



**UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE**

**FACOLTÀ DI INGEGNERIA**

Dipartimento di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in Ingegneria Gestionale

---

**TESI DI LAUREA**

**Dal Virtual Commissioning al Digital Twin**

---

**From Virtual Commissioning to Digital Twin**

Relatore: Chiar.mo:

Candidata:

Prof. Bevilacqua Maurizio

Francesca Fiore

---

**ANNO ACCADEMICO 2021-2022**

*Ai miei nonni e  
a chi mi guarda da lassù.*

## SOMMARIO

<b>INTRODUZIONE.....</b>	<b>5</b>
<b>1. IL VIRTUAL COMMISSIONING .....</b>	<b>5</b>
1.1.1 SVILUPPO DEL VIRTUAL COMMISSIONING .....	6
1.1.2 VIRTUAL COMMISSIONING E MESSA IN SERVIZIO REALE.....	6
<b>1.2 COMPRENDERE LA MESSA IN SERVIZIO VIRTUALE.....</b>	<b>7</b>
1.2.1 QUATTRO CATEGORIE DI SVILUPPO DEL CONTROLLO.....	8
1.2.2 IL VIRTUAL COMMISSIONING DAL 2010 .....	8
<b>1.3 INIZIO DI UNA MESSA IN SERVIZIO DIGITALE .....</b>	<b>8</b>
1.3.1 SIMULAZIONI DIGITALI .....	9
1.3.2 INTEGRAZIONE SIMULAZIONE-CONTROLLER FISICI.....	9
1.3.3 SIMULAZIONE COESA.....	9
<b>1.4 SCELTA DI UNA SOLUZIONE DI MESSA IN SERVIZIO VIRTUALE .....</b>	<b>10</b>
1.4.1 DINAMICHE A LIVELLO DI MACCHINA.....	10
1.4.2 DETTAGLI A LIVELLO DI PROCESSO .....	11
<b>1.5 VANTAGGI DEL VIRTUAL COMMISSIONING.....</b>	<b>12</b>
<b>1.6 MODELLI ROI PER IL VIRTUAL COMMISSIONING.....</b>	<b>12</b>
1.6.1 SOFT AND HARD RETURNS .....	13
1.6.2. I TRE MODELLI ROI .....	13
<b>2. VIRTUAL COMMISSIONING E VIRTUAL REALITY.....</b>	<b>15</b>
2.1 CASO APPLICATIVO TRA VC E VR .....	17
<b>3. IL DIGITAL TWIN.....</b>	<b>18</b>
3.1 DEFINIZIONE DEL GEMELLO DIGITALE.....	18
3.2 COSTRUZIONE DI UN GEMELLO DIGITALE.....	18
3.2.1 FUNZIONAMENTO DEL DIGITAL TWIN .....	19
3.3 PIANIFICAZIONE E PROGETTAZIONE DEL DIGITAL TWIN .....	19
3.4 VANTAGGI DEL DIGITAL TWIN.....	19
3.5 USO DEI GEMELLI DIGITALI.....	20
3.6 TIPI DI DIGITALTWIN .....	22
3.7 ALCUNE APPLICAZIONI PER I GEMELLI DIGITALI.....	23
3.8 APPLICAZIONE DEL DIGITAL TWIN NELL'INDUSTRIA FARMACEUTICA .....	25
3.9 DIGITAL TWIN E MATLAB .....	25
3.10 GEMELLI DIGITALI E AI.....	26
<b>4. DIGITAL TWIN PER LA SOSTENIBILITÀ AMBIENTALE – CASO SIEMENS.....</b>	<b>27</b>
4.1 SVILUPPO DI UN GEMELLO DIGITALE CON PROTIUM.....	29

4.2 SVILUPPO DI UN GEMELLO DIGITALE CON EVERFUEL.....	30
5. <i>DIFFERENZE TRA VIRTUAL COMMISSIONING E DIGITAL TWIN</i> .....	30
6. <i>COESIONE TRA VIRTUAL COMMISSIONING E DIGITAL TWIN</i> .....	31
6.1 COS'È UN GEMELLO DIGITALE PER IL CARICO VIRTUALE? .....	31
6.2 RUOLO DI UNA LIBRERIA DI COMPONENTI NEL VIRTUAL COMMISSIONING .....	32
6.3 FMI E CORRELAZIONE CON LA MISSIONE VIRTUALE .....	34
6.4 ANALISI DELLE SIMULAZIONI 1D E 3D .....	36
7. <i>CONCLUSIONE</i> .....	38
8. <i>RIFERIMENTI</i> .....	39
9. <i>INDICE DELLE FIGURE</i> .....	40

## INTRODUZIONE

La presente tesi ha come obiettivo analizzare nel dettaglio il Virtual Commissioning e il Digital Twin. Questi termini sovente possono essere confusi. Non è sempre possibile distinguere nettamente queste due tecnologie in quanto le stesse lavorano congiuntamente nell'ambiente industriale.

Ulteriormente, si andrà ad analizzare punti di forza e di debolezza di queste applicazioni e come queste contribuiscono al miglioramento aziendale e rendano la produzione più efficiente.

In particolare, il primo capitolo della tesi vuole definire la messa in servizio digitale, approfondendo nel dettaglio questa pratica e illustrando anche passo per passo come poterla implementare.

Nel capitolo successivo viene studiata un'applicazione importante che il VC ha assieme alla realtà virtuale. La sezione seguente si concentra sul Digital Twin e sul suo uso, e su alcune applicazioni che si possono avere con questa tecnologia. Il quarto capitolo vuole affrontare una tematica importante, quello della sostenibilità ambientale legata all'uso del gemello digitale. In ultimo, le ultime due sezioni di questa tesi si concentrano sull'analisi della differenza tra Virtual Commissioning e digital twin e del loro utilizzo congiunto.

## 1. IL VIRTUAL COMMISSIONING

Il Virtual Commissioning è una tecnologia di simulazione, pensata più di vent'anni fa, di tipo "virtuale" per "commissionare" quello che è il software di controllo. Esso viene progettato, installato o testato con un modello della macchina virtuale prima di essere collegato al sistema reale. "L'obiettivo di questa tecnica è quello di assistere lo sviluppo automatico"<sup>3</sup>.

"Il Virtual Commissioning permette di simulare il comportamento fisico di macchine e impianti industriali, utilizzando modelli digitali tridimensionali. Con opportuni strumenti di Realtà Virtuale, i tecnici possono immergersi nella simulazione, familiarizzando con le macchine di futura installazione, abilitando la verifica del layout della linea e raccogliendo informazioni importanti per le future operazioni"<sup>9</sup>.

La messa in servizio virtuale è considerata una delle parti più importanti del processo nonostante rappresenti soltanto il 25% del tempo di sviluppo. Spesso questa pratica però viene implementata piuttosto tardi nello sviluppo del software; secondo Reinhart e Wünsch errori nel software di controllo rappresentano fino al 70% dei ritardi"<sup>2</sup>.

"Pertanto, l'obiettivo dell'utilizzo della messa in servizio virtuale è quello di consentire la convalida precoce del codice macchina"<sup>1</sup>. Questo permette di ridurre sensibilmente il rischio di consegnare un programma contenente inesattezze. Uno degli aspetti più dispendiosi in termini di tempo è l'implementazione del software. Il Virtual Commissioning fornirebbe, di conseguenza, un software

di qualità superiore e ridurrebbe il tempo di messa in servizio complessivo.

“Fin dalla sua nascita, l'intenzione di mettere in servizio in un ambiente virtuale è stata quella di aiutare a risolvere i problemi che sorgono quando i sistemi di produzione vengono riuniti per l'integrazione e il funzionamento con un PLC”<sup>1</sup>. Da diverso tempo l'industria dell'automazione ha identificato i possibili benefici che porterebbe l'utilizzo di modelli virtuali per simulare le prestazioni dei sistemi fisici. Per essere di successo, tuttavia, la modellazione dell'impianto virtuale deve essere una riproduzione meticolosa del sistema in questione. Nell'industria aerospaziale e automobilistica i modelli di VC erano già da tempo conosciuti mentre la loro implementazione era carente nell'automazione. Per ottenere la messa a punto, le aziende avevano però bisogno di modelli di impianti che si integrassero con i loro metodi di progettazione PLC.

### 1.1.1 SVILUPPO DEL VIRTUAL COMMISSIONING

La messa in servizio virtuale è stata immaginata per la prima volta quasi 20 anni fa come una tecnica promettente per assistere lo sviluppo automatico (Auinger et al. 1999). Tuttavia, le funzionalità hardware non hanno eseguito test PLC a un costo accettabile, in particolare con i requisiti di simulazione in tempo reale quando si utilizzano PLC hardware. Nel 2006 si è dimostrato che la messa in servizio virtuale poteva far risparmiare fino al 75% del tempo necessario per la messa in servizio. La tecnologia offre tecniche pratiche che sono più accessibili che mai all'industria dell'automazione. Come parte di una crescente necessità di accelerare lo sviluppo e ridurre al minimo il rischio nello sviluppo di prodotti nuovi e innovativi, i gemelli digitali e le tecniche di messa in servizio virtuale stanno rapidamente diventando tecnologie essenziali.

### 1.1.2 VIRTUAL COMMISSIONING E MESSA IN SERVIZIO REALE

La principale e più importante differenza tra la messa in servizio reale e la messa in servizio virtuale consiste nell'effettuare i test nel primo caso su sistema di produzione di tipo reale, cioè una macchina, un controller come un PLC (programmable logic controller) assieme a sensori ed attuatori. Invece, nel secondo caso vengono usate delle repliche virtuali del sistema reale.

La messa in servizio virtuale è composta da tre “pezzi” principali: il digital twin (cioè un modello/gemello digitale), il codice del controller (ciò che governa il movimento e risponde ai feedback dei sensori) e un ambiente di sviluppo.

Questo tipo di tecnologia si è diffusa anche nel settore dell'automazione dopo lo sviluppo di pratiche di progettazione non soltanto rivolte ad ambienti di nicchia. Nell'automazione il virtual commissioning può essere usato anche come uno strumento che consente di ridurre i costi di messa in servizio e per creare un time-to-market più affidabile.

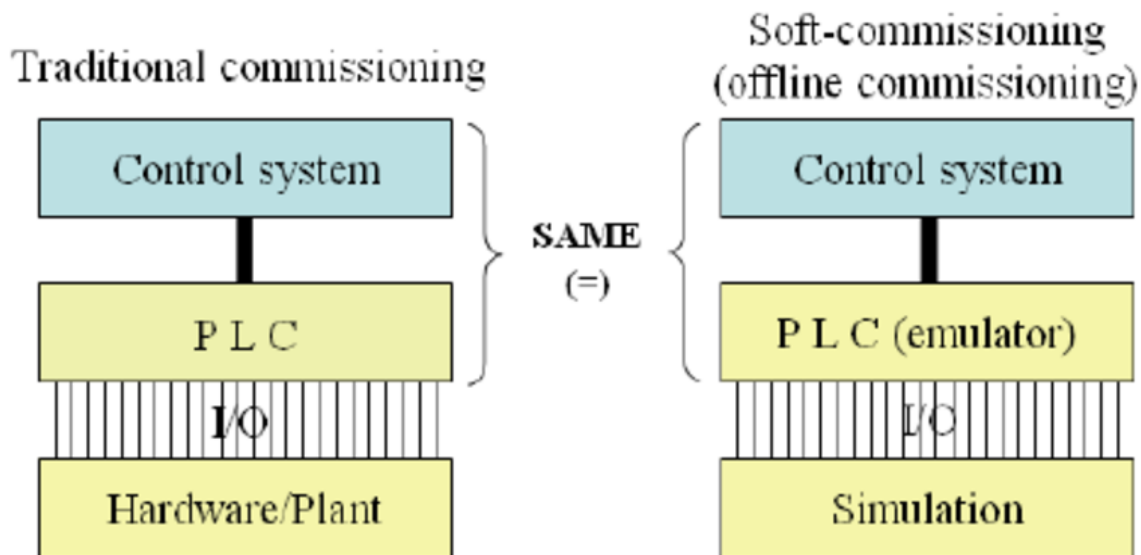


Figura 1. Differenza tra messa in servizio fisica e digitale

## 1.2 COMPRENDERE LA MESSA IN SERVIZIO VIRTUALE

L'obiettivo della messa in servizio virtuale (VC) è quello di ridurre i problemi dovuti all'integrazione, spesso capita di avere delle problematiche quando i sistemi di produzione vengono riuniti per l'integrazione e il funzionamento con il PLC.

Soprattutto nell'industria dell'automazione l'ausilio del virtual commissioning consente di poter individuare e correggere in anticipo i potenziali problemi di integrazione fisica che risultano piuttosto costosi.

Avere un buon VC significa aver creato un modello virtuale che rappresenta accuratamente il sistema reale; questo avveniva già da tempo per modelli di tipo automobilistico e aerospaziale ma mancava nell'automazione. Infatti, in questo ambiente si è iniziato a parlare di VC soltanto da pochi anni. Per ottenere la messa a punto, le aziende avevano bisogno di modelli di impianti che potessero essere integrati con i loro metodi di progettazione PLC – ciò non era disponibile dai primi standard di modellazione degli stessi.

“Nel 1999, i ricercatori stavano lavorando duramente cercando di definire e proporre strategie VC che potessero realizzare questi benefici”<sup>4</sup>.

Auinger ha descritto una tecnica detta “soft-commissioning” che promette di unire gli strumenti della simulazione con il programmable logic controller andando ad effettuare il debug di quella che sarebbe l’“uscita” del sistema fisico. Da qui in poi lo sviluppo del virtual commissioning è stato suddiviso in quattro categorie.

### 1.2.1 QUATTRO CATEGORIE DI SVILUPPO DEL CONTROLLO

Le quattro tipologie di sviluppo del controllo sono state introdotte per fare una distinzione tra il vero e proprio sistema di sviluppo virtuale e quelle che usano un sistema “misto”.

- La messa in servizio tradizionale comporta il test del sistema fisico (impianto) rispetto ai controller hardware senza l'assistenza di tecniche di modellazione virtuale.
- Soft Commissioning (o test Hardware-in-the-Loop (HIL)), impiega un modello di impianto virtuale che viene utilizzato per testare i controller hardware.
- Reality-in-the-Loop testa i controller hardware simulati contro un sistema fisico costruito.
- “La messa in servizio virtuale è il processo di test che utilizza sia un modello di impianto virtuale che un sistema di controllo virtuale per la simulazione”.<sup>6</sup>

Ognuna di queste quattro categorie ha bisogno di tecnologie differenti. Fino al 2010 gli ingegneri stavano ancora sviluppando metodi più efficaci per facilitare un approccio user friendly al processo del VC. Alcune delle difficoltà che si sono riscontrate sono state la creazione dei modelli degli impianti e la possibilità di far lavorare i diversi modelli insieme.

### 1.2.2 IL VIRTUAL COMMISSIONING DAL 2010

Oggi si è visto un notevole sviluppo delle tecnologie del virtual commissioning che rendono possibile l'uso di questo strumento nella maggioranza delle industrie dell'automazione. “È stato dimostrato che questa tecnologia possa ridurre fino al 75% del tempo richiesto per la messa in servizio tradizionale”<sup>4</sup>.

Negli ultimi anni si è anche notato un ampio utilizzo del VC da parte di aziende medio-piccole nonostante l'elevato costo che questa tecnologia può comportare per industrie di queste dimensioni.

## 1.3 INIZIO DI UNA MESSA IN SERVIZIO DIGITALE

La messa in servizio digitale aggiunge valore alle organizzazioni. Impiega un approccio di simulazione per testare i sistemi di produzione nel mondo virtuale, prima che le aziende commissionino fisicamente i sistemi. “Gli ingegneri sono liberi di esplorare e ottimizzare nuove idee nel regno virtuale. Identificano potenziali problemi all'inizio del processo di messa in servizio, eliminando costosi errori in fase avanzata”<sup>5</sup>. Consentendo alle aziende di risparmiare in termini sia di costo che di tempo potendo focalizzarsi maggiormente sull'innovazione dell'azienda.

I vantaggi che il VC porta in un'azienda sono innumerevoli. Molte volte il problema però sorge nel momento dell'implementazione, che risulta il passaggio più complesso. Imparare ad utilizzare il VC non è semplice, non si pensa in modo corretto se ci si aspetta che basti scaricare il software ed usarlo senza problemi. Per poter utilizzare questa tipologia di tecnologia c'è bisogno di pazienza.

### 1.3.1 SIMULAZIONI DIGITALI

Erroneamente si potrebbe credere che un progetto di messa in servizio virtuale inizi con l'integrazione di ogni componente hardware con la simulazione. Si potrebbe pensare di adottare questo metodo, ma risulta spropositatamente complesso.

Il primo step per la messa in servizio virtuale inizia nel dominio digitale con la stesura del codice per modellare il sistema di produzione, iniziando con una singola cella.

Usando questo approccio si riduce la complessità del virtual commissioning e si riesce a intendere meglio la linea di produzione digitale, cella per cella. Non appena verranno sviluppati tutti i modelli si potrà pensare di testare il sistema con un elaboratore fisico emulato. L'hardware garantisce che il modello si comporti come ci si aspettava e inoltre possono essere risolte complicazioni man mano che queste compaiono durante i test. Questo tipo di approccio aiuta alle aziende a comprendere cosa serve per realizzare un tipo di modellazione che può predire i comportamenti fisici. È un importante vantaggio in quanto la modellazione consente agli ingegneri di verificare che il codice sia pulito e che lo stesso abbia una logica, allo stesso tempo si deve anche verificare che abbia il comportamento desiderato.

### 1.3.2 INTEGRAZIONE SIMULAZIONE-CONTROLLER FISICI

Il passo successivo è quello dell'introduzione dell'ambiente di produzione, ossia il mondo fisico, si integrano le simulazioni del sistema di produzione con i controllori fisici. Le aziende possono procedere cellula per cellula potendo acquisire una comprensione graduale dei processi e delle procedure necessarie per andare avanti. Per poter implementare questo tipo di approccio, gli ingegneri compilano il codice dal modello e lo posizionano sul controller fisico. Dopodiché il modello viene collegato a una simulazione. Anziché essere eseguito su un computer, quindi digitalmente, verrà collegato sull'hardware del controller. Viene adottato questo approccio per “verificare che il codice funzioni come previsto con l'hardware del controller”<sup>5</sup>.

Nel passaggio descritto precedentemente spesso sorgono delle problematiche inattese, nonostante si sia già testato più volte il modello. Queste complicanze forniscono dati preziosi. Grazie al Virtual Commissioning adesso gli ingegneri possono risolvere questi errori in una fase antecedente, rispetto alla messa in servizio fisica. Gli addetti decidono anche di simulare il “comportamento meccanico dei sistemi di produzione, ottenendo così completa tranquillità prima di passare al passo successivo”<sup>5</sup>.

### 1.3.3 SIMULAZIONE COESA

Un ulteriore passaggio che si compie è la connessione dei controller hardware alle simulazioni delle celle. Vengono collegate tutte insieme in “un'unica simulazione coesa che copre tutte le singole

simulazioni”<sup>5</sup>. Si è sempre più vicini a un’unica rappresentazione del sistema di produzione, creando un ambiente dove tutti i controller hardware sono connessi alle loro simulazioni, ma allo stesso tempo sono collegati tra di loro in una simulazione più ampia del sistema produttivo. Quindi, tutto ciò che si verifica nella prima cella scende lungo la linea di produzione e colpisce la seconda cella, e così via. Nel passaggio precedente le aziende verificavano il comportamento di una singola cella di produzione. In questo, “confermano il comportamento a livello di sistema di un sistema di produzione a più celle. In tal modo, creano con successo un ambiente virtuale connesso, in cui possono commissionare apparecchiature senza inutili tempi di inattività o le spese di acquisto e integrazione di un’entità fisica in una linea di produzione”<sup>5</sup>. Le linee di produzione vengono simulate nel mondo virtuale per poter verificare il loro comportamento in maniera progressiva e naturale. Ciò limita i costi e le interruzioni; inoltre, vi sono minori possibilità di riscontrare problemi durante la messa in servizio fisica. La simulazione coesa massimizza i vantaggi a valore aggiunto della messa in servizio virtuale.

#### Machine design process lifecycle

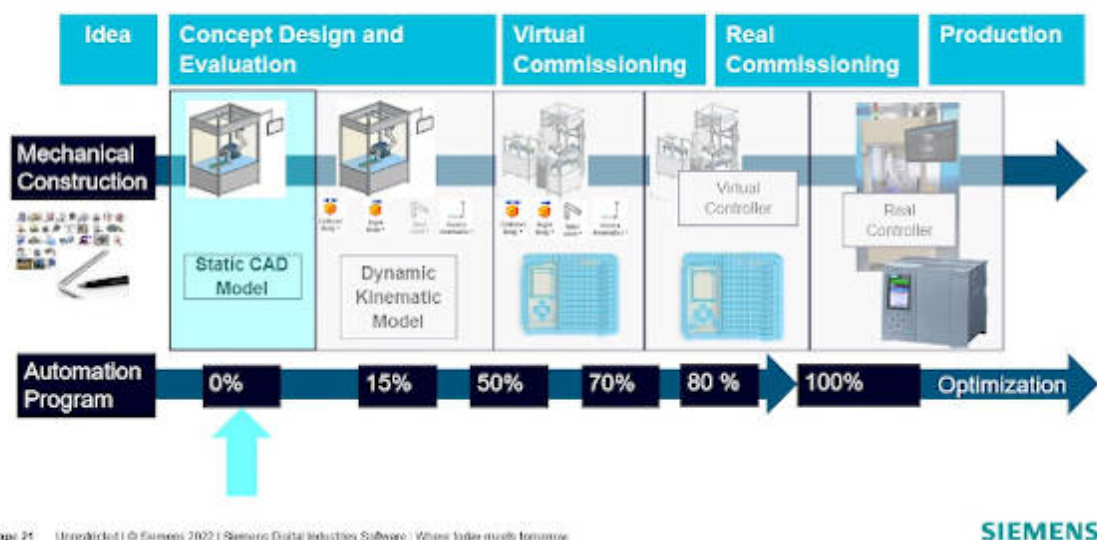


Figura 2. Rappresentazione grafica di come si giunge al Virtual Commissioning

## 1.4 SCELTA DI UNA SOLUZIONE DI MESSA IN SERVIZIO VIRTUALE

Vi sono diverse tecnologie di messa in servizio virtuale che si possono adottare in base a quelle che sono le richieste del sistema produttivo e gli obiettivi che si hanno. Di seguito verranno proposti due esempi a livello di macchina e a livello di processo.

### 1.4.1 DINAMICHE A LIVELLO DI MACCHINA

Nel momento in cui parte la progettazione di un nuovo macchinario sorgeranno diverse domande su

come le diverse specifiche reagiranno ai controller che si progettano e si implementano. Sicuramente si avrà un'idea generale delle dinamiche coinvolte.

Per garantire sia la sicurezza degli operatori che delle macchine che vengono impiegate in un sistema di produzione c'è il bisogno di prevenire situazioni in cui si potrebbero provocare danni.

Dunque, in casi come quello descritto precedentemente è necessario creare una messa in servizio virtuale per migliorare il modo in cui si eseguono i test di sicurezza. Ciò significa che si vogliono risolvere le dinamiche a livello di macchina. Si devono comprendere appieno come interagiscono i diversi sistemi, che siano elettrici o anche idraulici, per poter ottenere un modello di emulazione che ci consentirà di visualizzare come il codice di controllo impatta sul moto dell'apparecchiatura.

Per garantire la sicurezza dei macchinari, in questi casi il VC fornisce una piattaforma in cui possono essere eseguiti diversi test, che risultano molto accurati, basati su dei modelli per vedere come le diverse condizioni operative vanno ad impattare sulle prestazioni delle macchine stesse.

Questo tipo di messa servizio virtuale è basata su dei modelli anch'essi virtuali quindi nel momento in cui può avvenire un guasto non ci si deve preoccupare delle conseguenze poiché il malfunzionamento è solo ipotetico. Da questi errori si impara e si apportano le dovute migliorie.

In queste condizioni si può spingere la macchina virtuale ad operare in condizioni limite, ad esempio velocità elevate o carichi pesanti, oppure in condizioni ambientali ostiche (ad esempio simulare l'accumulo di polvere aumentando l'attrito dei giunti) per verificare cosa possa accadere ed evitare queste situazioni nel mondo reale. Quando si commissionerà la macchina fisica si avrà già a disposizione un design che sarà più massiccio e resistente ai guasti.

Con questa modellazione si possono verificare anche dei casi in cui l'operatore può trovarsi in situazioni critiche che ledono la sua sicurezza. Ciò consente di verificare che il macchinario non abbia movimenti inaspettati o guasti che potrebbero percuotere un operatore. La simulazione permette di riscontrare i parametri operativi della macchina, si testano diversi scenari in una frazione di tempo e successivamente se ne sceglie uno da implementare realmente lo scenario scelto è quello che riduce drasticamente situazioni critiche per gli addetti.

In questo caso serviranno delle strumentazioni di cui si parlerà successivamente nella dissertazione, il gemello digitale e visualizzazioni 3D e 2D.

#### 1.4.2 DETTAGLI A LIVELLO DI PROCESSO

Se in un sistema di produzione l'obiettivo è quello di visualizzare oppure ottimizzare il layout dell'impianto per visualizzare come potenzialmente il prodotto possa scorrere attraverso l'intera linea di produzione allora in questo caso si deve sviluppare, per la messa in servizio virtuale, un dettaglio a livello di processo.

In casi come questo servono più tecnologie a livello di processi. "Questi strumenti forniscono il giusto

strumento di visualizzazione, simulazione e controllo per i layout degli impianti”<sup>6</sup>.

Il digital twin che ne verrà fuori riguarderà anche la cinematica delle diverse macchine, acconsentendo di rendere visibile come tutto si disloca e opera simultaneamente.

Quando si progetta un impianto con l’aiuto di un gemello digitale si va a progettare in 3D il layout dell’impianto per visualizzare al meglio la produzione e poter esplorare le varie scelte possibili scegliendo la più adatta al proprio impianto produttivo. Grazie a questa tipologia di applicazione si possono esplorare varie opzioni per il layout e ottenere in tempi brevi un feedback visivo sul risultato. Molte di queste strumentazioni consentono di visualizzare il layout dell’impianto impiegando la virtual reality, permettendo un livello di immersione innovativo. Si potranno valutare più facilmente le strategie prima di proseguire con qualsiasi piano più specifico.

Se si sceglie di impiegare questo tipo di messa in servizio virtuale a livello di processo, normalmente si fornisce il CAD sviluppato al software ottenendo una libreria di macchine che può essere configurata e spostata in altri ambienti di lavorazione. Incorporando anche il codice di controllo dell’impianto si possono ottenere visualizzazioni realistiche del flusso del prodotto.

## **1.5 VANTAGGI DEL VIRTUAL COMMISSIONING**

“Utilizzando prototipi virtuali, i produttori possono testare il software di controllo in parallelo con altre fasi di ingegneria”<sup>2</sup>. Questo consente di ridurre la possibilità di avere errori nel processo.

Inoltre, grazie a questo ambiente virtuale possono essere eseguiti più test senza dover “mettere mano” e modificare il sistema/processo vero e proprio. Ne deriva direttamente il minor rischio di danneggiare i macchinari se l’ambiente del test fosse stato reale.

Poter effettuare più e più test per poter raggiungere la quasi perfezione mi permette di avere una migliore qualità del software.

Altro aspetto importante da considerare è quello relativo ai lavoratori, un ambiente di sviluppo virtuale consente di realizzare un ambiente reale con maggiore sicurezza per gli stessi.

“Il Virtual Commissioning promette di ridurre i ritardi e i rischi significativi associati all’integrazione e alla messa in servizio del sistema”<sup>7</sup>.

## **1.6 MODELLI ROI PER IL VIRTUAL COMMISSIONING**

La messa in servizio virtuale promette al cliente e all’azienda che ne usufruisce molto valore. Gli investimenti che però bisogna fare per adottare questo tipo di sistema non sono pochi. La messa in servizio virtuale consente agli ingegneri che se ne occupano di evitare lunghe notti di messa in servizio fisica dovuta all’installazione. Questo tipo di tecnologia permette, quindi, un notevole risparmio in termini di tempo. Tuttavia, questa non è la motivazione su cui il team degli sviluppatori

può contare per far approvare l'uso del virtual commissioning in azienda. La tecnica in questione sappiamo richiedere un enorme investimento finanziario che non tutte le industrie possono permettersi. Il direttore finanziario di un'azienda può decidere di approvare quest'investimento allorché egli sia sicuro che lo stesso produca valore per la propria industria; poiché vi è una differenza netta tra valore e ritorno sull'investimento.

### 1.6.1 SOFT AND HARD RETURNS

Per esaminare meglio il valore della messa in servizio virtuale, è importante esplorare le implicazioni delle cosiddette hard and soft skills.

I primi offrono una redditività quantificabile e superiore rispetto a quelli morbidi.

Le aziende ottengono questa tipologia di redditività, più spesso, dall'evitamento dei costi. Ridurre gli scarti, evitare le rilavorazioni dovute alle non conformità delle specifiche, limitare le modifiche degli ordini per via di una pianificazione impropria, prevenire gli ordini persi a causa di problemi di qualità o contrattamenti di pianificazione e persino evitare sanzioni per non conformità, sono tutti esempi di hard ROI.

I "rendimenti morbidi", al contrario, fanno riferimento alla produttività e all'efficienza dei lavoratori. I lavoratori, però, sono anche un costo fisso per le aziende. Pertanto, le aziende non possono monetizzare gli aumenti della produttività o dell'efficienza di quei lavoratori.

È per questo motivo che se i dirigenti non riescono a trovare un modo per monetizzare la produttività o l'efficienza, saranno meno propensi ad approvare miglioramenti che si traducono solo in soft ROI. Le aziende possono anche quantificare le loro hard skills in base all'aumento delle entrate. Tuttavia, è inverosimilmente difficile convincere un dirigente delle vendite ad aumentare il proprio obiettivo di vendita. Indipendentemente da quanto possa essere realistico il caso, questo tipo di approccio non viene mai analizzato.

### 1.6.2. I TRE MODELLI ROI

Sono stati individuati dei modelli ROI che grazie alla messa in servizio virtuale possono creare valore per un'impresa.

In generale tre sono i principali modelli ROI individuati:

1. Riduzione dei tempi di produzione;
2. Riduzione dei costi;
3. Produzione innovativa.

Gli impianti di produzione richiedono, di tanto in tanto, di essere sostituiti o aggiornati. Normalmente in queste situazioni la catena produttiva si ferma e l'impianto viene chiuso. Bisogna eseguire il debug dei componenti all'interno delle celle di produzione. Quest'operazione è però costosa in quanto

comporta una perdita monetaria per ogni ora in cui gli impianti non vengono usati dato che non vi è produzione. Utilizzare la messa in servizio virtuale consente di agire anzitempo evitando, di conseguenza, sia il debug fisico che il fermo dell'impianto stesso; facendo ciò si ridurrebbero i costi annessi ad essi. Il virtual commissioning simula la linea di produzione effettiva, esso è composto sia da un hardware meccanico che da uno azionato e da controllori logici programmabili, ossia un PLC, che lavorano congiuntamente come se fosse un sistema. Ciò che accade quando il sistema reale sbaglia, produce spesso grandi problematiche poiché risolvere i problemi del sistema può essere molto oneroso. La maggior parte delle volte le complicazioni più frequenti si hanno con il PLC.

Altro vantaggio del virtual commissioning è l'esecuzione tempestiva del debug sulla linea, evitando guasti su di essa. Quindi in questo caso il VC permette di aumentare la produzione, evitando fermi sulla linea e in definitiva migliorare la redditività.

Gli aggiornamenti fisici all'impianto produttivo possono arrecare danni allo stesso e risultare pertanto esosi. In quanto, mentre l'impianto è chiuso, gli addetti dovranno eseguire il debug dei componenti fisicamente all'interno del sistema di produzione. Bensì, se un'azienda effettuasse il controllo del sistema produttivo in modalità digitale potrebbe evitare di effettuare il debug fisico. Grazie al virtual commissioning si può dimostrare che vi è una riduzione dei costi in parte dovuta anche al mancato fermo degli impianti. Gli addetti alla di produzione possono esplorare i cambiamenti al sistema di produzione, quindi migliorare il processo ed eseguire simulazioni per verificare la modifica o l'implementazione. Tutto questo permette alle società di esplorare miglioramenti più frequenti ai loro sistemi di produzione.

Di conseguenza, l'adozione di questa tecnologia potrebbe migliorare il throughput di tutto il sistema produttivo, aumentando il volume di produzione e consentendo di evadere gli ordini più velocemente. Ciò permetterebbe anche di ridurre i costi ricorrenti (dovuti al fermo dell'impianto) e aumentare gli utili.

In ultimo, “la messa in servizio virtuale consente agli addetti alla produzione di testare virtualmente diversi scenari e opzioni durante la programmazione della catena produttiva. Ciò fornisce maggiori informazioni sul comportamento di produzione. Una maggiore comprensione del comportamento del sistema di produzione porta a decisioni più ponderate”<sup>8</sup>.

Quando le aziende comprendono il comportamento di produzione e possono adottare decisioni più misurate, ottenengono più opzioni di produzione. Ciò aumenta le probabilità di scoprire nuovi criteri per ridurre i costi e aumentare la “fabbricazione”, traducendosi in una maggiore efficienza della produzione, che monetizza l'uso della messa in servizio virtuale.

Ricapitolando la messa in servizio virtuale aggiunge valore riducendo il tempo alla produzione completa, riduce i costi grazie agli aggiornamenti e consente alle aziende di prendere decisioni di

produzione più innovative.

## 2. VIRTUAL COMMISSIONING E VIRTUAL REALITY

Tra le diverse tecnologie che il virtual commissioning implementa vi è anche la Realtà Virtuale (RV). “La RV comprende vari strumenti di rappresentazione virtuale che nel campo manifatturiero supportano gli ambienti CAD (Computer-Aided Design), CAE (Computer Aided Engineering) e CAM (Computer Aided Manufacturing) durante la fase di concept e progettazione, rilevando eventuali problematiche su aspetti di natura sia produttiva che ergonomica e incentivando la comunicazione tra progettisti e sviluppatori di team e reparti differenti”<sup>9</sup>.

In quest’era, quella della digitalizzazione, la tecnologia del virtual reality permette di sviluppare ambienti virtuali in grado di replicare perfettamente la realtà che ci circonda, secondo tutti i punti di vista. Nel campo della manifattura si può utilizzare la RV nelle tre aree principali: progettazione, formazione e manutenzione. Le applicazioni che vengono sviluppate come supporto alla progettazione svolgono una parte di fondamentale importanza nel “product life cycle management”. “Partendo dalla fase di concept del progetto, gli strumenti di RV - mediante utilizzo di appositi visori e controller che permettono l’immersione e l’interazione negli ambienti virtuali - supportano le decisioni progettuali, fornendo contributi immersivi rispetto alla tradizionale visualizzazione dell’impianto con modelli CAD bidimensionali sui classici monitor”<sup>9</sup>. Per poter soddisfare lo scopo cui è preposto, l’RV deve essere integrato in tutti i passaggi della progettazione. In particolare, bisogna seguire degli step imprescindibili: “importare modelli CAD in motori grafici, creare scene tridimensionali che ricostruiscano fedelmente l’ambiente di produzione e assegnare opportuni parametri ai componenti con i quali si vuole interagire tramite i dispositivi di RV”<sup>9</sup>. Queste fasi permettono di poter organizzare delle sessioni di Virtual Review, ossia revisione virtuale, sfruttando ambienti di simulazione nei quali possono essere analizzati i modelli virtuali dei macchinari come se si trattasse dei modelli reali. In alternativa ai motori grafici vi sono i software di visualizzazione virtuale che permettono, grazie all’ausilio di software di modellazione 3D, di osservare l’ambiente virtuale indossando dei dispositivi di RV.



*Figura 3. Esempio di utilizzo degli strumenti di RV in ambito industriale*

Si può dimostrare che grazie all'utilizzo di questa tecnologia si riesce ad "incrementare del 70% l'efficacia dell'apprendimento rispetto ad una media del 25%"<sup>10</sup>. Molte aziende decidono di adottare il cosiddetto VR Training. Questa tipologia di tecnologia, al contrario di quella tradizionale, ossia quella cartacea, permette al lavoratore di diventare un elemento attivo in grado di "relazionarsi con nozioni e informazioni di varia natura in maniera del tutto nuova ed è proprio in virtù di ciò che l'apprendimento riesce a consolidarsi con maggiore efficacia"<sup>10</sup>.

L'apprendimento viene svolto con delle modalità più intuitive consentendo anche una certa arbitrarietà personale, dal momento che l'utilizzatore può decidere in perfetta autonomia quando sentirà di aver raggiunto un livello tale da permettergli di fare a meno della tecnologia. Altro aspetto da non tralasciare è il controllo qualità del prodotto. Come ben si sa prima di poter mettere in commercio un prodotto deve essere effettuato un accurato controllo sulla qualità del prodotto per poter individuare anche il più piccolo difetto. Purtroppo, non sempre l'occhio umano riesce ad individuare correttamente tutte le irregolarità che possono presentarsi in un prodotto. Grazie a dei caschi muniti di sensori VR e guanti con sensazione tattile l'operatore riceve un'immagine 3D del prodotto che potrà esaminare in modo più dettagliato. Permettendo di poter "identificare con accuratezza gli eventuali difetti strutturali presenti che sarebbero andati inevitabilmente a nuocere sul funzionamento effettivo. Inoltre, c'è anche la possibilità di apportare schemi, appunti o segnalare in tempo reale delle modifiche che andranno poi apportate all'oggetto vero e proprio"<sup>10</sup>. Ogni piccolo accorgimento in più che viene adottato dalle aziende permette di aumentare sempre di più la produttività.



Figura 4. Esempio dell'utilizzo dei caschi con sensori VR

## 2.1 CASO APPLICATIVO TRA VC E VR

“L’applicazione delle tecniche di virtualizzazione ha trovato terreno fertile soprattutto nell’ambito automobilistico, dove le case costruttrici, per rispondere alle continue sfide del mercato, puntano sulla digitalizzazione delle fabbriche per ottenere la flessibilità necessaria a gestire l’attuale complessità e varietà di componenti e processi di produzione”<sup>9</sup>. Il caso di studio è stato svolto sulla azienda Masmec. Questa industria ha sviluppato una procedura di progettazione che si basa sulla realtà virtuale per una sua linea di produzione di assali elettrici (sistemi di propulsione modulari per trasmissioni elettrificate).

Tutta la fase di progettazione del CAD è stata sviluppata grazie alla realtà virtuale. Nel processo aziendale sono state integrate quattro fasi ovvero: esportazione dei file CAD relativi ai modelli dal software CAD, importazione dei modelli nell’ambiente virtuale, creazione della scena, organizzazione di sessioni di revisione virtuale del progetto.

Come prima cosa è stato svolto il backup del modello e allo stesso tempo è stato creato un ambiente virtuale che rappresenta l’ambiente di produzione reale. Dopodiché è stato importato il modello CAD, dove era già stata fatta una prima ottimizzazione del modello. Per rendere l’ambiente virtuale più affine a quello reale sono stati anche definiti i parametri come colore, texture, materiali e ombre. E alcune componenti sono state anche definite in modo tale da poter permettere all’utente di poter interagire con esse. “Sono state organizzate delle revisioni di progetto virtuali in maniera cadenzata in una stanza dedicata, utilizzando come visore di RV un Oculus”<sup>9</sup>.

La revisione virtuale del progetto ha permesso anche di analizzare nel dettaglio i modelli CAD della macchina della linea di produzione. Uno dei vantaggi riscontrati è la facilità con cui sono stati individuati gli ingombri e anche l’ergonomia delle postazioni. Relativamente a questo punto “è stato possibile integrare un manichino CAD con la relativa zona aurea (l’area più vicina al manichino posta

tra spalle e ginocchia dello stesso), che permette di distinguere le aree di lavoro dalle aree di picking che prevedono una flessione delle braccia e una rotazione del busto”<sup>9</sup>.

### 3. IL DIGITAL TWIN

#### 3.1 DEFINIZIONE DEL GEMELLO DIGITALE

“Un digital twin, ossia un gemello digitale, è una copia virtuale, un modello, di un reale asset fisico in funzione”<sup>11</sup>.

In altri termini viene anche definito come una replica che incorpora le risorse, i processi, i sottoinsiemi e l’ambiente, sfruttandoli per realizzare una rappresentazione realistica e digitale. Un’azienda sfrutta questa tecnologia per imitare e analizzare il comportamento di un sistema di produzione prima che venga inserito nel mondo reale.

Un digital twin riflette la condizione attuale dell’asset fisico in funzione includendo i dati storici e può prevedere il comportamento futuro, perfezionarne il controllo e ottimizzarne il funzionamento. Le opportunità offerte dal digital twin sono tantissime, tra i vantaggi principali vi è il risparmio di tempo e di denaro per i produttori. Infatti, con questa tecnologia si riescono a ottimizzare i sistemi e i prodotti della produzione prima di mettere in servizio la macchina reale.

#### 3.2 COSTRUZIONE DI UN GEMELLO DIGITALE

La maggioranza delle aziende che impiegano nel proprio impianto produttivo il virtual commissioning dovranno sicuramente poi creare un gemello digitale. I gemelli digitali assumono una conformazione differente in base all’applicazione che avranno. Nell’applicazione che si andrà ad analizzare di seguito, per creazione di gemello digitale si intende creazione di un modello a livello di sistema, ciò significa un “modello che incorpora complessivamente la dinamica di più sottosistemi, spesso includendo più domini di ingegneria (meccanico, idraulico, elettrico e così via)”<sup>11</sup>.

In primo luogo, per creare un gemello digitale viene impiegato uno strumento di modellazione a livello di sistema. Il prototipo simulato viene creato a partire dalle informazioni CAD (computer aided-design) sviluppate precedentemente. Nel workflow, lo strumento di modellazione viene usato per dimostrare come funziona il processo partendo da un modello CAD. Lo strumento di modellazione di sistema consente di importare automaticamente i CAD permettendo al gemello digitale di lavorare con delle geometrie già sperimentate. In alternativa, quando il progetto è nella sua fase iniziale si possono usare delle componenti drag-and-drop ad hoc.

Prima di poter connettere il digital twin al software reale, viene fatta un’indagine con quello simulato

per eseguire diverse analisi di progettazione.

A questo punto, il gemello digitale potrebbe essere impiegato come ausilio a strumenti di automazione, al fine di fungere da piattaforma di test basata su modelli per il virtual commissioning.

### 3.2.1 FUNZIONAMENTO DEL DIGITAL TWIN

“Un modello di digital twin include i componenti, i comportamenti e le dinamiche necessari dell’asset IoT.”<sup>11</sup> Vi sono due metodi di modellazione principali, quelli basati sulla modellazione meccanica, detti metodi sulla fisica o sui principi primi, e i metodi basati sul deep learning, ossia basati sui dati. “Un digital twin può inoltre essere un insieme di vari comportamenti modellati e di metodi di modellazione, ed è probabile che venga rielaborato nel tempo con l’identificazione di nuovi utilizzi”<sup>11</sup>.

## 3.3 PIANIFICAZIONE E PROGETTAZIONE DEL DIGITAL TWIN

Un’azienda decide di impiegare il gemello digitale sia per usi relativi alla catena produttiva che per l’output produttivo. Questo poiché in una prima fase il digital twin definisce digitalmente e in maniera chiara ed evidente i comportamenti specifici e la logica con cui si vuole che il sistema lavori.

“Per i prodotti, questa definizione può includere modelli 3D, diagrammi, layout e altre caratteristiche della progettazione del prodotto finale. Per i sistemi di produzione, la definizione include i modelli, i layout, le simulazioni e altro ancora per celle, linee e intere piante. L'elemento chiave qui sia per i prodotti che per i sistemi di produzione è che le simulazioni predicono accuratamente il comportamento e il funzionamento di ciascuno.”<sup>12</sup>

L’ausilio del gemello digitale aiuta gli addetti a simulare i cicli di lavoro delle nuove apparecchiature e ottenere delle risposte pronte. In aggiunta, si riescono anche ad anticipare e, soprattutto, ad esaminare eventuali errori logici. Allo stesso modo si possono esaminare diverse scelte, trovando soluzioni a qualunque problema si presenti.

## 3.4 VANTAGGI DEL DIGITAL TWIN

Nell’era dell’industria 4.0 i gemelli digitali aiutano a riempire il gap tra mondo fisico e digitale. I gemelli digitali aiutano a colmare le differenze tra mondo fisico e digitale. I gemelli digitali si differenziano nello scopo ma tutti hanno in comune la connessione che hanno al prodotto e le modifiche alla progettazione. Le industrie impiegano sempre più questa tecnologia per ottimizzare la produzione in modi che prima erano considerati irrealistici. “Per molte aziende, generano valore in costi di manutenzione ridotti, time-to-market più rapidi e un miglioramento nella gestione del

prodotto. Man mano che la tecnologia migliora e dà origine a nuove innovazioni, le aziende possono integrare facilmente i gemelli digitali nel loro processo di produzione”<sup>13</sup>. Un primo vantaggio nell’uso del digital twin è lo sviluppo concettuale.

L’uso di un software di automazione può essere usato per testare l’hardware PLC rispetto al gemello digitale, per garantire le prestazioni desiderate. Allo stesso tempo si può anche verificare il codice prima che esso venga integrato sull’hardware, consentendo una sintonia in tutto il sistema. Altro beneficio nell’uso del digital twin è la raccolta dei dati. “La combinazione di tecnologia dei sensori e simulazione sta cambiando il modo in cui sviluppiamo e integriamo gli strumenti, dando origine a nuove innovazioni. I sensori raccolgono enormi quantità di dati, permettendo alla versione digitale di agire come l’oggetto fisico”<sup>13</sup>. Un’esecuzione in parallelo del digital twin e dei dispositivi reali possono fornire dati sul funzionamento delle macchine, oppure allorché necessiterà riparazioni o come potrebbe operare in maniera più proficua. Tali scenari offrono una diminuzione dei costi e un miglior servizio clienti. Ulteriore agevolazione è la manutenzione predittiva. Senza un gemello digitale diversi fattori sono difficili da poter prevedere. “Questo fattore è l’impatto del carico dinamico su cuscinetti, ingranaggi e motori, causato da cambiamenti nel ciclo di lavoro. Mettere un gemello digitale attraverso un ciclo di lavoro proposto può aiutare a determinare i carichi su questi componenti e l’impatto sulla durata del componente, riducendo i costi di manutenzione”<sup>13</sup>. Si può anche predire l’insorgenza di problemi man mano che la risposta della macchina si allontana dal modello virtuale, consentendo di programmare sia manutenzioni che riparazioni riducendo l’inattività delle macchine e i relativi costi. Al di fuori del reparto ingegneristico possiamo individuare un altro vantaggio ossia che i gemelli digitali sono un importante strumento di vendita, in quanto, “danno informazioni accurate ai clienti e permettono di qualificare le specifiche dei clienti”<sup>13</sup>.

Per poter essere competitivi nel mercato attuale è indispensabile avvalersi della tecnologia del digital twin.

### **3.5 USO DEI GEMELLI DIGITALI**

I gemelli digitali vengono applicati sia ai prodotti che ai sistemi di produzione in vari punti del loro ciclo di vita di sviluppo.

L’ausilio del gemello digitale in un sistema produttivo consiste nell’inserire un codice nell’interfaccia uomo-macchina e sui PLC (programmable logic controller) e collegare il tutto a un hardware simulando una cella o alternativamente tutto l’impianto.

Se si desidera sviluppare un prodotto tramite l’ausilio del gemello digitale si devono usare dei sensori. Questi sensori forniranno dei risultati che verranno dati in input ad una simulazione, il gemello

digitale. La riproduzione digitale fornisce informazioni preziose agli ingegneri in fase di progettazione, in quanto essi possono decidere di “testare su una gamma più ampia di variabili e di interazioni di progettazione di quanto i soli test fisici fanno”<sup>14</sup>.

Insieme con il virtual commissioning si può eseguire il debug della logica della programmazione hardware testando e verificando i prodotti e i sistemi di produzione ancor prima che questi vengano installati.

Il digital twin continua ad essere utile anche una volta che un prodotto/sistema di produzione è in funzionamento. In questo caso si ricorre ancora all'utilizzo dei sensori. Quando il prodotto fisico è in funzionamento è possibile alimentare le letture dei sensori dal prodotto ad una piattaforma in cloud. Questi dati nella piattaforma cloud (Internet of Things o IoT) sono successivamente riportati in un ambiente di emulazione che va ad imitare il prodotto quando è in esecuzione. Grazie a questa simulazione si ottengono dei dati molto importanti che possono consentire la manutenzione predittiva per il prodotto e individuare possibili perfezionamenti nella progettazione dello stesso.

L'utilizzo dei sensori nei sistemi di produzione viene implementato come segue. Più sensori vengono posizionati sull'intera linea di produzione dando in input al digital twin i risultati degli stessi. Questa emulazione permette di correggere prontamente gli errori che appaiono in fabbrica, riducendo anche al minimo i tempi di inattività. Importante considerazione è che gli ingegneri possono ottimizzare i sistemi in modo proattivo.

Esistono diversi modelli di digital twin che possono essere impiegati in diverse aree: ottimizzazione delle operazioni, manutenzione predittiva, rilevamento delle anomalie e isolamento dei guasti.

Ottimizzazione delle operazioni: il controllo e l'ottimizzazione delle operazioni serve per mitigare i rischi, ridurre i costi e per evitare qualsiasi inefficienza di sistema.

Manutenzione predittiva: questa la si può osservare maggiormente nell'ambito dell'industria 4.0 dove il digital twin può fornire indicazioni su quando sostituire o eseguire manutenzioni sulle apparecchiature.

Rilevamento delle anomalie: il digital twin lavora di pari passo con il sistema reale e segnala immediatamente quando vi sono delle anomalie; il modello, quindi, contribuisce a evitare danni all'asset reale.

Isolamento dei guasti: nel momento in cui si presentano delle anomalie si possono attivare delle simulazioni per poter dapprima isolare il problema, identificandone la causa, e poi risolverlo adottando delle misure correttive.

### 3.6 TIPI DI DIGITALTWIN

Come già detto precedentemente, i gemelli digitali rispetto ai test su un prodotto reale permettono di ridurre i cicli dei prototipi, testare le apparecchiature senza arrecare danni e individuare le funzionalità attraverso la simulazione. Possiamo individuare tre diversi tipi di digital twin in base all'uso che un'azienda ne fa: Plant/Process Level, Machine Level, Part/Material Level.

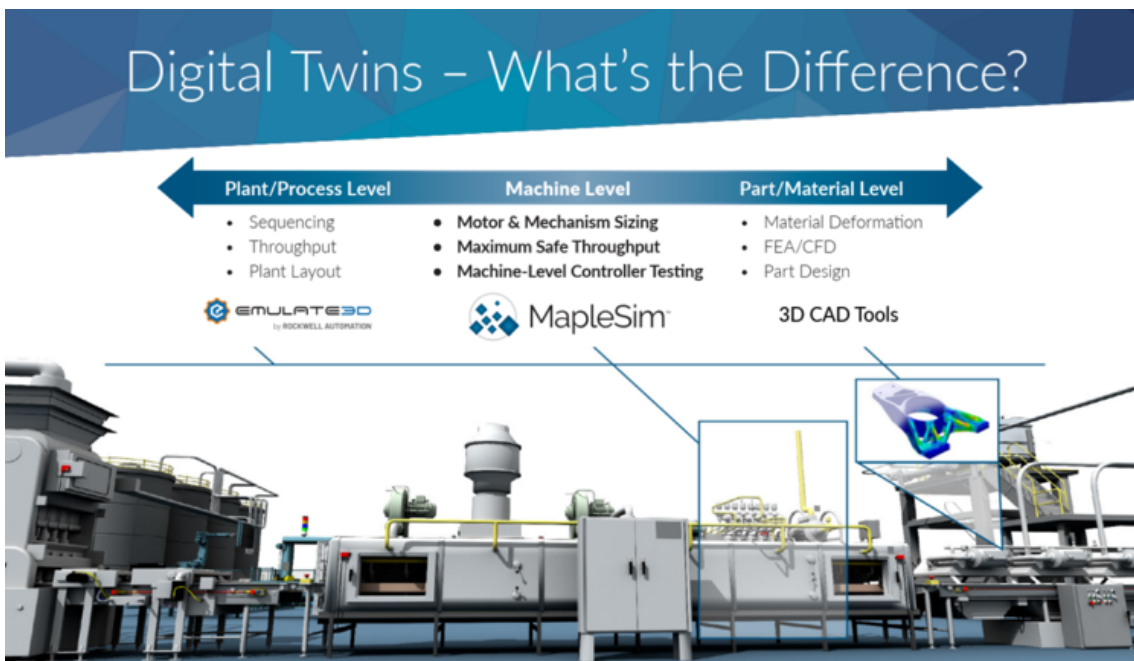


Figura 5. Caratteristiche principali dei tre tipi di digital twin

1. Plant/Process Level: i gemelli digitali sono stati pensati per aiutare a modellare interi processi produttivi e semplificare le interazioni che avvengono tra diverse macchine. “Questi tipi di gemelli digitali tendono a fare meno affidamento sulla fisica dettagliata di ogni singolo componente della macchina e pongono l'accento sull'ottimizzazione del flusso di materiali in un'intera linea”<sup>15</sup>. L'uso dei gemelli digitali a livello di impianto viene impiegato per attività come: sequenziamento (ottenere la disposizione ottima dell'impianto per consentire ai prodotti di potersi muovere in maniera vantaggiosa tra le celle dell'apparato produttivo), layout della planimetria (l'obiettivo è poter progettare una planimetria che fornisca la massima efficienza all'impianto), throughput (si vuole massimizzare la prestazione di un impianto ottimizzando i parametri di processo).
2. Machine Level: “Questi gemelli digitali utilizzano dati di simulazione altamente accurati della dinamica della macchina, compresi i comportamenti di meccanica, elettrica, idraulica e altro ancora”<sup>15</sup>. L'uso dei gemelli digitali a livello di macchina viene impiegato per attività come:

dimensionamento del motore (è possibile trovare i requisiti giusti per una macchina usando le simulazioni ad alta fedeltà del carico della macchina), massimo throughput sicuro (si testa quello che è il massimo throughput di una macchina per evitare di danneggiare fisicamente la macchina stessa), Machine-Level Controller Testing (individuare le più adatte strategie di controllo per le macchine del sistema sfruttando i modelli virtuali).

3. Part/Material Level: in questa tipologia vi è un focus sulle singole parti dei materiali. “Questi tipi di simulazioni di digital twin utilizzano le proprietà del materiale per eseguire simulazioni complesse e ad alta intensità di risorse sulle prestazioni effettive delle singole parti, in quanto rispondono alle sollecitazioni e alle tensioni di funzionamento”<sup>15</sup>. L’uso dei gemelli digitali a livello di materiale viene impiegato per attività come: deformazione del materiale (i materiali vengono sollecitati per verificare quali possano essere le potenziali deformazioni), FEA/CFD (si tratta di tecnologie di simulazione di materiali nello spazio 3D, nel primo caso, e di comportamento dei fluidi nel secondo. Gli acronimi indicano “fine element analysis” e “computational fluid dynamics”), progettazione delle parti (trovare le dimensioni ottimali delle parti per soddisfare i requisiti dati).

### **3.7 ALCUNE APPLICAZIONI PER I GEMELLI DIGITALI**

Le applicazioni di cui si parlerà di seguito si concentrano soprattutto sulla varietà di modelli di macchine dinamiche e sono basati sulla fisica dei gemelli digitali.

Una delle principali applicazioni che può avere un digital twin è quella sulla progettazione di un robot industriale su larga scala in quanto spesso si presentano problematiche relative alle prestazioni e che sfociano in problemi di costo e sicurezza. Le difficoltà nel garantire la sicurezza si verificano allorché un operatore si avvicini troppo ai macchinari. L’uso dei gemelli digitali in questo caso può risultare importantissima perché aiuta nella progettazione. In particolare, può consentire di ridurre, o addirittura eliminare, le vibrazioni della macchina grazie ad un migliore codice di controllo; si ha anche la possibilità di diagnosticare i problemi di prestazioni fornendo i risultati in simulazione, infine si possono convalidare nuove prestazioni di progettazione prima della prototipazione fisica.

“I gemelli digitali possono offrire una soluzione complementare ai problemi di trasferimento del calore in quanto la generazione e il trasferimento di calore in un sistema possono diventare rapidamente molto complicati da capire”<sup>16</sup>. Le aziende adoperano anche sistemi per studiare come il calore si muove attraverso il sistema. Però queste strumentazioni richiedono investimenti di tempo significativi per creare il modello ed emularlo; questi però vengono eseguiti tardi nel processo di progettazione. Usando, però, un approccio con i gemelli digitali è possibile riuscire a individuare anticipatamente questi problemi modificando il progetto e risparmiando, così facendo, denaro e

tempo. Di conseguenza vengono realizzate e testate nuove configurazioni in simulazione per studiare attentamente gli effetti del calore sul nuovo design.

Nei casi in cui nel design entrano in gioco elementi come cavi e pulegge vi sono ulteriori “dinamiche da considerare come la rigidità dei cavi, forze del vento e slittamento”<sup>16</sup>.

Le macchine per lo stampaggio ad iniezione (macchine composte da un gruppo di iniezione che invia il materiale fuso nello stampo e da un gruppo di chiusura che gestisce lo stampo) sono un prodotto caratterizzato da una particolare complessità. Il sistema, complessivamente, deve lavorare all’unisono per fornire profili di movimento molto precisi. Con un gemello digitale dinamico si riescono a risolvere diverse problematiche. Innanzitutto, è possibile “Ottimizzare le strategie di controllo per prevenire burnout motori o problemi di vibrazioni”<sup>16</sup>. Allo stesso tempo si riesce a massimizzare il rendimento grazie all’analisi del movimento impostata sulla simulazione. E in ultimo non vi è più il bisogno di dover spendere denaro in sostituzioni dell’hardware visto che si riescono a risolvere i problemi della macchina con il software.

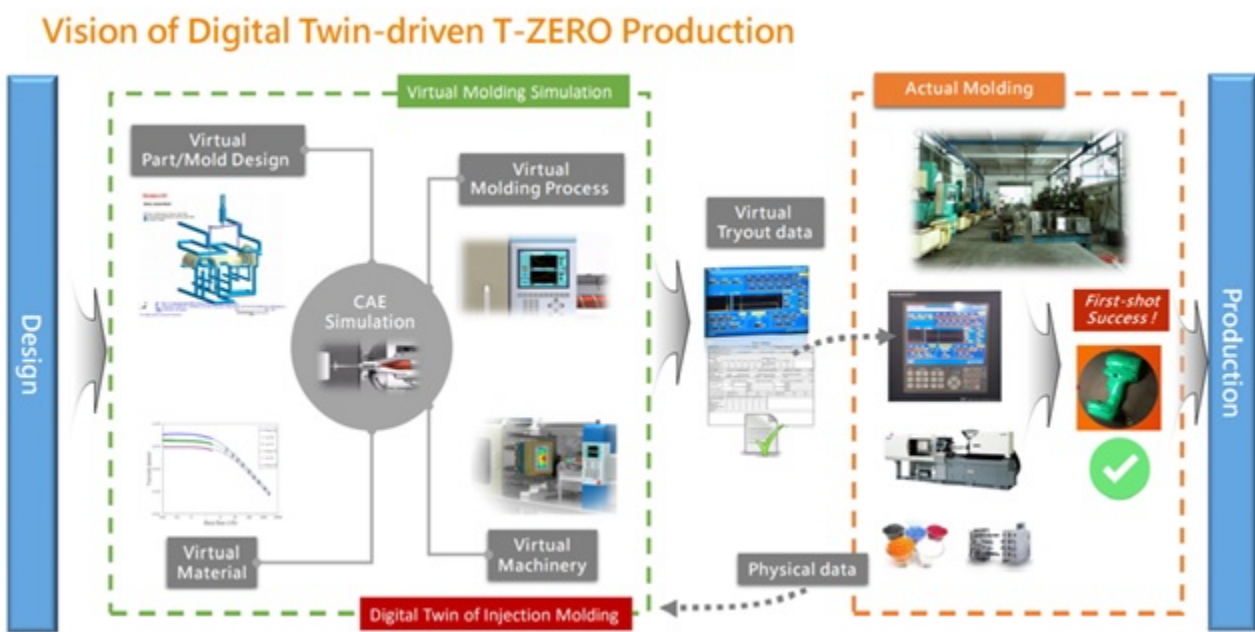


Figura 6. Simulazione virtuale di una macchina

Un gemello digitale permette di comprendere appieno il funzionamento di alcuni prodotti come le gru mobili. Indipendentemente dall’obiettivo che si ha, costruzione, logistica o sul campo, il gemello digitale aiuta a “garantire il corretto funzionamento di sistemi di pulegge 2D e 3D dei prototipi fisici”<sup>7</sup>. Ulteriormente, “vi è la possibilità di risolvere problemi preesistenti simulando ad esempio lo slittamento delle pulegge, le masse della catena, la piegatura dei cavi e altro ancora”<sup>16</sup>. In ultimo grazie al digital twin i progetti possono essere visualizzati in 3D.

### **3.8 APPLICAZIONE DEL DIGITAL TWIN NELL'INDUSTRIA FARMACEUTICA**

Grazie al digital twin si simulano processi e impianti per accelerare lo sviluppo. L'approccio usato dai gemelli digitali integra strumenti di simulazione che aiutano le aziende farmaceutiche a ottimizzare l'intero ciclo di vita del prodotto, dalla ricerca alla produzione. "Siemens fornisce un set completo di strumenti di simulazione che consente di creare un gemello digitale per l'industria farmaceutica. I nostri strumenti per la modellazione meccanicistica o ibrida e la dinamica dei fluidi consentono di sviluppare processi ottimizzati più velocemente, ridurre i tempi con i test in-silico e aumentare significativamente l'efficienza nella ricerca e sviluppo farmaceutica."<sup>16</sup> I gemelli digitali consentono di esporre progetti migliori e processi ottimizzati più velocemente e accelerare la progettazione. Congiuntamente con la messa in servizio si riducono gli sforzi e i rischi, e consente una formazione anticipata dell'operatore in un ambiente simulato realisticamente. Durante il funzionamento, un gemello digitale aiuta a ottimizzare i flussi di materiale e la logistica, nonché l'interazione tra lavoratori umani e robot. In definitiva, i gemelli digitali possono essere utilizzati per migliorare le prestazioni degli asset grazie alla manutenzione predittiva.

### **3.9 DIGITAL TWIN E MATLAB**

Un'interessante applicazione è quella dell'utilizzo di MATLAB assieme al digital twin. Tramite MATLAB si può definire un modello grazie ai dati provenienti dalle risorse che si hanno a disposizione. Altra strumentazione che può essere impiegata è quella del Simulink, anch'essa tecnologia MATLAB, che consente di creare un modello basato sulla fisica attraverso degli strumenti di modellazione multi-dominio. Questi gemelli digitali possono essere usati per le applicazioni di cui sopra e in tante altre situazioni come simulazioni what-if (cosa accadrebbe se...) oppure ancora per eseguire previsioni.

"I metodi basati su dati disponibili con MATLAB includono machine learning, deep learning, reti neurali e identificazione di sistemi. Normalmente si utilizza un set di dati per addestrare o estrarre un modello e un diverso set di dati di validazione per qualificare o testare i modelli"<sup>11</sup>. Si può in seguito scegliere quale sia il metodo che più si adatta ai propri bisogni.

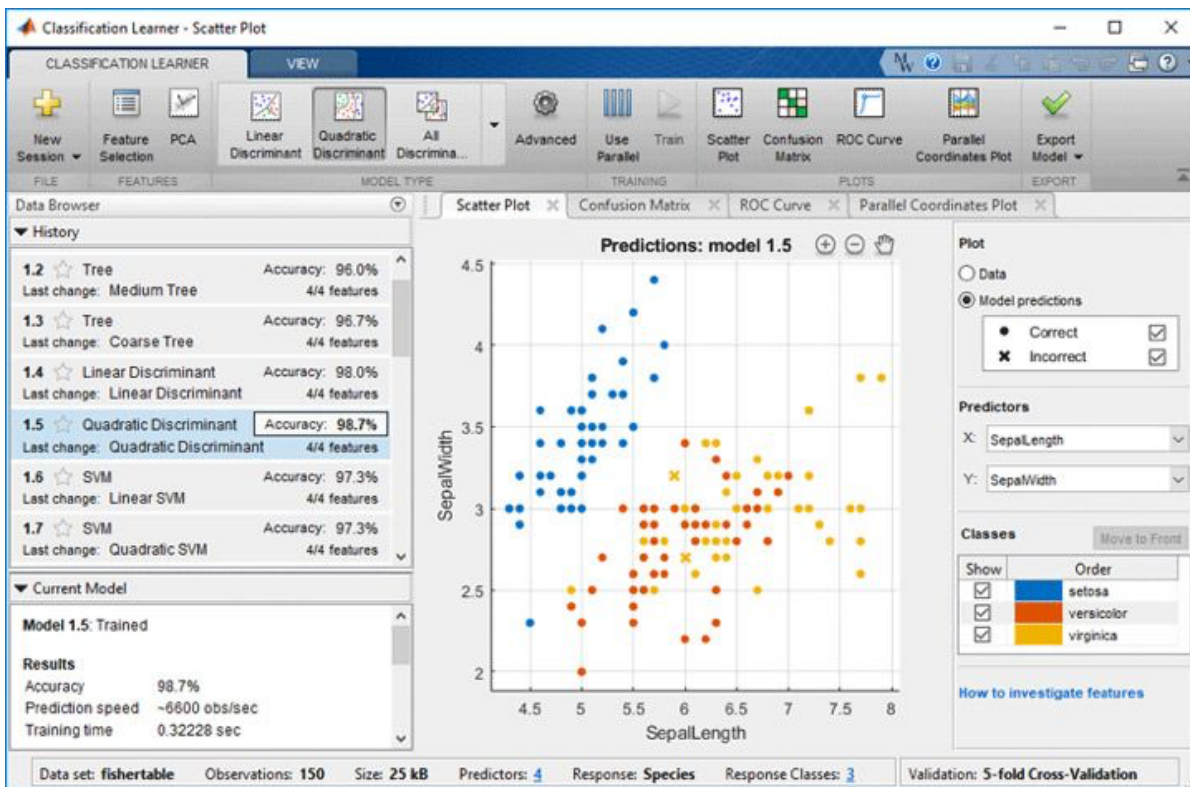


Figura 7. L'app Classification learner è usata per testare e validare i modelli (MATLAB)

La modellazione basata sulla fisica include la progettazione del sistema da principi primi. I modelli includono anche componenti idrauliche, elettriche e meccaniche. Con MATLAB i digital twin possono essere implementati ovunque sia necessario. Ciò include “nodi di calcolo periferici, sistemi IT e infrastrutture tecnologiche operative”<sup>11</sup>.

### 3.10 GEMELLI DIGITALI E AI

Gemelli digitali e intelligenza artificiale possono essere adoperati congiuntamente per sviluppare sistemi di produzione. Da un impianto produttivo possono essere catturate delle informazioni per poter affrontare eventuali problemi. Questi dati vengono inseriti nelle analisi 1D ed è qui che entra in gioco il digital twin. Vengono stilate delle equazioni o modelli che imitano il comportamento delle apparecchiature che si possono trovare in un sistema di produzione. Si avrà quindi una rappresentazione digitale dell'attrezzatura che si ha a disposizione in un impianto che viene “alimentata” con i dati in input. Una volta che si ha la simulazione in esecuzione la si può ampliare per ottenere più risultati. Si ottengono dati sia dai sensori fisici, quindi da un flusso di informazioni reale, che da sensori virtuali; l'obiettivo è quello di ampliare i dati a disposizione nel mondo reale. In seguito, vengono eseguite delle analisi sui dati per identificare dove potrebbero esserci delle anomalie, permettendo di verificare la qualità del prodotto ma anche il tempo di funzionamento delle

apparecchiature. Una problematica che può presentarsi è come ottenere gli strumenti di analisi per individuare le anomalie. È qui che interviene l'artificial intelligence. La stessa “cerca di correlare le anomalie nei dati a quegli eventi”<sup>17</sup>. L'IA, nel trattare con tutti questi dati, trova le anomalie e fa una correlazione agli eventi con il gemello digitale. Le due strumentazioni permettono di ottenere un quadro più completo, si possono individuare i problemi più velocemente e intraprendere azioni correttive. “È qui che l'intersezione tra l'intelligenza artificiale e il gemello digitale può aiutare a realizzare più rapidamente il valore delle strategie di produzione intelligenti”<sup>17</sup>.

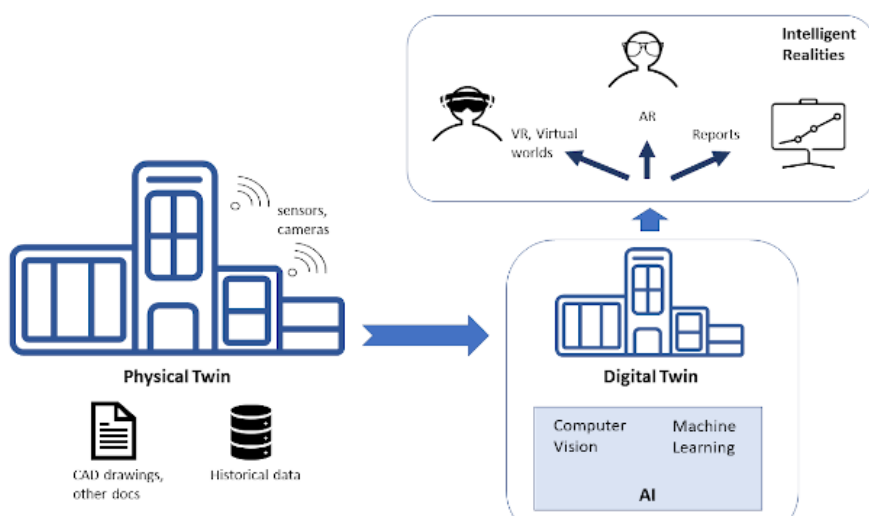


Figura 8. Intelligenza artificiale e digital twin

#### 4. DIGITAL TWIN PER LA SOSTENIBILITÀ AMBIENTALE – CASO SIEMENS

Le industrie di trasformazione sono sotto pressione per convertirsi a prodotti e processi a zero emissioni di carbonio. Ciò sta guidando importanti investimenti in energia pulita, percorsi di processo più sostenibili come l'uso dell'idrogeno come vettore energetico o il passaggio a mangimi a base biologica o di scarto. Per poter affrontare queste nuove “problematiche” la società Siemens ha deciso di affrontarle innanzitutto con le tecnologie digital twin.

Vengono forniti dei software, servizi e soluzioni per aiutare ad accelerare tre fasi chiave della decarbonizzazione. L'approccio con l'ausilio del digital twin si basa su tre step principali.

La S. fornisce a società terze dei modelli applicazioni digitali basati su modellazioni “chiavi in mano”, implementate sul basandosi sull'impianto esistente per massimizzare l'efficienza energetica. “Questi utilizzano tecnologie di ottimizzazione abbinata ai dati dell'impianto per ridurre al minimo le emissioni e risparmiare sui costi operativi e richiedono investimenti di capitale minimi o nulli”<sup>18</sup>.

Questa società ha sviluppato una tecnologia di progettazione dei processi digitali detta gPROMS che

promette di aiutare a esplorare lo spazio decisionale e a prendere decisioni rapide e informate su argomenti come la cattura del carbonio, l'energia basata sull'idrogeno o le materie prime da risorse rinnovabili.

A lungo termine l'aiuto della progettazione digitale permette di accelerare lo sviluppo di nuovi processi a basse emissioni di carbonio e la riprogettazione di processi esistenti, ad esempio per utilizzare l'idrogeno verde.

Con il software avanzato di modellazione dei processi gPROMS “si possono creare gemelli di processi digitali che acquisiscono una profonda conoscenza dei processi, convalidati rispetto a dati sperimentali e li utilizzano per sviluppare rapidamente e in modo affidabile nuovi progetti di processi a basse emissioni di carbonio”<sup>18</sup>. Ciò si traduce in grandi risparmi di capitale.

Il gemello viene impiegato per esplorare meticolosamente lo spazio decisionale, ottimizzare rapidamente i progetti del processo e quantificare e gestire il rischio tecnologico, con costi di sperimentazione ridotti.

Per gli impianti esistenti, non è semplice raggiungere le zero emissioni. Le applicazioni digitali online sono specificamente progettate per monitorare e ottimizzare l'utilizzo dell'energia e forniscono vantaggi immediati in termini di riduzione quotidiana delle emissioni, senza alcun investimento di capitale.

Gli strumenti, le tecnologie e i servizi del gemello digitale Siemens stanno contribuendo a guidare la sostenibilità in molte aree:

1. Processi a idrogeno: la tecnologia gPROMS di Siemens è impiegata per progettare processi di elettrolizzatori per la gestione ottimale della disponibilità di energia variabile
2. Cattura, utilizzo e stoccaggio del carbonio
3. Sviluppo di automobili a celle a combustibile
4. Processi e catalizzatori più verdi: gli strumenti di progettazione digitali permettono di accelerare lo sviluppo della tecnologia dei processi ecologici, fornendo rapidamente sul mercato nuovi concetti di reattori e catalizzatori
5. Sviluppo di processi per biocarburanti: la tecnologia digital twin per i biocarburanti aiuta le aziende a ottimizzare i processi e scalare rapidamente i sistemi
6. Riduzione delle emissioni
7. Gestione della domanda: con l'aumento della quota di energie rinnovabili, aumenta il bisogno di adeguarsi la domanda. Le tecnologie digitali aiutano a ottimizzare ogni decisione.
8. Pirolisi di rifiuti solidi (smaltimento con recupero dei rifiuti)
9. Ottimizzazione dinamica per la gestione della domanda: poiché l'energia rinnovabile da fonti

variabili come l'energia eolica o solare costituisce una quota sempre maggiore di energia risulta difficile bilanciare domanda e offerta. La tecnologia di ottimizzazione dinamica di Siemens è in grado di determinare il miglior progetto possibile per la gestione della variabilità.

#### **4.1 SVILUPPO DI UN GEMELLO DIGITALE CON PROTIUM**

“Siemens ha collaborato con il fornitore di soluzioni per l'idrogeno, con sede nel Regno Unito, Protium, al progetto Digital Twin, finanziato da Connected Places Catapult e dal Dipartimento dei trasporti del Regno Unito. Avente l'obiettivo di digitalizzare lo sviluppo dell'infrastruttura dell'idrogeno green per gli aerei. Protium sta implementando un gemello digitale Siemens per accelerare la progettazione e il collaudo durante lo sviluppo della tecnologia di rifornimento rapido a supporto dell'obiettivo finale del volo a emissioni zero”<sup>18</sup>.

Con la collaborazione con la startup inglese si comprende sempre più che le tecnologie dell'idrogeno sono essenziali per supportare l'obiettivo zero emissioni del 2050 per i voli nazionali. “L'idrogeno verde prodotto utilizzando elettricità rinnovabile può sostituire i combustibili fossili convenzionali; tuttavia, la tecnologia attuale non è in grado di fornire il rifornimento rapido essenziale per rendere l'idrogeno commercialmente fattibile per il settore dell'aviazione”<sup>18</sup>.

Protium è in prima linea nella transizione verde dell'industria aeronautica e si sta dedicando sempre più per riuscire a fornire un servizio energetico a emissioni zero. “L'azienda progetta, sviluppa, finanzia e gestisce soluzioni di idrogeno verde per l'aviazione, le applicazioni industriali rivolte ai consumatori e i trasporti”<sup>18</sup>.

Protium e Siemens hanno lavorato congiuntamente per sviluppare una tecnologia di digital twin per accelerare lo sviluppo dei sistemi di rifornimento di idrogeno degli aerei. Viene implementato un modello digitale per ottimizzare la progettazione del sistema, quindi emulare e ottimizzare le prestazioni del mondo reale, rendendo inutile la necessità di dover realizzare prototipazioni care. “Il gemello digitale consente a Protium di testare prontamente delle soluzioni ingegneristiche innovative per il rifornimento di carburante degli aerei e aumentare la fiducia nella tecnologia dell'idrogeno, contribuendo potenzialmente all'obiettivo del governo del Regno Unito di zero emissioni di carbonio entro il 2050”<sup>2</sup>. Il Business Manager di Siemens, Bart de Groot, afferma: “Siemens sta lavorando a lungo con innovatori di energia pulita per aiutare a portare nuove tecnologie sul mercato il più rapidamente possibile. Siamo molto entusiasti di lavorare con Protium per ridurre il time-to-market nella difficile area del volo a emissioni zero”<sup>18</sup>.

## 4.2 SVILUPPO DI UN GEMELLO DIGITALE CON EVERFUEL

“Everfuel, con sede a Herning, in Danimarca, è un attore chiave nel Power-to-X e nell'idrogeno verde, ha scelto la tecnologia di progettazione dei processi digitali gPROMS di Siemens per implementare gemelli digitali ad alta fedeltà”<sup>18</sup>.

Grazie ai gemelli digitali si può stabilire prontamente la fattibilità delle scelte progettuali e di quantificare il rischio associato alle decisioni operative. Gli esperti riescono a stabilire qual è la progettazione economicamente ottimale basandosi sui modelli di simulazione. Le tecnologie che verranno sviluppate svolgeranno un ruolo di primaria importanza nella trasformazione energetica fornendo capacità di accumulo di energia su larga scala. “Everfuel sta rendendo l'idrogeno verde per la mobilità a zero emissioni commercialmente disponibile in tutta Europa. L'idrogeno verde è un combustibile pulito al 100% ottenuto da energia rinnovabile e fondamentale per l'elettrificazione del settore dei trasporti in Europa, e quindi per un futuro sostenibile”<sup>18</sup>.

Per avere un impianto produttivo Power-to-X di successo si richiede uno strumento di progettazione digitale che abbia la capacità di poter acquisire la conoscenza dei processi chimici e fisici che servono per lo sviluppo dell'idrogeno green.

Il gemello digitale che ha adottato la Everfuel prevede lo sviluppo di un impianto di produzione e stoccaggio di idrogeno basato sull'elettrolisi. “La progettazione digitale di Siemens viene sfruttata per esplorare lo spazio decisionale, quantificare il rischio, ottimizzare la progettazione del sistema. Il gemello digitale consente, in più, di accelerare lo sviluppo e massimizzare l'economia dei processi. Everfuel ha anche utilizzato gPROMS per modellare una rete di distribuzione dell'idrogeno”<sup>18</sup>.

## 5. DIFFERENZE TRA VIRTUAL COMMISSIONING E DIGITAL TWIN

“La messa in servizio virtuale è la simulazione e la modellazione di un sistema di produzione per sviluppare e testare il comportamento prima della messa in servizio fisica. Gli ingegneri simulano i processi prima di accendere il sistema di produzione, consentendo loro di verificare che tutto funzioni”<sup>19</sup>. Aspetti positivi del VC sono la riduzione al minimo del tempo di inattività identificando e risolvendo bug e problemi ancor prima che un nuovo sistema di produzione inizi a lavorare e la riduzione dei costi.

La messa in servizio utilizza un metodo iterativo suddiviso in tre step principali: model in the loop (MiL), software in the loop (SiL) e hardware in the loop (HiL). Nella prima fase l'applicazione crea un prototipo logico del PLC e delle interfacce uomo macchina. Il modello poi viene connesso ad una

simulazione della catena produttiva. E successivamente i modelli creati possono essere eseguiti insieme. Nel qual caso vi sia un errore occorre modificare il prototipo finché esso non dia più errori. Lo step successivo consiste nel controllare che la logica nel prototipo sia uguale a quella del software. Infine, se non vi sono errori si può redigere il programma su un “programmable logic controller”. Grazie all’ausilio di un digital twin “le aziende acquisiscono i dati dei sensori dei sistemi di produzione fisici e operativi e forniscono tali informazioni nella simulazione in “tempo reale”. Ciò consente alla riproduzione di imitare il funzionamento del sistema di produzione in un ambiente live, fornendo un livello più profondo di comprensione del sistema, rispetto alle simulazioni in cui vengono utilizzati solo dati storici”.<sup>15</sup> Un gemello digitale può anche emulare un sistema mentre sta lavorando, dando l’opportunità alle società di poter monitorare il funzionamento del sistema.

Questa tecnologia può fornire un importante risposta aiutando a prevedere complicazioni che potrebbero presentarsi e a ridurre anche i tempi di inattività.

Sia il VC che i gemelli digitali sono applicazioni di simulazione molto vantaggiose ma la differenza tra esse è molto sottile. L’emulazione hardware in the loop è lo step finale che porta alla messa in servizio fisica. Il virtual commissioning ha fine allorché vengono installati i sensori nella linea produttiva. “La messa in servizio virtuale avviene prima che un sistema sia fisicamente commissionato. Gli ingegneri creano un gemello digitale dopo una commissione fisica, utilizzando i dati raccolti dal sensore. Un’altra distinzione chiave tra questi due metodi è che il processo di messa in servizio virtuale utilizza semplicemente modelli di un sistema di produzione, mentre il suo gemello digitale è una replica virtuale dell’istanza fisica di quel sistema”<sup>19</sup>. Più gli ingegneri si sentono sicuri nell’utilizzo del virtual commissioning, più sarà semplice passare da VC virtuale a fisico e infine allo sviluppo di un digital twin. Ecco perché è difficile comprendere dove termina l’uno e inizia l’altro.

## 6. COESIONE TRA VIRTUAL COMMISSIONING E DIGITAL TWIN

### 6.1 COS’È UN GEMELLO DIGITALE PER IL CARICO VIRTUALE?

Un sistema di produzione è caratterizzato da linee e celle di produzione che lavorano all’unisono per arrivare ad un risultato, il prodotto. Il virtual commissioning per questi sistemi avviene durante l’installazione e quando bisognerà fare gli aggiornamenti.

Allorché si fa virtual commissioning si pretende che tutti gli aspetti della macchina lavorino congiuntamente per produrre il risultato finale necessario. Nella maggior parte dei casi questo riscontro si effettua successivamente all’impostazione del sistema di produzione.

“Storicamente, la messa in servizio avviene fisicamente. Questo processo di debug verifica il sistema di produzione in più scenari, tra cui avvio, arresto, produzione ad alto volume e molti altri. Durante

tali test, gli ingegneri possono cercare problemi nel funzionamento del sistema di produzione. Una volta trovati, possono sviluppare e implementare modifiche che affrontano il problema.

Eppure, riuscire a trovare e risolvere eventuali problemi durante la messa in servizio fisica è costoso sia in termini di tempo che di materiali e personale”<sup>20</sup>. Ciò si traduce anche in sanzioni da parte di soggetti terzi dato che la messa in servizio fisica fa perdere molto tempo e fa ritardare le consegne. Ecco perché spesso si decide di passare al virtual commissioning.

Oggi giorno le aziende scelgono di unire il virtual commissioning al gemello digitale anziché mettere in servizio la macchina fisica dopo la produzione e l’installazione. “Questa replica virtuale emula e prevede i comportamenti del sistema di produzione fisica finale utilizzando mezzi digitali”<sup>20</sup>.

Un vantaggio importante del virtual commissioning è che al contrario di quello fisico non bisogna aspettare che sia pronto tutto il sistema prima di poter iniziare.

“La messa in servizio virtuale può iniziare molto prima che arrivi qualsiasi hardware. Poiché tutti i componenti esistono in un modello software, gli ingegneri possono iniziare a testare l’interoperabilità nel regno digitale. Questo trasforma la messa in servizio fisica nella verifica dei test del gemello digitale. Un altro vantaggio è la capacità di esplorare più alternative di design”<sup>20</sup>.

Questo porta a sistemi di produzione più performanti che forniscono un rendimento maggiore.

La chiave per il virtual commissioning è la simulazione 1D. “Visivamente, questi modelli sembrano un semplice diagramma di flusso con scatole di componenti collegate tra loro con connettori. Ogni componente ha ingressi e uscite, che passano informazioni e dati da uno all’altro attraverso le connessioni. Gli interni del componente trasformano l’ingresso nell’uscita. Questo collega la logica dei sistemi di controllo e i comportamenti fisici delle apparecchiature. In modo olistico, questo modello rappresenta il gemello digitale del sistema di produzione”<sup>20</sup>.

Il digital twin non sono stati ideati solo per il mondo virtuale. Esistono dei gemelli digitali detti ibridi che collegano apparecchiature fisiche e controller ai modelli di simulazione. La programmable logic unit può associarsi a un modello di simulazione della linea di produzione. Un facsimile digitale di un PLC può unirsi a una cella di produzione fisica. Questo concetto, chiamato Hardware-in-the-Loop (HiL), consente una transizione più lenta e senza soluzione di continuità dalla messa in servizio virtuale alla messa in servizio fisica.

Nel complesso le simulazioni 1D svolgono un ruolo fondamentale nella messa in servizio virtuale.

## **6.2 RUOLO DI UNA LIBRERIA DI COMPONENTI NEL VIRTUAL COMMISSIONING**

La messa in servizio virtuale consente il test digitale dei sistemi di produzione e dei programmi di

controllo associati utilizzando modelli di simulazione. Gli ingegneri sviluppano un modello a due vie, una parte rappresenta i controlli logici usati nel sistema di produzione l'altro quelli fisici del sistema. Per poter potenziare con successo le simulazioni per il virtual commissioning, sono imprescindibili due fattori tecnologici. Innanzitutto, si ha bisogno dell'applicazione software che costruisce ed esegue la simulazione. Dopodiché è essenziale una libreria di componenti virtuali per costruire i modelli. Come funzionano i componenti? Nell'emulazione 1D, ogni componente ha almeno un input e un output. Esempi di componenti di simulazione sono:

- “Un lettore di codici a barre: un lettore di codici a barre esegue la scansione di un modello di codici a barre leggibile dalla macchina e restituisce le informazioni codificate in quel modello in un formato leggibile dall'uomo.
- Un sensore di ispezione visiva: questo ispezionerà una parte sulla catena di montaggio per verificare che le caratteristiche lavorate rientrino in un intervallo specificato di soglie e avviserà l'operatore se una di esse non è conforme;
- Un robot che unisce due componenti in un'unica parte in lamiera: il componente utilizza sensori per controllare una serie di misure relative alla qualità. L'output è la modifica autonoma dell'operazione del robot per produrre il singolo foglio all'interno delle specifiche richieste”<sup>21</sup>.

Il lettore di codici a barre richiede un solo input e un solo output, il robot nell'ultimo esempio occorre assimilare più e più dati e rispondere ad essi in tempo reale. La caratteristica che li accomuna però è il calcolo appropriato di un output se ricevono in ingresso un input specifico.

La creazione della simulazione 1D per una catena produttiva richiede la modellazione dei componenti del sistema. Per raggiungere tale scopo occorre realizzare numerosi componenti. La realizzazione di componenti nuovi da zero è irrealistica poiché richiedere un dispendio temporale e finanziario.

Una soluzione che può essere adottata è il riutilizzo di componenti esistenti che erano state archiviate, le stesse possono essere utilizzate ripetutamente per eseguire le simulazioni il più velocemente possibile.

Quando un'azienda riesce a raggiungere questo obiettivo riuscirà ad avere nelle proprie mani preziosi dati iniziali riguardo la progettazione di una catena di montaggio o di una cella di produzione. Sarà possibile verificare comportamenti particolari prima di mettere in servizio fisicamente un sistema nuovo.

In aggiunta virtualmente è più semplice riconfigurare un sistema produttivo, consentendo di ottimizzare una catena di montaggio senza causare ritardi nell'ambiente di produzione reale.

Per concretizzare tutti questi benefici, è tassativa una libreria di componenti a tutto tondo.

“Un componente in una simulazione 1D deve emulare il comportamento di un aspetto del sistema di

produzione nel mondo fisico. Se non lo fa con precisione, l'intera simulazione può produrre risultati imprecisi, minando la messa in servizio virtuale”<sup>21</sup>.

Quando ciò accade, nel migliore dei casi qualcuno potrebbe notare l'errore e quindi i risultati della simulazione verrebbero ignorati. Nella peggiore situazione nessuno noterà gli errori e la catena di montaggio sarà fisicamente commissionata e implementata nel mondo reale con imprecisioni, un errore costoso per una società. È per questa motivazione che bisogna evitare situazioni rischiose, testando accuratamente ciascuna componente per poter garantire che essa abbia il comportamento reale del sistema che sta simulando.

In conclusione, per eseguire una simulazione di messa in servizio virtuale di successo non è sufficiente possedere una libreria di componenti. Ogni componente della libreria deve essere testato regolarmente per verificarne l'accuratezza. La messa in servizio virtuale è un potente strumento nello sviluppo di linee di assemblaggio o celle, ma solo quando viene utilizzato in combinazione con una solida libreria di componenti.

### **6.3 FMI E CORRELAZIONE CON LA MISSIONE VIRTUALE**

Sempre più spesso le aziende sono sotto pressione per cercare di ridurre al minimo i tempi di inattività. Il tutto risulta complicato quando si commissionano sistemi per linee di assemblaggio e celle. È in questi casi che il VC può favorire questo obiettivo riducendo i tempi.

I modelli di messa in servizio virtuale spesso non possono operare da soli ma con altri modelli simili per consentire la simulazione di un intero ambiente di produzione.

Quando si crea un sistema di produzione o se ne modifica uno, è obbligatorio scegliere con cura una vasta gamma di componenti per svolgere le attività della catena di montaggio.

Questi sistemi vengono considerati come un'importante risorsa che può essere riusata nell'impianto per anche una decade.

Il virtual commissioning offre alle società un modo sia affidabile che poco costoso per valutare i sistemi e il loro effetto sull'ambiente di produzione.

Anziché collegare un nuovo sistema a una catena di montaggio o a una cella per misurare il suo impatto, viene impiegato un modello di emulazione per testare digitalmente l'effetto. Qualsiasi individuo può utilizzare la simulazione 1D per testare digitalmente e verificare che tutto venga eseguito come previsto. I tempi di inattività dell'ambiente di produzione fisico sono ridotti al minimo e l'azienda dispone di un luogo virtuale sicuro per testare e ottimizzare le diverse configurazioni di produzione.

Per raggiungere questo obiettivo, è necessario creare una serie di modelli per ciascun sistema di

produzione.

Come si può ben immaginare le applicazioni software variano nel tempo. Gli aggiornamenti che devono essere eseguiti portano dei vantaggi dato che dispongono di nuove funzionalità per risolvere probabili problemi che possono presentarsi.

Tuttavia, anche le migliorie apportate ai software possono portare delle problematiche. Ad esempio, può essere impossibile aprire o eseguire versioni precedenti di un modello nell'ultima versione del software di modellazione. Questa è una preoccupazione particolare per chi, operatori e proprietari, utilizza nella propria azienda dei modelli di grandi dimensioni. Accade, spesse volte, che non vi è la possibilità di poter rimodellare questi grandi sistemi ogni volta che installano una nuova versione del loro software di modellazione.

I modelli digitali di sistemi di produzione che vengono mantenuti nel tempo sono particolarmente suscettibili a tali problemi. Qualora sia il momento di aggiornare o modificare un sistema di produzione, è utile aggiornare il modello. Tuttavia, se i modelli più vecchi sono incompatibili con le versioni più recenti delle applicazioni software, devono essere ricreati dall'organizzazione.

I lavoratori si troveranno con un patchwork di modelli di emulazione 1D costruiti utilizzando varie applicazioni software o in esecuzione su diverse versioni di applicazioni software. Modelli diversi potrebbero non funzionare congiuntamente.

In situazioni simili a quella descritta precedentemente viene introdotta la Functional Mock-up Interface (FMI). “Il FMI è uno standard aperto che consente lo scambio di diversi modelli tra diverse applicazioni software in un formato standardizzato. Permette alle aziende di scambiare modelli avanti e indietro. Di conseguenza, un'organizzazione può mantenere lo stesso modello, ma selezionare lo strumento più adatto a ciascun tipo di analisi di messa in servizio virtuale. Inoltre, i modelli possono essere condivisi e riutilizzati per altre applicazioni in tutta l'organizzazione. Mentre le applicazioni software supportano diversi gradi di compatibilità con il FMI, l'idea di base è che i modelli possono essere spostati da un'applicazione all'altra”<sup>22</sup>.

Due modelli possono anche essere eseguiti in una modalità connessa chiamata co-simulazione. Invece di essere spostati tra le applicazioni software, i modelli vengono eseguiti nella propria applicazione mentre sono collegati a un'altra applicazione. Ciò offre ai lavoratori di una azienda delle informazioni preziose e olistiche sul loro ambiente di produzione. “Possono utilizzare rapidamente e facilmente la co-simulazione per cercare soluzioni alternative perché non sono bloccati in un approccio specifico”<sup>22</sup>.

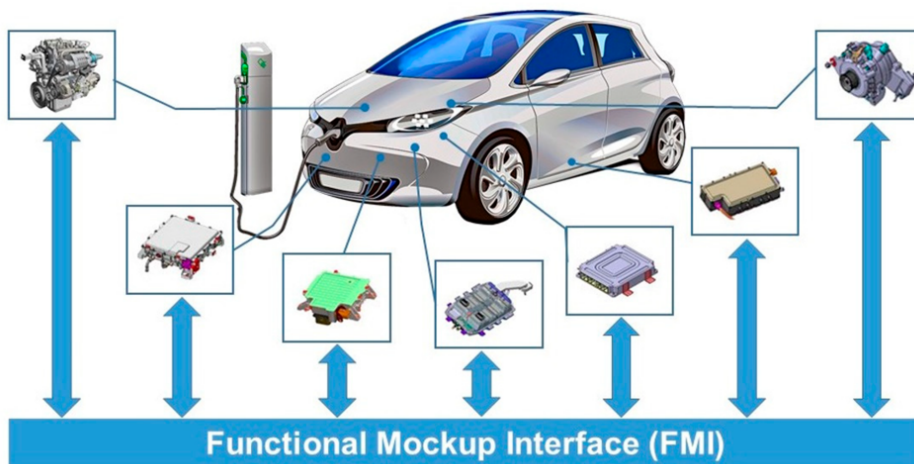


Figura 9. Esempio di FMI su un'autovettura elettrica

## 6.4 ANALISI DELLE SIMULAZIONI 1D E 3D

Stabilire qual è la migliore tecnica della messa in servizio virtuale non è semplice in quanto vi sono diverse scelte. Alcune aziende preferiscono l'utilizzo dei modelli di processo di simulazione 1D. Altri sfruttano disegni 3D dettagliati con animazioni. Altri ancora usano combinazioni di questi due approcci.

La simulazione 1D viene considerata una opzione per la messa in servizio virtuale di tipo astratto. Diversi sono gli aspetti da considerare per questa tipologia di emulazione.

Per prima cosa gli ingegneri possono esplorare più iterazioni di un possibile progetto. “Ciò consente di poter lavorare con i risultati per verificare rapidamente la soluzione migliore per i requisiti del progetto. Poiché queste simulazioni possono essere impostate rapidamente, ci sono molte opportunità per scoprire soluzioni nuove e innovative che possono guidare un progetto alla progettazione di livello successivo”<sup>23</sup>.

Inoltre, vi è la verifica dell'hardware PLC. La simulazione offre anche l'opportunità di verificare l'hardware PLC senza dover per forza analizzare il resto del sistema di produzione. “I PLC caricati con logica di controllo possono essere collegati a modelli virtuali del sistema di produzione in esecuzione in tempo reale. Gli ingegneri utilizzano questo approccio Hardware-in-the-Loop per eseguire ulteriormente il debug dell'hardware PLC. Ciò riduce il tempo per completare l'installazione verificando la funzione del sistema di produzione prima che arrivi l'altro hardware”<sup>23</sup>.

Di contro però non vi è nessun controllo spaziale. “Una limitazione della simulazione 1D è che non è utile per eseguire controlli spaziali. Il rilevamento delle collisioni e i controlli delle interferenze non sono possibili a causa della mancanza di geometria del modello 3D. Inoltre, utilizzando solo la simulazione 1D, gli ingegneri non possono garantire l'ergonomia dell'operatore della macchina”<sup>23</sup>.

La modellazione 3D sfruttata dai sistemi di produzione fornisce dei risultati diversi e richiedono,

soprattutto delle competenze differenti. Tra i vari vantaggi che possiamo riscontrare vi è il facile riutilizzo. “Sempre più aziende scelgono di usare i propri modelli di ingegneria meccanica implementando l'ingegneria basata sulla simulazione. Utilizzando modelli 3D già esistenti, le aziende e i dipendenti possono eseguire il debug dei sistemi di produzione prima dell'installazione”<sup>23</sup>. In più la tecnologia di scansione 3D cattura una rappresentazione tridimensionale di tutto l'impianto. Gli addetti possono posizionare il modello 3D del sistema produttivo nell'ambiente di scansione risultante, fornendo un contesto più realistico di simulazione. Altro strumento che fornisce la simulazione 3D è la verifica delle operazioni spaziali. Vi è la possibilità di scoprire problemi importanti, “come assicurarsi che ci sia abbastanza spazio all'interno della fabbrica per far funzionare ogni cella e sistema di macchina, ciò consente agli ingegneri di risolvere i problemi prima di raggiungere la messa in servizio fisica”<sup>23</sup>. Si possono impiegare le simulazioni di modelli 3D per identificare questi problemi digitalmente invece che fisicamente. Ulteriore aspetto è la certezza sull'ergonomia dei lavoratori in quanto gli ingegneri possono incorporare i modelli umani nelle simulazioni 3D. Gli operatori possono evitare modifiche post-installazione per affrontare l'ergonomia dei lavoratori che agirebbero come cavie; poiché tutto l'ambiente di lavoro funzionerebbe correttamente fin dall'inizio.

Di contro, però, non è presente la convalida del PLC. Le simulazioni 3D non offrono un mezzo per verificare la logica o l'hardware del controllo PLC, questa strumentazione è presente solamente nel dominio delle simulazioni 1D.

Separatamente, le simulazioni 1D e 3D forniscono valore alla messa in servizio virtuale. “La simulazione 1D è usata nei casi in cui è importante sia la programmazione che l'hardware PLC, ma è limitata a causa della mancanza di modelli 3D disponibili per la convalida spaziale. Come contrappunto, la modellazione 3D non è in grado di offrire le opzioni complesse necessarie per i test PLC, ma è più impattante per la pianificazione spaziale ed ergonomica”<sup>23</sup>.

L'utilizzo di una combinazione di simulazione 1D e 3D avvantaggia tantissimo le aziende. La simulazione 1D ha come punto di forza la logica PLC mentre la simulazione 3D fornisce informazioni sulla funzione dei sistemi meccanici e sul loro spazio all'interno di una struttura. L'uso congiunto delle due tecnologie velocizza la messa in servizio. Su una scala più piccola, se un kit di aggiornamento viene applicato a una macchina esistente, questo stile di emulazione garantisce che il passaggio sia pronto per l'implementazione fisica.

I fornitori di soluzioni di questo tipo stanno migliorando rapidamente la modellazione 1D e le soluzioni di modellazione 3D, consentendo simulazioni più veloci e accurate per la messa in servizio virtuale. “L'implementazione della logica PLC è più fluida. Un approccio combinato assicura che il prodotto finito sia di alta qualità e funzioni come previsto prima della costruzione. L'approccio

combinato 1D e 3D è un'opportunità per le aziende di fornire sistemi di produzione in tempo"<sup>23</sup>.

In definitiva, la simulazione 1D fornisce un mezzo per convalidare virtualmente la logica e l'hardware PLC, però è carente nella capacità di controllare le distanze spaziali e l'ergonomia del lavoratore.

- Le simulazioni 3D offrono la capacità di convalidare la clearance per le operazioni nei sistemi di produzione. Consente inoltre la verifica dell'ergonomia del lavoratore.
- La combinazione di simulazione 1D e 3D, in esecuzione in una co-simulazione, risponde a entrambe le esigenze funzionali. Insieme, questi modelli portano a tempi di immissione sul mercato più brevi e tempi di inattività minimi nella produzione.



Figura 10. Rappresentazione di simulazione 1D e 3D in diversi ambiti

## 7. CONCLUSIONE

Questa tesi ha voluto analizzare nel dettaglio il Virtual Commissioning e il Digital Twin, approfondendo allo stesso tempo anche delle applicazioni interessanti. L'ausilio di queste tecniche consente notevoli risparmi, di costo e di tempo.

Ciò che si è evinto da questa breve analisi è soprattutto l'utilità di queste due tecnologie. Oggigiorno sia la messa in servizio virtuale che il gemello digitale devono essere considerati elementi essenziali in un'industria. Per poter essere competitivi in un mercato usare queste applicazioni è fondamentale; questo perché, ad esempio, si può far visualizzare il prodotto finale a dei clienti ancor prima che questo possa essere prodotto realmente. Inoltre, si possono rendere noti i lead time, senza dover fare delle previsioni non veritiere rischiando di perdere la commessa. I vantaggi di VC e DT sono innumerevoli, naturalmente prima di adottare queste tecnologie un'azienda deve analizzare minuziosamente ogni dettaglio per decidere se intraprendere l'investimento.

## 8. RIFERIMENTI

1. <https://virtualcommissioning.com/what-is-virtual-commissioning/#:~:text=In%20the%20simplest%20terms%2C%20virtual,it%20to%20the%20real%20system>
2. Reinhart, Gunther e Georg Wünsch (2007). “Applicazione economica della messa in servizio virtuale ai sistemi di produzione meccatronici”. In: Ingegneria di produzione 1.4, pp. 371–379.
3. Auinger, F., Vorderwinkler, M. e Buchtela, G. (1999). "Architettura di modellazione indipendente dal dominio guidata dall'interfaccia per 'soft-commissioning' e 'reality in the loop'", Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference, Phoenix, AZ, USA, 1, pp. 798-805
4. GRAHAM JACKSON in: <https://virtualcommissioning.com/understanding-virtual-commissioning-a-brief-history/>
5. CHAD JACKSON in: <https://virtualcommissioning.com/how-to-get-started-with-virtual-commissioning/>
6. <https://virtualcommissioning.com/choosing-a-virtual-commissioning-solution-part-2/>
7. CHARLOTTE TURNBULL in: <https://virtualcommissioning.com/what-is-virtual-commissioning/#:~:text=In%20the%20simplest%20terms%2C%20virtual,it%20to%20the%20real%20system>
8. <https://virtualcommissioning.com/virtual-commissioning-making-the-case/>
9. [www.automazioneplus.it](http://www.automazioneplus.it) pubblicazione sulla Rivista automazione plus uscita di novembre-dicembre 2022
10. <https://blog.softecspa.com/applicazioni-e-vantaggi-realt%C3%A0-virtuale-industria-4-0>
11. <https://it.mathworks.com/discovery/digital-twin.html>
12. CHAD JACKSON in: <https://virtualcommissioning.com/from-planning-to-operation-use-cases-for-the-digital-twin/>
13. CHARLOTTE TURNBULL in <https://virtualcommissioning.com/top-5-benefits-of-digital-twins/>
14. CHAD JACKSON in: <https://virtualcommissioning.com/from-planning-to-operation-use-cases-for-the-digital-twin/>
15. GRAHAM JACKSON in <https://virtualcommissioning.com/types-of-digital-twins-finding-your-fit/>
16. <https://www.siemens.com/global/en/markets/pharmaceutical-life-science-industries/pharma-industry/focus-topics/digital-twin.html>
17. CHAD JACKSON in <https://virtualcommissioning.com/ai-and-digital-twins-for-smart-manufacturing/>

18. <https://www.siemens.com/global/en/products/automation/industry-software/gproms-digital-process-design-and-operations/digital-twin-for-sustainability.html>
19. CHAD JACKSON in: <https://virtualcommissioning.com/the-blurring-line-between-virtual-commissioning-and-digital-twins/>
20. CHAD JACKSON in: <https://virtualcommissioning.com/what-is-a-digital-twin-for-virtual-commissioning/>
21. CHAD JACKSON in: <https://virtualcommissioning.com/the-role-of-a-component-library-in-virtual-commissioning/>
22. CHAD JACKSON in: <https://virtualcommissioning.com/what-is-fmi-how-is-it-related-to-virtual-commissioning/>
23. CHAD JACKSON in: <https://virtualcommissioning.com/digital-twins-of-production-systems-1d-3d-what-is-the-best-fit/>

## 9. INDICE DELLE FIGURE

Figura 1. Differenza tra messa in servizio fisica e digitale.....	7
Figura 2. Rappresentazione grafica di come si giunge al Virtual Commissioning .....	10
Figura 3. Esempio di utilizzo degli strumenti di RV in ambito industriale.....	16
Figura 4. Esempio dell'utilizzo dei caschi con sensori VR.....	17
Figura 5. Caratteristiche principali dei tre tipi di digital twin .....	22
Figura 6. Simulazione virtuale di una macchina .....	24
Figura 7. L'app Classification learner è usata per testare e validare i modelli (MATLAB) .....	26
Figura 8. Intelligenza artificiale e digital twin.....	27
Figura 9. Esempio di FMI su un'autovettura elettrica .....	36
Figura 10. Rappresentazione di simulazione 1D e 3D in diversi ambiti .....	38