

POLITECNICO DI TORINO

Collegio di Ingegneria meccanica, aerospaziale, dell'autoveicolo e
della produzione

**Corso di Laurea Magistrale
in Ingegneria della Produzione Industriale e
dell'Innovazione Tecnologica**

Tesi di Laurea Magistrale

Simulazione DES: dal digital twin al virtual commissioning

Vehicles loop



Relatori

G. Perboli
M. Rosano

Candidato

Ilaria Meinardi

Luglio 2019

Ringraziamenti

Al termine del percorso universitario vorrei ringraziare tutti coloro che in questi cinque anni hanno contribuito alla mia crescita personale, didattica e professionale.

Desidero ringraziare SimTec per l'opportunità di svolgere il tirocinio e tutti i colleghi per la disponibilità e la collaborazione durante la realizzazione del progetto.

Ringrazio i miei genitori e la mia famiglia che da sempre hanno creduto in me e mi hanno sostenuta, permettendomi di arrivare fin qui.

Infine, vorrei ringraziare anche tutti gli amici e i compagni di corso che sono stati presenti al momento di riconoscere gli errori e di festeggiare i successi.

Indice

Introduzione	8
Origine e motivazione	9
Finalità e scopo	9
Struttura e organizzazione	10
1 La Quarta Rivoluzione Industriale	12
1.1 Impatti e conseguenze delle rivoluzioni industriali	13
2 Simulazione e organizzazione	17
2.1 La simulazione	18
2.1.1 Applicazioni e benefici	19
2.1.2 Verifica e Validazione	20
2.2 Il Digital Twin	22
2.2.1 Di cosa si tratta	22
2.2.2 Evoluzione del Digital Twin	25
2.2.2.1 Cenni storici	25
2.2.2.2 Situazione attuale e sviluppi futuri	27
2.2.3 Applicazioni	30
2.2.4 Vantaggi	32
2.3 Il virtual commissioning	34
2.3.1 Contestualizzazione	34
2.3.2 Di cosa si tratta	37
2.3.3 Tipologie di VC	38
2.3.4 Benefici	39
2.4 Conclusione	40

3	L'azienda	42
3.1	Applicazioni.....	43
4	Simulazione di flusso	46
4.1	Simulazione a eventi discreti	48
4.1.1	Definizioni	49
4.1.2	Esempio	51
5	Il progetto di tesi.....	54
5.1	Introduzione	54
5.1.1	Il magazzino.....	55
5.2	Specifiche di progetto	61
5.2.1	Logiche di funzionamento	63
5.3	Costruzione del modello	64
5.3.1	Fase 1 – Lista missioni.....	64
5.3.2	Fase 2 – Aumento della complessità del modello.....	72
5.3.3	Fase 3 – Statistiche	75
5.3.4	Fase 4 – Adattamento a differenti layout.....	77
5.3.5	Fase 5 – Interfaccia utente	82
5.4	Validazione del modello	88
5.4.1	Dati di input	90
5.4.2	Dati di output/Analisi dei risultati	93
5.4.2.1	Scenario A	93
5.4.2.2	Scenario B	95
5.4.3	La massima produttività del sistema.....	97
5.5	Sviluppi futuri.....	100
6	Conclusioni.....	102
7	Bibliografia – Referenze.....	105

Indice delle figure

Figura 1 - Le rivoluzioni industriali.....	15
Figura 2 - Relazione tra validazione e verifica.....	21
Figura 3 - Rappresentazione dei gemelli fisico e reale.....	23
Figura 4 - Prima rappresentazione del digital twin.....	26
Figura 5 - Hype Cycle delle tecnologie emergenti (2018).....	28
Figura 6 - Evoluzione del digital Twin.....	29
Figura 7 - Fasi principali della realizzazione di un'opera.....	34
Figura 8 - Existence and detection of nonconformities during PLM.....	36
Figura 9 - Confronto fasi di realizzazione di un'opera senza (sopra) e con (sotto) il virtual commissioning.....	37
Figura 10 - Differenza tra le simulazioni HIL e SIL.....	39
Figura 11 - Rappresentazione di un sistema con diagramma a blocchi.....	49
Figura 12 - Diagramma a blocchi del sistema considerato.....	51
Figura 13 - Grafo delle transizioni di Markov.....	52
Figura 14 - Andamento tipico di sistema ad eventi discreti.....	53
Figura 15 - Aree funzionali di un magazzino.....	56
Figura 16 - Magazzino intensivo con traslo elevatore e baia di interfaccia.....	58
Figura 17 - Baie di interfaccia di un magazzino automatizzato.....	59

Figura 18 - Raffigurazione di un Rushmover	60
Figura 19 - Situazione iniziale del progetto	62
Figura 20 - Creazione di un'entità sulla stazione "INBOUND_1"	66
Figura 21 - Scarico dell'entità sulla baia "W_IN_1"	69
Figura 22 – Rappresentazione del modello al termine della prima fase	71
Figura 23 - Inserimento di due navette nel circuito	72
Figura 24 - Rappresentazione di una track con stazione e sensore	78
Figura 25 - Interfaccia utente	84
Figura 26 - Callback Arguments	87
Figura 27 - Rappresentazione in scala del magazzino	89
Figura 28 - Rappresentazione dello scenario da realizzare	91
Figura 29 – Confronto tra i due scenari da realizzare	93
Figura 30 - Scenario da realizzare	98

Indice dei metodi

Metodo 1 – "Init"	65
Metodo 2 - "Sensore per carico"	67
Metodo 3 - "Sensore per scarico"	68
Metodo 4 - "Carico"	70
Metodo 5 - "Scarico"	71
Metodo 6 - "OnDistance"	73
Metodo 7 - "InizioCurva"	74
Metodo 8 - "FineCurva"	74
Metodo 9 - "AggiornaStatistiche"	76
Metodo 10 - "OnInteval" del generatore	77
Metodo 11 - "OnDragDrop" – parte 1	80
Metodo 12 - "OnDragDrop" – parte 2	81
Metodo 13 - "OnDragDrop" – parte 3	81
Metodo 14 - "OnDragDrop" – parte 4	82
Metodo 15 - "Callback" – parte 1	85
Metodo 16 - "Callback" – parte 2	85
Metodo 17 - "Callback" – parte 3	86

Indice delle tabelle

Tabella 1 - Esempio lista missioni.....	65
Tabella 2 - Segmenti della Track.....	79
Tabella 3 - "PosizionaSensori"	79
Tabella 4 - Caratteristiche delle navette	91
Tabella 5 - Scenario A: Output di simulazione.....	94
Tabella 6 - Scenario B: Output di simulazione - parte 1	95
Tabella 7 - Scenario B: Output di simulazione - parte 2	96
Tabella 8 - Output di simulazione con 9 navette	99

Introduzione

L'automazione industriale e le più recenti innovazioni tecnologiche hanno condotto a standard qualitativi sempre più elevati e a tempi di produzione sempre minori.

I clienti vogliono avere la possibilità di personalizzare il prodotto, il cui ciclo di vita diventa sempre più breve e, al fine di mantenere la propria posizione competitiva, ogni azienda deve essere flessibile e potersi adattare velocemente ad un mercato in continua evoluzione.

Questi trend hanno condotto ad un progressivo aumento della complessità dei sistemi di produzione e della gestione degli stessi.

Per quanto riguarda la progettazione di un sistema di produzione, di un impianto, di un magazzino o di un sistema di movimentazione, la verifica delle prestazioni dello stesso avviene durante la messa in servizio, quando ormai l'impianto è già stato costruito. In questa fase vengono individuati tutti i problemi e le criticità sia a livello strategico che processuale.

In questo contesto si colloca la simulazione, considerata ormai uno strumento indispensabile per lo studio e l'analisi dei sistemi complessi.

Origine e motivazione

Grazie al tirocinio svolto presso l'azienda SimTec ho avuto modo, attraverso la simulazione, di modellare sistemi reali al fine di validarne layout e tempo ciclo, individuando le fasi più critiche e proponendo azioni puntuali di miglioramento.

Durante il progetto formativo ho potuto lavorare su progetti diversi tra cui il dimensionamento di pallet e sistemi di movimentazione necessari al raggiungimento del target, la risoluzione di problemi logistici legati al numero e alla posizione delle stazioni di ricarica della batteria degli AGV, la validazione di diversi mix produttivi al fine di raggiungere il livello di efficienza desiderato, la creazione di diversi algoritmi per l'inserimento e l'estrazione di prodotti da un magazzino.

In tutti questi casi la simulazione è stata fondamentale poiché ha permesso di individuare tutti gli errori e le approssimazioni effettuati durante la precedente analisi statica.

In molti di questi casi, infatti, ci si ritrovava con sistemi sottodimensionati, che non potevano quindi raggiungere il target, o viceversa, con sistemi sovradimensionati in cui il traffico e altri errori riducevano notevolmente l'efficienza totale del sistema.

Finalità e scopo

Lo scopo di questa tesi è quello definire i termini “simulazione”, “digital twin” e “virtual commissioning”, spesso non conosciuti e confusi.

Inoltre, questo progetto di tesi si pone come obiettivo quello di riportare gli step necessari alla costruzione di un modello di simulazione e alla sua successiva analisi.

Verrà analizzato uno dei progetti ai quali ho potuto collaborare durante il periodo di tirocinio. Tra i tanti ai quali ho partecipato ho scelto questo poiché, grazie alla simulazione, il committente ha potuto realizzare di aver commesso errori nel dimensionamento del sistema di movimentazione.

Si partirà quindi con la costruzione del modello e la riproduzione di un caso reale, per concludere con l'analisi degli output di simulazione.

Struttura e organizzazione

Al fine di agevolare la comprensione del caso studio, esso verrà introdotto solamente dopo aver descritto il contesto in cui esso va ad inserirsi. La struttura della trattazione risulta quindi complessa.

Il documento si apre con un quadro generale delle innovazioni introdotte dalla Quarta Rivoluzione Industriale con gli impatti e le conseguenze che ne derivano. In questo primo capitolo si analizzerà come esse andranno ad inserirsi in un contesto aziendale, integrandosi con i processi e con le funzioni aziendali.

Nel secondo capitolo viene descritta la simulazione, con i benefici che ne derivano e di come essa si inserisce in un contesto manifatturiero. In questo capitolo verranno anche introdotti il digital twin, indispensabile per la creazione di un modello di simulazione, e il virtual commissioning, che ne rappresenta lo sviluppo futuro e l'integrazione con il mondo reale.

Nel terzo capitolo verrà presentata brevemente l'azienda presso la quale ho svolto il tirocinio e il settore in cui opera.

Il quarto capitolo è dedicato alla simulazione di flusso. Attraverso un esempio, vengono descritti il funzionamento, i concetti e la terminologia alla base della simulazione di flusso.

Infine, il progetto di tesi verrà presentato nel quinto capitolo. Questo capitolo può essere suddiviso in quattro parti: la prima parte sarà di introduzione al caso studio e sarà seguita da un paragrafo dedicato alle specifiche di progetto; la seconda parte sarà dedicata alla costruzione del modello, mostrando le fasi che hanno portato alla sua creazione; nella terza parte si effettua la validazione del modello e si analizzeranno i risultati. L'elaborato si concluderà con gli sviluppi futuri del progetto.

1 La Quarta Rivoluzione Industriale

Realtà aumentata, intelligenza artificiale, additive manufacturing, Internet of Things e machine learning sono i temi di cui più si sente parlare al giorno d'oggi.

In realtà si tratta della Quarta Rivoluzione Industriale, una rivoluzione che si sta diffondendo molto velocemente e che avrà un impatto diretto sul nostro modo di lavorare creando nuove opportunità di mercato e di crescita, nuovi prodotti, servizi, modelli e strategie.

Queste tendenze porteranno a un cambiamento del modo di produrre, di pensare e ad una nuova concezione dell'industria. Le nuove tecnologie stanno entrando molto velocemente a far parte della nostra vita quotidiana, influenzando le procedure di routine delle aziende a cui verranno chiesti prodotti e servizi sempre più complessi e più tecnologici.

Pertanto, le aziende, soprattutto quelle che non riescono ad adattarsi abbastanza velocemente a questi cambiamenti, rischiano di rimanere indietro e di non essere competitive in un mercato in rapida evoluzione.

Per questo motivo molte aziende vedono con diffidenza l'innovazione: per queste aziende l'innovazione minaccia la stabilità di un'organizzazione aziendale consolidata che ha permesso crescita, sviluppo e creazione di profitti.

1.1 Impatti e conseguenze delle rivoluzioni industriali

La quarta rivoluzione industriale è stata preceduta da altre tre rivoluzioni.

Anche in questo caso, come nel caso delle rivoluzioni precedenti, ci saranno conseguenze riguardanti l'ambiente di lavoro, il modo di produrre e l'organizzazione della società.

La *Prima Rivoluzione Industriale*, avvenuta nella seconda metà del '700, ha introdotto numerose innovazioni tecnologiche nei settori tessile e siderurgico. Il simbolo caratteristico della Prima Rivoluzione industriale è proprio la macchina a vapore che ha trasformato il modo lavorare: si sono diffuse numerose fabbriche nelle città con il conseguente trasferimento delle persone nei centri urbani. Per quanto riguarda l'organizzazione sociale, nasce una nuova classe: la classe operaia.

Tra il XIX e il XX secolo si ha un periodo di crescita economica e produttiva conosciuto come *Seconda Rivoluzione Industriale*. Grazie all'introduzione del petrolio e di altre fonti energetiche, i consumi, le abitudini e i comportamenti delle persone sono cambiati radicalmente. Si assiste, per esempio, alla creazione della prima automobile, alla proiezione del primo film, il primo volo aereo, il primo telefono o il primo frigorifero. In questi anni si diffondono le società per azioni e nascono nuove figure professionali quali quella dell'ingegnere, del medico e del fisico. Si diffondono la produzione di massa e la catena di montaggio.

La *Terza Rivoluzione Industriale* si diffuse negli anni successivi alla Seconda guerra mondiale e anche in questo caso si ha un periodo di crescita e benessere, favorito proprio dalla produzione elevata di armi. Oltre ai cambiamenti riguardanti il modo di produrre dovuti all'introduzione dei computer, dei robot,

dell'automazione, della *lean production* e del sistema JIT¹ si capisce l'importanza di alcune attività complementari alla produzione quali le risorse umane, l'innovazione tecnologica e scientifica e la R&S². Grazie alle nuove possibilità di spostarsi sempre più facilmente e velocemente, nascono imprese internazionali con una forte tendenza alla decentralizzazione e alla globalizzazione. Per quanto riguarda la società, invece, essa diventa sempre più interculturale e multietnica, con stili di vita e consumi abbastanza uniformi.

Quella che è in atto oggi è la *Quarta Rivoluzione Industriale*, conosciuta anche come Industria 4.0. Sebbene ancora non ci sia una descrizione definitiva del fenomeno, viene descritta come la rivoluzione che porterà a una produzione totalmente automatizzata ed interconnessa.

Le innovazioni introdotte avranno impatti su:

- gestione e archiviazione di quantità di dati sempre maggiori che dovranno essere accessibili (*Big Data, Open Data e Cloud Computing*);
- interconnessione e comunicazione tra gli oggetti: questa sarà ottenuta grazie all'*Internet of Things*, tramite opportuni sensori;
- tecniche e algoritmi che analizzano i dati e le informazioni (*Analytics*);
- sviluppo delle tecniche di intelligenza artificiale, quale il *machine learning* ossia l'apprendimento delle macchine. Ad oggi solo l'1% dei dati raccolti dalle imprese viene utilizzato dalle aziende stesse che ignorano il vantaggio che deriverebbe dalla loro analisi;
- interazioni uomo-macchina, che sono sempre più frequenti attraverso l'uso di dispositivi touch e della realtà aumentata. Si diffondono i *Cobot*³, robot

¹ Just in time

² Ricerca e sviluppo

³ Collaborative robot

in grado di lavorare direttamente con i dipendenti di un'azienda e di interagire con essi;

- passaggio dal digitale al reale, permesso dall'*additive manufacturing*, dalla robotica e dalle interazioni machine-to-machine.

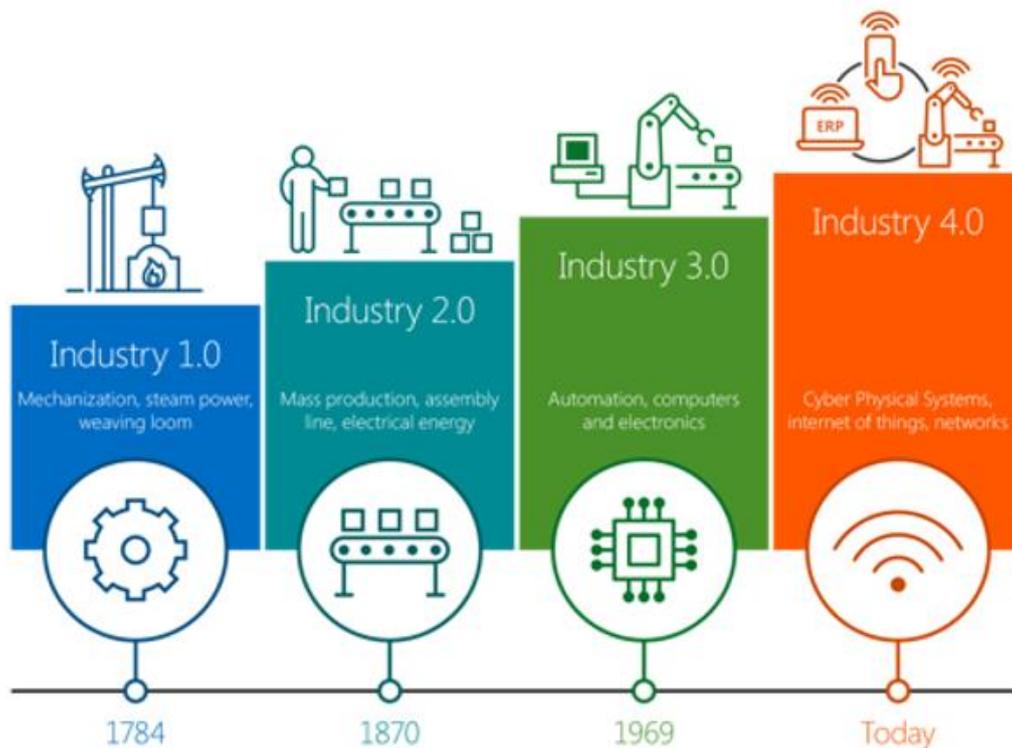


Figura 1 - Le rivoluzioni industriali⁴

La Quarta Rivoluzione Industriale fatica a diffondersi perché, come è avvenuto per le altre rivoluzioni, comporta un cambiamento radicale della società e del rapporto con il lavoro. La paura è che i robot e le macchine, sempre più sofisticati e precisi, andranno a sostituire l'uomo.

⁴ (Morgan, 2018)

In realtà, se da una parte alcune mansioni non saranno più necessarie, dall'altra parte ne verranno create di nuove. Infatti, la digitalizzazione delle imprese, oltre a rendere necessarie nuove figure professionali, aumenta la produttività portando all'espansione dell'impresa stessa e dell'economia. In questo modo più figure professionali saranno necessarie in tutti i settori.

“Nell'area Amministrazione, marketing e vendite emergono abilità legate a social network, Seo copywriting o gestione dei blog: un segnale che anche le aziende industriali stanno cercando di valorizzare le nuove tecnologie. Nell'area Progettazione, produzione automatica e logistica prevalgono security e connettività, mentre nell'area Sistemi informativi le skill più gettonate ruotano attorno alla data analysis: controllo e gestione dei dati nell'Industria 4.0 sono fondamentali”⁵.

Per concludere, le aziende che saranno in grado di portare l'innovazione all'interno dei processi e delle funzioni aziendali, investendo nella tecnologia e nella collaborazione tra uomini e robot, saranno anche quelle che riusciranno a trarre i maggiori vantaggi competitivi in un mercato in continua evoluzione.

⁵ (Nuove professioni da Industria 4.0, 2016)

2 Simulazione e organizzazione

L'obiettivo che si pone ogni azienda è quello di fornire al cliente un prodotto personalizzato, con un elevato livello di qualità al minimo costo e con rapidi tempi di consegna.

Per avere un vantaggio competitivo rispetto ai concorrenti, ogni azienda deve essere flessibile e sapersi adattare in modo tempestivo ai cambiamenti del mercato, rispettando il time-to-market.

Allo stesso tempo, però, si tende verso il miglioramento continuo: si è alla costante ricerca di elevati livelli di qualità ed efficienza in modo da ridurre gli sprechi, i tempi e, più in generale, i costi legati alle funzioni aziendali.

Questa ambizione comporta la costante riprogettazione dell'organizzazione, la reingegnerizzazione dei processi e la ridefinizione di competenze e risorse, aumentando sempre più la complessità del sistema.

Inoltre, a causa dei numerosi fattori di variabilità e dell'evoluzione continua del mercato, diventa sempre più complesso prendere una decisione, valutare i diversi scenari e prevedere quale sarà il comportamento del sistema nel caso in cui ci sia una variazione delle variabili in gioco.

I sistemi di produzione diventano sempre più complessi rendendone difficile il dimensionamento, il bilanciamento e l'individuazione dei suoi limiti.

Per far fronte a questa crescente complessità dei sistemi di produzione è necessario sviluppare nuove procedure di controllo, schemi di ottimizzazione, tecniche di analisi e strumenti di progettazione. È proprio a questo proposito che le aziende potrebbero trarre beneficio dall'uso delle tecniche di simulazione.

2.1 La simulazione

Prima di definire il termine simulazione è necessario dare una definizione di sistema. Un sistema viene definito come “insieme di enti astratti o concettuali strettamente coordinati, anche se non necessariamente dipendenti uno dall'altro”⁶ o come “insieme di elementi coordinati tra loro in una unità funzionale”⁷. Da queste definizioni emergono le caratteristiche principali di un sistema: la presenza di elementi coordinati e il fatto che questi elementi non comprendono unicamente enti reali o fisici ma possono essere anche astratti.

Per lo studio e l'analisi dei sistemi, con la digital factory⁸ è stata introdotta la simulazione.

Simulare significa riprodurre o imitare una condizione, un evento o una situazione, sia reale che probabile, per individuarne la causa o prevederne il comportamento futuro o stimare gli effetti di alcuni fattori in determinate circostanze. Il beneficio principale che deriva dall'uso di un modello di simulazione è la possibilità di poter

⁶ (Definizione sistema, n.d.)

⁷ (Definizione sistema, n.d.)

⁸ Il termine digital factory fa riferimento al processo di integrazione di tecnologie e strumenti digitali all'interno di sistemi manifatturieri al fine di migliorarne il controllo e le performance.

stimare e valutare numerose situazioni senza essere direttamente esposti a rischi o a pericoli.

Tuttavia, si tratta comunque di semplificazioni della realtà in quanto includono soltanto alcuni fattori del mondo reale che potrebbero avere effetti sul sistema di studio.

Negli ultimi anni, l'interesse per le tecniche di simulazione è aumentato notevolmente grazie agli esiti positivi ottenuti nei campi dell'aviazione civile e spaziale e nella progettazione di centrali nucleari e chimiche. Successivamente si sono diffuse anche in altri campi dove si è sottoposti ad elevati livelli di rischio. Un esempio potrebbe essere il campo medico dove si richiede un alto livello di affidabilità e la probabilità di errore deve essere minima.

In generale, gli aspetti principali per cui la simulazione viene utilizzata possono essere riassunti nella possibilità di:

- rappresentare sistemi reali anche molto complessi;
- racchiudere nel modello sorgenti di variabilità e incertezza;
- poter studiare anche situazioni che non potrebbero essere analizzate in un ambiente reale.

Tuttavia, in riferimento agli output ottenuti da un modello di simulazione, essi forniscono solamente indicazioni riguardanti il comportamento del sistema ma non risposte "esatte".

2.1.1 Applicazioni e benefici

La realizzazione di un modello è una fase molto delicata perché se da una parte si vuole un modello preciso e accurato dal punto di vista dell'analisi dei risultati, dall'altra si cerca di semplificarlo al massimo nella fase di costruzione. Pertanto, è

necessario raggiungere un buon compromesso tra queste due tendenze per salvaguardare la significatività del modello. Un buon modello deve essere sufficientemente rappresentativo anche se non completamente fedele alla realtà.

I benefici ottenuti dalla costruzione di un modello di simulazione si possono osservare in tutte le fasi del ciclo di vita di un sistema manifatturiero o di un prodotto.

Nelle fasi di pianificazione e implementazione la simulazione rappresenta uno strumento utile per migliorare il layout, analizzare colli di bottiglia e throughput permettendo di valutare diverse varianti del processo.

Anche durante le fasi operative, avere un modello di simulazione a disposizione consente di accertarsi di poter raggiungere il target validando in questo modo lo scheduling e i turni dei lavoratori ed eventualmente di ottimizzare il processo.

2.1.2 Verifica e Validazione

In un contesto ingegneristico e di simulazione, per assicurarsi che un prodotto, servizio o sistema rispetti le specifiche si parla di *Verifica e Validazione*.

Con verifica si intende la valutazione del prodotto in fase di sviluppo per determinare i requisiti specificati per quella fase sono soddisfatti. In questa fase non si valuta il prodotto vero e proprio ma le specifiche, i piani, i disegni e le procedure.

Invece, con validazione si fa riferimento al prodotto finito e si valuta se i requisiti e le specifiche sono effettivamente rispettati. La validazione serve per dimostrare che il prodotto finito riesca a fare ciò per cui è stato pensato e progettato.

In riferimento alla simulazione, in fase di validazione si controlla, per esempio, che il modello risolva i giusti problemi, sia basato su assunzioni precise e che segua le

opportune leggi fisiche, assicurando la correttezza e l'accuratezza del risultato. Il modello validato quindi risulta essere applicabile solamente nello specifico contesto per cui è stato creato.

La verifica del modello, invece, permette di individuare errori la cui correzione non andrà a modificare le specifiche ma solamente il modo in cui vengono implementate. Si tratta per esempio di errori di programmazione per assicurare che il modello soddisfi i requisiti convalidati e che si comporti come previsto.

In sintesi, il processo di V&V⁹ permette di confrontare ciò che fa il modello con il comportamento del sistema reale (validazione) e con ciò che il modellista aveva previsto (verifica).

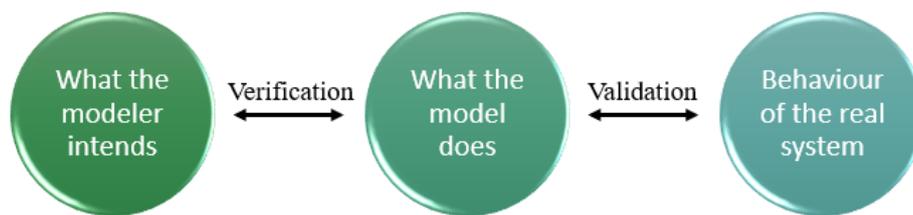


Figura 2 - Relazione tra validazione e verifica

⁹ Validazione e verifica

2.2 Il Digital Twin

2.2.1 Di cosa si tratta

Alla base della simulazione si ha quindi un modello che descrive tutte le caratteristiche e i comportamenti del sistema e reagisce esattamente nello stesso modo del sistema reale permettendone lo studio e l'analisi.

I progressi nel campo della simulazione, insieme alle innovazioni tecnologiche introdotte con la Quarta Rivoluzione Industriale, pongono le aziende di fronte ad una svolta importante: non è più necessario realizzare costosi prototipi fisici per testare le performance di un oggetto ma lo si può fare a livello virtuale attraverso l'uso di un digital twin, ormai considerati uno strumento indispensabile nei progetti di innovazione e IoT¹⁰ di una digital factory.

Si tratta della creazione di un gemello che rappresenta virtualmente una fabbrica, un impianto, un prodotto o un servizio con una corrispondenza tra attributi fisici e digitali.

È una copia digitale che può essere usata in ogni area del settore manifatturiero, soprattutto nella fase di prototipazione, e si comporta come un manichino, una rappresentazione fittizia che permette ad ingegneri, tecnici o manager di analizzare virtualmente nuovi scenari e strategie prima di implementarli nel processo di produzione, anticipando l'insorgere di eventuali problematiche ad esso connesse.

Come si può immaginare, i benefici che si trarrebbero dall'applicazione di digital twin nell'industria sono molteplici: ottimizzazione dinamica, manutenzione predittiva, monitoraggio di attrezzature e componenti, design e sviluppo di prodotti e molti altri.

¹⁰ Internet of things



Figura 3 - Rappresentazione dei gemelli fisico e reale¹¹

Lo sviluppo del digital twin di un oggetto o sistema parte da un modello CAD¹² usato per descrivere l'aspetto esteriore dell'entità fisica grazie alle informazioni su dimensioni e materiali da usare in costruzione. Al modello CAD vengono associati

¹¹ (Koon, 2019)

¹² Computer-Aided Design. Si tratta di “progettazione assistita dall'elaboratore”. Nel settore informatico, quando si parla di CAD si fa riferimento all'utilizzo di software di grafica per supportare le fasi di progettazione, di design dei componenti e creazione di documentazione attraverso la creazione di modelli 3D dei componenti.

dei sensori, collegati direttamente all'entità fisica, utilizzati per controllarne la performance durante il product lifecycle. I sensori raccolgono ed elaborano dati real-time per aggiornare lo stato dell'entità in questione.

Questi modelli possono essere combinati con altri sistemi IoT, come ad esempio la realtà aumentata, e in questo modo permettono di aumentare ulteriormente il potenziale del digital twin, facilitando la visualizzazione dei dati.

Il Direttore di Innovazione di GE Digital afferma “il digital twin è una sorta di modello in vivo di un impianto o di una linea di produzione, realizzato dall'incrocio tra i dati reali di funzionamento e i disegni CAD e digitali serviti per la progettazione. Il digital twin consente di costruire una copia virtuale dell'impianto reale (ma anche di una singola macchina) in grado di replicare in tutto e per tutto il funzionamento reale o di verificarne tutte le possibili alternative”.¹³

Il digital twin rappresenta, quindi, una soluzione innovativa che permette alle aziende di analizzare e ottimizzare le performance dei loro processi o prodotti in condizioni operative reali, simulando interventi e operazioni e fornendo previsioni affidabili sulle prestazioni e sul funzionamento prima di procedere alla realizzazione fisica.

Grazie all'uso di digital twin, i processi di progettazione, sviluppo e produzione cambiano, diventano più rapidi dando la possibilità di effettuare simulazioni e valutare alternative che altrimenti sarebbero dispendiose in termini di tempo e complicate, scelta non sempre compatibile con il time-to-market.

Per esempio, un'azienda che ha introdotto la creazione di digital twin nella sua produzione è *Boeing*. Questa azienda, a partire dai miglioramenti ottenuti con il modello 777, punta a digitalizzare tutto il sistema di engineering e sviluppo,

¹³ (Plana, 2017)

comprendendo tutta la supply chain fino al cliente finale. In questo caso, il digital twin analizza dati su altitudine e velocità, raccolti direttamente dal gemello fisico, e li converte in informazioni utili per i piloti nella cabina di guida, aiutando l'azienda a ridurre costi e tempi di sviluppo di software per la raccolta e l'elaborazione dei dati.

Le informazioni vengono aggiornate in tempo quasi reale e, oltre a simulare la situazione operativa da parte del digital twin, consentono di rilevare difformità di funzionamento tra l'entità virtuale e quella fisica permettendo di intervenire tempestivamente.

2.2.2 Evoluzione del Digital Twin

2.2.2.1 Cenni storici

Il concetto di digital twin risale al 2002 quando per la prima volta viene nominato durante una presentazione di Michael Grieves, insegnante presso l'università del Michigan.

Durante la presentazione del PLM¹⁴, facendo riferimento al digital twin, furono introdotte due dimensioni: lo spazio reale e quello virtuale, connessi da un flusso continuo di dati.

¹⁴ Product lifecycle management. Si tratta di un approccio strategico per la gestione di tutte le informazioni, risorse e processi che intervengono nelle varie fasi del ciclo di vita di un prodotto o servizio, dall'ideazione fino al declino.

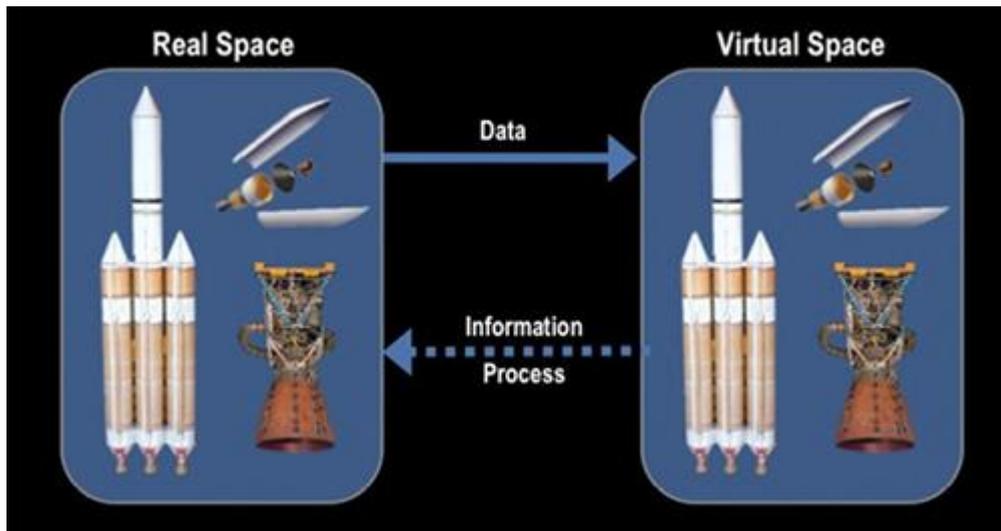


Figura 4 - Prima rappresentazione del digital twin¹⁵

Anche se comunemente si fa risalire al 2002, in realtà la prima allusione al digital twin è precedente. Già negli anni '60, infatti, la NASA aveva cercato di riprodurre alcuni sistemi dello spazio.

Nel 1970, la chiave dell'esito della celebre missione di soccorso dell'Apollo 13, missione spaziale che sarebbe dovuta sbarcare sulla Luna, fu proprio la presenza sulla Terra di un modello digitale gemello della navicella. Come è noto, ci fu un'esplosione che danneggiò molti equipaggiamenti che impedì l'allunaggio e rese difficoltoso il rientro sulla Terra. Per consentire il ritorno sulla Terra, ingegneri e tecnici dovettero testare soluzioni e risolvere problemi tecnici da oltre 300.000 km di distanza. Per valutare e testare l'efficacia di diverse soluzioni usarono proprio un digital twin.

Chiaramente, i gemelli virtuali si sono evoluti e ad oggi le simulazioni avvengono prevalentemente in ambiente virtuale.

¹⁵ (Tobe, 2016)

2.2.2.2 *Situazione attuale e sviluppi futuri*

Nonostante il concetto di digital twin sia conosciuto già dal 2002, solo recentemente, e più precisamente nel 2017, è diventato mainstream, facendo crescere notevolmente il settore e le applicazioni. La sua diffusione è correlata al crescente sviluppo di dispositivi e applicazioni che sfruttano il potenziale dell'IoT e della sensoristica.

Nel 2018, la società di consulenza Gartner, inserisce il digital twin all'interno del suo *Hype Cycle*¹⁶ delle tecnologie emergenti.

Nel 2018 il digital twin si trova sul massimo della curva, nella sezione *Peak of Inflated Expectations*. A questo punto la prima fase di *Innesco della tecnologia*, in cui ancora non ci sono sul mercato prodotti utilizzabili e non si ha prova della validità della tecnologia, è stata superata. Il gemello virtuale è appena entrato nella seconda fase, quella del *picco delle aspettative esagerate*, in cui soltanto le imprese più "coraggiose" decidono di adottare la tecnologia, mentre molte altre, le più diffidenti, decidono di non rischiare.

Questa curva mostra come la tecnologia del gemello virtuale non si sia ancora diffusa pienamente e il percorso del digital twin per diventare la principale tendenza sul mercato ed entrare nell'*Altopiano della produttività* è ancora lungo.

¹⁶ L'Hype Cycle, letteralmente "Ciclo dell'esagerazione", è una metodologia introdotta dalla società di consulenza Gartner e rappresenta le fasi del ciclo di vita di una tecnologia. Le cinque fasi del ciclo di vita di una tecnologia, che ne rappresentano l'introduzione, la maturità, l'adozione e il declino sono: Technology Trigger, Peak of Inflated Expectations, Trough of Disillusionment, Slope of Enlightenment e, per ultima, Plateau of Productivity.

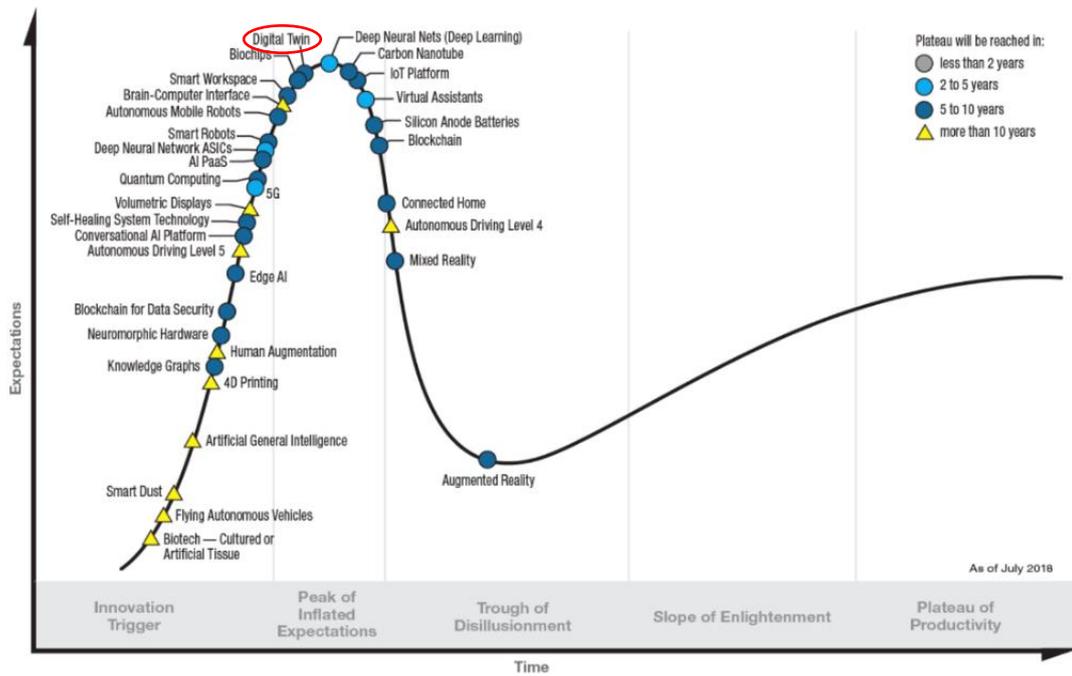


Figura 5 - Hype Cycle delle tecnologie emergenti (2018)¹⁷

L'introduzione e sviluppo del digital twin nel settore manifatturiero è stata lenta e la sua evoluzione si è articolata in quattro fasi.

¹⁷ (5 trend tecnologici seguire nel 2018, n.d.)

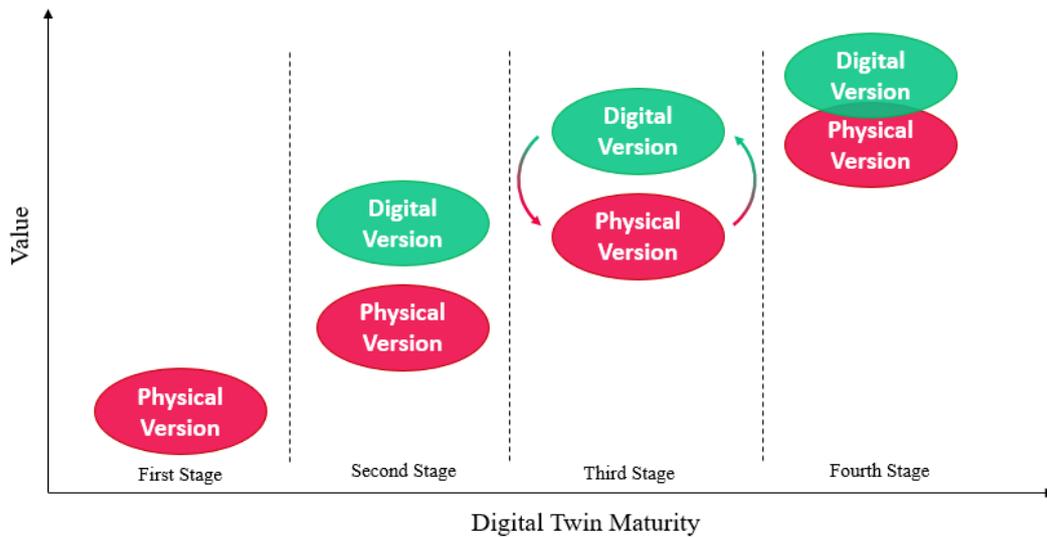


Figura 6 - Evoluzione del digital Twin

Nella prima fase esisteva soltanto la dimensione fisica di un processo manifatturiero, ovvero la versione fisica delle varie entità coinvolte.

Nella fase successiva, per migliorare le entità fisiche, vengono introdotte le versioni digitali, anche chiamate *Status Digital Twins*. Questi modelli, già diffusi da molti anni, non permettono di interagire con la realtà e per ottenere informazioni significative è necessario ricreare manualmente uno schema dell'ambiente fisico, operazione lunga, complessa e soprattutto non scalabile poiché non permette il confronto di scenari e richiede di essere aggiornata frequentemente in base ai più recenti dati a disposizione.

Nella terza fase le due versioni cominciano ad interagire e a scambiarsi informazioni. Nel settore manifatturiero vengono introdotti gli *Operational Digital Twins* che permettono di raccogliere un'elevata quantità di dati in tempo reale e di creare una base di dati utili per le analisi. Inoltre, a questi gemelli digitali vengono aggiunti modelli fisici di comportamento, facendoli diventare *Simulation Digital Twins* che permettono di riprodurre fedelmente un processo.

Infine, nell'ultima fase si ha ulteriore convergenza e interazione tra le due versioni fisica e digitale. Si realizza l'integrazione completa delle due dimensioni e il digital twin diventa il gemello predominante nella gestione.

La sfida del futuro sarà quella di usare il gemello virtuale per prendere decisioni in autonomia e controllare tutti i dispositivi e le apparecchiature connessi.

Attualmente ci si trova a ridosso della quarta fase. Il digital twin sta diventando oggetto di tendenza e rappresenta lo strumento fondamentale per l'implementazione di progetti IoT. Lo studio di Juniper Research (9 Aprile 2019) ha rivelato che i ricavi dovuti al digital twin raggiungeranno i 13 miliardi di dollari entro il 2023. Invece, la cifra stimata per il 2019 è di 9,8 miliardi di dollari, con una crescita annua del 35%.¹⁸

Lo stesso studio ha individuato le aziende che si posizionano ai primi posti in questo settore: General Electric, Siemens, IBM, PTC, Microsoft, Bosch.

Un altro studio individua quali sono i settori con i ricavi attesi maggiori: i settori dei trasporti, dell'energia e dei servizi. Si stima che entro il 2023 le cifre raggiungeranno 2,5 (trasporti) e 1,1 miliardi di dollari (energia e servizi).

2.2.3 Applicazioni

L'introduzione e l'uso del digital twin ha cambiato il modo di progettare, sviluppare e produrre, creando valore durante tutto il ciclo di vita del prodotto.

¹⁸ (Digital Twin revenues to reach \$13 billion by 2023, fuelled by AI & machine learning innovation, 2019)

Il digital twin virtuale può essere implementato in vari modi all'interno del settore manifatturiero e può essere riferito a un asset o risorsa specifica, a un'intera struttura o ad un singolo prodotto o componente nel campo.

I benefici derivanti dall'applicazione di un gemello virtuale sono molteplici e si possono raggruppare in tre gruppi principali:

- Design e prototipazione;
- Uso/applicazione sul campo;
- Prodotti futuri.

Il *design e la prototipazione* riguardano le prime fasi del ciclo di vita di un prodotto, prima della produzione vera e propria. In questo caso il beneficio di avere un digital twin sta nella possibilità di esaminare complessivamente i vari componenti e di verificare che siano adatti al compito che devono svolgere. Inoltre, in questa fase è possibile valutare strutture, forme e materiali alternativi e di testare i vari componenti anche da un punto di vista meccanico, elettrico e termico, riducendo l'incertezza in questa fase delicata per lo sviluppo del prodotto.

Per quanto riguarda *l'uso sul campo*, oltre a permettere di testare preventivamente l'integrazione con altri componenti, la presenza di un digital twin supporta l'identificazione e la risoluzione dei problemi, fornendo da remoto anche i dati più difficili da rilevare e sulle parti meno accessibili.

I dati raccolti, insieme ad algoritmi predittivi, consentono di stimare le condizioni dei vari componenti e di stimarne la vita utile, assicurando affidabilità e disponibilità attraverso il monitoraggio costante del prodotto.

Tutti i dati raccolti costituiscono un database che può essere sfruttato per lo sviluppo di prodotti futuri. Si stanno creando delle piattaforme capaci di raccogliere e memorizzare informazioni su guasti, usi, e performance dei prodotti nell'ottica di migliorare l'esperienza dei clienti futuri fornendo prodotti sempre migliori.

Come conseguenza si ha un cambiamento della relazione con il cliente.

Il cliente, in base all'uso che fa del prodotto, fornisce una serie di informazioni alle aziende e ai produttori che possono sfruttarle nell'ottica del miglioramento continuo e per la continua soddisfazione del cliente.

Viene introdotta una nuova idea di prodotto accompagnata da nuove forme di relazione lungo tutta la supply chain: un coinvolgimento del cliente finale sempre maggiore e la possibilità, anche per piccole aziende e start-up, di partecipare al miglioramento dell'esperienza percepita dal cliente, alla ricerca di nuovi vantaggi competitivi creando nuovi servizi supplementari o migliorando la performance di quelli esistenti. Si tenderà sempre più verso la MCM¹⁹.

2.2.4 Vantaggi

Avere il digital twin del proprio stabilimento, impianto o prodotto offre numerosi vantaggi. I più significativi sono:

- la possibilità di confrontare e valutare diversi scenari;
- il supporto al processo decisionale grazie alla presenza di dati e analisi;
- la raccolta di dati in tempo reale sul funzionamento di un prodotto direttamente nell'ambiente in cui esso verrà installato o utilizzato dal cliente finale;
- l'integrazione dei vari sistemi o processi tra di loro per avere una migliore visione di insieme, utile per il monitoraggio e il tracking dei componenti e del sistema;
- la risoluzione dei problemi di dispositivi e apparecchiature e assistenza remota per ridurre i tempi e i costi di riparazione;

¹⁹ Mass Customisation Manufacturing (letteralmente personalizzazione di massa). MCM fa riferimento alla produzione di beni e servizi personalizzati senza perdere l'efficienza della produzione di massa. In questo modo si garantiscono bassi costi di produzione e quindi di vendita.

- la capacità di controllare processi e sistemi complessi.

Questi vantaggi si possono sintetizzare in visualizzazione e collaborazione.

Il primo è la possibilità di selezionare e ordinare i dati in base alla rilevanza per trarne informazioni utili.

Il processo decisionale diventa sempre più complicato man mano che il processo si complica: l'aumento della quantità dei dati raccolti spesso crea confusione e rende difficile stabilire il piano d'azione.

Per esempio, in un ambiente manifatturiero il digital twin permette di creare schermate ibride utilizzando un mix di dati storici e attuali che possono essere ordinati e visualizzati in modi diversi per identificare le aree critiche e individuare le priorità.

Il secondo, invece, riguarda la distanza fisica dal processo che non costituisce più un ostacolo al corretto sviluppo del prodotto. Grazie alla presenza di un digital twin si ha una migliore conoscenza dei dettagli del processo che permette ad un set più ampio di progettisti, tecnici e ingegneri di dare il loro contributo portando alla creazione di prodotti o servizi più efficienti, risparmiando tempo e risorse nelle diverse fasi del ciclo di vita.

2.3 Il virtual commissioning

2.3.1 Contestualizzazione

Il Commissioning o messa in servizio sta ad indicare il processo in base al quale un'attrezzatura, una struttura o un impianto (completi, installati o quasi completi) vengono testati per verificarne il funzionamento, compatibilmente con le specifiche del progetto. In riferimento ad un impianto, in questa fase tutti i sottosistemi vengono messi insieme e connessi tra di loro per dar vita al sistema vero e proprio e verificarne la funzionalità. Si tratta di verificare e validare tutti i componenti e i sottoinsiemi, preventivamente assemblati, che costituiscono il sistema.

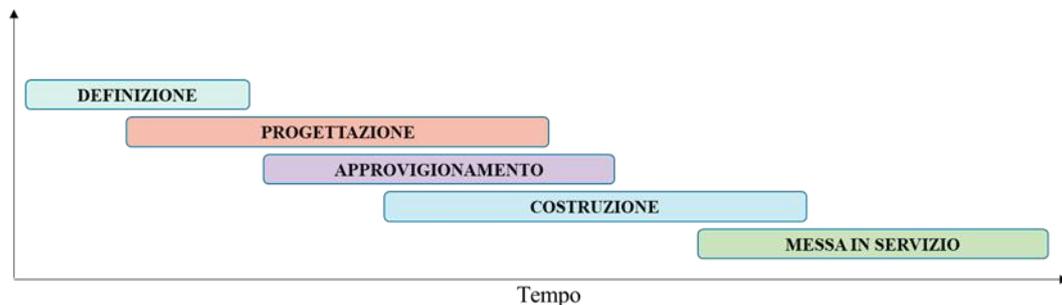


Figura 7 - Fasi principali della realizzazione di un'opera

Ci troviamo alla fine del ciclo di realizzazione di un'opera, prima della consegna del progetto, quando è necessario verificare l'affidabilità dei singoli componenti e che i sottosistemi siano stati correttamente assemblati. In questa fase è necessario eseguire test e regolazioni per controllarne l'integrità e la continuità.

I controlli da eseguire sono due tipi: il *Site Acceptance Test* (SAT) e il *Site Integration Test* (SIT).

Il primo riguarda la verifica dell'installazione e della documentazione e che il funzionamento dei singoli sistemi sia conforme alle specifiche di progetto. Questo

primo passo è un test funzionale e si occupa di controllare che il sistema non si sia danneggiato durante il trasporto o durante il montaggio in loco.

Il secondo test, come suggerisce il nome, verifica che l'integrazione dei vari sottosistemi sia avvenuta correttamente, che i vari componenti comunichino tra di loro correttamente e che il flusso di dati sia corretto. L'identificazione di eventuali errori può avvenire soltanto dopo il primo avvio della struttura quando si rilevano collegamenti mancanti o errori.

A seguito di questi test si ha una fase di correzione degli errori in modo da rendere il sistema disponibile, a norma e affidabile.

Nella fase di avvio, a causa di vincoli dovuti al tempo, spesso vengono testate soltanto le funzioni principali e, di conseguenza, vengono rilevati e corretti soltanto gli errori più facili da individuare o più frequenti. Gli altri errori, invece, non vengono identificati fino alla fase di produzione, causando un notevole aumento dei costi.

La maggior parte dei guasti sono individuati ed eliminati soltanto nelle fasi successive alla fabbricazione e all'assemblaggio con il rischio che il guasto venga individuato dal cliente stesso con un aumento dei costi di risoluzione del problema e conseguenze sull'immagine e sulla reputazione.

Il 75-80% delle non conformità hanno origine nelle prime fasi del ciclo di vita di un sistema. Ma queste vengono individuate e corrette solo successivamente con un aumento del costo di correzione. Infatti, l'80% delle modalità di fallimento vengono identificate soltanto dopo la produzione (Figura 8).

Per questo motivo le prime fasi del ciclo di vita del prodotto sono le più delicate se si vuole sviluppare un prodotto robusto sin dal principio.

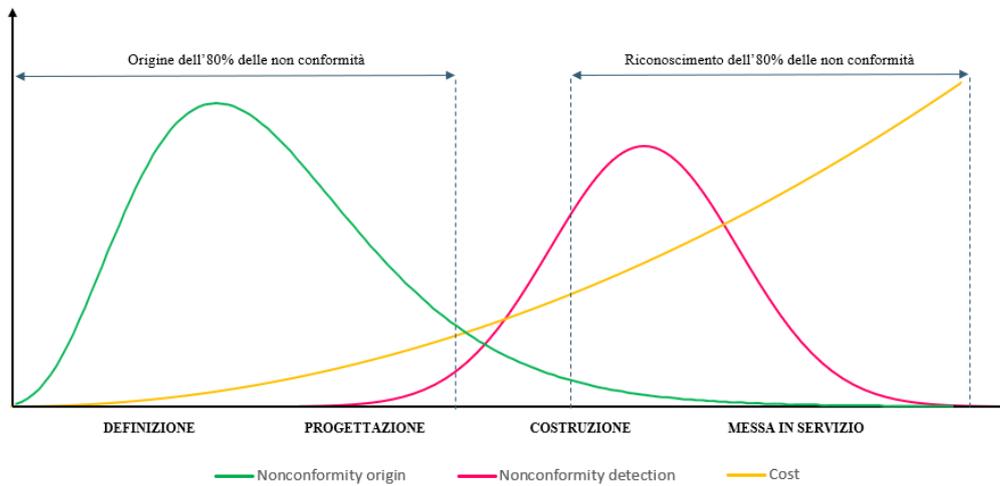


Figura 8 - Existence and detection of nonconformities during PLM ²⁰

L'obiettivo a cui si tende è quindi quello di cercare di eliminare gli errori già nelle prime fasi del product life-cycle.

Purtroppo, però, la tendenza attuale di avere sistemi sempre più flessibili e riconfigurabili, non è compatibile con quest'ottica e richiede sempre più spesso di ripetere la fase di messa in servizio. È in questo contesto che si colloca il Virtual Commissioning.

²⁰ (Product Life Cycle Risk Management, 2017)

2.3.2 Di cosa si tratta

In risposta a questi problemi nasce il Virtual Commissioning che si pone come obiettivo la verifica del sistema e dei relativi programmi di controllo attraverso i PLC²¹ prima della realizzazione.

Prima della fase di VC viene creato un modello di simulazione per validare le logiche da inserire nel sistema reale.

Lo scopo finale è quello di individuare e correggere gli errori il prima possibile.

Il VC permette di ridurre il tempo necessario alla realizzazione di un'opera e soprattutto la fase di *Messa in Servizio* si riduce notevolmente (Figura 9).

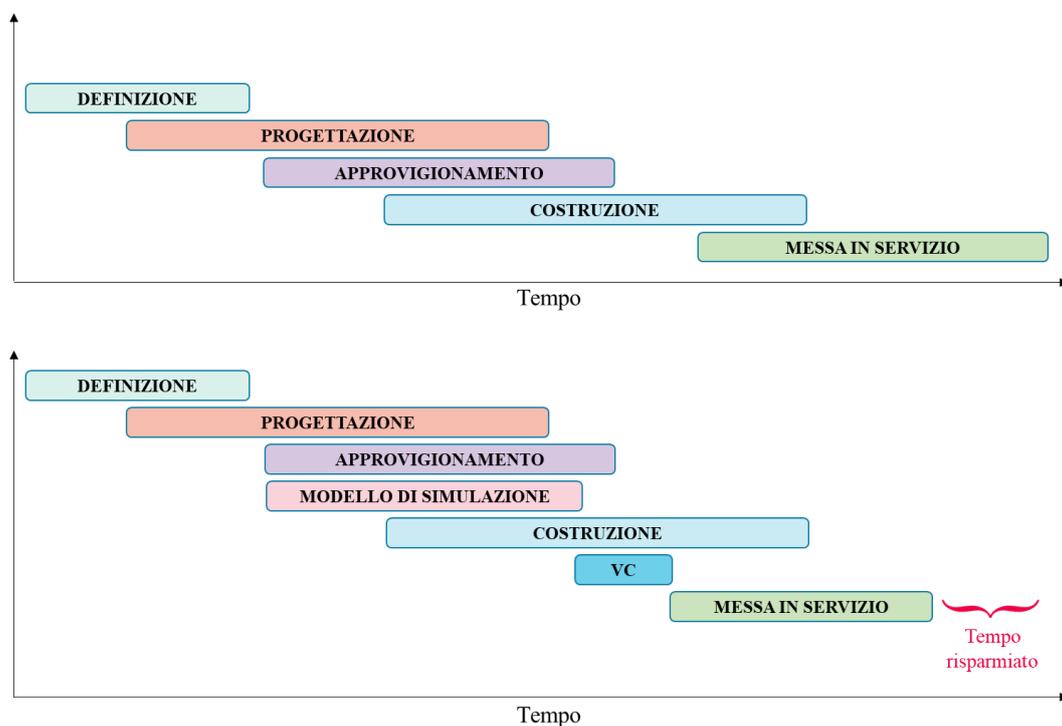


Figura 9 - Confronto fasi di realizzazione di un'opera senza (sopra) e con (sotto) il virtual commissioning

²¹ Controllore logico programmabile (Programmable Logic Controller). È un computer specializzato nel controllo dei processi industriali in grado di elaborare i segnali provenienti da sensori.

Grazie al VC si possono testare vari scenari di guasto e funzionamento e diversi livelli di fattore di rumore che influenzeranno il comportamento del sistema e che, spesso, soprattutto per motivi di tempo, non vengono adeguatamente analizzati.

Nel 2013, in un'intervista per MeccanicaNews, portale di approfondimento online dedicato all'industria meccanica, Gianluca Sacco²² descrive il Virtual Commissioning come "... un ambiente virtuale integrato, dove possono essere condotte tutte le operazioni di validazione di una macchina: non solo la parte meccanica, ma anche la parte elettrica ed elettronica, fino ad arrivare alla logica di funzionamento e ai codici. È importante sottolineare questo aspetto, in un mercato dove a decretare il successo di una macchina industriale è sempre di più la sua logica, il "bagaglio" software di cui è dotata, che ne definisce la sua versatilità, la riconfigurabilità, portandola a soddisfare in modo sempre più personalizzato le esigenze dell'utilizzatore".²³

2.3.3 Tipologie di VC

In riferimento al VC, si distinguono due tipi diversi di simulazione:

- Hardware-in-the-loop Commissioning (HIL);
- Software-in-the-loop Commissioning (SIL).

Entrambi operano in un ambiente virtuale ma, a differenza della simulazione HIL, che prevede l'uso di un controllore reale, nella simulazione SIL anche il controllore è virtuale.

²² Marketing Director South Europe di Siemens Industry Software

²³ (Gianluca Sacco, spazio all'innovazione con il Virtual Commissioning, 2013)

Sia che la simulazione sia di tipo SIL che HIL, la connessione tra il controllore e l'ambiente virtuale in cui si trova il modello avviene tramite PLC.

Di norma, se la simulazione avviene per testare un processo o un componente in laboratorio si preferisce usare il PLC virtuale. Invece, se si sta lavorando con il cliente finale è meglio usare il PLC fisico.

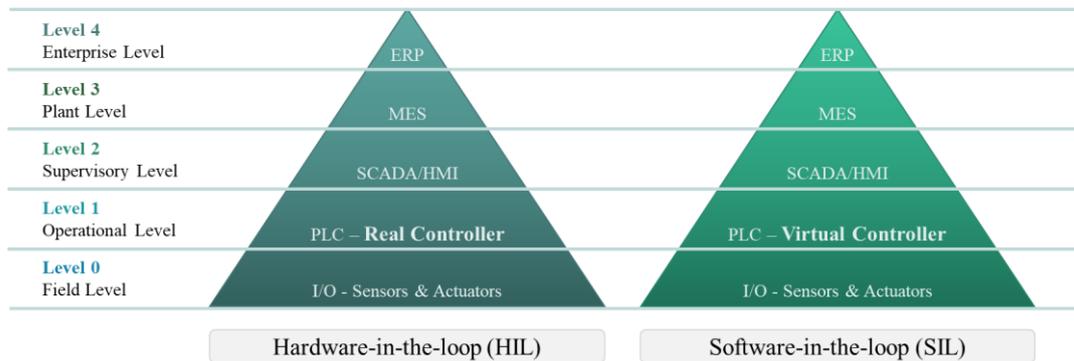


Figura 10 - Differenza tra le simulazioni HIL e SIL

2.3.4 Benefici

Molti vantaggi derivano dall'applicazione del Virtual Commissioning nella fase di Engineering di un processo: il tempo totale richiesto per la messa in servizio e gli sprechi derivanti dalla prototipazione si riducono, gli errori sono meno costosi da correggere in quanto sono individuati nelle prime fasi del ciclo di vita e la qualità del software è nettamente migliore.

A sostegno di questa argomentazione è stato creato un modello costituito da un PLC che controlla 17 sensori e 10 attuatori. Questo modello ha dimostrato che il Virtual Commissioning ha aumentato la qualità, intesa come adempimento dei requisiti, dal

37% al 84% e, al tempo stesso, ha causato una riduzione dei tempi del 75% e il time-to-market del 15%.²⁴

Costruire un modello completo già dalle prime fasi permette di creare sinergie tra le varie parti, i team coinvolti e gli stakeholder: tutti gli attori coinvolti riusciranno a comunicare meglio, riducendo errori e incomprensioni durante la definizione degli obiettivi e la progettazione.

Il VC permette di:

- ridurre i tempi necessari allo sviluppo del software;
- effettuare analisi di efficienza del sistema grazie alla possibilità di simulare guasti che influiscono direttamente sulla performance;
- eseguire controlli di efficacia dei sistemi di sicurezza;
- offrire supporto post-vendita con la possibilità di verificare facilmente eventuali modifiche future sul modello già esistente prima di implementarle;
- supporto al venditore che può usare il modello per verificare di soddisfare tutti i requisiti e le specifiche concordate precedentemente con il cliente.

2.4 Conclusione

Per concludere, quando si parla di digital twin si intende semplicemente la riproduzione virtuale di un sistema fisico. Questa copia esiste soltanto

²⁴ (Reinhart & Wunsch, 2007)

nell'ambiente virtuale in cui è stata creata ma permette la connessione con il sistema fisico, per scambiare dati utili per la diagnostica, la riprogettazione e il design.

Il digital twin può essere usato come base per la creazione di un modello di simulazione. Il modello di simulazione riproduce, sempre in un ambiente virtuale, le condizioni operative e di funzionamento del sistema e sfrutta il digital twin per studiarne il comportamento ed analizzarne la performance nelle condizioni considerate.

Infine, il digital twin può essere usato come punto di partenza per il virtual commissioning o messa in servizio virtuale. Esso permette di creare sinergie tra i vari componenti del sistema già dalla fase di progettazione e di verificare non solo la parte meccanica di ogni componente ma anche la parte elettrica ed elettronica che permetterà l'integrazione con gli altri componenti del sistema.

La tecnologia del digital twin quindi crea nuove opportunità per tutti coloro che decidano di entrare in questo mercato emergente.

Una tecnologia come quella del digital twin, e in uno step successivo anche del virtual commissioning, può essere applicata e adattata ad ogni contesto: da un ambiente produttivo aziendale fino alla riproduzione virtuale di un'intera città²⁵.

²⁵ Alcune città tra cui Singapore e Jaipur stanno implementando il digital twin delle città stesse per ottimizzarne la sostenibilità e sviluppare diverse strategie di risoluzione dei problemi

3 L'azienda

L'azienda che mi ha permesso di svolgere il tirocinio curriculare, di avvicinarmi al mondo del lavoro e di approfondire lo studio di questi temi è stata SimTec.

SimTec è una società di consulenza che applica la simulazione di flusso al fine di analizzare e migliorare il flusso produttivo o logistico di uno stabilimento.

Grazie alla sua esperienza nei campi della simulazione, dell'automazione, della logistica e della supply chain, offre consulenza a piccole, medie e grandi imprese attive in diversi settori produttivi, accompagnandole nel processo di innovazione e di automazione.

L'azienda, partner Siemens, offre servizi di consulenza e di formazione nell'ambito della digital factory occupandosi di progetti di innovazione e IoT.

SimTec nasce inizialmente come società di consulenza nel settore automotive, ma successivamente si espande anche in altri settori tra cui i settori logistico, energetico, siderurgico, F&B.

Ad oggi opera in numerosi settori con clienti quali FCA, Ferrari, CNH, Electrolux e Ferrero.

3.1 Applicazioni

Applicando la simulazione, l'azienda rappresenta ed analizza sistemi produttivi e logistici, individuando le attività più critiche e quelle che non sono a valore aggiunto. Questo permette di individuare i colli di bottiglia, ovvero quelle attività che non permettono di raggiungere il TH desiderato e di ottimizzarle.

Per quanto riguarda i servizi di consulenza, i campi principali in cui l'azienda opera sono i settori dell'automazione industriale, dei sistemi di trasporto e di gestione della produzione.

Nell'ambito dell'*automazione industriale*, l'obiettivo che si pone ogni azienda è quello di aumentare la produttività e al tempo stesso di ridurre il più possibile gli sprechi derivanti da inefficienze.

Grazie all'introduzione di nuovi sistemi come il controllo adattativo, le macchine moderne sono sempre più in grado di autoregolare i parametri di lavorazione tra cui potenze, coppie e velocità, garantendo in ogni momento una lavorazione con parametri ottimali e, contemporaneamente di controllare lo stato di usura degli utensili al fine di garantire un elevato livello di qualità.

In questo campo, il compito della simulazione di flusso è quello di validare il layout, i tempi ciclo, il flusso e gli accumuli.

Per esempio, nel caso di una cella robotizzata asservita da un robot, la simulazione di flusso deve verificare che tutti gli elementi e le attrezzature necessarie siano effettivamente raggiungibili dal robot e che quindi tutte le operazioni possano avvenire al meglio.

Invece, se considerassimo un ambiente di produzione in serie, come potrebbe essere la produzione nel settore automotive, in cui si hanno alti volumi di produzione, la simulazione di flusso permette di validare virtualmente il tempo ciclo e di verificare

di poter effettivamente raggiungere il target produttivo. In questo caso, per esempio, la simulazione permette di introdurre guasti e perdite di produttività e di valutare l'efficienza del sistema e il TH finale della linea.

Infine, un'ulteriore applicazione della simulazione nell'ambito dell'automazione industriale è il material handling. In questi casi il numero di mezzi di movimentazione, manipolatori robotici, pallet e attrezzature gioca un ruolo fondamentale. Grazie ad uno strumento di simulazione è possibile valutare se le attrezzature sono state dimensionate correttamente o se, al fine di limitare i tempi di attesa e di garantire un certo livello di efficienza dell'impianto è necessario aumentarne il numero.

In riferimento ad un sistema logistico, il ruolo SimTec riguarda i *sistemi di trasporto*, di movimentazione e di stoccaggio dei materiali. Grazie all'uso della simulazione di flusso è possibile minimizzare i costi di gestione e produzione.

La simulazione permette di verificare che le missioni e le movimentazioni siano gestite correttamente ed eventualmente di valutare una gestione alternativa, per esempio aumentando il numero di mezzi e sistemi di movimentazione, modificando i circuiti o valutando mezzi di movimentazione alternativi.

Per esempio, in riferimento ad un sistema di movimentazione gestito da AGV, la simulazione potrebbe permettere di valutare se il numero di navette inserite nel sistema sono sufficienti a garantire il TH richiesto e di verificare se le postazioni di ricarica della batteria degli AGV previste sono compatibili con la produttività e il layout.

Infine, nell'ambito della *gestione della produzione*, il modello di simulazione permette di identificare le sequenze e mix produttivi corretti garantendo al sistema

di avere ciò che serve, dove serve al momento giusto, andando a ridurre di conseguenza le inefficienze, le attese e i problemi di sicurezza.

Per esempio, la simulazione permette di verificare se lo scheduling e la gestione della produzione permettono di raggiungere il target o se è necessario cambiare il mix produttivo al fine di raggiungere un livello di efficienza più elevato.

Infine, recentemente SimTec è entrata nel mondo del VC realizzando un magazzino automatizzato il cui carro ponte è interamente controllato dalla simulazione. A partire da questo progetto, l'azienda ha iniziato a lavorare nel campo del Virtual Commissioning.

4 Simulazione di flusso

Ad oggi la simulazione di flusso rappresenta uno strumento indispensabile per lo studio di sistemi complessi. Alcuni trend attuali dell'economia e dei mercati quali:

- aumento della complessità e della varietà dei prodotti;
- livelli di qualità richiesti sempre più elevati;
- aumento della flessibilità;
- cicli di vita del prodotto sempre più corti;
- ridimensionamento dei lotti;
- aumento della competizione;

hanno condotto a fasi di planning sempre più corte. La simulazione nasce proprio nel contesto in cui il risultato ottenuto con altri metodi non è più significativo a causa di un numero sempre maggiore di semplificazioni.

Nella progettazione in ambito industriale e della produzione si fa ricorso alla simulazione di flusso nelle fasi di pianificazione, di implementazione e nelle fasi operative.

Nella *fase di pianificazione* il potenziale della simulazione risiede nella possibilità di individuare colli di bottiglia ed eventuali miglioramenti, calcolare i valori massimi e minimi di utilizzo, identificare i limiti prestazionali del sistema, effettuare test riguardanti la capacità, il volume delle scorte.

Nella *fase di implementazione* l'uso di un modello di simulazione permette di effettuare test sulle prestazioni, di valutare le performance in condizioni operative diverse, di testare requisiti futuri e di simulare condizioni particolari o guasti.

Infine, nella *fase operativa*, i benefici principali derivanti dalla simulazione includono il test delle alternative di controllo, la revisione delle strategie di emergenza e la previsione di date di consegna, oltre ad essere prova di un alto livello di affidabilità e qualità.

Se per i sistemi più semplici è possibile creare dei modelli matematici per spiegarne il comportamento, man mano che i sistemi si complicano il risultato di un'analisi statica diventa sempre meno significativo. In questi casi, quindi, si utilizzano dei software di simulazione.

Nella realtà i modelli si distinguono tra modelli continui, quando le variabili variano in modo continuo nel tempo e il loro valore cambia in ogni istante con continuità, e discreti, quando il valore delle variabili cambia in istanti di tempo ben definiti. In questi casi il tempo è discretizzato.

Un'altra classificazione divide i modelli in statici e dinamici. I primi rappresentano un sistema solamente in un determinato istante, a differenza dei secondi che ne rappresentano l'evoluzione nel tempo. Pertanto, i modelli statici sono utili quando si deve rappresentare un qualcosa che non è influenzato dallo scorrere del tempo. I modelli dinamici, invece, sono quelli guidati da eventi e si evolvono nel tempo, facendo cambiare lo stato del sistema e il valore delle variabili.

Un'ulteriore distinzione si ha tra modelli deterministici, quando non sono soggetti ad aleatorietà, e stocastici, quando nel modello viene introdotta l'aleatorietà attraverso l'uso di distribuzioni. A differenza dei modelli stocastici, i modelli deterministici non permettono di introdurre nell'analisi le perturbazioni del sistema

e i risultati ottenuti da questo tipo di modelli sarebbero rappresentativi soltanto dei valori medi, senza dare indicazioni sulla variabilità.

In un contesto manifatturiero spesso ci si trova di fronte a quantità discrete: il numero di entità in coda, di pezzi in magazzino o di elementi che si stanno servendo che variano in istanti di tempo ben definiti. Per questo motivo in molte applicazioni si usano modelli di simulazione ad eventi discreti che sono modelli discreti, dinamici e stocastici.

Inoltre, questi modelli permettono di approssimare anche il comportamento di sistemi continui con le opportune semplificazioni.

4.1 Simulazione a eventi discreti

La simulazione DES²⁶ rappresenta l'evoluzione nel tempo di un sistema le cui variabili variano in istanti di tempo ben definiti, assumendo valori appartenenti ad un insieme limitato.

Questi modelli sono detti *event-driven* perché si verifica il cambiamento dello stato di un sistema al verificarsi di determinati eventi.

²⁶ Discrete Event System

4.1.1 Definizioni

In generale, nella teoria delle code si dice che un sistema è costituito da entità e risorse.

Le *entità* sono i clienti, ovvero coloro che attendono in coda di essere serviti o, più in generale di poter usare le *risorse*, che offrono il servizio.

La teoria delle code quindi analizza il comportamento di una risorsa, con capacità limitata, in grado di poter servire un certo numero di clienti in un determinato tempo. L'obiettivo è quello di configurare un sistema basandosi sull'analisi dei tempi di attesa, della lunghezza della coda e del tasso con cui i clienti vengono serviti.

Grazie all'analisi delle code si può determinare il numero di risorse necessarie per garantire il minimo tempo di attesa e la massima produttività.

Un sistema viene rappresentato attraverso diversi elementi (Figura 11). Se al momento di arrivo la risorsa (Server) è disponibile, le entità possono essere processate immediatamente, altrimenti dovranno attendere il loro turno generando una coda (Queue). Al termine del servizio, si ha la partenza dell'entità.

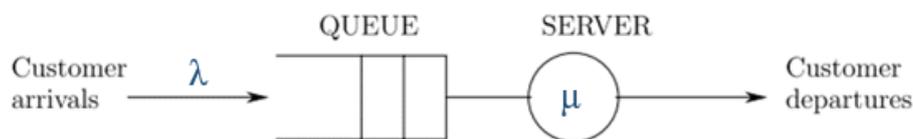


Figura 11 - Rappresentazione di un sistema con diagramma a blocchi

Questo tipo di analisi si può quindi applicare in molti contesti, in cui si hanno delle entità in coda. Esempi tipici di applicazioni sono:

- clienti in coda in banca;
- numero di lotti che devono essere processati;
- persone alla fermata dell'autobus.

In riferimento a un sistema di code si possono definire:

- la *popolazione*, ovvero l'insieme di cui fanno parte tutti i potenziali clienti. In generale gli elementi che fanno parte di una stessa popolazione non sono distinguibili tra di loro. Se in un'applicazione è necessario effettuare una distinzione tra le entità, per esempio se richiedono un tempo di processamento diverso, si assume che esse provengano da popolazioni diverse;
- il *tasso di arrivo* dei clienti che descrive la frequenza con cui si presentano i clienti;
- la *coda (buffer)* costituita da tutti gli utenti in attesa di esser serviti. La coda può essere finita, se una volta raggiunta la saturazione del buffer le entità sono respinte, o infinita quando i clienti non vengono mai respinti. Viene definita inoltre una *politica di coda* che stabilisce l'ordine secondo il quale i clienti vengono serviti. Si possono distinguere tre tipi diversi di code: FIFO²⁷, LIFO²⁸, SIRO²⁹;
- il *tempo di processamento* che descrive il tempo nel quale il servizio è erogato;
- il *tasso di uscita o throughput* del sistema che rappresenta il numero di entità in uscita dal sistema nell'unità di tempo.

Le notazioni principali sono:

²⁷ First In First Out quando il primo che arriva è il primo ad essere servito

²⁸ Last In First Out se l'ultimo che arriva viene servito per primo

²⁹ Service In Random Order se i clienti sono serviti in modo casuale

- λ , indica tasso di arrivo dei clienti
- $1/\lambda$, definisce il tempo medio di inter-arrivo
- μ , indica il tasso di servizio
- $1/\mu$, definisce il tempo medio di servizio

4.1.2 Esempio

Prendiamo per esempio un magazzino logistico. Quando un nuovo prodotto viene introdotto e stoccato in magazzino si dice che si ha un *arrivo*. Quando invece si effettua un'operazione di prelievo si ha una *partenza*. Il livello di inventario del magazzino, e quindi il contenuto del buffer, si può rappresentare attraverso un modello ad eventi discreti. Gli eventi che fanno variare lo stato del sistema sono rappresentati in questo caso dalle operazioni di deposito e di prelievo.



Figura 12 - Diagramma a blocchi del sistema considerato

Per semplicità del modello assumiamo che:

- un'operazione di deposito e una di prelievo non possano avvenire contemporaneamente;
- il tempo necessario all'esecuzione di queste operazioni sia 0 quindi il servitore ha un tempo di processamento nullo ed è come se fosse assente;
- la capacità massima del magazzino non sia mai raggiunta.

Il livello di inventario $N(t)$ può variare solamente in modo discreto. Le operazioni di deposito $d(t)$ e prelievo $p(t)$ in funzione del tempo sono definite nel modo seguente:

$$d(t) = \begin{cases} 1, & \text{se si ha un arrivo al tempo } t \\ 0, & \text{altrimenti} \end{cases}$$

$$p(t) = \begin{cases} 1, & \text{se si ha una partenza al tempo } t \\ 0, & \text{altrimenti} \end{cases}$$

Pertanto, i possibili stati del sistema risultano essere:

1. $d(t) = 1, p(t) = 0$ se si è in presenza di un arrivo;
2. $d(t) = 0, p(t) = 1$ in presenza di una partenza (solo se $N(t) > 0$);
3. $d(t) = 0, p(t) = 0$ se al tempo t non si ha né un arrivo né una partenza, lasciando invariato lo stato del sistema;

Il livello di inventario del magazzino può essere descritto da $N(t)$.

$$N(t') = \begin{cases} N(t) + 1, & \text{se } d(t) = 1, p(t) = 0 \\ N(t) - 1, & \text{se } d(t) = 0, p(t) = 1, N(t) > 0 \\ N(t), & \text{altrimenti} \end{cases}$$

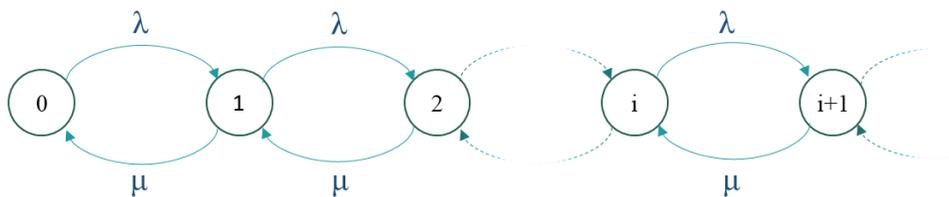


Figura 13 - Grafo delle transizioni di Markov

L'andamento tipico del sistema descritto è rappresentato in figura AAA.

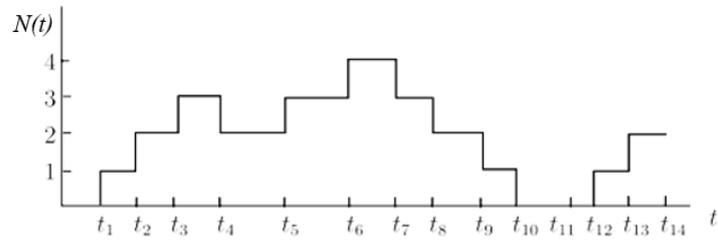


Figura 14 - Andamento tipico di sistema ad eventi discreti

5 Il progetto di tesi

5.1 Introduzione

Il progetto di tesi sviluppato in azienda va ad applicare la simulazione di flusso ad un magazzino automatizzato al fine di verificare che il sistema progettato rispetti le specifiche di progetto e che il dimensionamento del numero di navette sia corretto.

La simulazione di flusso è uno strumento che permette di migliorare le prestazioni del sistema e la sua produttività per passare dalla situazione attuale, *as-is*, a quella *to-be*.

Il progetto di tesi si è articolato in due fasi.

Nella prima fase viene creato il modello *as-is*, rappresentante quindi il sistema così come è ella realtà.

Invece, nella fase successiva, il sistema viene analizzato: i dati di input vengono fatti variare in modo da trovare le condizioni *to-be* che permettono di migliorare l'efficienza del sistema.

Il progetto sviluppato per questa tesi potrebbe evolversi, in un futuro, in un caso di Virtual Commissioning andando a scambiare dati direttamente con i sensori reali.

Il progetto in questione viene realizzato per un'azienda che opera nel settore logistico, e più in particolare si occupa della movimentazione di pallet per l'asservimento di un magazzino automatizzato.

Si tratta di sistemi di movimentazione su rotaia per l'automazione della logistica, conosciuta come *Smart Logistics*³⁰.

5.1.1 Il magazzino

Ai fini di una maggiore comprensione sarà fornita un'introduzione sulle operazioni e sui flussi individuabili all'interno di un magazzino.

Parlando di un magazzino, al suo interno si possono individuare diverse aree in funzione dei processi. I principali processi individuabili all'interno di un magazzino sono:

- Ricevimento merci;
- Stoccaggio;
- Preparazione ordini e prelievo;
- Imballaggio;
- Spedizione;
- Attività amministrative.

³⁰ Applicazione delle innovazioni introdotte dalla Quarta Rivoluzione Industriale alla logistica e ai trasporti.

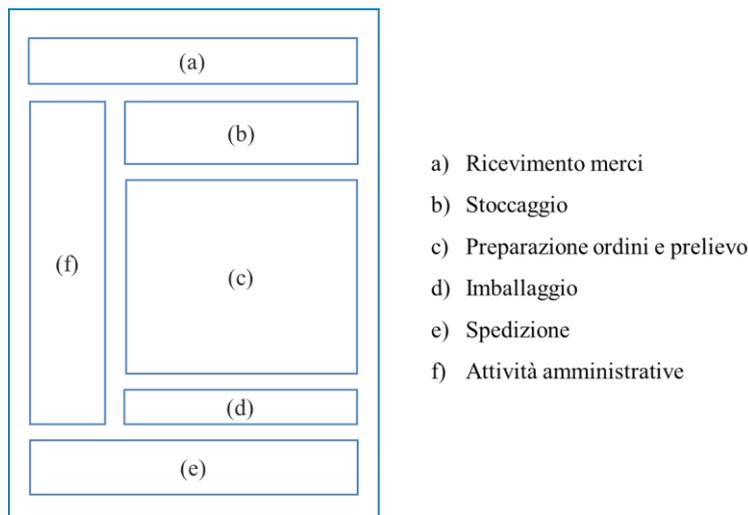


Figura 15 - Aree funzionali di un magazzino

Le aree di ricevimento e di spedizione comprendono le banchine di carico e scarico merci. È in queste aree che si ha l'arrivo dei mezzi di trasporto in arrivo dal fornitore e da cui partono quelli diretti al cliente.

All'arrivo in magazzino, questi mezzi vengono scaricati e viene verificata la compatibilità dei lotti con ciò che è stato ordinato.

A questo punto, al fine di assicurare la conformità e il rispetto delle specifiche si può avere un ulteriore controllo di qualità, anche a campione. In caso di lotti non conformi alle specifiche o danneggiati, essi vengono separati dagli altri e rispediti al fornitore per essere sostituiti. Invece quelli conformi seguono il flusso e ad ognuno di essi viene assegnata una posizione in magazzino in modo da tenere traccia di cosa si ha e della posizione di ogni UdC³¹. Tutte queste operazioni fanno parte del *Ricevimento*.

³¹ Unità di Carico. È l'insieme compost dal prodotto e dal pallet.

La fase successiva è la fase di *Stoccaggio*. I lotti conformi vengono portati nell'area di stoccaggio per essere depositati in magazzino.

A questo punto si conclude la fase di *Inbound*, che va quindi dal momento dell'ordine al fornitore fino al ricevimento della merce e del suo stoccaggio in magazzino.

Dal momento in cui si ha un ordine da parte del cliente inizia la fase di *Outbound* che si conclude con la spedizione della merce verso il cliente o altri centri di distribuzione.

In questa fase si esegue il picking³² delle UdC o dei colli³³ richiesti. Dopo aver effettuato le operazioni di prelievo necessarie, viene verificata la compatibilità dei prodotti prelevati con quelli presenti nell'ordine. I materiali vengono quindi raggruppati in modo da soddisfare ordini di spedizione, costituendo in questo modo delle UdC di spedizione.

Prima di essere caricati sui mezzi di distribuzione e consegnati al cliente, i prodotti vengono attentamente imballati in modo da assicurare la consegna nelle condizioni prestabilite.

Tutte queste attività sono coordinate da attività amministrative per garantire efficienza e produttività delle varie aree e affiancate da aree di servizio che includono, per esempio, uffici e stazioni per la ricarica della batteria di sistemi di movimentazione.

Ad oggi nei magazzini tradizionali tutte queste operazioni sono ancora effettuate dall'uomo. I magazzini sono ancora fortemente manuali ma nell'ottica della Smart Logistics si cerca di automatizzare il magazzino. In questo specifico caso

³² L'operazione di picking prevede il prelievo di UdC mono codice al fine di organizzare una nuova unità di carico o di spedizione, composta da diversi tipi di item.

³³ Singola unità di confezionamento o di imballaggio

l'automazione del magazzino avviene tramite dei sistemi di movimentazione su rotaia.

Nel caso studio proposto si ha un magazzino automatizzato.

Un magazzino automatizzato (Figura 16) è costituito da uno o più traslo elevatori, collegati a inizio e/o fine corsa da baie di interfaccia.



Figura 16 - Magazzino intensivo con traslo elevatore e baia di interfaccia³⁴

Un *traslo elevatore* è una macchina progettata per lo stoccaggio automatico delle unità di carico mediante movimenti meccanici automatizzati. La sua caratteristica principale è quella di poter effettuare simultaneamente traslazioni orizzontali e

³⁴ (Solutions in Action: Power Automation Systems, n.d.)

verticali, garantendo alte prestazioni e un elevato livello di utilizzazione dello spazio richiesti da un magazzino intensivo.

Il traslo elevatore si interfaccia con altri sistemi di movimentazione attraverso una *baia di interfaccia*, di solito costituita da AGV.

Le UdC da stoccare vengono consegnate da queste navette a un traslo elevatore in caso di deposito, e viceversa nel caso in cui si abbia un'operazione di prelievo.

Le postazioni delle baie di interfaccia possono essere statiche, quando costituite da semplici postazioni fisse, o continue, se costituite da nastri trasportatori, o sistemi di movimentazione a rulli o a catene, formando percorsi lineari o circolari.

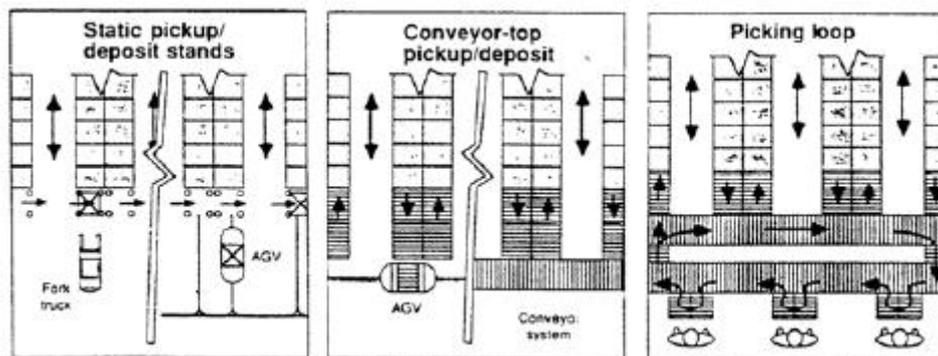


Figura 17 - Baie di interfaccia di un magazzino automatizzato³⁵

Nel caso in analisi, l'asservimento al traslo elevatore tramite baia di interfacciamento avviene tramite dei sistemi di movimentazione su rotaia chiamati *Rushmover*.

³⁵ (Grimaldi, Slides del corso di Programmazione della produzione e Logistica)

Il rushmover è un particolare tipo di navetta che si muove autonomamente su rotaia lungo un circuito chiuso.



Figura 18 - Raffigurazione di un Rushmover³⁶

Il vantaggio principale di queste navette è l'estrema flessibilità, intesa sia come la possibilità di adattare il percorso a diverse esigenze, sia come capacità di trasportare carichi di forme e dimensioni diverse, garantendo un'elevata produttività. I comandi di avvio e arresto delle navette avvengono attraverso un sistema a raggi infrarossi.

Invece, il vincolo principale di questo sistema è l'impossibilità di gestire cambi di direzione e bivi, costringendo le navette a seguire percorsi chiusi.

³⁶ (Automha, n.d.)

5.2 Specifiche di progetto

L'area di interesse del progetto di tesi comprende il sistema di interfacciamento e le logiche di flusso tra l'area di ricevimento e il traslo elevatore e tra il traslo elevatore e l'area di spedizione.

Pertanto, saranno escluse dalla trattazione tutte le altre aree operative, compreso il traslo elevatore.

Lo scopo del progetto è quello di fornire al cliente uno strumento che gli permetta di dimensionare correttamente il numero di navette e di baie di scarico, per quattro diversi tipi di magazzino.

A tal fine, il programma dovrà permettere al cliente di configurare la baia di interfacciamento a suo piacimento adattandola alle caratteristiche di ciascun tipo di magazzino, garantendo la coerenza delle statistiche e degli output di simulazione con i dati di input impostati.

La configurazione migliore è intesa in termini di numero e caratteristiche delle navette, della forma del percorso (un loop o una forma a "L") e il numero di postazioni necessarie a garantire un determinato livello di produttività.

Come base per la modellazione il cliente ha fornito la configurazione rappresentata in Figura 19.

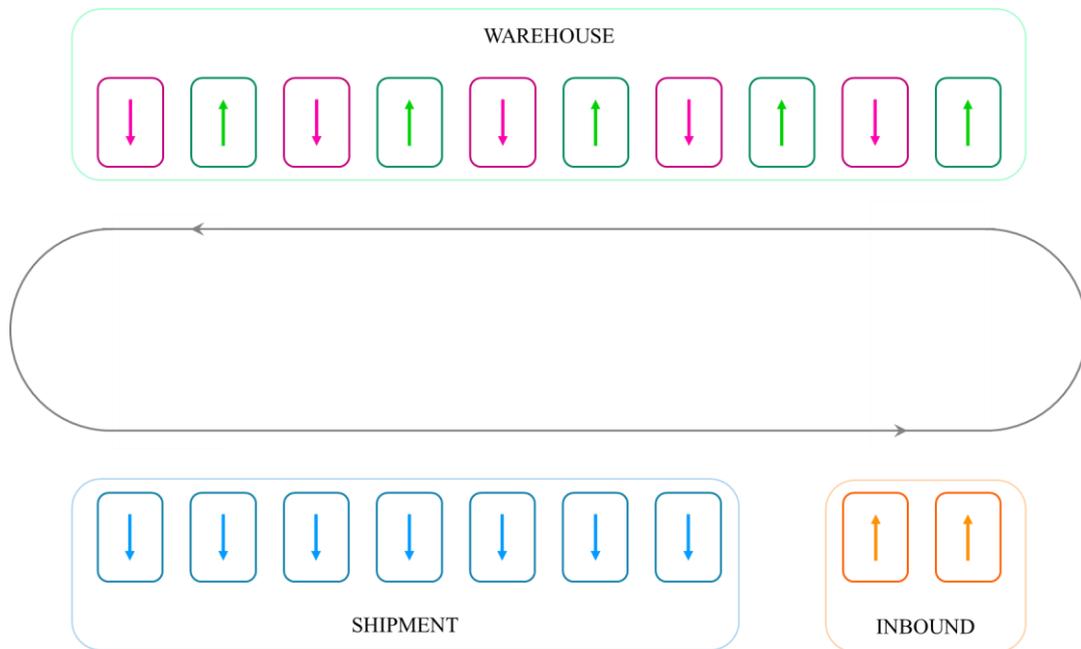


Figura 19 - Situazione iniziale del progetto

Nella situazione iniziale del progetto (Figura 19) si possono distinguere:

- Ricevimento merci costituito da due postazioni;
- Cinque postazioni di deposito per lo stoccaggio in magazzino;
- Cinque postazioni di prelievo;
- Sette postazioni di spedizione.

Vista l'incapacità dei rushmover di gestire bivi, non sarà presente un percorso per il ricircolo delle navette vuote e per l'attesa in caso in cui non venga assegnata loro una missione.

I percorsi saranno quindi dei loop chiusi e la gestione dei cicli sarà di tipo *milk run*³⁷, in perenne circolazione e senza stazionamento.

³⁷ La gestione della movimentazione secondo cicli di tipo milk run prevede che il sistema di movimentazione ripeta lo stesso percorso continuamente. Questo sistema, che si ispira al sistema

L'obiettivo del cliente è quello di valutare la performance del loop al variare del numero di baie di scarico utilizzate.

5.2.1 Logiche di funzionamento

Il funzionamento del sistema è basato su una *Lista Missioni*.

Questa lista assegna le missioni alle navette riportando tempo, postazione di partenza e postazione di arrivo.

Raggiunto l'istante di tempo indicato sulla lista, viene simulato l'arrivo del pallet a una postazione e, da quell'istante in poi, la prima navetta disponibile che passerà davanti a quella baia eseguirà la missione.

All'arrivo della navetta, si deve tener conto di un tempo di trasbordo necessario al trasferimento del pallet dalla baia alla navetta e viceversa alla baia di arrivo per scaricare il pallet.

Durante tutta la simulazione deve essere rispettato il vincolo della distanza di sicurezza tra le navette.

utilizzato anni fa per la consegna del latte, fa parte delle tecniche della lean introdotte con la produzione snella. Questo tipo di gestione prevede che i mezzi di movimentazione siano costantemente in movimento seguendo un percorso prefissato. L'obiettivo di questo tipo di gestione è di ridurre al minimo il tempo di consegna (JIT) e di riuscire a consegnare tempestivamente il prodotto.

5.3 Costruzione del modello

5.3.1 Fase 1 – Lista missioni

In questa prima fase si decide di creare un modello semplificato in cui verranno inserite le prime logiche e quindi iniziare ad impostare quello che diventerà il modello finale. Si decide, quindi, di partire da un modello semplificato (Figura 20) costituito semplicemente da una navetta, un circuito e alcune stazioni (che rappresentano le baie di carico e scarico).

Nel contesto attuale le baie possono essere di quattro tipi diversi:

- *Inbound*, dove arrivano i camion carichi di pallet che dovranno essere stoccati;
- *Warehouse In*, dove le UdC verranno prelevate dal traslo elevatore per essere stoccate in magazzino
- *Warehouse Out*, dove saranno depositate dal traslo elevatore a seguito di una missione di prelievo
- *Shipment*, dove i pallet verranno caricati su un camion per essere consegnate al cliente.

Nel modello verranno quindi create quattro classi³⁸ di oggetti che permettano di distinguere le baie: Inbound, Warehouse In, Warehouse Out e Shipment.

L'obiettivo di questa fase è quello di scrivere la logica che permetta all'Event Controller³⁹ di leggere la lista delle missioni e fare in modo che all'istante x , indicato nella lista, venga creato il pallet nella stazione corretta in modo che la missione possa avvenire correttamente.

³⁸ La classe permette di definire una serie di proprietà e caratteristiche comuni a tutti gli oggetti appartenenti a quella classe. Le caratteristiche di una classe sono quindi "ereditate" dai suoi figli.

³⁹ L'EventController coordina e sincronizza tutti gli eventi che si verificano durante la simulazione. Plant Simulation permette di creare modelli di simulazione event-driven e quindi i cambiamenti di stato avvengono all'accadere di determinati eventi.

A tale scopo viene creata una lista missioni (Tabella 1).

Tabella 1 - Esempio lista missioni

<i>Release Time</i>	<i>Partenza</i>	<i>Arrivo</i>
01:00	INBOUND_1	W_IN_1
02:00	INBOUND_2	W_IN_2
03:00	INBOUND_1	W_IN_1
04:00	INBOUND_2	W_IN_2
05:00	INBOUND_1	W_IN_1
...

Il metodo⁴⁰ che permette di leggere la lista delle missioni è un metodo di tipo Init⁴¹ (Metodo 1).

```
var releasetime, attesa : time;

for var i:=1 to ListaMissioni.ydim
  releasetime:=ListaMissioni[1,i];
  attesa:=releasetime-eventcontroller.simtime;
  wait attesa;

  str_to_obj(ListaMissioni[2,i]).destination:=ListaMissioni[3,i];
  .MUs.Entity1.create(str_to_obj(ListaMissioni[2,i]));
next
```

Metodo 1 – “Init”

⁴⁰ Un metodo permette di controllare il comportamento di un oggetto. Ogni metodo viene richiamato all'accadere di determinati eventi e richiede che gli vengano passate delle informazioni dall'oggetto in modo che, dopo o durante la sua esecuzione, possa restituire un valore.

⁴¹ I metodi di tipo Init vengono avviati automaticamente al momento in cui viene avviata la simulazione.

Questo metodo scorre la lista delle missioni e ogni volta calcola il tempo che manca al verificarsi dell'evento successivo (release time): viene calcolato il periodo da attendere (attesa) prima di creare l'entità nella stazione corretta.

Per non perdere l'informazione sulla destinazione di ogni pallet in ingresso, viene creato l'attributo⁴² *Destination* sulla stazione. Il valore di questo attributo verrà successivamente comunicato al *Transporter*⁴³ che eseguirà la missione ed effettuerà la movimentazione e la consegna del pallet.

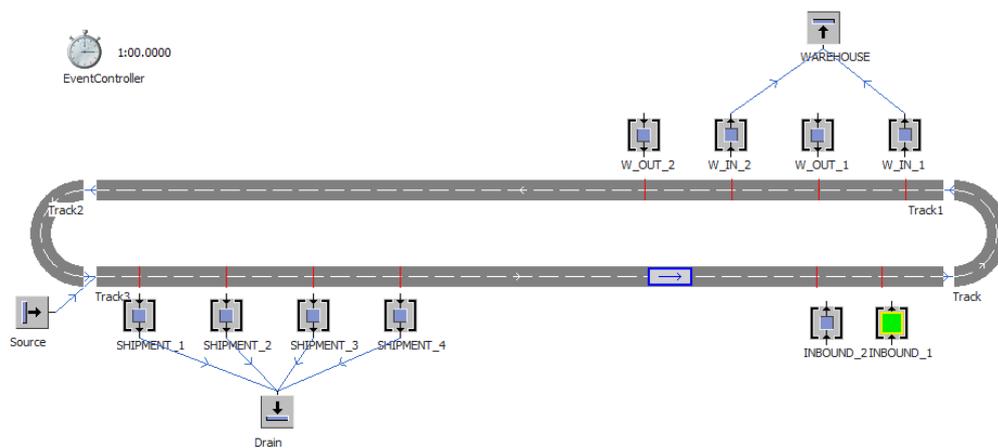


Figura 20 - Creazione di un'entità sulla stazione "INBOUND_1"

Quando il Transporter, ovvero la nostra navetta, passerà davanti ad una stazione, grazie al sensore associato ad ogni stazione (rappresentato con un segmento rosso sulla Track), saprà se dovrà fermarsi per caricare o scaricare un pallet oppure se potrà proseguire alla ricerca di una missione da compiere.

⁴² Gli attributi definiscono le caratteristiche delle entità, permettendo quindi di caratterizzarle e distinguerle. Gli attributi possono essere di diverso tipo (numeri interi, reali, stringhe, ...).

⁴³ Il transporter è un oggetto mobile che permette di rappresentare veicoli che viaggiano su un percorso. I transporter sono usati per il trasporto di altri oggetti e in questo caso vengono utilizzati per modellare le navette.

In questo caso specifico i sensori possono appartenere a due categorie diverse: possono essere sensori per stazioni di carico o per stazioni di scarico.

Nel caso in cui si tratti di baie appartenenti alle classi di Inbound o Warehouse out i sensori saranno per il carico, a differenza delle altre due classi che avranno sensori per lo scarico.

Per quanto riguarda i sensori di carico, il metodo inserito al loro interno permette di controllare il valore dell'attributo *Destinazione* della baia. Se al momento dell'arrivo della navetta il suo valore è nullo, essa potrà proseguire alla ricerca di un'altra missione da eseguire, altrimenti dovrà fermarsi ed eseguire il carico del pallet.

Il metodo che effettua il carico del pallet scorre una tabella, chiamata *PosizioneSensore*, contenente tutte le coppie sensore e stazione. Una volta trovata la corrispondenza tra il sensore e la stazione, viene controllato l'attributo della stazione. Se l'attributo *Destination* è nullo significa che non ci sono pallet in attesa altrimenti significa che ci sono dei "clienti" in attesa di essere serviti.

A questo punto, se la navetta è piena proseguirà senza fermarsi, altrimenti si arresterà, eseguirà il carico e prenderà l'informazione sulla destinazione per poi ripartire.

```
param SensorID: integer, Front: boolean
var stazione : string;

for var i:=1 to PosizioneSensore.ydim
  if obj_to_str(?)=PosizioneSensore[1,i] AND sensorID=PosizioneSensore[2,i]
    if str_to_obj(PosizioneSensore[3,i]).destination/="0" AND @.empty
      stazione:=PosizioneSensore[3,i];
      Carico(stazione);
    end
  end
next
```

Metodo 2 - "Sensore per carico"

Se seguiamo il flusso della navetta piena, durante il suo percorso, essa non si fermerà quando incontrerà sensori per il carico, ma sarà alla ricerca della stazione che le permetterà di scaricare il pallet e completare la missione.

```
param SensorID: integer, Front: boolean
var stazione : string;

for var i:=1 to PosizioneSensore.ydim
  if obj_to_str(?)=PosizioneSensore[1,i] AND sensorID=PosizioneSensore[2,i]
    if PosizioneSensore[3,i]=@.dest
      stazione:=PosizioneSensore[3,i];
      Scarico(stazione);
    end
  end
next
```

Metodo 3 - "Sensore per scarico"

In presenza di un sensore per scarico, come nel caso precedente, tramite la tabella di associazione tra sensore e stazione, viene determinata la stazione associata al sensore incontrato. Se la stazione coincide con la destinazione della navetta essa si fermerà, eseguirà lo scarico per poi ripartire vuota e alla ricerca di un nuovo sensore per il carico, altrimenti proseguirà alla ricerca della sua destinazione al fine di completare la missione.

Dopo aver effettuato lo scarico la missione è completata.

A questo punto il ciclo si ripete: la navetta riparte alla ricerca di un'altra missione da eseguire. La simulazione si concluderà solo dopo aver completato tutte le missioni della lista.

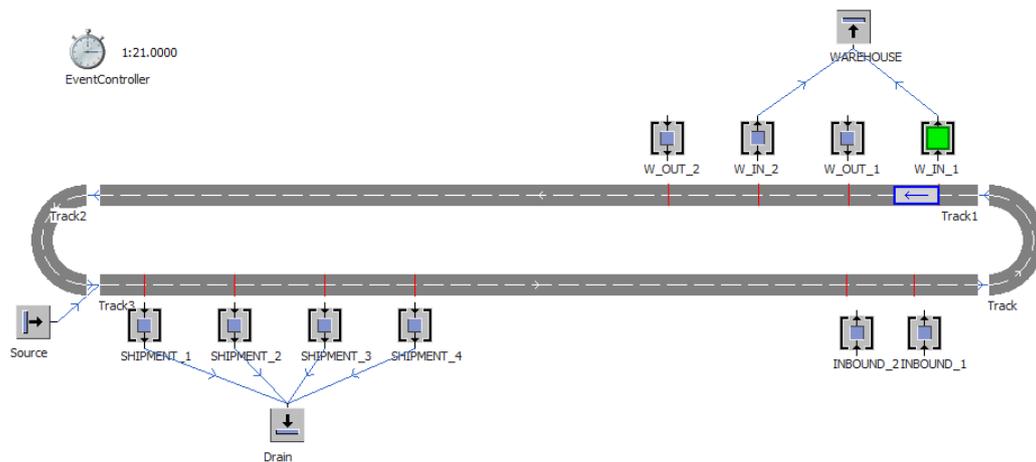


Figura 21 - Scarico dell'entità sulla baia "W_IN_1"

Il modello finora analizzato è poco fedele alla realtà in quanto non considera l'eventualità che su una baia possa esserci più di un'entità. Nella realtà però, se pensiamo per esempio all'arrivo di un camion ad una baia di inbound, difficilmente ci sarà solo un pallet in attesa di essere stoccato ma si formerà una coda.

Il modello viene quindi complicato aggiungendo prima delle baie di tipo *Inbound* e *Warehouse In* un oggetto chiamato *Coda*. Si tratta di un buffer in cui le entità attenderanno il loro turno per essere processate.

Anche in questo caso è necessario memorizzare da qualche parte l'informazione sulla baia di destinazione. A questo proposito, all'interno della baia viene creata una tabella chiamata *Coda Missioni*, contenente le destinazioni di tutte le missioni in coda.

Il metodo *Init* sarà modificato in modo da creare le entità non più sulla baia stessa ma nel buffer in modo che l'esecuzione delle missioni possa seguire una logica di tipo FIFO.

Inoltre, per quanto riguarda l'aggiornamento della *Destination* di ogni baia secondo la *Coda Missioni*, esso sarà effettuato al momento del carico del pallet sulla navetta.

```
param stazione : string;

@.speed:=0;

Str_to_obj(stazione).mu.move(@);
@.dest:=str_to_obj(stazione).destination;

if str_to_obj(stazione).pred.contentslist.ydim=0
    str_to_obj(stazione).destination:="0";
else
    str_to_obj(stazione).destination:=str_to_obj(stazione).CodaMissioni[1,1];
    str_to_obj(stazione).CodaMissioni.cutrow(1);
end

wait TempoTrasbordo;

@.speed:=Vel_Rett_Pieno;
@.acceleration:=Acc_Rett_Pieno;
@.deceleration:=Dec_Rett_Pieno;
```

Metodo 4 - "Carico"

Nel momento in cui la navetta arriva ad una baia, prima di eseguire il carico, la velocità viene portata a 0. Una volta ferma, in base al valore di decelerazione impostato, il pallet verrà spostato dalla baia sulla navetta e l'informazione sulla destinazione memorizzata.

Prima della partenza della navetta, l'attributo *destination* della baia deve essere aggiornato assumendo valore nullo nel caso in cui la coda sia vuota, o la destinazione della missione successiva, aggiornando la tabella *Coda Missioni* di conseguenza.

Invece, per quanto riguarda lo scarico, sempre dopo aver fermato la navetta, prima di spostare il carico sulla baia, è necessario attendere che il pallet precedente sia stato rimosso e che la baia sia libera.

A questo punto lo scarico del pallet può avvenire e, prima della ripartenza della navetta, la destinazione cancellata.

```
param stazione : string
var obj_staz : object
@.speed:=0

obj_staz:=str_to_obj(stazione);
waituntil obj_staz.empty prio 1;
@.mu.move(str_to_obj(stazione));
@.dest:="0";
wait TempoTrasbordo;

if @.empty
  @.speed:=Vel_Rett_Vuoto;
  @.acceleration:=Acc_Rett_Vuoto;
  @.deceleration:=Dec_Rett_Vuoto;
else
  @.speed:=Vel_Rett_Pieno;
  @.acceleration:=Acc_Rett_Pieno;
  @.deceleration:=Dec_Rett_Pieno;
end
```

Metodo 5 - "Scarico"

Inoltre, per rendere il modello ancora più simile al sistema reale, dopo ogni stazione di shipment viene inserito un buffer, rappresentante la *rulliera* in cui vengono depositati i pallet successivamente al trasbordo e infine, lo *scarico*, che rappresenta il mulettaista che carica i pallet a uno a uno sul mezzo di distribuzione (Figura 22).

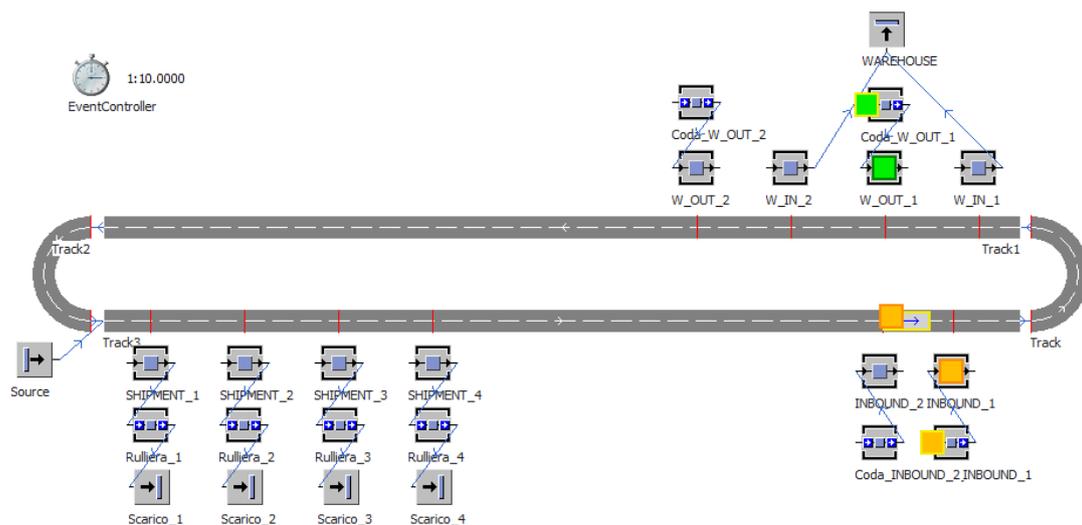


Figura 22 – Rappresentazione del modello al termine della prima fase

5.3.2 Fase 2 – Aumento della complessità del modello

Il modellino finora creato è funzionante ma la sua complessità viene aumentata in modo da renderlo ancora più verosimile.

A questo proposito, si decide di aumentare il numero di navette all'interno del circuito al fine di analizzare il comportamento del sistema nelle nuove condizioni.

La scelta di modellazione fatta in precedenza di non assegnare la missione direttamente alla navetta ma di comunicare la presenza dell'entità tramite il sensore ha fatto sì che il modello si potesse adattare facilmente alla nuova situazione senza doverlo "stravolgere" o adattare le logiche.

In questo modo la prima navetta disponibile che passerà davanti alla stazione, e quindi la più vicina, eseguirà la missione.

In questa fase si eseguono delle prove con due navette.

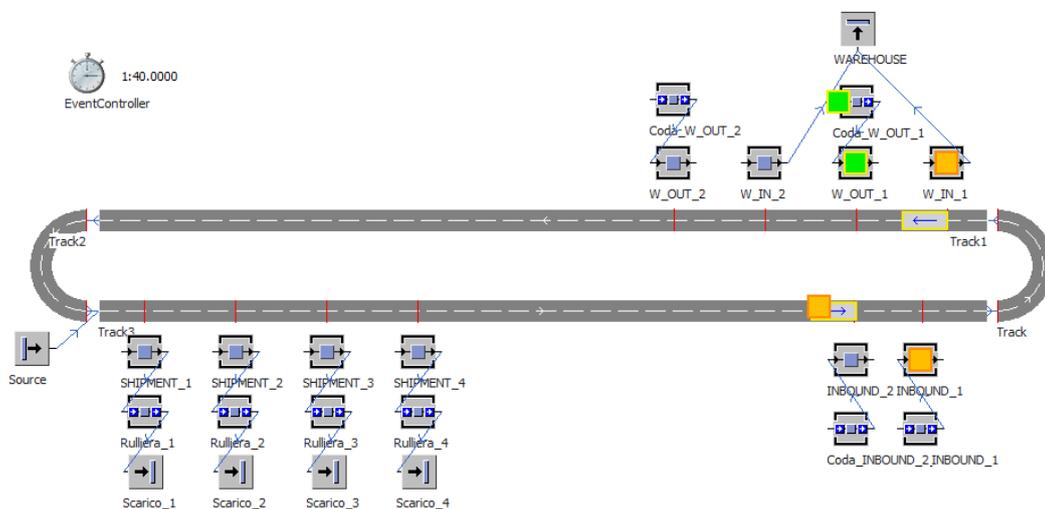


Figura 23 - Inserimento di due navette nel circuito

Per prima cosa è necessario creare un metodo che faccia sì che tra le due navette sia mantenuta una distanza di sicurezza in modo da prevenire incidenti.

```
param distanceIsBelowLimit: boolean
var vel: real;
var l : list[real];

if distanceIsBelowLimit
    ?.speed:=0;
    ?.global_stop:=TRUE;
    wait 0.1;
else
    wait 0.1;
    l.create;
    l.insert(1,Vel_Rett_Vuoto);
    l.insert(2,Vel_Rett_Pieno);
    l.insert(3,Vel_Curva_Vuoto);
    l.insert(4,Vel_Curva_Pieno);
    ?.speed:=l.min;
    l.delete;
    ?.global_stop:=FALSE;
end
```

Metodo 6 - "OnDistance"

A questo proposito viene creato un controllo chiamato *OnDistance* (Metodo 6) che viene attivato automaticamente tutte le volte che la distanza tra un transporter e il successivo risulta minore di un limite di sicurezza preimpostato.

Quando la distanza scende al di sotto di questo limite, la navetta inizia a frenare per poi ripartire una volta ristabilita la distanza di sicurezza.

Sempre in questa fase vengono creati altri due metodi: *InizioCurva* (Metodo 7) e *FineCurva* (Metodo 8).

```
param SensorID: integer, Front: boolean

if @.global_stop
  waituntil not @.global_stop prio 1;
end

if @.empty
  @.speed:=Vel_Curva_Vuoto;
  @.acceleration:=Acc_Curva_Vuoto;
  @.deceleration:=Dec_Curva_Vuoto;
else
  @.speed:=Vel_Curva_Pieno;
  @.acceleration:=Acc_Curva_Pieno;
  @.deceleration:=Dec_Curva_Pieno;
end
```

Metodo 7 - "InizioCurva"

```
param SensorID: integer, Front: boolean

if @.global_stop
  waituntil not @.global_stop prio 1;
end

if @.empty
  @.speed:=Vel_Rett_Vuoto;
  @.acceleration:=Acc_Rett_Vuoto;
  @.deceleration:=Dec_Rett_Vuoto;
else
  @.speed:=Vel_Rett_Pieno;
  @.acceleration:=Acc_Rett_Pieno;
  @.deceleration:=Dec_Rett_Pieno;
end
```

Metodo 8 - "FineCurva"

Questi due metodi sono associati a due sensori presenti all'inizio e alla fine di una curva e permettono di regolare i parametri del moto delle navette assegnando ad ognuna di esse un valore di velocità, accelerazione e decelerazione a seconda che esse stiano trasportando un carico oppure no.

In questa fase viene inserito sul transporter l'attributo *global_stop*.

Durante le prove di simulazione viene notato che in alcuni casi il metodo *OnDistance* entrava in conflitto con i metodi *InizioCurva* e *FineCurva* provocando urti e incidenti tra le navette.

Se per esempio, al momento dell'ingresso in curva la prima navetta viene rallentata, una volta non rispettata la distanza di sicurezza, sulla seconda navetta viene attivato il controllo *OnDistance* provocando il rallentamento della stessa.

In alcuni casi, però, durante la frenata, la seconda navetta passava di fronte al sensore presente all'ingresso della curva, e riceveva nuovi parametri dal sensore *InizioCurva* che annullavano la frenata e il rallentamento della navetta, e provocando di conseguenza urti con la navetta di fronte.

Viene quindi inserito l'attributo *global_stop* per risolvere questo problema.

Nel momento in cui il metodo *OnDistance* rileva una distanza con la navetta di fronte inferiore alla distanza di sicurezza impostata viene attivato lo stato di allerta assegnando il valore positivo alla variabile. Entrando o uscendo dalla curva la navetta non riceverà immediatamente i nuovi valori di velocità, accelerazione e decelerazione, ma solo una volta che la variabile *global_stop* avrà assunto un valore pari a *false* e la distanza di sicurezza ristabilita.

5.3.3 Fase 3 – Statistiche

In questa fase ci si concentra sulla modellazione della parte di output della simulazione.

A questo proposito viene creata la tabella Statistiche per tener traccia del numero di missioni in ingresso o in uscita da ogni baia.

Su ogni baia viene creato l'attributo *NumeroMissioni* il cui valore viene incrementato di una unità a seguito di ogni missione di carico e scarico.

Al fine di avere statistiche aggiornate in tempo reale viene introdotto nel modello un *generatore*⁴⁴.

Trascorsa un'ora all'interno della simulazione, viene attivato il generatore che ad intervalli costanti di un minuto attiverà il metodo *OnInterval* (Metodo 10).

Ad inizio simulazione la tabella *Statistiche* viene aggiornata inserendo il nome di tutte le baie presenti nel modello.

```
var j : integer;

@.delete;

j:=1;

for var i:=1 to Inbound.ydim
  Statistiche[1,j]:=Inbound[1,i];
  j:=j+1;
next
for var i:=1 to Warehouse_In.ydim
  Statistiche[1,j]:=Warehouse_In[1,i];
  j:=j+1;
next
for var i:=1 to Warehouse_Out.ydim
  Statistiche[1,j]:=Warehouse_Out[1,i];
  j:=j+1;
next
for var i:=1 to Shipment.ydim
  Statistiche[1,j]:=Shipment[1,i];
  j:=j+1;
next
```

Metodo 9 - "AggiornaStatistiche"

⁴⁴ Il generatore è un oggetto che attiva un metodo ad intervalli di tempo regolari o statisticamente distribuiti a partire da un momento di avvio.

Ad intervalli di tempo regolari viene eseguito il metodo *OnInterval* (Metodo 10) che per ogni stazione aggiornerà il numero di missioni in entrata o in uscita e calcolerà la produttività oraria (LU/H).

```
for var i:=1 to Statistiche.ydim
  if Statistiche[2,i]/=0
    Statistiche[3,i]:=Statistiche[2,i]*3600/time_to_num(eventcontroller.simtime);
  else
    Statistiche[3,i]:=0;
  end
next
```

Metodo 10 - "OnInteval" del generatore

5.3.4 Fase 4 – Adattamento a differenti layout

A questo punto, la fase di costruzione è terminata. Il modello è funzionante ma, come già anticipato, l'esigenza del cliente è quella di modellare con questo strumento quattro magazzini diversi.

Nell'ottica di costruire uno strumento facilmente utilizzabile e configurabile anche in assenza di una conoscenza approfondita di programmazione, al modello vengono aggiunte un'interfaccia che permetta all'utente di modificare i dati di input e la configurazione del layout.

L'obiettivo di questa fase è quello di creare una logica che permetta l'inserimento automatico dei sensori sulla *Track*, rappresentante il binario su cui si muove la navetta.

Sull'oggetto di tipo track, viene creato un controllo, *OnDrag&Drop*, che verrà richiamato tutte le volte che un oggetto sarà rilasciato sulla rotaia.

La caratteristica dei sensori è che la loro posizione non è assegnata in coordinate assolute nello spazio ma la loro posizione è assegnata a partire dalla lunghezza percorsa dall'inizio della *Track* su cui sono posizionati.

Il metodo parte quindi dall'estrazione dei segmenti che costituiscono il percorso per determinare, tramite le coordinate della baia, quale è il segmento più vicino alla baia stessa, trovare la posizione rispetto al punto di partenza della track e posizionare il sensore di fronte ad essa.

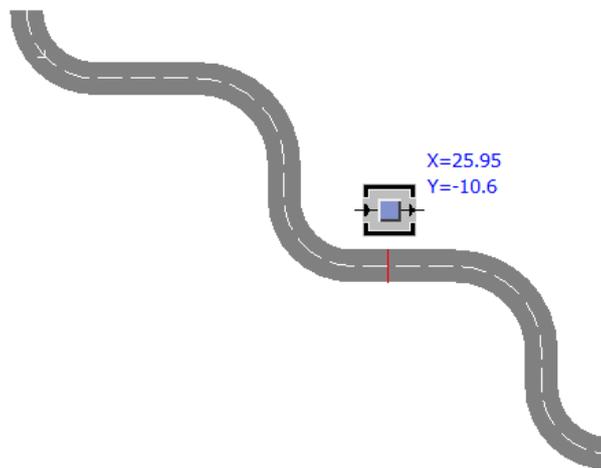


Figura 24 - Rappresentazione di una track con stazione e sensore

Prendiamo in considerazione una situazione formata da un oggetto di tipo track, rappresentante il binario, e una stazione, rappresentante la baia.

Se la baia viene trascinata e rilasciata sulla *Track* il metodo deve determinare in quale posizione creare il sensore.

Per prima cosa, si estrare la tabella contenente tutti i segmenti che costituiscono il tratto di track considerato (Tabella 2).

Tabella 2 - Segmenti della Track

<i>Tangential angle</i>	<i>Length</i>	<i>Curve angle</i>	<i>Radius</i>	<i>Vertical curve</i>	ΔZ	<i>X</i>	<i>Y</i>	<i>Z</i>
					0	15.6	-4.9	0.1
90		-90	2	FALSE	0	17.6	-6.9	0.1
0	3				0	20.6	-6.9	0.1
0		90	2.5	FALSE	0	23.1	-9.4	0.1
0	1				0	23.1	-10.4	0.1
0		-90	2	FALSE	0	25.1	-12.4	0.1
0	3				0	28.1	-12.4	0.1
0		90	2.5	FALSE	0	30.6	-14.9	0.1
0	1				0	30.6	-15.9	0.1
0		-90	2	FALSE	0	32.6	-17.9	0.1

A partire dalla tabella dei segmenti viene creata la tabella *PosizionaSensori* (Tabella 3). Quest'ultima viene usata per individuare quale è il segmento più vicino alla baia.

Tabella 3 - "PosizionaSensori"

<i>Length</i>	<i>Curve angle</i>	<i>Radius</i>	<i>X</i>	<i>Y</i>	<i>Direzione</i>	<i>Cumulata</i>	<i>Dist 1</i>	<i>Dist 2</i>
0	0	0	15.55	-4.9				
0	-90	2	17.55	-6.9		3.14		-1
3	0	0	20.55	-6.9	ORIZZONTALE	6.14		-1
0	90	2.5	23.05	-9.4		10.07		-1
1	0	0	23.05	-10.4	VERTICALE	11.07		-1
0	-90	2	25.05	-12.4		14.21		-1
3	0	0	28.05	-12.4	ORIZZONTALE	17.21	1	1.75
0	90	2.5	30.55	-14.9		21.14		-1
1	0	0	30.55	-15.9	VERTICALE	22.14		-1
0	-90	2	32.55	-17.9		25.28		-1

Per costruire la tabella *PosizionaSensori*, per prima cosa si determina se i segmenti sono curvilinei o rettilinei, e in quest'ultimo caso se si tratta di segmenti orizzontali o verticali.

Successivamente si determina, a partire dalle coordinate della baia, in quali dei segmenti potrebbe essere contenuta.

```
for local i := 1 to draggedObjects.dim
  obj := draggedObjects[i]

  ?.getCurveSegments(Segmenti);

  for var j:=1 to Segmenti.ydim
    PosizionaSensore["Length",j]:=Segmenti["Length",j];
    PosizionaSensore["Curve Angle",j]:=Segmenti["Curve Angle",j];
    PosizionaSensore["Radius",j]:=Segmenti["Radius",j];
    PosizionaSensore["X",j]:=Segmenti["X",j];
    PosizionaSensore["Y",j]:=Segmenti["Y",j];
  next

  for var j:=2 to PosizionaSensore.ydim
    if PosizionaSensore["Curve Angle",j]=0
      if PosizionaSensore["X",j]=PosizionaSensore["X", j-1]
        PosizionaSensore["Direzione",j]="VERTICALE";
      else
        PosizionaSensore["Direzione",j]="ORIZZONTALE";
      end
      PosizionaSensore["Cumulata",j]:=PosizionaSensore["Length",j]
        +PosizionaSensore["Cumulata",j-1];
    else
      PosizionaSensore["Cumulata",j]:=pi*(Abs(PosizionaSensore["Curve Angle",j])/180)
        *PosizionaSensore["Radius",j]+PosizionaSensore["Cumulata",j-1];
    end
  next
next
```

Metodo 11 - "OnDragDrop" – parte 1

In particolare, se la baia è contenuta in un segmento, se si tratta di un segmento orizzontale nella colonna "Dist 1" si inserisce la differenza tra la coordinata in X della baia e del segmento e in "Dist 2" la stessa differenza ma calcolata sull'asse Y, e viceversa in caso di un segmento verticale (Metodo 12).

```
for var j:=2 to PosizionaSensore.ydim
  switch PosizionaSensore["Direzione",j]
  case "ORIZZONTALE"
    if (obj.coordinate3D[1]>PosizionaSensore["X",j-1] AND
        obj.coordinate3D[1]<PosizionaSensore["X",j]) OR
        (obj.coordinate3D[1]<PosizionaSensore["X",j-1] AND
        obj.coordinate3D[1]>PosizionaSensore["X",j])
      PosizionaSensore["Dist 1",j]:=abs(obj.coordinate3D[1]-PosizionaSensore["X",j-1]);
      PosizionaSensore["Dist 2",j]:=abs(obj.coordinate3D[2]-PosizionaSensore["Y",j]);
    else
      PosizionaSensore["Dist 2",j]:=-1;
    end
  case "VERTICALE"
    if (obj.coordinate3D[2]>PosizionaSensore["Y",j-1] AND
        obj.coordinate3D[2]<PosizionaSensore["Y",j]) OR
        (obj.coordinate3D[2]<PosizionaSensore["Y",j-1] AND
        obj.coordinate3D[2]>PosizionaSensore["Y",j])
      PosizionaSensore["Dist 1",j]:=abs(obj.coordinate3D[2]-PosizionaSensore["Y",j-1]);
      PosizionaSensore["Dist 2",j]:=abs(obj.coordinate3D[1]-PosizionaSensore["X",j]);
    else
      PosizionaSensore["Dist 2",j]:=-1;
    end
  else
    PosizionaSensore["Dist 2",j]:=-1;
  end
end
next
```

Metodo 12 - "OnDragDrop" – parte 2

Infine, tra tutti i segmenti in cui la baia potrebbe essere contenuta, deve essere scelto il segmento più vicino tramite la ricerca del minimo, ovvero il segmento la cui “Dist 2” è minore (Metodo 13).

```
minimo:=-1;
for var j:=2 to PosizionaSensore.ydim
  if PosizionaSensore["Dist 2",j]>0
    if minimo=-1
      minimo:=PosizionaSensore["Dist 2",j];
    elseif PosizionaSensore["Dist 2",j]<minimo
      minimo:=PosizionaSensore["Dist 2",j];
    end
  end
end
next

l:=1;
while PosizionaSensore["Dist 2",l]/=minimo
  l:=l+1;
end

distanza:=PosizionaSensore["Cumulata",l-1]+PosizionaSensore["Dist 1", l];
```

Metodo 13 - "OnDragDrop" – parte 3

Una volta individuato il segmento corretto viene creato il sensore la cui posizione viene determinata tramite la cumulata, calcolata in precedenza. Al momento della creazione del sensore è necessario inserire all'interno dello stesso il metodo corretto affinché si comporti come un sensore per carico o per scarico (Metodo 14).

```
for var i:=1 to PosizioneSensore.ydim
  if PosizioneSensore[3,i]=obj.name
    str_to_obj(PosizioneSensore[1,i]).deletesensor(PosizioneSensore[2,i]);
    PosizioneSensore.cutrow(i);
  end
end
next

PosizioneSensore[1,PosizioneSensore.Ydim+1]:=obj_to_str(@);
if obj_to_str(obj.class)="INBOUND" OR
  obj_to_str(obj.class)="WAREHOUSE_OUT"
  PosizioneSensore[2,PosizioneSensore.Ydim]:=
  @.createsensor(distanza, "Length", "self.SensorePerCarico");
elseif obj_to_str(obj.class)="SHIPMENT" OR
  obj_to_str(obj.class)="WAREHOUSE_IN"
  PosizioneSensore[2,PosizioneSensore.Ydim]:=
  @.createsensor(distanza, "Length", "self.SensorePerScarico");
end

PosizioneSensore[3,PosizioneSensore.Ydim]:=obj.name;
```

Metodo 14 - "OnDragDrop" – parte 4

Per ultimo è necessario aggiornare la tabella di corrispondenze tra sensore e stazione in modo da permettere il funzionamento del modello.

5.3.5 Fase 5 – Interfaccia utente

Al fine di permettere la parametrizzazione del modello viene creata un'interfaccia utente che permette all'utente di valutare diverse configurazioni del modello e di valutare diverse alternative.

Tramite l'oggetto *Dialog*⁴⁵ viene creata una finestra di dialogo che permette all'utente di inserire i dati di cui il modello ha bisogno al fine di fornire l'output.

Il pannello di controllo si suddivide in cinque schede: *Dati generali*, *Crea*, *Dati navetta*, *Elimina*, *Lista Missioni* (Figura 31). Attraverso questa interfaccia è possibile accedere e modificare i dati riguardanti:

- il tempo di trasbordo, ovvero il tempo necessario al caricamento e allo scaricamento della navetta;
- il numero di navette da inserire all'interno del circuito;
- il tempo di scarico, ovvero il tempo necessario al mulettista per caricare il camion;
- i dati delle navette quali velocità, accelerazione, decelerazione, la distanza di sicurezza;
- i dati per la creazione della lista missioni.

Inoltre, tramite il pannello di controllo è possibile creare ed eliminare stazioni.

⁴⁵ La *Dialog* è l'oggetto che permette la creazione di finestre di dialogo e interfacce in modo che l'utente possa inserire e modificare i dati di input della simulazione



Figura 25 - Interfaccia utente

Il metodo che permette di modellare la dialog ed eseguire i comandi dell'utente è il metodo *Callback*⁴⁶ (Metodo 15).

In questo caso i triggers⁴⁷ del metodo *callback* sono:

- Open;
- Apply;
- Altri.

Un trigger di tipo *Open* esegue delle azioni al momento dell'apertura del pannello di controllo. Per esempio, alcuni campi possono mostrare i valori attuali delle variabili e altri essere inizializzati o cancellati.

⁴⁶ Questo metodo viene chiamato da un trigger, ovvero all'accadere di un evento per esempio viene attivato al premere di un bottone o alla selezione di un elemento di un elenco.

⁴⁷ Un trigger è un'azione o una procedura la cui esecuzione attiva un altro metodo.

```
case "Open"

  ?.setCaption("CreaNome", "");
  ?.setIndex("CreaTipo",1);
  ?.setIndex("EliminaTipo",1);
  ?.AggiornaElenco("EliminaStazione");

  ?.setCaption("VelRettVuoto", num_to_str(Vel_Rett_Vuoto));
  (...)

  ?.setCaption("Percorso", "");
  ?.setCaption("Gap", num_to_str(.MUs.Transporter.distance));

  ?.setCaption("GiorniDaSimulare", "");
```

Metodo 15 - "Callback" – parte 1

Un altro tipo di trigger è *l'Apply*, ovvero al premere del tasto apply, quando si ha finito di modificare i parametri, i valori di tutte le variabili vengono aggiornati.

```
case "Apply"

  Vel_Rett_Vuoto:=str_to_Num(?.getvalue("VelRettVuoto"));
  (...)

  TempoTrasbordo:=str_to_time(?.getvalue("TempoTrasbordo"));
  for var i:=1 to Inbound.ydim
    str_to_obj(Inbound[1,i]).proctime:=tempotrasbordo;
  next
  (...)

  if existsObject("source")
    source.number:=str_to_num(?.getvalue("NumeroNavette"));
  end

  switch ?.getvalue("TipoNavetta")
  case "Macchina Attuale"
    .MUs.Transporter.length:=2.04;
  case "Macchina Nuova"
    .MUs.Transporter.length:=1.8;
  end
```

Metodo 16 - "Callback" – parte 2

Per esempio, in questo caso vengono aggiornati tutti i campi che sono stati modificati.

Infine, gli altri triggers vengono richiamati attraverso dei *Callback Argument*. Se selezionati o modificati questi elementi attivano a loro volta altri metodi o eseguono delle azioni.

Per esempio (Figura 35), se si seleziona Genera lista, i quattro bottoni sottostanti vengono attivati, e se selezionati eseguiranno a loro volta delle azioni.

```
case "Genera"  
  if ?.getvalue("Genera")="true"  
    Impostazioni.setSensitive("DatiInbound",true);  
    Impostazioni.setSensitive("DatiWarehouseIn",true);  
    Impostazioni.setSensitive("DatiWarehouseOut",true);  
    Impostazioni.setSensitive("DatiShipment",true);  
    Impostazioni.setSensitive("TempoDaSimulareText",true);  
    Impostazioni.setSensitive("GiorniDaSimulare",true);  
  else  
    Impostazioni.setSensitive("DatiInbound",false);  
    Impostazioni.setSensitive("DatiWarehouseIn",false);  
    Impostazioni.setSensitive("DatiWarehouseOut",false);  
    Impostazioni.setSensitive("DatiShipment",false);  
    Impostazioni.setSensitive("TempoDaSimulareText",false);  
    Impostazioni.setSensitive("GiorniDaSimulare",false);  
  end  
  
case "DatiInbound"  
  Inbound.open;
```

Metodo 17 - "Callback" – parte 3

The image displays two screenshots of a web form titled "Genera Lista".

The top screenshot shows the "Genera" checkbox unchecked. Below it are four buttons: "Dati Inbound", "Dati Warehouse In", "Dati Warehouse Out", and "Dati Shipment". At the bottom, there is a label "Tempo da simulare [ore]:" followed by an empty text input field.

The bottom screenshot shows the "Genera" checkbox checked. The layout of buttons and the "Tempo da simulare [ore]:" label with its input field is identical to the top screenshot.

Figura 26 - Callback Arguments

5.4 Validazione del modello

Al termine della fase di costruzione del modello si ha la fase di validazione dello stesso.

Lo strumento creato nella fase precedente viene usato per modellare uno stabilimento reale del cliente: in questo modo le logiche inserite possono essere validate.

Si parte dal layout in scala del magazzino reale, esso viene inserito all'interno del frame e usato per fare in modo che il modello riproduca fedelmente la realtà.

Facendo in questo modo si è sicuri che, per esempio, il circuito su rotaia segua esattamente lo stesso percorso della realtà, le distanze che saranno percorse dalla navetta saranno le stesse che eseguirà la navetta reale e che le baie si trovino esattamente nella posizione corretta.

Il modello così creato (Figura 36) sarà una riproduzione in scala della realtà e pertanto potrà essere usato per lo studio e l'analisi del sistema reale.

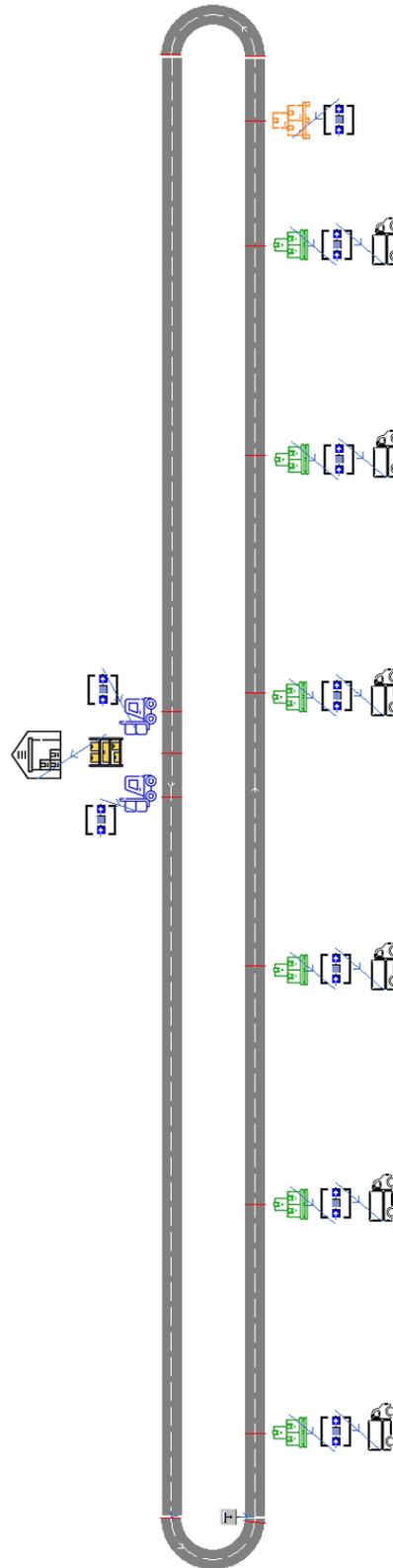


Figura 27 - Rappresentazione in scala del magazzino

Si vuole valutare come varia la produttività al variare il numero di navette nel circuito e del numero delle baie di shipment utilizzate.

L'obiettivo è quindi quello di trovare il dimensionamento migliore del numero di navette necessarie per garantire il raggiungimento del target in determinate condizioni del sistema.

Si preparano quindi due scenari diversi, lo scenario A e lo scenario B, al fine di valutare il sistema in due diverse condizioni di funzionamento.

5.4.1 Dati di input

Per quanto riguarda i dati di input, al fine di ottenere dei risultati significativi, alcuni dati inseriti saranno mantenuti costanti tra i due scenari.

Per l'analisi e il dimensionamento delle navette di questo specifico caso consideriamo di non avere arrivi alla baia di inbound e, con l'assunzione di avere sempre dei pallet disponibili in magazzino di avere in uscita 80 LU/h in ognuna delle due baie di Warehouse out, ovvero un pallet ogni 45 secondi (situazione figura 28).

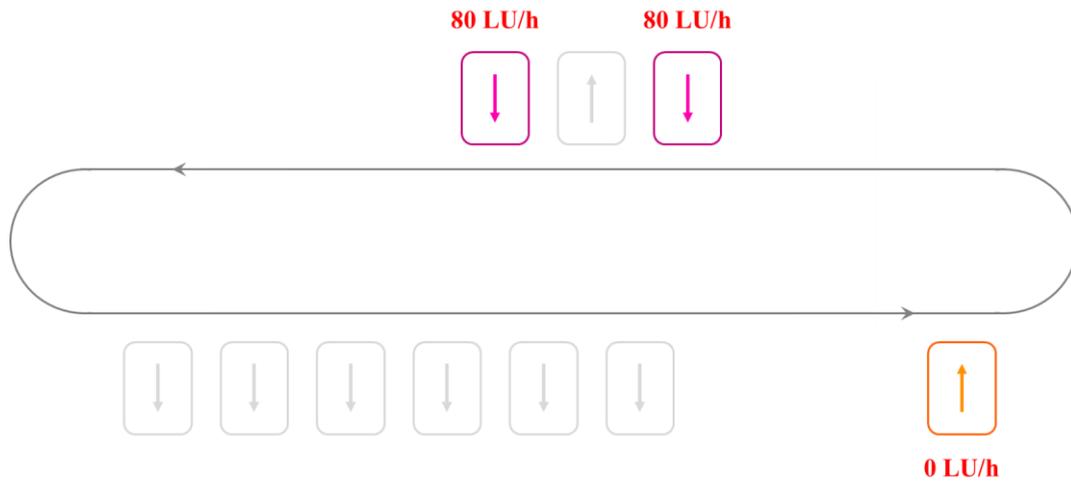


Figura 28 - Rappresentazione dello scenario da realizzare

Per l'analisi dei due scenari si decide di mantenere costanti le caratteristiche delle navette. Vengono quindi impostati dei valori di velocità, accelerazione e decelerazione delle navette e la distanza di sicurezza che deve essere mantenuta (Tabella 4).

Tabella 4 - Caratteristiche delle navette

	Velocità [m/s]	Accelerazione [m/s ²]	Decelerazione [m/s ²]
Rettilineo – Vuoto	2	1	1.33
Rettilineo – Carico	2	0.5	1.33
Curva – Vuoto	1	0.5	1.33
Curva - Carico	0.5	0.5	1.33
GAP da mantenere [m]		4	
Tempo di trasbordo [s]		10	

Un altro valore che sarà mantenuto costante è il tempo di trasbordo che in entrambi gli scenari sarà pari a 10 secondi.

Infine, si è notato che il TH⁴⁸ del sistema è fortemente influenzato dal tempo necessario allo scarico. Pertanto, al fine di non diminuire la significatività dell'analisi, si decide di considerare un tempo di scarico nullo.

Nel primo scenario si vuole valutare il variare del TH al variare del numero delle navette utilizzando solamente due baie di shipment, la prima e la sesta.

Nel secondo scenario, invece, tutte le baie saranno utilizzate.

In entrambi gli scenari il lotto considerato sarà costituito da 32 pallet. Quindi dopo aver consegnato tutti i pallet del lotto nella prima baia, si passerà alla baia successiva.

⁴⁸ Throughput

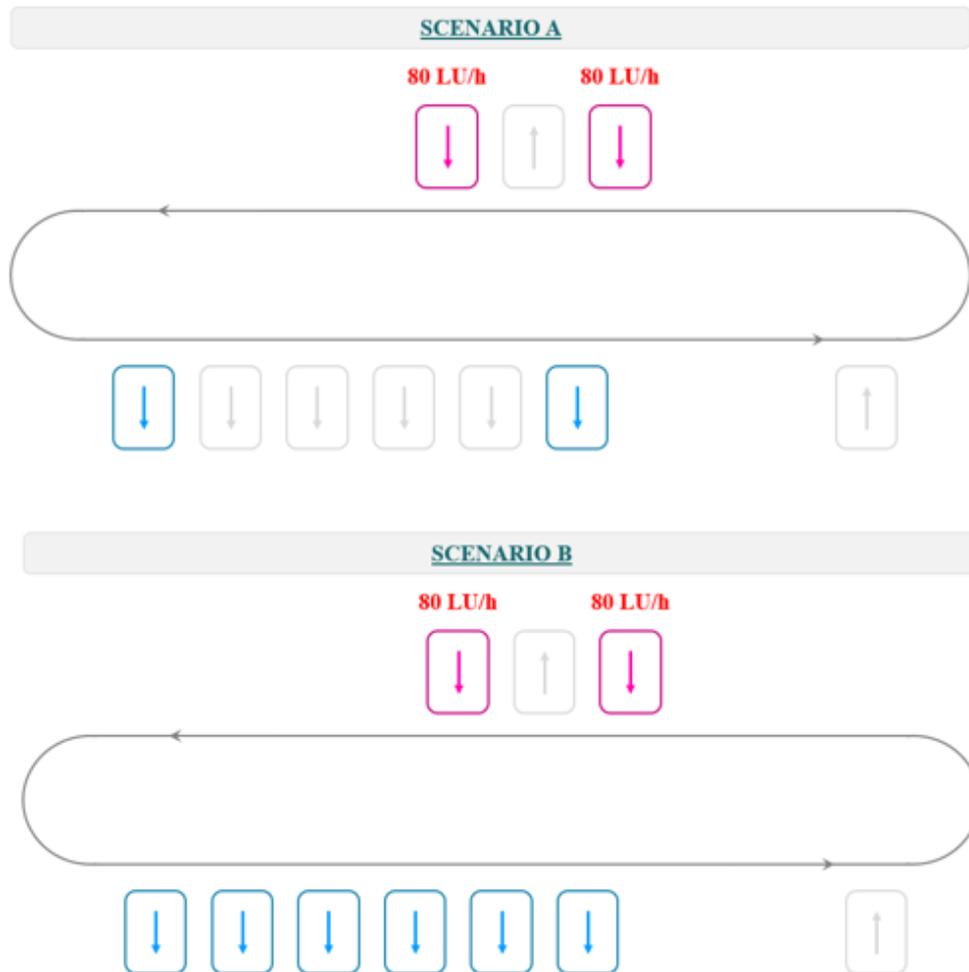


Figura 29 – Confronto tra i due scenari da realizzare

5.4.2 Dati di output/Analisi dei risultati

5.4.2.1 Scenario A

Nelle caratteristiche considerate, con cinque navette si riesce a garantire il target di 80 LU/h.

Tabella 5 - Scenario A: Output di simulazione

Numero navette	Statistiche		
	Baia	Missioni	LU/h
1	Warehouse_Out 1	13440	17.24
	Warehouse_Out 2	13440	17.24
	Shipment 1	13440	17.24
	Shipment 2	13440	17.24
2	Warehouse_Out 1	13440	34.48
	Warehouse_Out 2	13440	34.48
	Shipment 1	13440	34.48
	Shipment 2	13440	34.48
3	Warehouse_Out 1	13440	51.71
	Warehouse_Out 2	13440	51.71
	Shipment 1	13440	51.71
	Shipment 2	13440	51.71
4	Warehouse_Out 1	13440	68.95
	Warehouse_Out 2	13440	68.95
	Shipment 1	13440	68.95
	Shipment 2	13440	68.95
5	Warehouse_Out 1	13440	79.99
	Warehouse_Out 2	13440	79.99
	Shipment 1	13440	79.99
	Shipment 2	13440	79.99
6	Warehouse_Out 1	13440	79.50
	Warehouse_Out 2	13440	79.50
	Shipment 1	13440	79.50
	Shipment 2	13440	79.50
7	Warehouse_Out 1	13440	79.50
	Warehouse_Out 2	13440	79.50
	Shipment 1	13440	79.50
	Shipment 2	13440	79.50

Nel caso in cui nel circuito si avesse una sola navetta, essa non riuscirebbe da sola a garantire il TH voluto in quanto riuscirebbe a consegnare solo 17.24 LU/h pari al 21.55% del target.

Man mano che il numero di navette aumenta il TH si avvicina sempre più al valore del target.

Raggiunto un TH pari al target in uscita, ovvero 80 LU/h, aumentare ulteriormente il numero delle navette non servirebbe a nulla se non ad aumentare il traffico riducendo, anche se di poco, il TH del sistema e la sua efficienza.

5.4.2.2 Scenario B

Anche con le caratteristiche di questo scenario, ovvero volendo utilizzare tutte e sei le baie di shipment, cinque navette permettono di raggiungere il target produttivo di 80 LU/h.

Tabella 6 - Scenario B: Output di simulazione - parte 1

Numero navette	Statistiche		
	Baia	Missioni	LU/h
1	Warehouse_Out 1	13440	17.24
	Warehouse_Out 2	13440	17.24
	Shipment 1	4480	5.75
	Shipment 2	4480	5.75
	Shipment 3	4480	5.75
	Shipment 4	4480	5.75
	Shipment 5	4480	5.75
	Shipment 6	4480	5.75

Simulazione DES: dal digital twin al virtual commissioning
Vehicles loop

2	Warehouse_Out 1	13440	34.48
	Warehouse_Out 2	13440	34.48
	Shipment 1	4480	11.49
	Shipment 2	4480	11.49
	Shipment 3	4480	11.49
	Shipment 4	4480	11.49
	Shipment 5	4480	11.49
	Shipment 6	4480	11.49
3	Warehouse_Out 1	13440	50.45
	Warehouse_Out 2	13440	50.45
	Shipment 1	4480	16.82
	Shipment 2	4480	16.82
	Shipment 3	4480	16.82
	Shipment 4	4480	16.82
	Shipment 5	4480	16.82
	Shipment 6	4480	16.82

Tabella 7 - Scenario B: Output di simulazione - parte 2

Numero navette	Statistiche		
	Baia	Missioni	LU/h
4	Warehouse_Out 1	13440	68.95
	Warehouse_Out 2	13440	68.95
	Shipment 1	4480	22.98
	Shipment 2	4480	22.98
	Shipment 3	4480	22.98
	Shipment 4	4480	22.98
	Shipment 5	4480	22.98
	Shipment 6	4480	22.98
5	Warehouse_Out 1	13440	80.00
	Warehouse_Out 2	13440	80.00
	Shipment 1	4480	26.67
	Shipment 2	4480	26.67
	Shipment 3	4480	26.67
	Shipment 4	4480	26.67

	Shipment 5	4480	26.67
	Shipment 6	4480	26.67
6	Warehouse_Out 1	13440	79.50
	Warehouse_Out 2	13440	79.50
	Shipment 1	4480	26.50
	Shipment 2	4480	26.50
	Shipment 3	4480	26.50
	Shipment 4	4480	26.50
	Shipment 5	4480	26.50
	Shipment 6	4480	26.50

5.4.3 La massima produttività del sistema

Un altro dato che potrebbe essere interessante conoscere è quale è la massima produttività del sistema.

Considerando che al momento della progettazione, questo magazzino era stato pensato per essere usato con nove navette, per il cliente potrebbe essere interessante conoscere quale è il TH massimo che il sistema è in grado di garantire inserendo nel sistema un numero di navette pari a nove.

Se in uscita dalle baie di Warehouse Out inserissimo dei valori molto alti, impossibili da raggiungere, al termine della simulazione avremo il numero massimo di missioni che le nove navette sono riuscite a compiere.

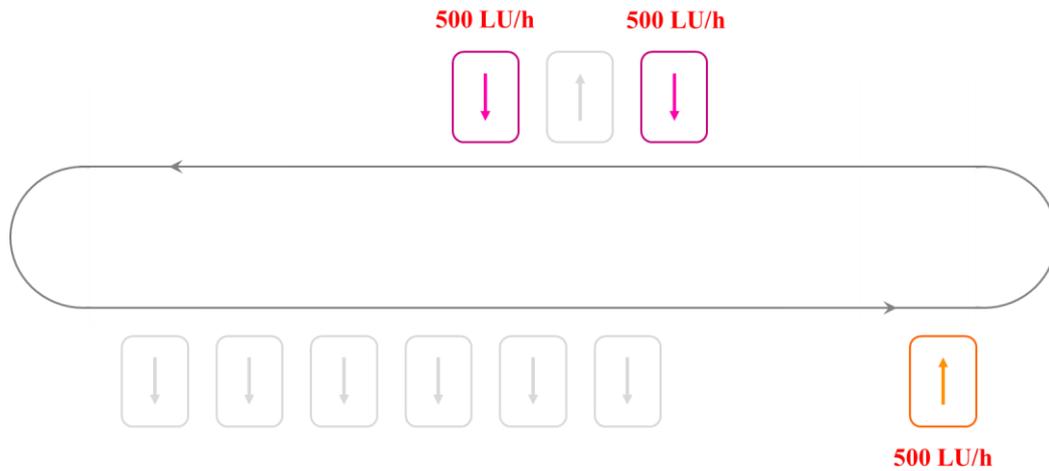


Figura 30 - Scenario da realizzare

Se inseriamo in uscita dalle due baie di warehouse out missioni in modo da avere 500 missioni/h, al termine della simulazione si ottiene il TH massimo del sistema nelle condizioni considerate.

Al termine dei sette giorni di simulazione, si ha che in uscita dalle stazioni si hanno in media 93.29 LU/h.

Tabella 8 - Output di simulazione con 9 navette

Numero navette	Statistiche		
	Baia	Missioni	LU/h
9	Inbound 1	86400	93.29
	Warehouse_In 1	86400	93.29
	Warehouse_Out 1	86400	93.29
	Warehouse_Out 2	86400	93.29
	Shipment 1	28800	31.10
	Shipment 2	28800	31.10
	Shipment 3	28800	31.10
	Shipment 4	28800	31.10
	Shipment 5	28800	31.10
Shipment 6	28800	31.10	

5.5 Sviluppi futuri

Il caso studio considerato potrebbe evolversi in un caso di virtual commissioning e, al fine dell'automazione industriale, il modello di simulazione creato potrebbe essere messo in comunicazione con la realtà e scambiare dati direttamente con il mondo reale.

Nell'ambito del virtual commissioning il modello di simulazione creato diventerebbe il "cervello" e avrebbe la possibilità di comunicare con i dispositivi I/O sul campo, come sensori e attuatori reali, che permetteranno lo scambio di informazioni come la raccolta dei dati e la comunicazione con organi di comando e azionamenti.

In riferimento al caso studio presentato precedentemente, la presenza di una navetta di fronte ad una baia, per esempio, sarebbe rilevata e comunicata al "cervello". L'informazione della presenza di un elemento di fronte a una baia, rilevata attraverso i sensori reali posti di fronte alla baia, sarebbe passata all'ambiente virtuale della simulazione che prenderà una decisione.

Per esempio, il nostro "cervello" potrebbe decidere di fermare la navetta e quindi di iniziare la decelerazione. La decisione e le istruzioni di comando, oltre ad essere eseguite nell'ambiente virtuale, vengono comunicate al PLC e agli attuatori in comunicazione con gli azionamenti che farebbero frenare la navetta reale.

Parlando di VC, la tecnica che permette di stabilire la connessione tra i PLC, e quindi il mondo reale, e l'ambiente virtuale è il protocollo OPC⁴⁹.

⁴⁹ Ole for Process Control

La comunicazione tra l'ambiente virtuale della simulazione e il mondo reale avviene tramite OPC UA⁵⁰, un protocollo di comunicazione automatico che permette l'accesso e lo scambio dei dati con i PLC tramite Intranet, Internet o Wan.

Si tratta di un protocollo che permette lo scambio di informazioni tramite una comunicazione client-server tra il PLC e i client OPC ad esso connessi, permettendo quindi ai server e alle apparecchiature sul campo di comunicare con i client OPC. Questo tipo di comunicazione permette la sincronizzazione in tempo reale tra il PLC e il software di simulazione.

Nel caso in cui la navetta dovesse arrestarsi, per esempio per eseguire il carico o lo scarico di un pallet, il comando di fermarsi verrebbe dato direttamente dal modello di simulazione alla navetta reale. Tramite OPC l'informazione viene trasferita al controllore logico programmabile che agirà direttamente sugli azionamenti, con il conseguente arresto della navetta.

Lo stesso avverrebbe entrando in curva o all'arrivo di un pallet ad una baia: tramite il protocollo OPC UA e la possibilità di scambiare informazioni con sensori e attuatori, l'ambiente virtuale della simulazione potrebbe controllare il comportamento del sistema reale.

⁵⁰ OPC Unified Architecture

6 Conclusioni

Garantire al cliente prodotti e servizi personalizzati, con elevati livelli di qualità, a basso costo e in un tempo di consegna rapidi è l'obiettivo di ogni azienda.

Grazia al progetto formativo ho potuto comprendere come la simulazione sia importante all'interno di un processo manifatturiero. Qualsiasi sia il settore in cui si operi, l'analisi del sistema attraverso un modello di simulazione può portare grossi benefici.

Se dovessimo analizzare un impianto, un magazzino o un sistema logistico e validare i mix produttivi o il dimensionamento di attrezzature, pallet e sistemi di movimentazione tramite un'analisi statica le approssimazioni e le semplificazioni sarebbero innumerevoli. Se cercassimo di analizzare il comportamento di un sistema in determinate condizioni, la complessità del calcolo aumenterebbe in proporzione al numero delle variabili da considerare. Il modello così ottenuto non sarebbe significativo e non descriverebbe il comportamento del sistema.

Se da un lato durante il tirocinio ho potuto vedere il contributo dato da un modello di simulazione, che in molti casi ha permesso di rilevare e correggere errori prima che fosse troppo tardi, dall'altro ho notato come l'utilità e i benefici ottenibili da un modello di simulazione non sia riconosciuta da molte aziende.

Molte aziende, infatti, all'inizio del progetto non credevano che gli output di simulazione avrebbero in qualche modo aiutato la fase di progettazione. Già dopo i primi risultati, però, l'atteggiamento cambiava: alcune aziende erano sollevate nel

vedere le loro stime confermate, altre, invece, nel ricevere risultati diversi da quelli sperati erano preoccupate di non riuscire a raggiungere i target stabiliti.

In riferimento al progetto di tesi, il risultato della simulazione ha rivelato che durante la progettazione del magazzino e del sistema di movimentazione annesso il cliente aveva commesso errori.

Il magazzino che è stato riprodotto attraverso la simulazione deve garantire, in un primo momento, un throughput di 80 LU/ora. Questo output è ottenibile, come dimostrato, senza difficoltà e soprattutto è raggiungibile anche senza utilizzare tutte le baie.

In un secondo momento, lo stesso magazzino avrebbe dovuto garantire, con l'aggiunta di alcune navette, un output più elevato. Questo risultato però non è raggiungibile con le 9 navette che erano state stimate. Come visto, inserendo 9 navette all'interno del circuito, la produttività massima ottenibile è di 93,29 LU/ora, risultato inferiore al target.

Il progetto di tesi vuole definire e chiarire le differenze tra i termini “digital twin”, “simulazione” e “virtual commissioning”.

Il digital twin è quindi la riproduzione virtuale di un sistema e quindi nel caso studio comprende il circuito su rotaia, le navette, e le baie.

A partire dal digital twin si crea un modello di simulazione, ricreando le condizioni di funzionamento e inserendo, per esempio, all'interno del sistema le 9 navette.

Si parlerà di virtual commissioning quando il modello sarà collegato a sensori e attuatori reali e permetterà di controllare il sistema reale.

In conclusione, un articolo scritto da SimTec durante il periodo del tirocinio permette di riassumere i temi principali affrontati nel corso della trattazione.

“Il Virtual Commissioning può essere considerata quella fase intermedia tra la progettazione e la messa in servizio di un sistema automatizzato, nella quale si costruisce un ambiente virtuale (Digital Twin) che consente la validazione del sistema automatizzato, con l’obiettivo finale di testare gli elementi progettati e le relative automazioni controllate dai plc. Sono anni che si cerca una soluzione per riprodurre il comportamento virtuale di un sistema o di un impianto, con la sfida di applicarlo a una realtà operativa e funzionante. Fino alla fine del secolo scorso, però, i pezzi del puzzle non combaciavano: la tecnologia a disposizione non supportava con precisione questa visione, limitandosi all’emulazione delle singole stazioni. L’intuizione degli anni Novanta fu quella di poter in futuro simulare interi stabilimenti ed emulare le parti ritenute più critiche a livello di automazione. ...

Oltretutto, tramite l’animazione grafica, ormai molto più fruibile che un tempo, è possibile visualizzare e rendere più comprensibile l’oggetto stesso della simulazione, gli ipotetici cambiamenti al sistema, senza effettuare investimenti ingenti, riuscendo anche ad avere un controllo sul tempo. ...

Il Digital Twin come modello di funzionamento predittivo del sistema è in definitiva la nuova frontiera per valutare correttamente l’impatto di nuove soluzioni tecnico-impiantistiche e, se necessario, organizzative, prima dell’implementazione, capendo se, in ogni momento, tutto stia andando per il verso giusto. Il connubio vincente è dato dalla progettazione meccanica e del layout del sistema validato da Virtual Commissioning: si valutano le criticità su diversi livelli potendo modificare layout, macchine, logiche prima della parte esecutiva.” (Automazione Industriale, 2019).

7 Bibliografia – Referenze

- 5 trend tecnologici seguire nel 2018.* (s.d.). Tratto da injenia:
<https://www.injenia.it/5-trend-tecnologici-seguire-nel-2018/>
- Arriva la quarta rivoluzione industriale: lo smart manufacturing.* (s.d.). Tratto da Rai: <http://www.economia.rai.it/articoli/arriva-la-quarta-rivoluzione-industriale-lo-smart-manufacturing/30732/default.aspx>
- Astarita, C. (2017, Ottobre 27). *Perché i robot ci rubano il lavoro.* Tratto da Panorama: <https://www.panorama.it/economia/lavoro/perche-robot-ci-rubano-il-lavoro/>
- Automazione Industriale. (2019, Giugno). Il virtual commissioning.
- Automha.* (s.d.). Tratto da <https://www.automha.it/rushmover/>
- CAD.* (s.d.). Tratto da Wikipedia: <https://it.wikipedia.org/wiki/CAD>
- Cassandras, C. G., & Lafortune, S. (s.d.). *Introduction to Discrete Event System.* Springer.
- Cronaca della quarta rivoluzione industriale.* (2016, Novembre 25). Tratto da Wired.it: <https://www.wired.it/attualita/tech/2016/11/25/cronaca-della-quarta-rivoluzione-industriale/>
- Definizione sistema.* (s.d.). Tratto da Treccani:
<http://www.treccani.it/enciclopedia/sistema/>
- Definizione sistema.* (s.d.). Tratto da Dizionari Corriere:
https://dizionari.corriere.it/dizionario_italiano/S/sistema.shtml
- Digital Transformation: per le pmi progressi lenti.* (s.d.). Tratto da Industria Italiana: <https://www.industriaitaliana.it/digital-transformation-per-le-pmi-progressi-lenti/>

- Digital Twin*. (2018, Dicembre 12). Tratto da Automazione News:
<https://www.automazionenews.it/digital-twin/>
- Digital Twin Applications*. (s.d.). Tratto da ABB Asea Brown Boveri Ltd:
<https://new.abb.com/control-systems/features/digital-twin-applications>
- Digital Twin revenues to reach \$13 billion by 2023, fuelled by AI & machine learning innovation*. (2019, Aprile 9). Tratto da Juniper Research:
[https://www.juniperresearch.com/press/press-releases/digital-twin-revenues-to-reach-\\$13-billion](https://www.juniperresearch.com/press/press-releases/digital-twin-revenues-to-reach-$13-billion)
- Flammini, A. (s.d.). Dispense del corso Sistemi per l'automazione e PLC - Introduzione all'automazione industriale.
- G. N. (2017, Gennaio 20). *La Quarta Rivoluzione Industriale: sintesi di un cambiamento strutturale*. Tratto da Oggi Scienza:
<https://oggiscienza.it/2017/01/20/quarta-rivoluzione-industriale-innovazione/>
- Gestione del ciclo di vita del prodotto*. (s.d.). Tratto da Wikipedia:
https://it.wikipedia.org/wiki/Gestione_del_ciclo_di_vita_del_prodotto
- Gianluca Sacco, spazio all'innovazione con il Virtual Commissioning*. (2013, Ottobre 30). Tratto da Meccanica News:
<https://www.meccanicaneWS.com/2013/10/30/gianluca-sacco-spazio-allinnovazione-con-il-virtual-commissioning/>
- Grimaldi, S. (2019). Programmazione della produzione e logistica - Elementi di gestione dei progetti.
- Grimaldi, S. (s.d.). Slides del corso di Programmazione della produzione e Logistica.
- Hype Cycle*. (s.d.). Tratto da Wikipedia: https://it.wikipedia.org/wiki/Hype_cycle
- I robot non rubano il lavoro*. (2018, Novembre 5). Tratto da Il foglio:
<https://www.ilfoglio.it/economia/2018/11/05/news/i-robot-non-rubano-il-lavoro-222639/>
- Increasing Control Software Quality With Virtual Commissioning*. (2016, Marzo 18). Tratto da Visual Components:
<https://www.visualcomponents.com/insights/articles/increasing-control-software-quality-with-virtual-commissioning/>

Industria 4.0, la chiave dell'efficienza è nei "lavoratori connessi". (s.d.). Tratto da Internet 4 things: <https://www.internet4things.it/industry-4-0/industria-4-0-la-chiave-dellefficienza-e-nei-lavoratori-connessi/>

Industria 4.0. Scenari, Prospettive, Problemi. (2016). Tratto da Treccani: http://www.treccani.it/istituto/sala_stampa/comunicati/comunicati_2016/cs46.html

Industry 4.0 - La storia della rivoluzione industriale. (s.d.). Tratto da Team3D: <https://www.team3d.it/industry-4-0-la-storia/>

Intini, E. (2018, Aprile 12). *I robot ci rubano il lavoro no ne creano di nuovo*. Tratto da Focus: <https://www.focus.it/comportamento/economia/i-robot-ci-rubano-il-lavoro-no-ne-creano-di-nuovo>

Kalwani, S. (2017, Agosto 31). *The Evolution of Digital Twins for Asset Operators*. Tratto da Element Analytics: <https://www.elementanalytics.com/blog/digital-twin-blog-part-2>

Koon, J. (2019, Gennaio 31). *Getting the Most Value with a Digital Twin*. Tratto da Engineering: <https://www.engineering.com/DesignSoftware/DesignSoftwareArticles/ArticleID/18398/Getting-the-Most-Value-with-a-Digital-Twin.aspx>

Koppel, A. (2018, Luglio 16). *Meet the digital twin—the key technology in your smart factory*. Tratto da A medium corporation: https://medium.com/@i4ms_eu/meet-the-digital-twin-the-key-technology-in-your-smart-factory-16d5cf0dd284

La “Corsa del Latte” (MILK-RUN): un approvvigionamento più efficiente e flessibile! (s.d.). Tratto da LapiLogistica: <https://www.lapilogistica.com/azienda/news/53-la-corsa-del-latte-milk-run-un-approvvigionamento-piu-efficiente-e-flessibile>

La prima rivoluzione industriale. (s.d.). Tratto da Cultura Nuova: <https://www.culturanuova.net/storia/3.contemp/1a.rivoluzione.industriale.php>

La seconda rivoluzione industriale. (s.d.). Tratto da Treccani: http://www.treccani.it/export/sites/default/scuola/lezioni/storia/SECONDA_RIVOLUZIONE_INDUSTRIALE_ lezione.pdf

- La terza rivoluzione industriale.* (s.d.). Tratto da Sapere.it:
<http://www.sapere.it/sapere/strumenti/studifacile/geografia-economica/Il-pianeta-uomo-e-la-tecnosfera/Il-sistema-industriale/La-terza-rivoluzione-industriale-.html>
- Morgan, D. (2018, Gennaio 30). *Intelligent enterprises for the 4th industrial revolution.* Tratto da Avanade:
<https://www.avanade.com/en/blogs/avanade-insights/avanade-spotlight/intelligent-enterprises-for-the-4th-industrial-revolution>
- Nuove professioni da Industria 4.0.* (2016, Ottobre 03). Tratto da Il Sole 24 Ore:
<https://www.ilsole24ore.com/art/impresa-e-territori/2016-10-03/nuove-professioni-industria-40-063726.shtml?uuid=ADrNk4UB>
- Organizzazione di un magazzino: le sei aree funzionali.* (s.d.). Tratto da e-commerce e logistica: <http://www.ecommerceelogistica.it/organizzazione-magazzino-le-sei-aree-funzionali/>
- Plana, R. (2017, Novembre 6). Innovation & ecosystem director di GE Digital.
Product Life Cycle Risk Management. (2017, Dicembre 20). Tratto da intechopen:
<https://www.intechopen.com/books/risk-management-treatise-for-engineering-practitioners/product-life-cycle-risk-management#F2>
- Reinhart, G., & Wunsch, G. (2007). *Economic Application of virtual commissioning to mechatronic production systems.*
- Richter, I. (2019, Gennaio 10). *How digital twins are completely transforming manufacturing.* Tratto da Seebo Blog: <https://blog.seebo.com/digital-twin-technology-cornerstone/>
- Saracco, R. (2018, Febbraio 13). *Industry 4.0, come il modello “digital twin” migliora sviluppo e prodotti.* Tratto da Agenda Digitale:
<https://www.agendadigitale.eu/industry-4-0/industry-4-0-modello-digital-twin-migliora-sviluppo-prodotti/>
- Simulation.* (s.d.). Tratto da Business Dictionary:
<http://www.businessdictionary.com/definition/simulation.html>
- Sistema.* (s.d.). Tratto da Treccani: <http://www.treccani.it/enciclopedia/sistema/>
- Sito di Simtec.* (s.d.). Tratto da <https://www.simtec-group.eu/it/>

Solutions in Action: Power Automation Systems. (s.d.). Tratto da Rockwell Automation: https://www.rockwellautomation.com/global/news/case-studies/detail.page?pagetitle=OEM-Solution%3A-Power-Automation-Systems&content_type=casestudy&docid=08b4a4841d7d31a2851b6129fc11fde9

The history and creation of the digital twin concept. (2019). Tratto da Challenge.org: <https://www.challenge.org/insights/digital-twin-history/>

Tobe, F. (2016, Luglio 25). *Challenges for the Digital Twin concept.* Tratto da Designworldonline: <https://www.designworldonline.com/challenges-digital-twin-concept/>

Verification vs Validation. (s.d.). Tratto da Software Testing Fundamentals: <http://softwaretestingfundamentals.com/verification-vs-validation/>

Virtual Commissioning. (2017). Tratto da BSim engineering: <https://www.bsim-engineering.com/blog/virtual-commissioning/>

What is simulation. (s.d.). Tratto da Talumis: <https://www.talumis.com/what-is-simulation/>