitale di un robot potrebbe avere dei modelli comportamentali che descrivono il suo comportamento e anche dei modelli funzionali che descrivono le sue capacità.

Gli strumenti sono software utilizzati per creare, valutare e analizzare i modelli. Questi strumenti vengono eseguiti su piattaforme informatiche come sistemi operativi, macchine virtuali, oppure contenitori Docker.

La risorsa gemello digitale, invece, indica dei gemelli digitali creati da uno o più utenti che possono essere riutilizzati e riadattati per casi d'uso specifici.

Una caratteristica importante della piattaforma è che le risorse precedentemente elencate sono tutte riutilizzabili. Inoltre, DTaaS è indipendente dal formato delle risorse, ciò significa che l'unico requisito che devono soddisfare è che siano dei file caricabili nella pagina Library.

Un gemello digitale può essere creato solo collegando le risorse in modo significativo. Questa relazione può essere espressa tramite un'equazione matematica:

$$DT: \{ D^*, M^*, (FT)^+ \} CDT$$

La lettera D denota i dati, M i modelli, F le funzioni, T gli strumenti, CDT la configurazione del digital twin, e DT è una notazione simbolica per un

gemello digitale. Il simbolo * indica zero, una o più istanze della risorsa, mentre il + indica una o più istanze [4].

4.3 Monitoraggio e linguaggio query

DTaaS mette a disposizione il microservizio lib, il quale fornisce un'interfaccia API per le risorse riutilizzabili nella Library ed è responsabile della gestione e del servizio dei contenuti delle risorse che vi sono all'interno. Fornisce anche un endpoint API affinché i client possano eseguire query e recuperare queste risorse. Il linguaggio utilizzato per scrivere le interrogazioni è il linguaggio di query GraphQL. Si possono anche inviare interrogazioni GraphQL come richieste http POST e ottenere risposte.

È possibile impostare servizi di monitoraggio dei dati del gemello digitale attraverso i servizi esterni come Grafana, InfluxDB, RabbitMQ, Mosquitto [4].

4.4 Metriche di qualità e strumenti di amministrazione

Tutti gli utenti hanno delle aree di lavoro dedicate, le quali sono versioni dockerizzate di desktop Linux. Le aree di lavoro sono isolate, pertanto le installazioni e le personalizzazioni eseguite in un'area di lavoro non influiscono sulle altre. Ogni area mette a disposizione servizi e strumenti preinstallati accessibili dal browser web, in modo che tutti i DT in esecuzione possano interagire sia con servizi interni che con servizi esterni della piattaforma DT.

All'interno delle aree di lavoro dell'utente sono presenti alcuni strumenti di sviluppo come Jupyter Lab, Jupyter Notebook, VS Code in the browser e ungit.

L'area di lavoro è organizzata in tre voci principali: Library, Digital Twins e Workbench. Nella libreria ci sono sia risorse private (per un singolo utente) sia risorse comuni accessibili da tutti gli utenti del workspace. Si possono creare, modificare, caricare e scaricare risorse agevolmente. La pagina Digital Twins presenta il laboratorio di Jupyter e tre schede: Create, Execute, Analyze. Esse indicano dei suggerimenti/istruzioni sulle attività da intraprendere nelle fasi del ciclo di vita del gemello digitale. Inoltre, nel laboratorio Jupyter è installato un plugin git tramite il quale si possono collegare i file a repository git esterni. Nel workbench infine vengono forniti collegamenti a degli strumenti integrati nella piattaforma.

La qualità del codice di progetto può essere misurata tramite:

- Code Climate: esegue analisi statiche e controlli di stile.
- CodeCov: tiene traccia della copertura del test per l'intero progetto.
- Azioni GitHub di successo: Tutte le azioni di pull request e di commit diretti del codice devono avere successo nello stato delle azioni su GitHub [4].

4.5 Modelli analitici e di analisi formale

La piattaforma offre molti strumenti di simulazione come Simulink, co-simulazione, CFD, FEM, ROM, Machine learning e altri ancora [4]. Per esempio, importando dei modelli FMU, attraverso l'orchestratore Maestro è possibile eseguire una co-simulazione.

4.6 Tecniche di analisi what-if/if-what

Anche in DTaaS è possibile implementare il servizio Grafana per fare delle analisi sui dati dei digital twin. Grafana offre la possibilità di creare modelli di machine learning per creare previsioni sullo stato attuale o futuro dei sistemi. Dopo la configurazione del modello, il sistema lo addestrerà in background, e una volta addestrato si potranno eseguire query per prevedere il valore dei parametri. Sempre con Grafana si possono monitorare i parametri e progettare allarmi con sistemi di notifica per prevenire incidenti o problemi al sistema fisico [6].

4.7 Visualizzazione e realtà aumentata

DTaaS permette di caricare qualsiasi modello che sia una rappresentazione grafica del sistema fisico. Inoltre, poiché ogni utente ha a disposizione un sistema operativo Linux, si possono anche eseguire gemelli digitali dotati di interfaccia grafica [4]. Nella documentazione non ci sono riferimenti alla possibilità di creare delle visualizzazioni animate in 3D o visualizzazioni a realtà aumentata.

4.8 Hosting, condivisione e formati di interscambio

Il software DTaaS è un'applicazione web ed è possibile ospitarla su un server oppure si può anche installare il software in locale sul proprio computer e accedervi come localhost. Tutti i digital twin sono salvati nel cloud e la piattaforma permette di condividerli con altri utenti. La condivisione con persone che non interagiscono con la piattaforma viene facilitata dal fatto che è possibile collegare i propri gemelli digitali a delle repository git [4].

4.9 Collaborazione con diverse piattaforme DT

Nella documentazione di DTaaS non c'è alcun riferimento a collaborazioni con altre piattaforme DT.

4.10 Tabella di valutazione










REQUISITI	DTAAS
DT-PT SYNCHRONISATION	
VIRTUAL MODELING AND KNOWLEDGE RAPRESENTATION	
MONITORING AND QUERY LANGUAGE	
DT QUALITY METRICS AND ADMINISTRATION TOOLS	
MATHEMATICAL AND/OR FORMAL ANALYSIS	
WHAT-IF/IF-WHAT ANALYSIS	
VISUALIZATION AND AUGMENTED REALITY	
HOSTING, SHARING AND INTERCHANGE FORMAT	
COLLABORATION WITH DIFFERENT DT-PLATFORMS	

Figura 9: Valutazione DTaaS

4.11 Esempi

Il gemello digitale è stato sviluppato seguendo degli esempi forniti nella documentazione della piattaforma DTaaS.

Il digital twin comprende due smorzatori a molla di massa e mostra come un DT basato sulla co-simulazione possa essere utilizzato all'interno di DTaaS.

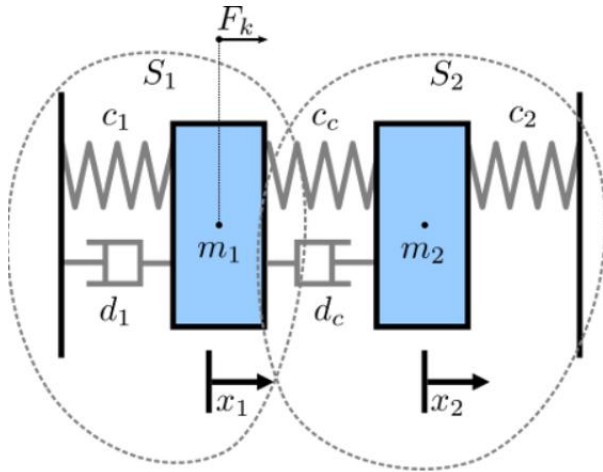


Figura 10: Schema Ammortizzatore a molla di massa [10].

Il digital twin è organizzato come segue:

```
1 workspace/  
2   data/  
3     mass-spring-damper  
4       input/  
5       output/  
6  
7   digital_twins/  
8     mass-spring-damper/  
9       cosim.json  
10      time.json  
11     lifecycle/  
12       analyze  
13       clean  
14       evolve  
15       execute  
16       save  
17       terminate  
18     README.md  
19  
20   functions/  
21   models/  
22     MassSpringDamper1.fmu  
23     MassSpringDamper2.fmu  
24  
25   tools/  
26     common/  
27       data/  
28       functions/  
29       models/  
30       tools/  
31         maestro-2.3.0-jar-with-dependencies.jar
```

Figura 11: File system del digital twin [4]

Questa è la struttura del DT all'interno della Library. Nella directory digital twin sono presenti due file “cosim.json” e “time.json” che rappresentano la configurazione per la co-simulazione. Nella directory models sono presenti i due modelli FMU delle due masse. Il primo modello calcola lo spostamento di massa e la velocità della massa m_1 per una data forza F_k che agisce su di essa. Il secondo modello calcola la forza F_k dato lo spostamento e la velocità della massa m_1 . Attraverso l'esecuzione di questi due modelli è possibile calcolare l'evoluzione della posizione delle due masse.

Nella sezione comune e directory strumenti è presente l'orchestratore maestro tramite il quale è possibile eseguire la co-simulazione.

Infine, nella cartella lifecycle sono presenti tutti gli script che gestiscono il ciclo di vita del digital twin, dalla fase di creazione fino alla fase di terminazione [10].

Per utilizzare la piattaforma ho creato una macchina virtuale sul mio PC con sistema operativo Ubuntu 22.04 e ho eseguito l'installazione su host locale. Una volta configurata la piattaforma ho importato gli esempi presenti nella documentazione di DTaaS nel mio workspace.

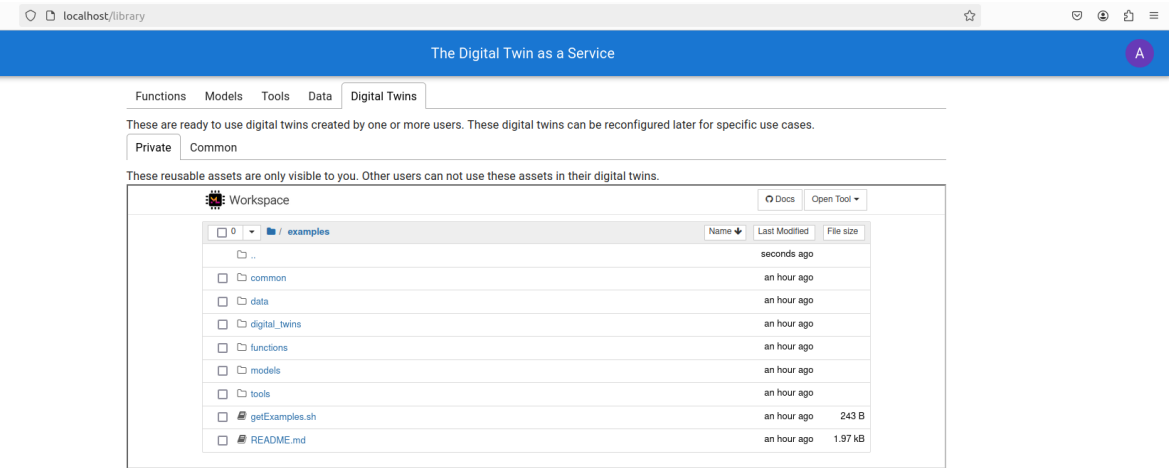
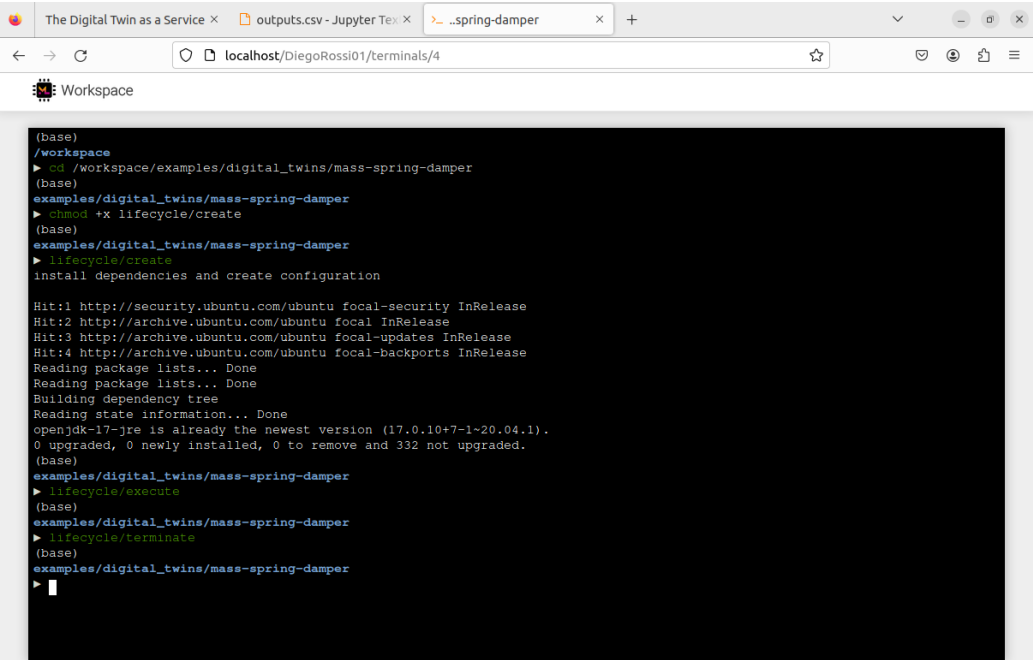


Figura 12: Spazio di lavoro utente.

Ho aperto il terminale dal mio spazio di lavoro e ho eseguito gli script di creazione ed esecuzione del digital twin.

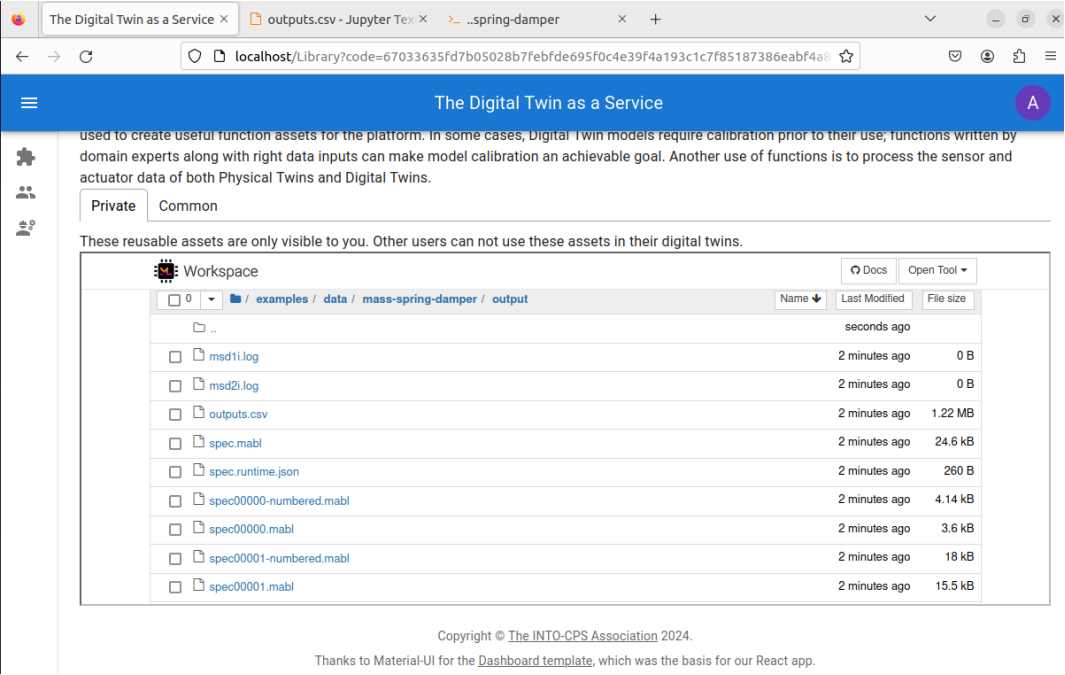


```
(base)
/workspace
└─> cd /workspace/examples/digital_twins/mass-spring-damper
(base)
examples/digital_twins/mass-spring-damper
└─> chmod +x lifecycle/create
(base)
examples/digital_twins/mass-spring-damper
└─> lifecycle/create
install dependencies and create configuration

Hit:1 http://security.ubuntu.com/ubuntu focal-security InRelease
Hit:2 http://archive.ubuntu.com/ubuntu focal InRelease
Hit:3 http://archive.ubuntu.com/ubuntu focal-updates InRelease
Hit:4 http://archive.ubuntu.com/ubuntu focal-backports InRelease
Reading package lists... Done
Reading package lists... Done
Building dependency tree
Reading state information... Done
openjdk-17-jre is already the newest version (17.0.10+7-1~20.04.1).
0 upgraded, 0 newly installed, 0 to remove and 332 not upgraded.
(base)
examples/digital_twins/mass-spring-damper
└─> lifecycle/execute
(base)
examples/digital_twins/mass-spring-damper
└─> lifecycle/terminate
(base)
examples/digital_twins/mass-spring-damper
└─>
```

Figura 13: Terminale dello spazio di lavoro

Una volta eseguito lo script di esecuzione sono apparsi i risultati della co-simulazione nella directory examples/data/mass-spring-damper/output.



The screenshot shows a web application titled "The Digital Twin as a Service". It features a sidebar with a menu icon and a user profile icon. The main content area displays a directory listing for the path `examples / data / mass-spring-damper / output`. The directory contains several files, including `msd1i.log`, `msd2i.log`, `outputs.csv`, `spec.mabl`, `spec.runtime.json`, and several `spec00000-numbered.mabl` files. The files are listed with their names, last modified times (all 2 minutes ago), and file sizes. The application also includes a footer with copyright information for The INTO-CPS Association 2024 and a note about the Material-UI library.

Name	Last Modified	File size
..	seconds ago	
msd1i.log	2 minutes ago	0 B
msd2i.log	2 minutes ago	0 B
outputs.csv	2 minutes ago	1.22 MB
spec.mabl	2 minutes ago	24.6 kB
spec.runtime.json	2 minutes ago	260 B
spec00000-numbered.mabl	2 minutes ago	4.14 kB
spec00000.mabl	2 minutes ago	3.6 kB
spec00001-numbered.mabl	2 minutes ago	18 kB
spec00001.mabl	2 minutes ago	15.5 kB

Figura 14: Directory dei risultati dell'esecuzione del DT.

Dopo aver visionato i risultati ho eseguito lo script di terminazione per cancellare i file di debug e i file di output dell'esecuzione.

Conclusioni

In questa tesi sono state valutate le due piattaforme di digital twin AWS IoT TwinMaker e DTaaS. Dalla valutazione, si può notare come entrambe le piattaforme supportano la maggior parte dei requisiti presenti nel framework, questo le rende sicuramente due piattaforme affidabili per quanto riguarda la realizzazione di gemelli digitali.

La stesura di questa tesi mi ha permesso di apprendere i concetti che stanno alla base dei digital twin dandomi la possibilità di applicarli nella valutazione e nell'utilizzo delle due piattaforme.

Ho trovato questo argomento molto interessante e stimolante, in particolare per l'impatto che questa tecnologia può avere su numerosi settori e per la sua versatilità in merito ai casi d'uso in cui può essere applicata.

In conclusione, sono soddisfatto di aver approfondito questo argomento e potrà sicuramente tornarmi utile in futuro.

Bibliografia

- [1] R. Eramo, F. Bordeleau, B. Combemale, M. v. d. Brand, M. Wimmer and A. Wortmann, "Conceptualizing Digital Twins," in IEEE Software, vol. 39, no. 2, pp. 39-46, March-April 2022, doi: 10.1109/MS.2021.3130755.

keywords: {Data models; Predictive models; Analytical models; Unified modeling language; Adaptation models; Biological system modeling; Digital twin; Digital Twin; Conceptual Modeling Framework; Model Types}.

- [2] https://docs.aws.amazon.com/it_it/iot-twinmaker/latest/guide/what-is-twinmaker.html
- [3] <https://into-cps-association.readthedocs.io/en/latest/>
- [4] <https://into-cps-association.github.io/DTaaS/development/index.html>
- [5] https://docs.aws.amazon.com/it_it/iot-sitewise/latest/userguide/what-is-sitewise.html
- [6] <https://grafana.com/docs/grafana-cloud/>
- [7] https://docs.aws.amazon.com/it_it/iotevents/latest/developerguide/what-is-iotevents.html
- [8] <https://catalog.us-east-1.prod.workshops.aws/workshops/93076d98-bdf1-48b8-bfe8-f4039ca1bf25>
- [9] <https://catalog.us-east-1.prod.workshops.aws/workshops/c9cd344a-0d0b-42cb-8734-09667433f89c/en-US/1-introduction>
- [10] <https://into-cps-association.github.io/DTaaS/development/user/examples/mass-spring-damper/index.html>

Ringraziamenti

In questa sezione della tesi desidero ringraziare tutte le persone che con il loro aiuto hanno permesso tutto ciò. Vorrei ringraziare:

La Prof.ssa Scandurra per la sua disponibilità a seguirmi nella stesura della tesi.

La mia famiglia e i miei amici che mi sono stati vicini in questi anni.

La mia ragazza per avermi sempre supportato e incoraggiato durante tutto questo percorso.