



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea triennale in Ingegneria Meccanica

Analisi degli strumenti per la realizzazione dei Digital Twin per
scopi industriali

Analysis of Digital Twin creation tools for industrial purposes

Relatore: Chiar.mo

Prof. Filippo Emanuele Ciarapica

Tesi di Laurea di:

Simone Brega

A.A. 2019 / 2020

Sommario

INTRODUZIONE	1
1 CAPITOLO: IL DIGITAL TWIN	3
1.1 Che cos'è il Digital Twin?.....	3
1.2 Come funziona il Digital Twin?	5
1.3 Digital Twin nell'Industria Manifatturiera.....	9
1.3.1 Industria 4.0.....	11
1.3.2 Digital Twin in campo manifatturiero.....	15
1.3.3 I vantaggi	18
1.3.4 Entrate supplementari dovute al Digital Twin	21
1.3.5 Esempi di utilizzo del Digital Twin	23
2 CAPITOLO: CASI DI STUDIO.....	28
2.1 Sistemi ciberfisici e Digital Twin	28
2.2 Digital Twin e Additive Manufacturing	40
2.3 Digital twin e logistica di cantiere.....	55
CONCLUSIONI.....	74
SITOGRAFIA	
ELENCO DELLE FIGURE	

INTRODUZIONE

Internet of Things (IoT), nella definizione italiana “Internet delle cose”, nasce dalla convergenza tra sensoristica, elaborazione e comunicazione in rete di apparati digitali specializzati pensati per essere impiegati ovunque serva raccogliere ed elaborare informazioni, automatizzare o integrare il funzionamento di dispositivi diversi.

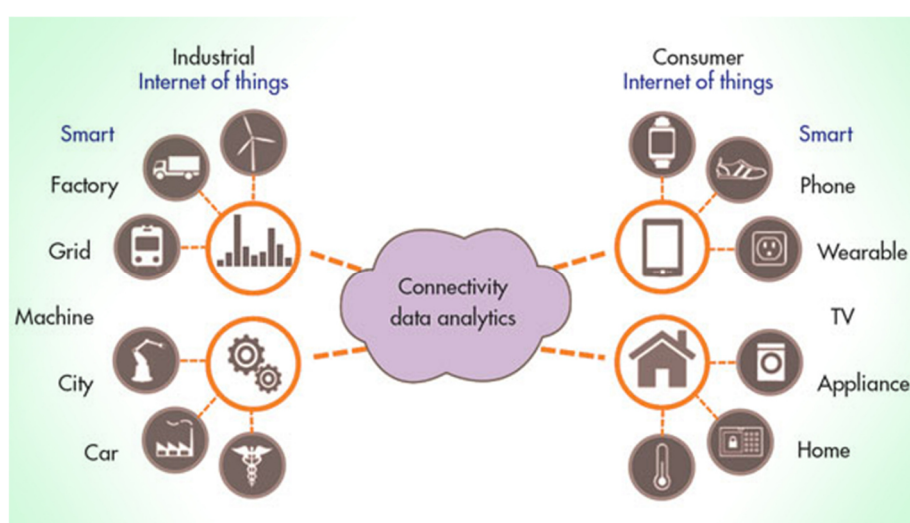


Figura 0.1: Insieme di esempi riguardanti l'utilizzo dell'analisi dei dati

Rispetto ai sistemi embedded, di cui raccoglie il testimone, il significato di Internet of Things sviluppa al massimo livello i concetti della comunicazione in rete per permettere l'interazione tra oggetti, come ad esempio tra apparati di produzione destinati a operare insieme, tra apparati e sistemi aziendali utilizzati per la pianificazione, la sicurezza e la manutenzione. Tale capacità di dialogo consente oggi di avvalersi dei servizi in *cloud* (spazio di archiviazione personale che risulta essere accessibile in qualsiasi momento ed in ogni luogo utilizzando semplicemente una qualunque connessione ad Internet) per elaborazioni dati sofisticate o per l'inserimento in processi di business complessi. In parole povere dunque

l'Internet of Things permette di informatizzare e mettere in rete le “cose”, esattamente come personal computer e smartphone hanno fatto con le persone.

La connettività IoT offre al settore manifatturiero un numero crescente di modi per accedere ai dati basati su sensori installati in macchine e apparecchiature industriali, e da questo deriva una necessità sempre più cruciale di metodi di analisi, gestione e controllo delle informazioni. La quantità di dati raccolti dal monitoraggio di una smart factory può essere infatti enorme, ma se quest'ultimi non vengono aggregati ed organizzati in modo tale da supportare il processo decisionale, non sono purtroppo di alcuna utilità.

Un metodo che si sta rivelando inestimabile per i team di progettazione e assistenza clienti che cercano di sfruttare al meglio i dati raccolti è quello del ***Digital Twin***.

1 **CAPITOLO: IL DIGITAL TWIN**

1.1 **Che cos'è il Digital Twin?**

Il concetto di *digital twin*, tradotto anche come “gemello digitale”, fu usato per la prima volta nel 2002 da Michael Grieves, oggi Chief Scientist for Advanced Manufacturing presso il Florida Institute of Technology, che durante un corso di Product Lifecycle Management (PLM) presso l'Università del Michigan descriveva il digital twin come la copia virtuale di un servizio o di un prodotto reale.

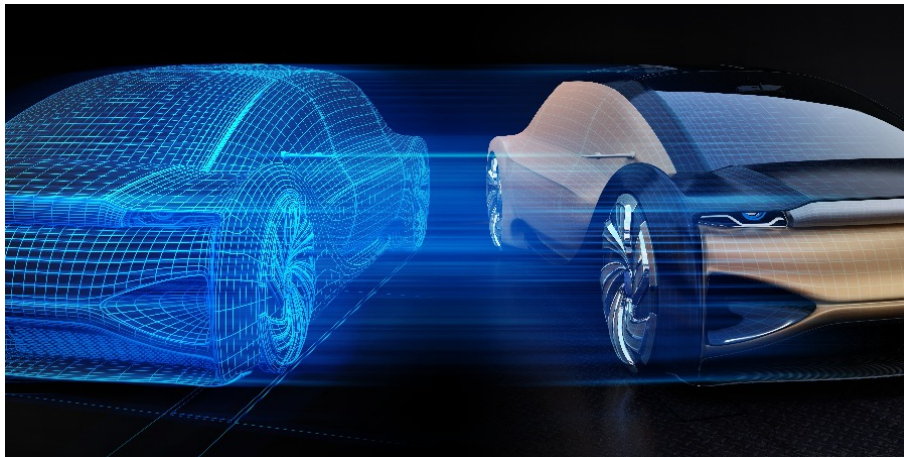


Figura 1.1: Esempio di digital twin

Il settore aerospaziale è stato un pioniere nell'utilizzo del digital twin: la NASA è stata la prima a sperimentarne le potenzialità, fin dagli albori dell'esplorazione dello spazio, addirittura ben prima che fosse del tutto identificato e teorizzato. Ovviamente l'ambito si prestava bene dato che in un contesto così distante da mezzi fisici occorreva controllare, effettuare manutenzione e riparare sistemi. Da qui l'ente spaziale statunitense ha avviato studi che hanno poi portato all'impiego dei gemelli digitali in contesti molteplici, potendo simulare condizioni d'uso.

L'abbinamento dei mondi virtuale e fisico consente di analizzare i dati e monitorare i sistemi per poter individuare eventuali problemi prima che essi si verifichino, prevenire i guasti, sviluppare nuove opportunità e persino pianificare il futuro mediante simulazioni. L'avvento della Internet of Things ha accelerato l'affermazione del digital twin, poiché il posizionamento di sensori negli ambienti fisici ne consente il collegamento con corrispondenti ambienti di simulazione nel cloud, rendendo possibili analisi sofisticate anche a notevole distanza. Alla base c'è sia la disponibilità di software particolarmente sofisticati, che la capacità di raccogliere e processare grandi quantità di dati attraverso i sensori presenti all'interno dei vari macchinari. Grazie a ciò, come già accennato in precedenza, è possibile anche analizzare e diagnosticare l'operatività di un prodotto dall'interno, per capire in modo concreto come poterlo modificare e migliorare in futuro.

Entrando un po' più nello specifico, possiamo dire che il concetto di digital twin può essere diviso in altri due "sottoconcetti", per meglio identificare i processi di riferimento:

- Il *Digital Twin Prototype* (DTP), che riguarda progetti, analisi e processi volti alla realizzazione di un prodotto fisico, gemello di quello virtuale;
- La *Digital Twin Instance* (DTI), che rappresenta il gemello digitale di ogni specifico prodotto realizzato, con un collegamento che dura per tutto il ciclo vita del prodotto.

DTP e DTI sono gestiti nel *Digital Twin Environment* (DTE), mentre il *Digital Twin Aggregate* (DTA) è l'aggregazione dei DTI, i cui dati e informazioni, digitali, possono essere utilizzati per interrogazioni che riguardano il prodotto fisico. Fanno capo al Digital Twin molte altre suddivisioni, che però spesso restano più a livello accademico, mentre, in senso più pratico, chi, aldilà delle definizioni e dei sotto concetti, fa da guida sono i casi pratici.

Secondo uno studio di Gartner (società che si occupa di consulenza strategica, ricerca e analisi nel campo della tecnologia dell'informazione) nel 2018 il 48% delle aziende interessate nell'IoT stanno progettando l'uso di digital twin, che consentirebbe, come già detto, di testare le soluzioni prima che esse vengano effettivamente applicate e questo converrebbe notevolmente in termini puramente economici, si risparmierebbe circa il 50% del tempo e la produzione incrementerebbe del 20%.

Come per precedenti importanti punti di svolta nella storia dell'umanità, basti guardare alla nascita dell'agricoltura o alla rivoluzione industriale, digital twin e IoT industriale rappresentano un vero e proprio cambiamento epocale nel campo della produzione.

1.2 Come funziona il Digital Twin?

Tecnologicamente parlando il digital twin si basa su tre pilastri: un oggetto o dispositivo fisico e reale, un alter ego virtuale esistente nel mondo digitale e un "ponte" in grado di collegare le due parti, connettendole, raccogliendo e inviando numerose informazioni. A livello ideale quindi, un digital twin contiene tutte le informazioni dell'oggetto fisico attraverso una rappresentazione tridimensionale dei suoi aspetti a livello meccanico, a livello geometrico e a livello elettronico, ovvero software incorporato, micro software, dati di prodotto e dati associati a sensori e attuatori, tutti sempre più pervasivi.

Conceptual Ideal for PLM

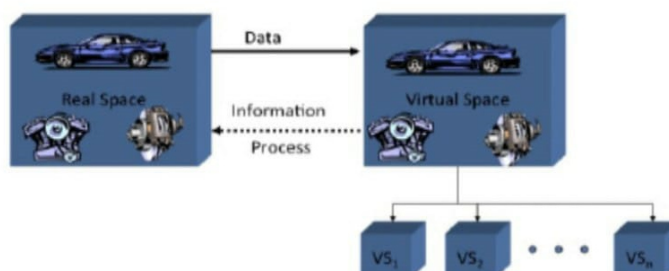


Figura 1.2: Come è strutturato un digital twin

La tecnologia digitale gemellare utilizza sensori collegati al cloud integrati nelle macchine per caricare dati operativi in tempo reale, producendo così simulazioni virtuali aggiornate di macchine reali. I produttori possono quindi utilizzare direttamente tale prototipo virtuale per analizzare e valutare il rendimento dei loro prodotti sul campo. L'obiettivo finale è quello di avere un contesto digitale in esecuzione per ogni risorsa del mondo reale sul campo, con la replica virtuale pronta ad aggiornare il suo stato grazie alla ricezione e analisi dati.

L'Internet of Things, come detto, è la chiave per implementare tale tecnologia. La crescente convenienza dei sensori, l'uso ormai diffuso del Wi-Fi e la capacità di trasmissione dei dati del cloud si combinano per rendere l'applicazione della modellazione digitale accessibile su larga scala per una vasta gamma di soluzioni e per un'ampia platea di aziende. Ma da dove si origina un digital twin? In generale, la creazione di un gemello digitale risponde a due particolari esigenze: da una parte, progettare i processi futuri e i vari requisiti informativi appartenenti al ciclo di vita del prodotto, cioè dalla progettazione di quest'ultimo all'uso effettivo sul campo, per non parlare poi della manutenzione alla quale sarà sottoposto nel mondo reale; dall'altra, creare una tecnologia abilitante per integrare l'asset fisico e il suo gemello digitale e il relativo flusso di dati in tempo reale dei sensori e delle informazioni

operative e transazionali provenienti dai sistemi centrali dell'azienda, come espresso in un'architettura concettuale di tipo orizzontale.

Semplificando il tutto, possiamo dire che il gemello digitale serve come replica virtuale di ciò che sta effettivamente accadendo in un ambiente in tempo reale. Questo, come già accennato, è possibile grazie a tutta quella sensoristica che è distribuita ovunque nell'ambiente fisico e nelle componenti di processo, che esso sia un'azienda con macchinari o uno smart building con sale e impianti vari. Tali sensori processano i segnali, di vario tipo, permettendo al digital twin di catturare dati operazionali e ambientali, e grazie alla tecnologia di aggregazione tra il mondo fisico e il mondo digitale, di elaborarli, il tutto mediante tecniche analitiche, impiegate per analizzare i dati attraverso simulazioni algoritmiche. Da qui la risposta, tramite *attuatori*, ovvero dispositivi fisici che rispondono a una determinata esigenza o problema da risolvere.

I gemelli digitali possono utilizzare sistemi di *machine learning* e di *artificial intelligence* (AI) per elaborare i dati e produrre nuova conoscenza. In quanto cloni digitali evoluti del mondo fisico, infatti, portano a nuove opportunità di collaborazione tra esperti di prodotto e scienziati dei dati il cui compito è analizzare i dati raccolti da una pluralità di fonti al fine di comprendere le tendenze e generare modelli interpretativi che portino valore alle organizzazioni. Standardizzando i dati e i metadati, altre fonti di informazione, come codici di programmazione, documentazioni, articoli, video o progetti scientifici, possono essere strutturate facilmente e collegate al digital twin. Si tratta di un vero e proprio passo in avanti verso una collaborazione che possiamo definire “intensiva”, poiché le informazioni possono essere condivise in modo efficiente all'interno di tutta l'azienda, attraverso diversi profili, dipartimenti e silos di informazioni. Abilitando nuove economie di scala, le risorse

ottengono le stesse informazioni di tutte le fabbriche del mondo, facilitando così il raggiungimento degli obiettivi aziendali globali. Inoltre, i dipendenti che non conoscono un progetto o l'azienda possono essere inseriti rapidamente nel sistema, accelerando in questo modo la loro produttività.

Questa associazione tra realtà fisica e realtà virtuale consente di attivare un'analisi dei dati e un monitoraggio dei sistemi tale per cui è possibile ragionare in modalità predittiva, affrontando i problemi prima ancora che questi si verifichino. Oltre a prevenire anomalie, tempi di inattività e inefficienze, utilizzando simulazioni appropriate è possibile sviluppare nuove opportunità, pianificando inoltre quelli che potranno essere i business futuri.

Perciò, adottando un digital twin, è possibile capire meglio come ottimizzare le operazioni, aumentare l'efficienza o scoprire un problema prima che effettivamente accada a qualunque cosa si stia in quel momento duplicando dal mondo reale. Questo tipo di conoscenze possono quindi essere applicate al sistema originale con un rischio molto minore e un ritorno sull'investimento decisamente maggiore. Infine, la tecnologia del gemello digitale aiuta le aziende a migliorare l'esperienza del cliente comprendendo meglio le esigenze specifiche per apportare miglioramenti a prodotti, operazioni e servizi esistenti, fornendo così le linee guida dell'innovazione.

Consentendo una continuità digitale dall'ideazione alla produzione fino a coprire anche i servizi post-vendita, la gestione dei gemelli digitali sta prendendo piede a livello globale. Sono molte oggi le piattaforme di analisi di dati che consentono la creazione di digital twin; tra i numerosi fornitori che si possono trovare attualmente in circolazione, i più importanti e degni di nota sono: Sap, Dassault Systèmes, Siemens, Cisco e Intel.

1.3 Digital Twin nell'Industria Manifatturiera

Prendendo in considerazione il settore manifatturiero, che è quello che a noi più interessa, il digital twin può essere semplicemente definito come un modello dal vivo che viene utilizzato per guidare i risultati aziendali; esso può essere implementato in tre diversi modi:

- Digital Twin di una risorsa specifica all'interno di una struttura;
- Digital Twin di un'intera struttura;
- Digital Twin di un singolo prodotto o componente.

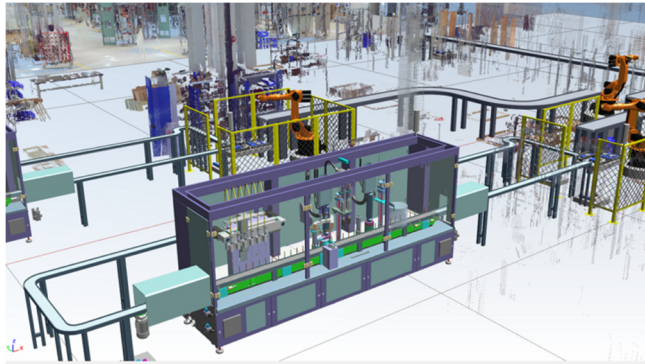


Figura 1.3: Digital twin di una linea di montaggio

Il gemello digitale è un elemento fondamentale per Industria 4.0, sia dal punto di vista teorico, che per la digitalizzazione della produzione. Il suo contenuto è basilare durante tutte le fasi del ciclo di vita e all'interno di diversi tipi di piattaforma e strumenti, dall'ingegneria ai servizi post-vendita. Dalla teoria serve ora però passare alla pratica, ed è su questo che lavora attualmente una parte della ricerca, in ambito accademico e non solo. Franco Fummi, docente di Ingegneria Informatica dell'Università di Verona, responsabile del progetto di Eccellenza del dipartimento di informatica, afferma che:

“La direzione di ricerca relativa al gemello digitale è di interesse per l'ambito industriale in quanto ci si è accorti che è uno degli aspetti più complessi da approcciare, specie per

quelle aziende che contano già su linee produttive, costituite il più delle volte assemblando parti senza però avere una visione di insieme. Tutto ciò produce squilibri anche in termini di efficienza complessiva. Qui entra in gioco il digital twin: assicurando la possibilità di effettuare simulazioni, permettendo di comprendere se determinate scelte o azioni possono offrire vantaggi o meno”¹.

Le caratteristiche del digital twin lo rendono ideale per la gestione aziendale. Per questo Gartner sostiene che sebbene oggi solo il 13% delle organizzazioni che implementano progetti basati sull’Internet of Things lo impieghi già, il 62% sta già cercando come stabilire l’utilizzo del gemello digitale o stia pianificando di farlo. La previsione è che entro il 2022, oltre due terzi delle aziende che già contano su soluzioni IoT avranno implementato almeno un digital twin nel proprio ramo produttivo.



Figura 1.4: Tasso di crescita del Digital Twin in base alla località (2019-2024)

¹ Andrea Balocchi, *Digital twin: cos'è, come funziona e perché è utile agli smart building*, 2019

1.3.1 Industria 4.0

In precedenza abbiamo utilizzato il termine *Industria 4.0*, ma quale è il suo significato? Esso indica una tendenza delle aziende all'automatizzazione, cioè all'integrazione di alcune nuove tecnologie produttive per migliorare le condizioni di lavoro, creare nuovi modelli di business e aumentare la produttività e la qualità produttiva degli impianti.

Industria 4.0, prende il nome dall'iniziativa europea "Industry 4.0", a sua volta ispirata ad un progetto del governo tedesco; nello specifico la paternità del termine tedesco "Industrie 4.0" viene attribuita a Henning Kagermann, Wolf-Dieter Lukas e Wolfgang Wahlster che lo impiegarono per la prima volta in una comunicazione, tenuta alla Fiera di Hannover del 2011, in cui preannunciarono lo "Zukunftsprojekt Industrie 4.0". Concretizzato alla fine del 2013, il progetto per l'industria del futuro "Industrie 4.0" prevedeva investimenti su infrastrutture, scuole, sistemi energetici, enti di ricerca e aziende per ammodernare il sistema produttivo tedesco e riportare la manifattura tedesca ai vertici mondiali rendendola competitiva a livello globale.

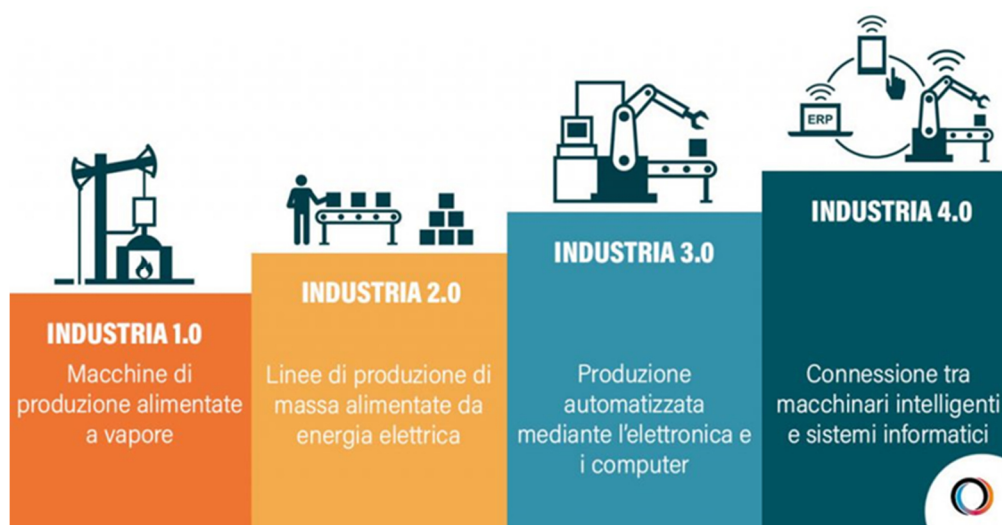


Figura 1.5: Le 4 rivoluzioni industriali

Dalla ricerca “The Future of the Jobs” presentata al World Economic Forum è emerso che, nei prossimi anni, fattori tecnologici e demografici influenzeranno profondamente l’evoluzione del lavoro. Alcuni, come l’utilizzo del cloud e la flessibilizzazione del lavoro, hanno iniziato ad influenzare le dinamiche già a partire dal 2016. Secondo tale studio l’effetto sarà la creazione di 2 milioni di nuovi posti di lavoro, ma contemporaneamente ne spariranno 7, con un saldo netto negativo di ben oltre 5 milioni di posti di lavoro. L’Italia ne uscirà con un pareggio (200 000 posti creati e altrettanti persi), meglio di altri paesi come Francia e Germania ad esempio. A livello di gruppi professionali, le perdite si concentreranno soprattutto nelle aree amministrative e della produzione: rispettivamente 4,8 e 1,6 milioni di posti eliminati. Inoltre, sempre secondo questa ricerca, compenseranno parzialmente queste perdite l’area finanziaria, il management, l’informatica e l’ingegneria; cambiano di conseguenza le competenze e abilità ricercate: nel 2020 il *problem solving* rimarrà la competenza non specifica più ricercata, e parallelamente, diventeranno più importanti il pensiero critico e la creatività.

L’Industria 4.0 passa per il concetto di *smart factory* che si compone principalmente di 3 parti:

- **Smart production:** nuove tecnologie produttive che creano collaborazione tra tutti gli elementi presenti nella produzione, ovvero collaborazione tra operatore, macchine e strumenti;
- **Smart service:** tutte le “infrastrutture informatiche” e tecniche che permettono di integrare i sistemi; ma anche tutte le strutture che permettono, in modo collaborativo, di integrare le aziende tra loro e con le strutture esterne;

- **Smart energy:** tutto questo sempre con un occhio attento ai consumi energetici, creando sistemi più performanti e riducendo gli sprechi di energia secondo i paradigmi tipici dell'energia sostenibile.

La chiave di volta dell'Industria 4.0 sono i *sistemi ciberfisici* (CPS) ovvero sistemi fisici che sono strettamente connessi con i sistemi informatici e che possono interagire e collaborare con altri loro simili. Questo sta alla base della decentralizzazione e della collaborazione tra apparati, che è strettamente connessa con il concetto di Industria 4.0.

Da uno studio di Boston Consulting Group (multinazionale statunitense che si occupa di consulenza strategica) è emerso inoltre, che la quarta rivoluzione industriale si centra sull'adozione di alcune tecnologie definite "*abilitanti*"; alcune di queste sono "vecchie" conoscenze, concetti già presenti ma che non hanno mai sfondato il muro della divisione tra ricerca applicata e sistemi di produzione veri e propri; oggi, invece, grazie all'interconnessione e alla collaborazione tra sistemi, il panorama del mercato globale sta cambiando portando alla personalizzazione di massa, diventando così di interesse per l'intero settore manifatturiero.

Le 9 tecnologie abilitanti definite da Boston Consulting Group sono:

- **Advanced manufacturing solution:** sistemi avanzati di produzione, ovvero sistemi interconnessi e modulari che permettono flessibilità ed ottime performance. In queste tecnologie rientrano i sistemi di movimentazione dei materiali automatici e tutta la parte relativa alla robotica avanzata, che oggi entra sul mercato con i robot collaborativi, detti anche *cobot*;

- **Additive manufacturing:** sistemi di produzione additiva che aumentano l'efficienza dell'uso dei materiali;
- **Realtà aumentata:** sistemi di visione con realtà aumentata utilizzati per guidare meglio gli operatori nello svolgimento delle attività quotidiane;
- **Simulazioni:** simulazione tra macchine interconnesse per ottimizzare i processi;
- **Integrazione orizzontale e verticale:** integrazione e scambio di informazioni in orizzontale e in verticale, che avviene tra tutti gli attori del processo produttivo;
- **Industrial internet:** la comunicazione tra elementi della produzione avviene non solo all'interno dell'azienda, ma anche all'esterno grazie all'utilizzo di internet;
- **Cloud:** implementazione di tutte le tecnologie cloud come l'archiviazione online delle informazioni, l'uso del cloud computing, e di servizi esterni di analisi dati, ecc. Nel cloud sono contemplate anche le tecniche di gestione di grandissime quantità di dati attraverso sistemi aperti;
- **Sicurezza informatica:** l'aumento delle interconnessioni interne ed esterne aprono la porta a tutta la tematica della sicurezza delle informazioni e dei sistemi che non devono essere alterati dall'esterno;
- **Big Data Analytics:** tecniche di gestione di grandissime quantità di dati attraverso sistemi aperti che permettono previsioni o predizioni.

L'Osservatorio Industria 4.0 del Politecnico di Milano fornisce un'ulteriore classificazione di 6 tecnologie abilitanti, le cosiddette “*tecnologie intelligenti*”, raggruppandole in due grandi sotto insiemi di tecnologie digitali innovative, **le tecnologie dell'informazione (IT)** e **le tecnologie operazionali (OT)**.

Rientrano nel primo gruppo:

- **Industrial Internet of Things:** tecnologie che si basano sui *smart objects* e sulle reti intelligenti;
- **Industrial Analytics:** tecnologie in grado di sfruttare le informazioni celate all'interno dei big data;
- **Cloud Manufacturing:** non è altro che l'applicazione in ambito manifatturiero del cloud computing.

Rientrano invece nel secondo gruppo:

- **Advanced Automation:** tecnologie affini alla robotica, con riferimento ai più recenti sistemi di produzione automatizzati;
- **Advanced Human Machine Interface:** dispositivi indossabili e nuove interfacce uomo/macchina;
- **Additive Manufacturing:** categoria di tecnologie affine a quanto già individuato da Boston Consulting Group.

In conclusione, riportiamo quanto stimato da Federmeccanica nel 2016 e cioè che l'adozione delle tecnologie abilitanti dovrebbe contribuire alla riduzione del *time to market* e dei costi di personalizzazione dell'offerta, con ulteriori benefici in termini di produttività dei fattori e informazioni disponibili sui vari processi di produzione.

1.3.2 Digital Twin in campo manifatturiero

Ciò che rende il digital twin (e IoT industriale in generale) così prezioso è che può fornire valore alle aziende durante tutto il ciclo di vita della produzione del prodotto. L'impatto di tale tecnologia può essere classificato in 3 "aree" principali:

- Produzione e Progettazione;
- Prodotti in produzione;
- Prodotti futuri.

I digital twin industriali ottimizzano l'efficienza prevedendo i possibili guasti nella produzione, in modo tale che possano essere riparati prima che incidano sugli obiettivi posti. I miglioramenti possono essere simulati regolando i parametri lungo la linea di produzione gemella senza rischiare di danneggiare quella vera e propria; simulazioni di successo possono quindi poi essere applicate al sistema reale. Inoltre, i digital twin dei prodotti possono essere analizzati dai vari team di ingegneri, che possono così confrontare l'effettivo comportamento del prodotto con quello previsto in fase di progettazione. Le deviazioni comportamentali possono essere poi valutate per influenzare le future iterazioni di sviluppo del bene.

I gemelli digitali consentono la messa in servizio e la diagnostica a distanza di prodotti già esistenti sul campo, riducendo i costi di assistenza e aumentando la soddisfazione del cliente. Nei casi in cui si manifesta un problema di funzionamento, ed è necessario un tecnico per interagire fisicamente con il prodotto in modo da poterlo risolvere, è possibile diagnosticare il problema a distanza tramite il gemello digitale in modo poi da poter ordinare le attrezzature e le parti necessarie alla risoluzione dell'imprevisto. Allo stesso modo, i nuovi prodotti che vengono consegnati ai clienti, possono essere configurati dal personale di servizio in remoto.

Nuovi prodotti possono essere sviluppati grazie alla conoscenza del comportamento di quelli già esistenti nel mondo reale. Le prestazioni e l'utilizzo da parte dei clienti vengono proiettate nel gemello digitale, per poi incidere nello sviluppo del prodotto e nel suo processo

di produzione al fine di aumentare i margini, la soddisfazione dei clienti e le quote di mercato.

L'eliminazione dei tempi di inattività non pianificati e la riduzione dei costi di manutenzione sono i principali fattori considerati dalle aziende di vari settori per poter puntare a migliorare la produttività e l'efficienza. Secondo gli analisti, oltre un'azienda su 10 (82%) ha subito almeno un'interruzione di inattività non pianificata in un arco di 3 anni. Questi tempi di fermo nelle aziende influiscono su tutto il processo di produzione, impattando negativamente sulla produttività, sull'efficienza e sul servizio clienti. La riduzione dei tempi di fermo può essere raggiunta appunto con l'implementazione di un gemello digitale che aiuta le aziende a raccogliere dati e utilizzarli per generare risultati aziendali specifici. I dati recuperati vengono analizzati rispetto a vari parametri e vengono adottate, in modo proattivo, misure preventive e predittive per evitare danni ad un prodotto, processo e sistema che a loro volta aiuterebbero a ridurre i tempi di fermo e di conseguenza aumentare l'efficienza complessiva.

Per chi si occupa di produzione poter gestire processi, prodotti e servizi partendo dallo studio del loro equivalente nel cyberspazio è un'opportunità strategica per:

- Migliorare le prestazioni delle risorse;
- Giocare d'anticipo sul PLM, intervenendo sui possibili effetti ambientali negativi;
- Svolgere attività di manutenzione preventiva basata sui dati forniti in tempo reale dai sensori;
- Apportare ulteriori benefici a livello di filiera;
- Potenziare la capacità di ascolto del cliente per gestire l'offerta in base al delinearci della domanda;

- Innescare il circolo virtuoso della produzione basata su una personalizzazione sempre più spinta.

Oltre a portare vantaggi al processo produttivo, il gemello digitale aiuta a regolamentare i rapporti fra i diversi reparti in un'ottica di condivisione e di collaborazione che consente di immettere sul mercato prodotti altamente funzionali. Non va dimenticato che molto spesso un prodotto non è altro che un aggregato di varie componenti, normalmente realizzate da aziende diverse. In un'ottica di azienda estesa o di supply chain collaborativa i digital twin permettono massima trasparenza informativa in fase di progettazione e di realizzazione. Un'azienda sviluppa il proprio modello e lo consegna ad un'altra, che ha il compito di integrarlo con il suo (o di farli interagire); questo procedimento si ripete fino a quando non si arriva ad un'ultima azienda, che dovrà assemblare tutti i prototipi ricevuti e simulare poi l'operazione richiesta. Non a caso i sistemi PLM associati ai digital twin vengono sempre più presi in considerazione anche in settori diversi come il terziario o la logistica.

1.3.3 I vantaggi

Per quanto riguarda il mondo industriale, ma non solo, l'adozione di digital twin consente già oggi, per non pensare poi a quello che sarà in futuro, di ottenere importanti vantaggi; anche se molto è già stato detto, riportiamo qualche esempio:

- Capacità di risolvere problemi comuni con largo anticipo rispetto ai prodotti rilasciati sul mercato;
- Riduzione dei difetti del prodotto e dei costi di produzione per eliminare quasi tutti i rischi nei prodotti futuri;

- Spostamento dei processi di convalida nel mondo virtuale, pur mantenendo comunque una connessione virtuale-fisica che consente di analizzare il rendimento di un prodotto in una serie di condizioni e apportare le modifiche necessarie nel mondo virtuale per garantire che il prodotto fisico funzioni esattamente come previsto sul campo;
- Verifica del processo di produzione, che agisce prima che qualcosa entri effettivamente in produzione. Perfezionando questa caratteristica, l'azienda può impedire costosi tempi di inattività alle macchine e ai robot in fabbrica. È anche possibile prevedere quando sarà necessaria una manutenzione preventiva per evitare tempi di fermo non necessari;
- Accorciare il *time-to-market*: arrivare sul mercato più velocemente della concorrenza è un problema che tutte le aziende devono affrontare;
- Risparmio di tempo e denaro nella simulazione, nelle prove e nelle analisi;
- Affidamento non solo sul fisico: si possono includere informazioni dalle loro prestazioni fisiche nei gemelli digitali per mantenere una versione fedele del mondo virtuale.

Questo flusso costante di informazioni accurate e aggiornate offre già oggi l'intelligenza necessaria per prendere decisioni più rapidamente, aumentare la velocità di produzione e ottimizzare la produttività, il tutto per poter arrivare sul mercato più velocemente.

Le simulazioni preliminari, permesse dalla replica virtuale di un prodotto reale, nel tempo abbassano i costi dei reparti delle imprese che si occupano di ricerca, e questo grazie alle condizioni operative ottimali, durante le quali testare i consumi, e alle caratteristiche quantitative e qualitative dell'oggetto; al tempo stesso, aumentano le

possibilità di effettuare modifiche anche minime ai processi. La simulazione offline dei robot consente, ad esempio, di controllare in modo esatto l'evoluzione del pezzo lavorato dalla macchina, potendo minimizzare completamente la comparsa di anomalie di realizzazione e assicurando così un risultato quanto più vicino alla perfezione.

Sappiamo che l'apprendimento e il processo decisionale umano vengono migliorati attraverso la visualizzazione, ma con molti dei processi avanzati nella produzione di oggi, non è sempre facile ottenere una conoscenza accurata dello stato della fabbrica e dello stato della macchina. Quando i dati dal vivo vengono presentati ai manager sotto forma di grafici, a volte possono sembrare troppo astratti per costituire la base per l'azione. Il digital twin offre visualizzazioni ibride, combinando informazioni visive con dati storici e "dal vivo". I manager possono "andare" sotto il cofano di ogni macchina a visualizzare i parametri fisici come ad esempio anomalie di usura e di temperatura. Le informazioni che non sono critiche possono essere nascoste al fine di prevenire l'ingombro visivo, ma possono essere richiamate in qualsiasi momento. Questo livello di visualizzazione non era disponibile prima e migliora significativamente la capacità di prendere decisioni informate e di identificare le aree critiche che richiedono attenzione immediata.

Durante l'Innovation Day 2017 di Monaco di Baviera, Joe Kaeser, CEO di Siemens, ha spiegato che vorrebbe rendere disponibile un digital twin per ogni macchina, prodotto e processo industriale. Il colosso tedesco è attualmente l'unica azienda in grado di coprire tutti gli aspetti riguardanti il prodotto: parte meccanica, elettronica e software.

È importante stare al passo delle innovazioni, come testimoniano anche le parole di Thomas Kaiser, vice presidente di SAP:

“I Digital Twin stanno diventando un imperativo aziendale che coprono l’intero ciclo di vita di un bene o di un processo e costituiscono la base per prodotti e servizi connessi. Le aziende che non risponderanno saranno indietro rispetto alle altre”².

1.3.4 Entrate supplementari dovute al Digital Twin

Non c’è dubbio che il digital twin sia il modello di riferimento per tutte le aziende che desiderino essere competitive, ma la sua implementazione, come già in parte accennato, richiede alcuni prerequisiti, come disporre delle risorse necessarie in termini di infrastruttura IT e personale qualificato, così come avere un’idea chiara di quali dati è necessario raccogliere e di come proteggerne la riservatezza.

Fatta questa premessa necessaria, vediamo in concreto in che modo il digital twin è in grado di creare flussi di entrate supplementari per l’azienda che decide di adottarlo.

Progettazione e miglioramento dei prodotti: un digital twin può aiutare i progettisti a prevedere meglio le prestazioni dei prototipi nel mondo reale, in modo che sia possibile apportare rapidamente modifiche di progettazione, realizzare meno prototipi, ed infine accelerare e ridurre i costi di produzione. Nella fase successiva al lancio del prodotto, per formulare corrette strategie di posizionamento, è possibile raccogliere informazioni dettagliate sul tipo di clienti interessati grazie all’utilizzo del digital twin.

Analisi delle prestazioni del prodotto: un digital twin può permettere al rivenditore di riprogettare o persino creare un nuovo processo *end-to-end* per migliorare lo sviluppo e la

² Cadlog, *Digital Twin: la nuova era dell’Industria 4.0 che segue in parallelo tutto il ciclo di vita fisico del prodotto*, 2018

produzione del prodotto, promuovere la collaborazione tra funzioni diverse e migliorare l'esperienza e il coinvolgimento del cliente.

Offerta di prodotti come servizi: le aziende possono creare un digital twin di un ambito territoriale, come ad esempio una città, e fornirlo come servizio per assistere i responsabili delle politiche di pianificazione urbana. Inoltre è possibile creare un gemello digitale di un'area, comprendente strade e punti di riferimento, per attivare servizi di prova per auto senza conducente.

Offerta di analisi dei dati come servizio: nel settore dei servizi, i dati del digital twin possono consentire a un'azienda di sostituire componenti prima della loro rottura, per minimizzare i ritardi e le perdite negli introiti. Nella vendita al dettaglio, il gemello digitale può aiutare a prevenire situazioni di esaurimento delle scorte. I rivenditori possono persino utilizzare la copia virtuale di un consumatore tipo, per raccogliere dati sui suoi modelli di acquisto e di consumo, prevedere le sue esigenze future e proporgli tempestivamente offerte di *cross-sell* o *up-sell*.

Offerta di consegna dei dati come servizio: un produttore può sviluppare un digital twin delle prestazioni di una macchina, per rendere disponibili ai clienti i suoi stati critici e i dati operativi tramite il cloud, in modo che i clienti stessi possano visualizzare i dati, monitorare i loro macchinari ed evitare i tempi di fermo.

Offerta di servizi basati sulla raccolta sul campo dei dati di un prodotto: i digital twin possono aiutare istituzioni, come ad esempio gli ospedali, a raccogliere dati operativi. Grazie a questo tipo di analisi, gli ospedali possono riprogettare il modo in cui diagnosticano,

trasportano e trattano i pazienti, aumentando a loro volta la qualità dell'assistenza e riducendo i tempi di attesa, il costo delle cure e persino la mortalità dei pazienti.

Monitoraggio delle risorse sul campo e manutenzione predittiva: un'azienda può creare un digital twin per ogni apparecchiatura e risorsa chiave sul campo, per raccogliere dati sulle prestazioni e da eventi come le sostituzioni e le riparazioni. Combinando e analizzando tali set di dati, un'azienda può ottimizzare i piani di manutenzione e implementare la manutenzione predittiva, al posto di quella basata sulla pianificazione, prolungando la durata del proprio patrimonio.

Ottimizzazione dell'uso dell'energia: nelle industrie ad alta intensità di consumi elettrici, un digital twin può aiutare a progettare e testare le reti elettriche, per migliorare l'efficienza energetica.

Automazione dei dispositivi e gestione e sistemi: con il digital twin di un sistema di controllo di dispositivi connessi, un'azienda può proteggere tali dispositivi dagli attacchi informatici, rilevando e isolando eventuali anomalie per ulteriori indagini e mantenere il sistema in funzione. Inoltre, il gemello digitale di un sistema di controllo o di sistemi multipli può aiutare un ingegnere di processo a mettere a punto, ottimizzare e monitorare centinaia di loop di controllo, evitando così problemi dovuti a manipolazioni manuali, oscillazioni del sistema o problemi meccanici.

1.3.5 Esempi di utilizzo del Digital Twin

Fornendo una visione in tempo reale di ciò che sta accadendo con le apparecchiature ed altre risorse fisiche, i digital twin, come sappiamo, risultano strategici nel supportare la produzione, riducendo i problemi di manutenzione e garantendo prodotti ottimizzati. Ma ci

sono anche altri ambiti dove le piattaforme di gestione dei gemelli digitali possono portare valore aggiunto; vediamo alcuni esempi:

Manufacturing: Fameccanica, tra i principali player mondiali dell'industria delle macchine per la produzione di pannolini e assorbenti igienici, si è dotata di una *virtual room* nella quale può riprodurre, in dimensioni reali e in 3D, i propri macchinari per migliorare lo sviluppo del prodotto ma anche per poter formare al meglio i manutentori.

Oil & Gas: Chevron, ad esempio, da qui al 2024 prevede di risparmiare milioni di dollari in costi di manutenzione di piattaforme petrolifere e raffinerie.

Energia: General Electric da alcuni anni ha esteso l'utilizzo dei digital twin ai sistemi eolici migliorando così anche tutta la parte riguardante la manutenzione e il controllo post vendita. Quando la turbina viene venduta, viene associata ad un gemello digitale; il prodotto fisico contiene una varietà di sensori che in tempo quasi reale comunicano con la turbina virtuale, fornendo dati sull'accensione, la velocità di rotazione delle pale, la potenza elettrica istantanea, l'attrito (riscaldamento) dei diversi componenti e così via.

Sanità: i digital twin possono rivoluzionare sia le operazioni sanitarie che l'assistenza ai pazienti. Avere un gemello digitale di un paziente, con una rappresentazione tridimensionale di organi, ossa, sistema venoso, linfatico e nervoso consente ai chirurghi e agli operatori sanitari di sperimentare le procedure in un ambiente simulato piuttosto che su un paziente reale. I sensori delle dimensioni delle bende possono monitorare i pazienti e produrre modelli digitali che possono essere monitorati dall'intelligenza artificiale e utilizzati per migliorare l'assistenza.



Figura 1.6: Digital twin in ambito ospedaliero

Entertainment: in Cina allo Spring Gala Festival in onda sulla CCT (China Central Television), i quattro ospiti umani sono stati raggiunti dai loro avatar digitali creati da ObEN. Grazie all'utilizzo dell'intelligenza artificiale e, in particolare, all'apprendimento automatico attraverso un'elaborazione del linguaggio naturale unitamente a tecniche di visione artificiale, sono state create delle copie virtuali degli ospiti. Ma le applicazioni future per questa tecnologia includono piani per dar vita a insegnanti, infermieri e medici virtuali basati sull'AI.

Sport: i digital twin sono utilizzati anche per perfezionare le corse automobilistiche di Formula 1. In uno sport in cui ogni secondo conta, usare la simulazione può aiutare il guidatore e il team automobilistico a sapere quali regolazioni possono contribuire a migliorare le prestazioni della monoposto prima che quest'ultima venga messa in pista.



Figura 1.7: Digital twin di una monoposto di Formula 1

Smart city: non tutti sanno che esiste addirittura un gemello digitale di Singapore. Considerando tutte le variabili relative alla gestione di una città, il “gemellaggio digitale” aiuta gli urbanisti a comprendere come migliorare l’efficienza dei consumi energetici, a gestire il traffico, i servizi pubblici e a identificare nuove applicazioni che possono migliorare la vita dei cittadini.



Figura 1.8: Digital Twin della città di Singapore

Per quanto riguarda invece il nostro Paese, degna di nota è la Dallara, azienda costruttrice di automobili da competizione, che anziché sviluppare prototipi di scocche e testarli in gallerie del vento e in altri laboratori, costruisce direttamente modelli digitali. È su questi digital twin che vengono effettuate tutte le prove e le simulazioni necessarie ad arrivare alla finalizzazione di ogni progetto. Quando il modello in bit è pronto, attraverso l’utilizzo di diversi tipi di macchine (per esempio stampanti tridimensionali e robot) si “convertono i bit in atomi” e si ottiene il prodotto effettivo. Tutto il processo di progettazione diventa più rapido anche perché è possibile fare verifiche che non sarebbero possibili con un mock-up fisico. Diventa soprattutto più veloce provare soluzioni diverse, cambiare forme e materiali e valutare strutture alternative.

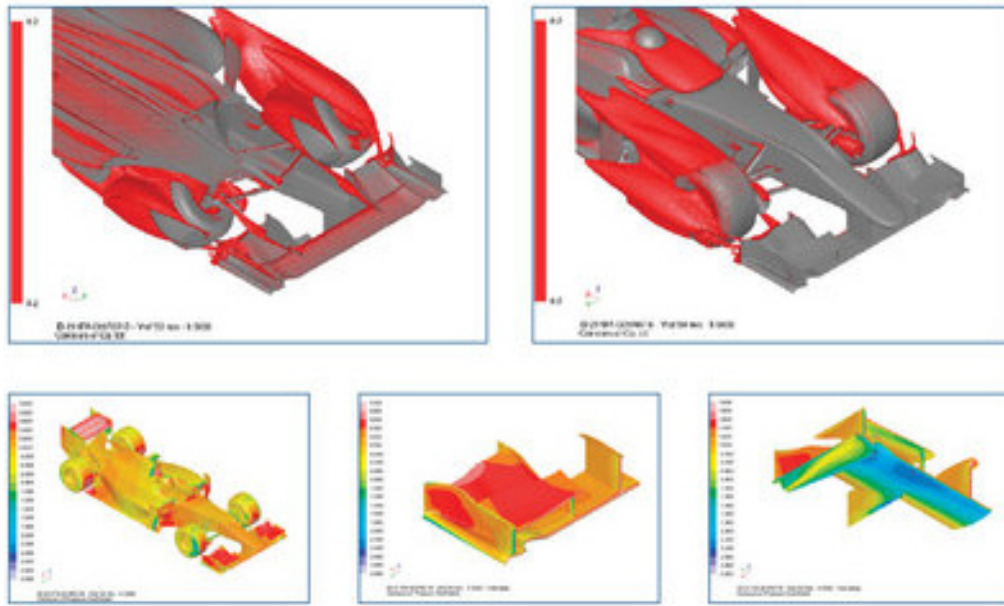


Figura 1.9: Digital twin di un'automobile da competizione sviluppato dalla Dallara

2 **CAPITOLO: CASI DI STUDIO**

2.1 **Sistemi ciberfisici e Digital Twin**

In questo primo caso di studio andremo a prendere in considerazione un'analisi basata sulla simulazione dell'interazione tra un gemello fisico ed uno digitale in un sistema di produzione ciberfisico.

Alla base di questa simulazione vi è una piattaforma dimostrativa del mondo reale, che attraverso la rappresentazione di un processo di produzione ci illustra i vantaggi che il controllo autonomo ha, rispetto ad un controllo centralizzato, nella logistica di produzione.

La figura sottostante mostra un'immagine del sistema fisico.

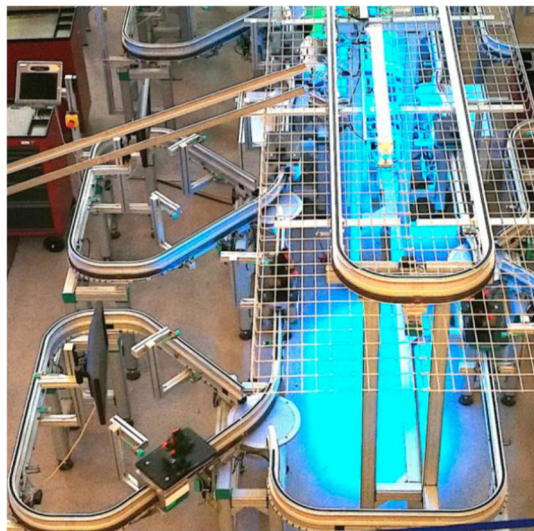


Figura 2.1: Sistema fisico alla base della simulazione

Tale sistema è costituito da un impianto di trasporto monorotaia con navette semoventi che hanno la possibilità di muoversi lungo tutto il suo percorso e che sono dotate di un particolare sistema di controllo che ha il compito di evitare che si scontrino a vicenda. L'attività di assemblaggio che viene svolta in questo sistema produttivo è la realizzazione di fanali posteriori per auto, dove ognuno di essi è composto ovviamente da più parti. Esistono vari

tipi di luci posteriori, con cover bianche o colorate ad esempio, e l'ordine di montaggio di alcune parti può variare in base al modello che viene preso in considerazione. Come prima cosa, il metallo fuso viene posizionato su di una navetta; ogni calco contiene un *radio-frequency identification* (RFID), una tecnologia per l'identificazione e/o memorizzazione automatica di informazioni inerenti a oggetti, animali o persone, nel nostro caso uno specifico fanale posteriore, basata sulla capacità di memorizzazione di dati (in questo specifico caso di studio quelli di produzione) da parte di etichette elettroniche, chiamate *tag* (o anche *transponder*), e sulla capacità di queste di rispondere all'interrogazione a distanza da parte di appositi apparati fissi o portatili, chiamati *reader*. Le postazioni di assemblaggio delle diverse parti che andranno poi a comporre i fanali sono posizionate all'interno di una sorta di avvolgimenti, che l'impianto monorotaia va a creare, chiamati *loops*, e la navetta si muove attraverso la rete ferroviaria, di stazione in stazione, fino a quando non riesce ad ottenere tutte le parti necessarie per portare a termine la costruzione della luce posteriore. I percorsi delle navette differiscono a seconda del tipo di fanale posteriore e dello stato attuale delle stazioni. Ad esempio, se la stazione per la parte A è temporaneamente fuori servizio, ma la stazione per la parte B funziona e l'ordine di assemblaggio delle parti A e B può essere invertito, il metodo di controllo autonomo dirige la navetta alla stazione B, modificando quello che era il percorso iniziale e riducendo così i tempi di produzione.

La nostra simulazione è composta da due modelli, entrambi implementati utilizzando AnyLogic (strumento che viene utilizzato per creare modelli di simulazione) e interconnessi attraverso un'interfaccia, basata su Java, TCP/IP (suite di protocolli Internet, cioè una famiglia di protocolli di rete legati da dipendenze d'uso su cui si basa il funzionamento logico della rete Internet): un modello simula il sistema fisico appartenente al mondo reale, mentre l'altro è il vero e proprio digital twin. Caratteristiche come la prevenzione delle

collisioni o la probabilità di intervenire prima che la macchina si rompa sono implementate nel primo modello, così come la logica del PLC (controllore logico programmabile), un computer per l'industria specializzato in origine nella gestione o controllo dei processi industriali. Inoltre, in questo primo modello, sono inclusi i sensori necessari per il continuo scambio di informazioni con il suo gemello digitale. A differenza di quello che avviene nel sistema fisico reale, nel nostro caso il numero e il tipo di sensori possono essere facilmente variati. Chiameremo questo *frontend model*, o semplicemente gemello fisico. Il secondo modello, come già detto in precedenza, è il vero e proprio digital twin dell'impianto reale e, in questo caso, funge da gemello del gemello fisico. Contiene un'elevata logica di sistema, controlla il frontend model e necessita da quest'ultimo feedback, in modo da poter poi aggiornare quelle che sono le sue variabili di sistema in base allo stato corrente del suo gemello fisico. Questo verrà chiamato *backend model* o digital twin.

La figura qui sotto mostra il frontend model, dove i simboli dei camion rappresentano le varie navette. Nella parte superiore della figura, precisamente all'interno dei loops formati dall'impianto monorotaia, sono situate le stazioni, mentre la parte inferiore, priva di ogni elemento, rappresenta l'area in cui le navette iniziano e terminano le loro mansioni.

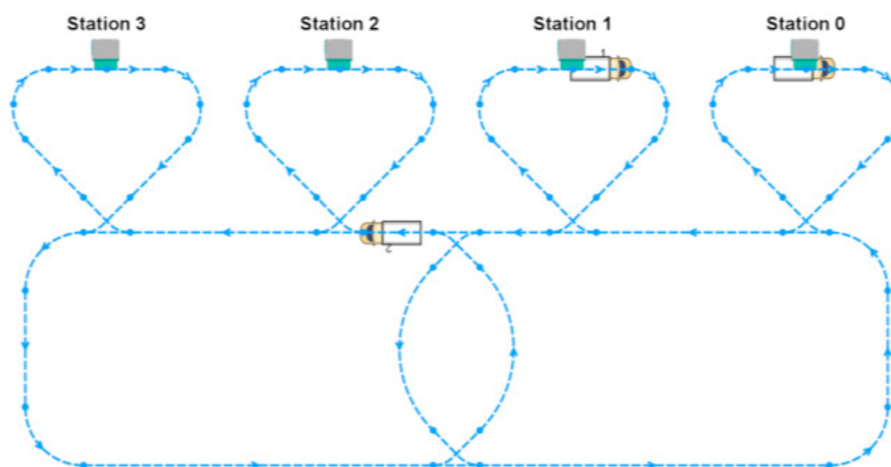


Figura 2.2: Rappresentazione del frontend model

In questa simulazione, per quanto riguarda l'attività di assemblaggio, verrà preso in considerazione un unico esempio di prodotto, il quale sarà composto da quattro parti differenti e il cui l'ordine di assemblaggio potrà essere scelto liberamente.

Nel frontend model, ogni navetta sa sempre quale è la posizione verso cui dovrà spostarsi; quando arriva in una stazione avviene immediatamente l'assemblaggio della parte presente. Una volta entrata in uno dei quattro loops, in cui è situata come sappiamo una stazione, la navetta non può lasciarlo fino a quando non viene completato l'assemblaggio; è facile notare come tale informazione sia particolarmente rilevante nel caso in cui avvenga un guasto alla postazione. Da sottolineare il fatto che il frontend model stesso non contiene alcuna informazione sulla sequenza di assemblaggio per il prodotto e, quindi, non eseguirà alcuna azione da solo.

La pianificazione dei vari ordini in arrivo e il processo di assemblaggio sono controllati dal backend model. Attraverso l'utilizzo di *sensori RW* (cioè di lettura e scrittura), posizionati in punti specifici del frontend model, il backend scrive la destinazione successiva di ogni navetta all'interno della loro "memoria". Nel digital twin è anche inclusa la logica comportamentale da utilizzare in caso di guasto della macchina, mentre il frontend, nello specifico le navette, eseguono semplicemente le istruzioni fornite dal loro gemello digitale. La figura qui sotto ci dà un'idea di quella che è l'interazione tra i due modelli.

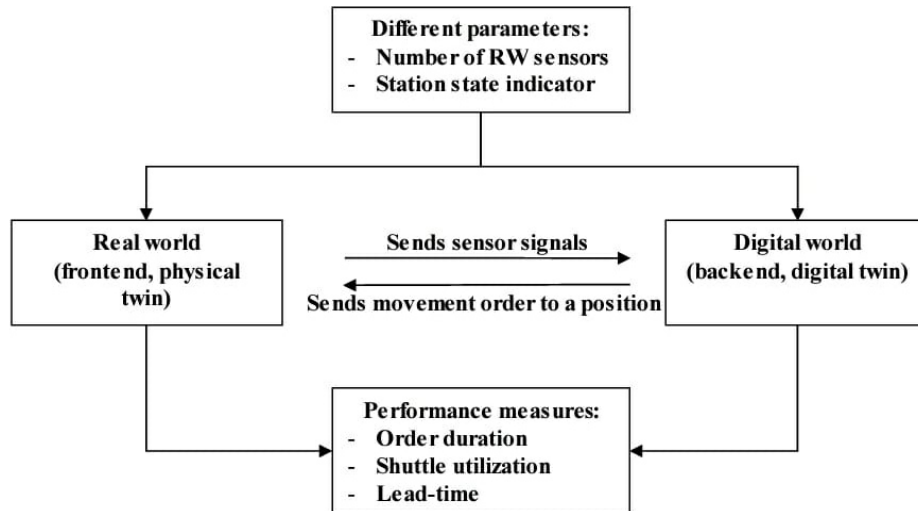


Figura 2.3: Schema dell'interazione tra frontend e backend model

Come accennato in precedenza lo scopo di questo studio di simulazione è esaminare quanti sensori sono necessari, e in quali posizioni devono essere posti, per garantire la sincronizzazione richiesta tra gemello fisico e digitale.

Per quanto riguarda questo studio considereremo otto scenari; essi differiscono nella quantità di sensori RW, nella disponibilità di informazioni riguardanti la stazione (guasti e fine attività) e nel così detto *station failure rate*, che sta ad indicare il numero di volte in cui è avvenuto un guasto nella postazione d'assemblaggio (in un arco temporale di un'ora se vogliamo essere precisi). La Tabella 1 riassume i vari scenari.

Scenario identifier	Number of sensors	Station information	Station failure rate (per hour)
S1	6	No	1
S2	6	No	3
S3	6	Yes	1
S4	6	Yes	3
S5	20	No	1
S6	20	No	3
S7	20	Yes	1
S8	20	Yes	3

Figura 2.4: Tabella 1

La configurazione a 6 sensori ha un sensore posizionato su ogni loop e i restanti due posizionati lungo i segmenti di binario “diritti”, ed è quella che contiene il numero minimo richiesto di sensori per una ragionevole comunicazione con il digital twin. Quella a 20 sensori invece, ha due sensori su ogni loop e i restanti distribuiti equidistanti lungo i segmenti rettilinei. Questa seconda configurazione ci fornisce informazioni particolarmente accurate riguardo le posizioni occupate dalla navetta durante il suo tragitto lungo l’impianto a monorotaia, pur avendo allo stesso tempo un numero non così elevato di sensori visto e considerando le dimensioni del sistema fisico.

Per la simulazione, come già accennato in precedenza, viene utilizzato un prodotto composto da quattro parti, pertanto ogni ordine di produzione è caratterizzato da quattro attività di assemblaggio, eseguite ciascuna presso la propria stazione corrispondente. L'ordine in cui vengono eseguite le varie attività dipende dallo scenario considerato, che può essere scelto liberamente oppure essere già predefinito. Per tutti gli scenari in cui le informazioni sulla stazione non sono disponibili (S1, S2, S5, S6), viene utilizzato un valore predefinito, di default, mentre nei scenari S3, S4, S7 e S8, ogni volta che una stazione termina la propria attività di assemblaggio viene inviato una sorta di messaggio al gemello digitale. Infine, per quanto riguarda le informazioni riguardanti i guasti e le riparazioni delle varie stazioni, esse vengono inviate direttamente al backend model in tempo reale. Il digital twin utilizza queste informazioni per un processo decisionale intelligente. In questo caso, sia lo stato di funzionamento della stazione sia la lunghezza della coda al suo ingresso, vengono considerati come parametri fondamentali per l’assegnazione dinamica della successiva stazione di lavoro delle navette.

Per includere quelle che sono le dinamiche del sistema fisico reale nella simulazione del gemello fisico, i parametri di processo per i tempi di elaborazione e di riparazione, nonché poi la frequenza di arrivo dell'ordine, sono modellati come dinamici. I parametri di processo considerati nella simulazione sono riassunti nella Tabella 2. I valori che appaiono come un intervallo sono modellati come distribuzione triangolare (T) o uniforme (U), a seconda del processo, al fine di considerare la natura stocastica di ciò che avviene nel mondo reale; la distribuzione triangolare viene utilizzata per approssimare un processo con una distribuzione asimmetrica. Gli intervalli riportati nella tabella sottostante, sono stati selezionati appositamente per poter fornire una dinamica sufficientemente reale al nostro sistema, che ha il compito, come ben sappiamo, di imitare al meglio il comportamento del vero e proprio dimostratore.

Process parameter	Value
Station processing time	[70; 80; 95] sec. (T)
Station repair time	120 to 180 sec. (U)
Order arrival frequency	Every 100 to 140 sec. (U)
Number of generated orders	30
Size of mono-rail system	7.4 m × 4.0 m
Speed of shuttles	0.2 m/s

Figura 2.5: Tabella 2

Per la valutazione degli scenari sono state prese in considerazione, ed ovviamente misurate, le tre seguenti performance:

- Tempo di produzione medio;
- Messaggi persi;
- Messaggi totali;

Come misura comune delle prestazioni per i sistemi di produzione, è stato considerato il *tempo di produzione medio*. Inoltre, sono stati considerati il numero di *messaggi persi* e il *numero totale di messaggi* appartenenti alla comunicazione reciproca tra gemello fisico e digitale, poiché si trattano di misure rilevanti per descrivere la qualità e la quantità della comunicazione. Il numero di messaggi persi è uguale al numero totale di messaggi che sono stati inviati da uno dei due modelli e che però non sono stati ricevuti dall'altro.

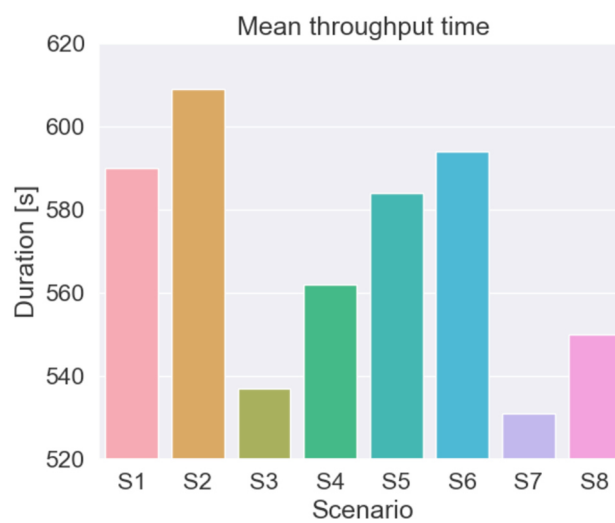


Figura 2.6: Tempo di elaborazione medio degli scenari

La Figura 2.6 mostra il tempo di elaborazione medio di un ordine per tutti e otto gli scenari. Un confronto dei valori risultanti porta alle seguenti conclusioni: in primo luogo, confrontando gli scenari con uno station failure rate basso e quelli corrispondenti con station failure rate elevato (ovvero confrontando S1 con S2, S3 con S4, S5 con S6 e S7 con S8) notiamo che il tempo di elaborazione medio si riduce con un station failure rate inferiore, come previsto. Un confronto riguardante l'inclusione delle informazioni sui guasti delle stazioni e quindi l'applicazione di un processo decisionale dinamico (ovvero confrontando S1 con S3, S2 con S4, S5 con S7 e S6 con S8) mostra che il processo decisionale dinamico migliora il tempo di elaborazione. Infine, mettendo a confronto gli scenari a 6 sensori con

quelli corrispondenti a 20 sensori (cioè da S1 a S5, da S2 a S6, da S3 a S7 e da S4 a S8) si evidenzia un'ulteriore riduzione del tempo di elaborazione causata dalla presenza di un maggior numero di sensori.

Nonostante si abbia una riduzione complessiva del tempo di elaborazione medio, quando si utilizzano più sensori si va a rallentare però la comunicazione tra il gemello digitale e quello fisico; a quanto pare ciò è dovuto al maggior numero di messaggi scambiati tra i due modelli, e il tutto può essere visto confrontando, come fatto nella Figura 2.7, S1 con S5, S2 con S6, S3 con S7 e S4 con S8. La figura mostra anche che il processo decisionale dinamico porta a più messaggi (confrontare da S1 a S3, da S2 a S4, da S5 a S7 e da S6 a S8), in quanto messaggi aggiuntivi vengono inviati alle navette in caso di mancato spostamento verso una stazione alternativa.

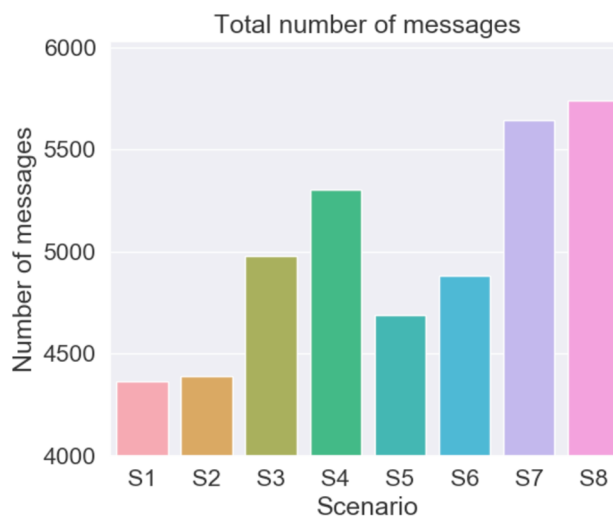


Figura 2.7: Numero totale di messaggi scambiati tra il frontend e il backend model

Oltre al maggior numero di messaggi totali, anche il numero relativo di messaggi persi è maggiore per gli scenari con un numero elevato di sensori, come mostrato nella Figura 2.8; è importante specificare però che il numero di messaggi persi non aumenta semplicemente

con un numero maggiore di messaggi, cosa che possiamo notare confrontando le Figure 2.7 e 2.8. Ciò può essere spiegato dalla presenza di una maggiore frequenza di messaggi, che si verificano dove si ha una elevata densità di sensori sul sistema fisico. Tutto questo porta sia a messaggi persi così come a ritardi e interruzioni di comunicazione, che rallentano di conseguenza l'intero processo produttivo.

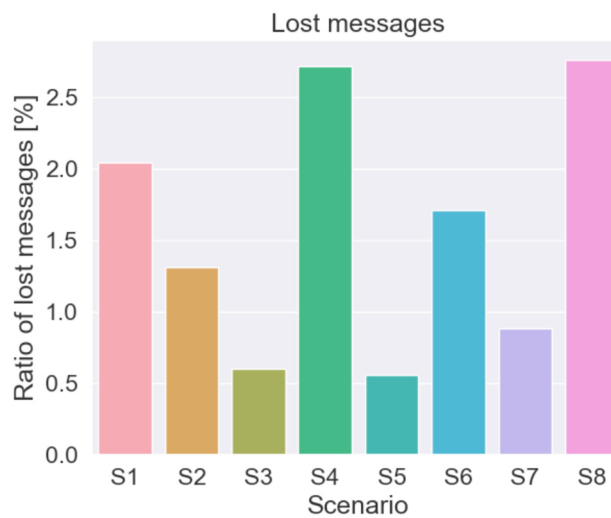


Figura 2.8: Rapporto tra messaggi persi e messaggi totali

Nonostante questi possibili rallentamenti della comunicazione tra gemello fisico e reale, un numero maggiore di sensori riduce comunque il tempo di elaborazione, soprattutto in quei casi dove lo station failure rate è più elevato (vale a dire gli scenari S2, S4, S6 e S8). Quanto detto può essere visto nella Figura 2.9. Il rapporto della riduzione del tempo di elaborazione medio (confrontandola anche con la Figura 2.6) è tracciato tra gli scenari corrispondenti che differiscono nel numero di sensori.

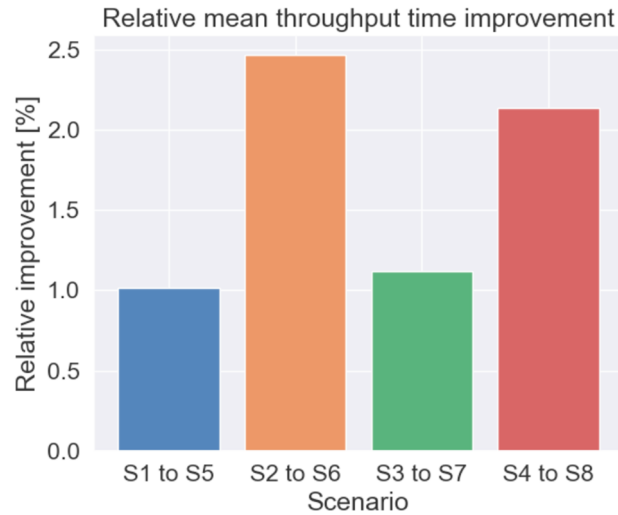


Figura 2.9: Miglioramento medio relativo del tempo di elaborazione tra scenari corrispondenti con un numero crescente di sensori

Fino ad ora non sono stati considerati i possibili guasti a cui le navette possono andare in contro; si prevede che in questo caso il tempo di elaborazione trarrebbe ampiamente vantaggio da un numero maggiore di sensori, poiché qui il guasto di una navetta deve essere dedotto indirettamente dal mancato arrivo di quest'ultima al sensore successivo, che è posizionato lungo il suo percorso dopo un certo lasso di tempo. Il tempo che viene impiegato per dedurre la presenza di un guasto alla navetta, che è ovviamente considerato come un ritardo, sarà più breve nel caso in cui si abbia un numero maggiore di sensori e consentirà al gemello digitale di effettuare un processo decisionale più rapido. Ovviamente, avendo preso in considerazione un sistema monorotaia, eventuali guasti bloccherebbero il percorso per le altre navette. Pertanto, in futuro, una possibile soluzione potrebbe essere quella di estendere la rete di movimento del sistema fisico a un sistema più complesso dove le navette (o componenti in movimento in generale) possano continuare a muoversi evitando gli ostacoli sul loro percorso.

In conclusione, i risultati della simulazione mostrano che i potenziali risparmi attraverso l'implementazione di digital twin si basano principalmente sulla misurazione di parametri che indicano incertezze nei sistemi di produzione come guasti macchina, ora di arrivo degli ordini e così via. In questo contesto, i sensori possono monitorare questi parametri e comunicare i loro valori in tempo reale a un gemello digitale che porta a un migliore controllo della produzione e giustifica l'investimento su nuove tecnologie e sensori. In questo caso di studio, è stato analizzato l'effetto di un numero diverso di sensori su un sistema fisico per supportare il suo gemello digitale. Sia il gemello fisico che quello digitale sono stati modellati e simulati e sono state esaminate virtualmente diverse configurazioni dei sensori. Rispetto all'esecuzione di questa attività direttamente sul sistema fisico, la simulazione consente di risparmiare ovviamente tempo e denaro.

Quindi, riassumendo, questo metodo di analisi è stato applicato utilizzando un dimostratore del mondo reale di un sistema di assemblaggio. Sulla base di questo sistema, sono stati sviluppati modelli di simulazione sia per il sistema fisico che per il suo gemello digitale. I risultati della nostra simulazione hanno mostrato che un numero maggiore di sensori migliora la produttività complessiva del sistema, nonostante rallenti però la comunicazione tra i due modelli. In futuro, è prevista un'estensione della simulazione del gemello fisico includendo la possibilità di avere più guasti ai diversi componenti e quella di utilizzare un mix di prodotti più ampio per l'assemblaggio. Inoltre, per il sistema fisico sono previste sia più stazioni e componenti di prodotto, che la simulazione di tipi di sensori più specifici per la comunicazione con il gemello digitale, nonché una determinazione automatica del numero richiesto di sensori tramite ottimizzazione e analisi dei costi.

2.2 Digital Twin e Additive Manufacturing

Gli ultimi tre decenni hanno visto la proliferazione dell'*additive manufacturing* (AM) in una vasta gamma di settori. In particolare, ci sono state sempre più richieste per i così detti *multi-material additive manufacturing processes*, in quanto negli ultimi anni un numero sempre maggiore di oggetti, come ad esempio quelli utilizzati nelle applicazioni biomediche, è formato da più di un singolo materiale. Tra tutti i processi AM che fino ad ora sono stati sviluppati, i più famosi sono quelli basati sulla tecnica dell'estrusione, dove uno o più strumenti (di solito ugelli) vengono guidati lungo percorsi già predefiniti per depositare poi vari materiali di fabbricazione. Presentano i vantaggi dell'intuizione del processo, un'ampia scelta di materiali, un controllo accurato della deposizione e della composizione del materiale ed infine una facile estensione ai multi-material manufacturing processes. Fused Deposition Modeling (FDM), Laser Engineered Net Shaping (LENS) e Direct Metal Deposition (DMD) sono esempi tipici di questa categoria. Tuttavia, i processi AM basati sull'estrusione sono relativamente lenti; questo accade prevalentemente quando nel processo sono coinvolte grandi sezioni trasversali o quando sono necessarie larghezze di tratteggio inferiori ma ad elevata precisione, in quanto i contorni solidi devono essere riempiti con semplici linee di deposizione di materiale. Un modo intuitivo per migliorare la velocità di fabbricazione consiste nell'introdurre più attuatori per la deposizione simultanea di materiali. Avere più attuatori aiuta anche a distribuire in modo più bilanciato il lavoro, evitando così di sovraccaricare un attuatore rispetto ad un altro. Tuttavia, la tecnica riguardante la pianificazione del tragitto che un determinato utensile deve percorrere non è stata ancora del tutto perfezionata. I metodi attuali sono basati principalmente sull'utilizzo di robot mobili che però non prendono ancora in considerazione l'introduzione di maggiori vincoli operativi, i quali ci garantirebbero una miglior gestione dei meccanismi pratici ed una sicurezza

adeguata all'intero processo. Negli ultimi anni, per lo sviluppo di sistemi AM basati sull'estrusione, sono stati introdotti quelli che prendono il nome di *bracci* o *attuatori robotici*. Rispetto al tradizionale meccanismo a stadi X-Y-Z, gli attuatori robotici sembrano essere più flessibili per quanto riguarda i processi AM basati sull'estrusione. Essi offrono spazi di lavoro più ampi e facilitano la realizzazione del processo ibrido e la collaborazione multi attuttore. È importante sottolineare come i bracci robotici siano già stati a lungo adoperati per la produzione collaborativa, saldatura e assemblaggio di prodotti, e come la pianificazione del percorso utensile, che permette di evitare collisioni e migliorare l'efficienza, sia già stata ampiamente studiata per quest'ultime applicazioni.

Per quanto riguarda la pianificazione del percorso utensile di più bracci robotici nelle varie applicazioni AM, è stato sviluppato un sistema di prototipazione virtuale per l'additive manufacturing con più bracci robotici riconfigurabili, come mostrato in Figura 2.10.

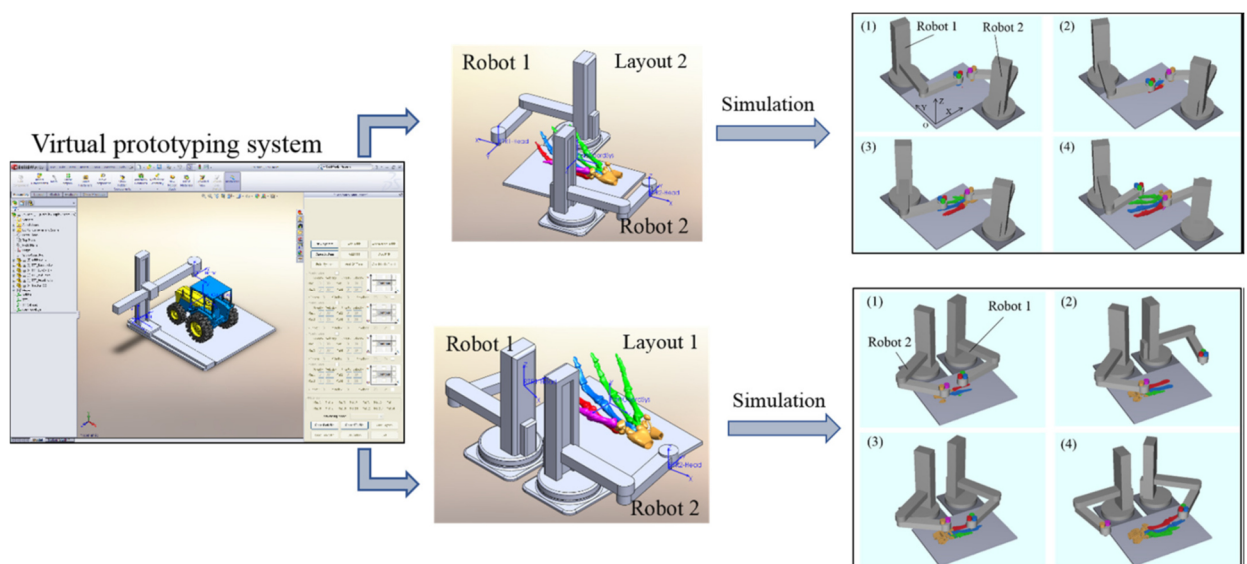


Figura 2.10: Sistema di prototipazione virtuale per la pianificazione dei processi di produzione additiva con più bracci robotici

Sono stati inoltre sviluppati, e integrati nel sistema, algoritmi per la pianificazione del percorso utensile che hanno il compito, come già accennato in precedenza, di consentire la deposizione simultanea e la prevenzione delle collisioni. Con l'aiuto di un'interfaccia utente costruita in SolidWorks (un pacchetto software CAD commerciale), un utente può selezionare diversi tipi e numeri di attuatori robotici, inserirli in diversi layout (posizioni e orientamenti) e assegnare loro vari materiali. In base al tipo di attuatore e al materiale che è stato assegnato, gli algoritmi di pianificazione del percorso utensile possono generare percorsi ottimali; i risultati possono essere successivamente visualizzati con un modulo di simulazione integrato. Una delle principali lacune riguardanti questo sistema è che se un layout viene determinato tramite la simulazione, come può l'utente distribuire tale layout a robot reali? In alternativa, se un utente desidera eseguire la simulazione per un layout di robot fisico esistente, come può creare il layout nel sistema di prototipazione virtuale? In altre parole, il layout dei robot (coordinate e orientamento) deve essere sincronizzato nel gemello digitale e nel sistema fisico. Un collegamento ciberfisico riguardante il layout del robot deve ancora essere sviluppato. Questo caso di studio mira a creare un collegamento tra la simulazione (cioè il dominio cyber) e i bracci robotici (cioè il dominio fisico) in termini di layout del robot, attraverso l'utilizzo della *realtà aumentata* (AR). Nella realtà aumentata gli elementi virtuali, generati dal computer, vengono sovrapposti ad oggetti veri e propri che vengono "catturati" in tempo reale da una telecamera, in modo da poter fornire informazioni, ed istruzioni, basate su ciò che sta realmente accadendo. In questo progetto, gli indicatori dei layout vengono generati in modo da poter guidare un utente nel posizionamento dei bracci robotici in determinate posizioni all'interno della simulazione. La tecnica di tracciamento del *marker* (un'immagine che il sistema deve riconoscere per attivare i contenuti virtuali) utilizzata in AR ha il compito di fornire alla telecamera determinate

informazioni sulla posizione di un qualsiasi oggetto che è situato all'interno del suo campo visivo. Nel nostro caso, tale tecnica viene utilizzata per determinare la relazione spaziale che c'è tra i diversi elementi fisici (fotocamera, bracci robotici, part substrate, ecc.) e per ricostruire inoltre il loro layout all'interno della simulazione.

La Figura 2.11 mostra come è configurata l'area di lavoro che prenderemo in considerazione per il nostro caso di studio.

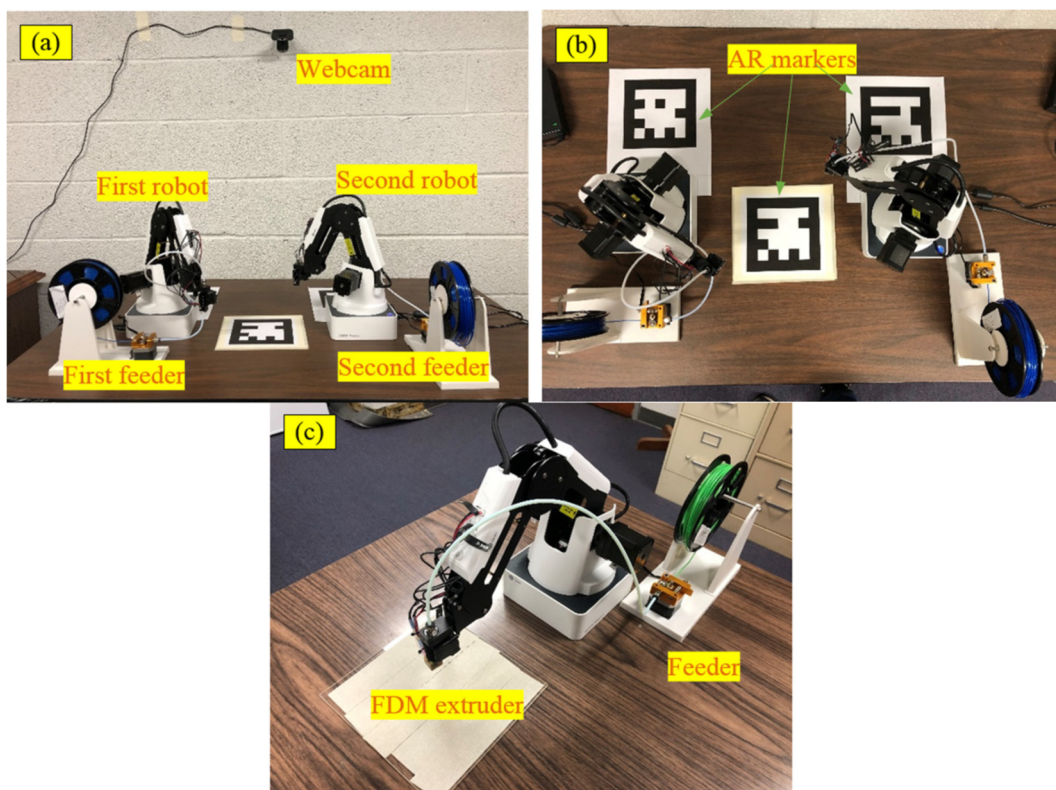


Figura 2.11: Panoramica dello spazio di lavoro: (a) vista frontale, (b) vista dall'alto e (c) Dobot Magician robot

Una webcam Full HD 1080 P è fissata alla parete per catturare in video, a 30 fps se vogliamo essere precisi, tutto quello che avviene in tempo reale all'interno del nostro scenario di lavoro; è importante sottolineare che a causa del principio di funzionamento del sistema AR,

l'altezza della webcam non necessita di essere calcolata rigorosamente fintanto che è in grado di catturare tutti gli elementi presenti nell'area di lavoro. Due Dobot Magician 4-DOF desktop robotic arm (un particolare tipo di braccio robotico) vengono utilizzati per eseguire le attività di costruzione. I loro *effettori finali* (cioè la parte situata all'estremità finale del braccio) vengono modificati in estrusori in stile FDM e due *feeder* separati (o anche detti in italiano "alimentatori") forniscono ai due bracci un particolare tipo di filamento, denominato PLA. Vengono utilizzati tre markers AR; uno viene utilizzato per indicare la posizione del part substrate, mentre gli altri due individuano, rispettivamente, la posizione dei due bracci robotici. Inoltre, gli ultimi due marker sono integrati in due *positioning card* che vengono utilizzate per individuare i due bracci. Il part substrate e i due bracci possono essere spostati liberamente, andando ad individuare di volta in volta layout differenti. Il sistema è riconfigurabile in questo senso. La libreria open source NyAR-ToolKit viene utilizzata per tracciare i marker e generare oggetti virtuali come indicatori di layout e sistemi di coordinate.

Per costruire il collegamento tra il dominio fisico e quello cibernetico, è importante determinare la relazione spaziale che intercorre tra tutti gli elementi, compresi il part substrate, i bracci robotici e la telecamera. In questo caso, le trasformazioni delle coordinate sono necessarie per tutti gli elementi presenti in Figura 2.12.

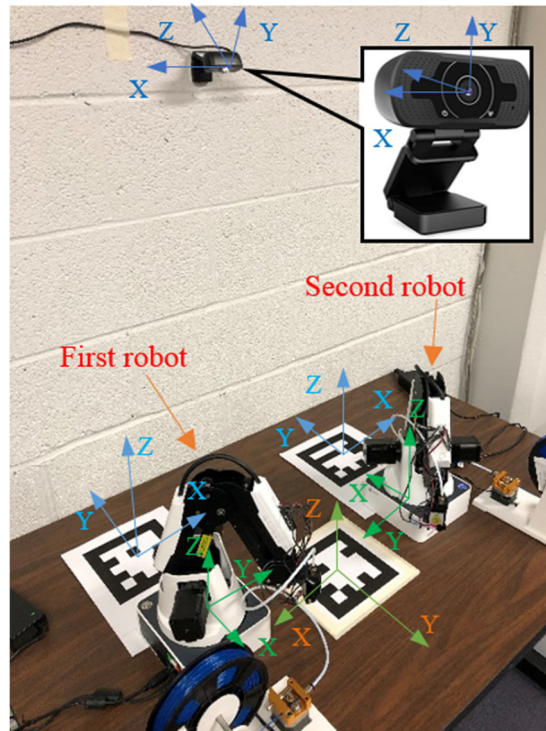


Figura 2.12: Sistemi di riferimento degli oggetti presi in considerazione

La libreria NyARToolKit fornisce una matrice di trasformazione delle coordinate che ci permette di passare dalla telecamera ad un marker. La relazione che vi è tra la telecamera ed un marker può essere espressa come

$$P_C = M_{CM}P_M \quad (1)$$

dove P_C è un vettore 4×1 ($[x_C y_C z_C 1]^T$) che sta a rappresentare i valori delle coordinate di un punto spaziale nel sistema di riferimento della telecamera, P_M invece è sempre un vettore 4×1 ($[x_M y_M z_M 1]^T$) che rappresenta però i valori delle coordinate dello stesso punto spaziale ma nel sistema di riferimento del marker. Infine, M_{CM} è la matrice di trasformazione omogenea 4×4 che ci permette di passare, come già accennato qualche righe fa, dal sistema di coordinate della telecamera a quello del marker. Inoltre, la relazione tra la telecamera e i due marker può essere espressa nel seguente modo

$$P_C = M_{CM1}P_{M1} = M_{CM2}P_{M2}$$

e poi

$$P_{M1} = M_{CM1}^{-1}M_{CM2}P_{M2} \quad (2)$$

La matrice di trasformazione omogenea 4 x 4 dal sistema di coordinate del primo marker a quello del secondo è $M_{CM1}^{-1}M_{CM2}$. Per il sistema di coordinate della telecamera, l'asse +X punta al lato destro della vista in video, l'asse +Y punta al lato superiore della vista in video e l'asse +Z punta verso colui che sta guardando la vista in video e cioè l'osservatore. Di conseguenza, tutti i marker presenti nella vista vengono tradotti in direzione -Z e questo implica che avranno un valore negativo per la traduzione delle "Z" nella matrice. È importante sottolineare il fatto che per ottenere la posizione relativa tra due differenti marker, la posizione assoluta della telecamera non è necessaria.

Idealmente, il sistema di riferimento di un marker dovrebbe sovrapporsi a quello di un braccio robotico in modo che, tracciando il marker, la posizione e l'orientamento del braccio siano direttamente noti. Questo è in realtà poco praticabile in quanto se per allineare i due sistemi di riferimento, un marker viene posizionato al di sotto del robot, il marker non sarà più visibile alla telecamera. Per risolvere questo problema, le positioning card vengono sviluppate come mostrato in Figura 2.13.

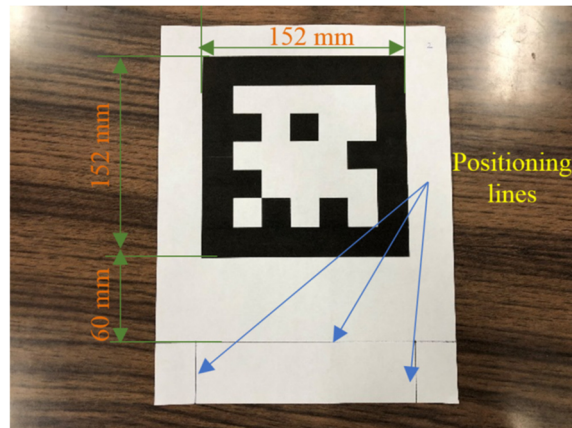


Figura 2.13: Positioning card

Le linee di posizionamento vengono tracciate ad una distanza di offset arbitraria dal marker pari a 60 mm, mentre la dimensione di quest'ultimo è nota, ed è di 152 mm. La distanza tra le due linee di posizionamento “corte” è uguale alla dimensione della base quadrata del robot che è di 158 mm. Quando i tre bordi della base del robot si allineano con le tre linee di posizionamento, viene conseguentemente determinata la relazione che intercorre tra il sistema di coordinate del robot ed il marker. La relazione che c'è tra un marker e un braccio robotico allineato può essere espressa come

$$P_M = M_{MR}P_R \quad (3)$$

dove P_M è un vettore 4×1 che rappresenta i valori delle coordinate di un punto spaziale nel sistema di coordinate del marker, P_R è un vettore 4×1 che rappresenta i valori delle coordinate dello stesso punto spaziale ma nel sistema di coordinate del robot e M_{MR} è la matrice di trasformazione omogenea 4×4 dal sistema di coordinate del marker a quello del robot. Nella Figura 2.12, il sistema di riferimento del primo robot, rispetto a quello del primo marker, viene ruotato di -90 gradi intorno all'asse Z e traslato di -215 mm lungo l'asse Y. La matrice di trasformazione M_{MIR1} dal sistema di coordinate del primo marker al sistema di coordinate del primo robot è:

$$M_{M1R1} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & -215 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Il sistema di coordinate del secondo robot, rispetto a quello del secondo marker, viene ruotato invece di +90 gradi intorno all'asse Z e traslato di -215 mm lungo l'asse Y. La matrice di trasformazione M_{M2R2} dal sistema di coordinate del secondo marker a quello del secondo robot è invece:

$$M_{M2R2} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -215 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Combinando adesso le equazioni (1) e (3), la relazione che vi è tra la telecamera ed un braccio robotico allineato, può essere espressa come

$$P_C = M_{CM}M_{MR}P_R \quad (4)$$

La matrice di trasformazione omogenea 4 x 4 che ci permette di passare dal sistema di riferimento della telecamera al sistema di riferimento del robot è $M_{CM}M_{MR}$.

Per ricostruire il layout fisico nel sistema di prototipazione virtuale, è necessario conoscere la posizione relativa tra il part substrate e i due bracci robotici in modo tale che i valori delle coordinate, racchiusi all'interno di un file part, possano essere opportunamente trasformati per la fabbricazione simultanea messa in atto dai due bracci robotici. Nella configurazione del progetto, il marker della parte è posizionato al centro del substrato. La relazione tra il sistema di coordinate della parte e il braccio robotico allineato può essere espressa come

$$P_C = M_{CP}P_P = M_{CM}M_{MR}P_R$$

e poi

$$P_P = M_{CP}^{-1} M_{CM} M_{MR} P_R$$

dove P_P è un vettore 4×1 che rappresenta un punto spaziale nel sistema di coordinate della parte, P_R è un vettore 4×1 che rappresenta i valori delle coordinate dello stesso punto spaziale ma nel sistema di coordinate del robot, M_{CP} è la matrice di trasformazione omogenea 4×4 dal sistema di coordinate della telecamera al sistema di coordinate della parte ed infine M_{CP}^{-1} è la sua matrice inversa. La matrice di trasformazione omogenea 4×4 dal sistema di coordinate della parte al sistema di coordinate del robot è $M_{CP}^{-1} M_{CM} M_{MR}$.

Ora andremo a vedere quello che prende il nome di *layout reading*, e cioè come è possibile ricostruire un layout fisico esistente, attraverso l'utilizzo della tecnologia AR, all'interno di un gemello digitale. È stato preparato un layout di prova come mostrato nella sottostante Figura 2.14.

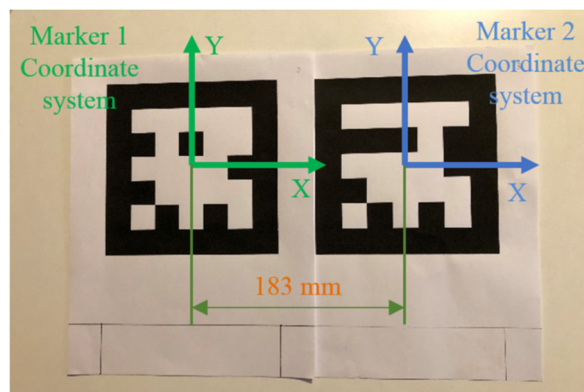


Figura 2.14: Layout di prova per la lettura

Due marker sono stati allineati l'uno accanto l'altro con uno spazio centrale che li divide di 31 mm. Dato che la dimensione di ogni marker è pari a 152 mm x 152 mm, la distanza tra i due centri dovrebbe essere all'incirca di 183 mm, che corrisponde ad una trasformazione

traslazionale di +183 mm, lungo l'asse X, dal primo al secondo marker. Non dovrebbe esserci invece alcuna trasformazione traslazionale lungo gli assi Y e Z. Seguendo l'equazione (2), sono state raccolte quattro istanze di M_{CM1} e M_{CM2} per il calcolo della matrice di trasformazione $M^{-1}_{CM1}M_{CM2}$. I risultati della traslazione lungo X, Y e Z nella matrice sono mostrati nella Tabella 1 insieme ai loro valori medi e a quelli effettivi.

	1 st trial	2 nd trial	3 rd trial	4 th trial	Trial average	Actual
X (mm)	187.19	188.05	189.89	194.46	189.90	183
Y (mm)	-0.95	-3.87	-8.21	-18.98	-8.00	0
Z (mm)	31.25	19.06	15.15	18.03	20.87	0

Figura 2.15: Tabella 1

È possibile vedere come la differenza che intercorre tra i valori calcolati e i valori effettivi delle traslazioni lungo X e Y è situata all'interno di un intervallo di 10 mm, mentre il valore della traslazione lungo Z è abbastanza diverso. Ciò in teoria è dovuto alla distorsione della vista nella fotocamera, che può essere però risolta implementando un processo di calibrazione personalizzato, invece di utilizzare un modulo statico appartenente alla libreria NyARToolKit.



Figura 2.16: Utilizzo della realtà aumentata per l'implementazione del layout

Adesso, dopo aver trattato il layout reading, andremo ad approfondire quello che prende il nome invece di *layout deployng*, cioè andremo a dimostrare quella che è la possibilità di utilizzare la tecnica AR per guidare l'utente nella distribuzione di un layout di bracci robotici all'interno del gemello digitale, il tutto basandosi sui risultati ottenuti nella simulazione. Nel seguente layout di esempio, il primo robot deve essere ruotato di 90 gradi intorno all'asse Z e traslato di 250 mm lungo l'asse X partendo dal sistema di coordinate della parte, mentre il secondo robot deve essere ruotato di -90 gradi intorno all'asse Z e traslato di -250 mm lungo l'asse X partendo sempre dal sistema di coordinate della parte. Come primo passo, è stato

identificato il marker riguardante il sistema di riferimento della parte e di conseguenza sono stati generati due indicatori di posizione, come mostrato nella Figura 2.16 (a) soprastante. Successivamente l'utente ha raccolto la positioning card del primo braccio robotico e un modello virtuale di quest'ultimo si è generato in base a quella che è la matrice di trasformazione proprio tra il marker ed il braccio robotico allineato, come mostrato in Figura 2.16 (b). L'utente ha poi spostato la card fino a quando la parte inferiore del robot virtuale non ha combaciato perfettamente con l'indicatore di posizione verde e per fare ciò, il sistema ha fornito in tempo reale sia indicazioni visive che sonore, il tutto per far sapere all'utente che la posizione e l'orientamento del braccio robotico virtuale erano sufficientemente accurati (es. entro un intervallo di 5 mm), come mostrato in Figura 2.16 (c). L'utente ha ripetuto nuovamente questo processo e posizionato il secondo braccio robotico virtuale come mostrato in Figura 2.16 (d). Infine, è possibile vedere come in Figura 2.16 (e) l'utente ha preso i due bracci robotici fisici e li ha allineati, seguendo gli appositi indicatori di posizione, con il corrispondente marker. Durante questo caso di studio, è stato riscontrato però che se l'angolo tra l'asse centrale della telecamera e l'asse Z appartenente al sistema di coordinate della parte si riduce, ovvero la linea centrale della telecamera è maggiormente allineata con la direzione normale del part substrate, il tracciamento del marker tende ad essere più impreciso e instabile, con il risultato di una resa distorta e non realistica degli oggetti virtuali. Il motivo è che all'angolo di visualizzazione, un piccolo cambiamento nella dimensione o nella forma del marker si tradurrà in un cambiamento considerevole nel vettore normale determinato dal part substrate e quindi nell'asse Z del sistema di coordinate di quest'ultimo. Questo problema può essere risolto regolando adeguatamente la posizione della telecamera in modo tale che rimanga lontana dalla direzione normale del part substrate pur essendo però in grado di catturare tutti i marker presenti.

Come mostrato nei due casi trattati in precedenza, a causa di vari motivi come la distorsione dell'immagine della telecamera, il rilevamento errato del marker, condizioni di illuminazione sfavorevoli e così via, il tracciamento del marker presenta un'impresione che possiamo definire addirittura "intrinseca". Di conseguenza, possiamo dire che la tecnica AR potrebbe non essere adatta a prendere il ruolo di metodo del posizionamento finale per connettere il dominio cyber con quello fisico, ma sarà comunque una buona scelta nei casi in cui si necessita di una dislocazione rapida e approssimativa del layout ottimale determinato dal gemello digitale e per la ricostruzione del layout, che abbiamo intenzione di utilizzare, all'interno della simulazione. Nella pratica reale, ci saranno metodi più accurati per la calibrazione degli attuatori, come ad esempio mettere in relazione, prima però che la fabbricazione effettiva inizi, i sistemi di coordinate degli attuatori con il sistema di coordinate della parte. Un modo semplice è quello di utilizzare quella che prende il nome di *teaching mode* per poter guidare l'end-effector di un attuatore verso posizioni predefinite (come ad esempio l'origine) all'interno del sistema di coordinate della parte e registrare le coordinate corrispondenti sotto il sistema di coordinate dell'attuatore, in modo tale che una matrice di trasformazione tra il sistema di coordinate dell'attuatore e quello della parte possano essere stabiliti utilizzando una tecnica simile a quella dell'equazione (1). La relazione che intercorre tra il sistema di coordinate della parte e il sistema di coordinate del robot può essere espressa come

$$P_P = M_{PR}P_R$$

dove la matrice di trasformazione che ci permette di passare dal sistema di coordinate della parte a quello del robot è

$$M_{PR} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 & \Delta X \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 & \Delta Y \\ 0 & 0 & 1 & \Delta Z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

In questa matrice, θ indica la rotazione intorno all'asse Z del sistema di coordinate della parte, mentre ΔX , ΔY e ΔZ indicano il movimento traslatorio dell'origine del sistema di coordinate del robot da quella che è l'origine del sistema di coordinate della parte. La rotazione intorno agli assi X e Y non viene considerata in quanto si suppone che il piano di lavoro sia a due dimensioni. Il valore di $\cos\theta$, $\sin\theta$, ΔX , ΔY e ΔZ può essere calcolato utilizzando la teaching mode del robot per poter guidare l'ugello verso più punti già noti nel sistema di coordinate della parte, registrare i valori delle coordinate correnti che vengono mostrate nel robot e inserire queste informazioni riguardanti la posizione all'interno dell'equazione (6). Ad esempio, se l'end-effector viene guidato fino a (0,0,0), (1,0,0) e (0,1,0) nel sistema di coordinate della parte, e i corrispondenti valori di coordinate del robot sono (-10,5,-5), (-9,5,-5) e (-10,6,-5), possiamo dire che la matrice di trasformazione dal sistema di coordinate della parte al sistema di coordinate del robot è

$$M_{PR} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 10 \\ 0 & 1 & 0 & -5 \\ 0 & 0 & 1 & 5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Se l'end-effector deve andare a (10,10,0) nel sistema di coordinate della parte, allora dovrebbe essere guidato verso (0,15,-5) nel sistema di coordinate del proprio attuatore.

Riassumendo il tutto, possiamo dire che in questo paragrafo è stata presentata una metodologia di utilizzo della tecnica AR che permette ad un sistema AM riconfigurabile fatto di bracci robotici ed il suo corrispondente digital twin per la pianificazione e la

simulazione del percorso utensile, di comunicare comodamente tra loro le informazioni riguardanti un determinato layout. È stato presentato inoltre un prototipo di sistema composto da due desktop AM robotic arms e sono state derivate inoltre matrici di trasformazione per determinare la relazione spaziale tra i diversi elementi del sistema, inclusi telecamera, marker, bracci robotici e part substrate. Sono stati condotti casi di studio per dimostrare la capacità di questa metodologia di recuperare automaticamente le informazioni di layout e di assistere gli utenti nell'implementazione di layout predeterminati. I risultati hanno mostrato che la metodologia sviluppata consente il recupero rapido delle informazioni sulla posizione dal layout fisico del sistema nel gemello digitale e facilita la distribuzione conveniente di un layout determinato nel gemello digitale basato sulla simulazione e sull'ottimizzazione nel sistema fisico. Per quanto riguarda il futuro, l'accuratezza del tracciamento del marker AR deve essere ulteriormente migliorata attraverso lo sviluppo di una calibrazione della telecamera su misura e metodi di compensazione della distorsione.

2.3 Digital twin e logistica di cantiere

Si prevede che negli anni a venire, la trasformazione digitale ridisegnerà in modo significativo anche il settore delle costruzioni, spesso elencato tra quelli meno digitali. Attualmente, molti dei maggiori protagonisti nel campo della costruzione si stanno spingendo sempre più in avanti per quanto riguarda lo sviluppo di rappresentazioni digitali di edifici in modo da poterne facilitare la gestione, la manutenzione e, laddove possibile, i miglioramenti. Tuttavia, i processi svolti in cantiere rimangono chiaramente non digitali, caratterizzati da responsabilità poco chiare, piani stampati e da quelli che in inglese vengono chiamati *opaque inventories* (l'inventario viene chiamato "opaco" perché i fornitori specifici rimangono nascosti fino a quando l'acquisto non è stato completato). È facile capire come

in tali ambienti sia alquanto complicato attuare procedure di pianificazione efficienti. In questo caso di studio esploreremo quelli che sono i vantaggi offerti dalla creazione di gemelli digitali per *silos* contenenti merci sfuse, a chi si occupa della logistica di cantiere. Siamo interessati al potenziale valore aziendale che garantirebbe un continuo monitoraggio del livello di riempimento dei silos e del loro tracciamento. Questa innovazione tecnologica, apparentemente piccola, offre diverse opportunità per migliorare gli attuali processi aziendali e per introdurne anche dei nuovi.

I materiali sfusi costituiscono l'elemento più grande della catena di fornitura delle costruzioni; lo stoccaggio deve essere conveniente, sicuro e i sistemi dovrebbero essere facilmente integrabili nei processi operativi. I silos si sono affermati per essere particolarmente adatti per applicazioni mobili di stoccaggio alla rinfusa nell'edilizia e nell'agricoltura. Il processo "classico" riguardante la fornitura dei silos dipende esclusivamente dal trasporto di quest'ultimi avanti e indietro tra i siti di costruzione e gli impianti di produzione del materiale. Questo particolare processo di movimentazione è organizzato come segue (confrontare con Figura 2.17 (a)):

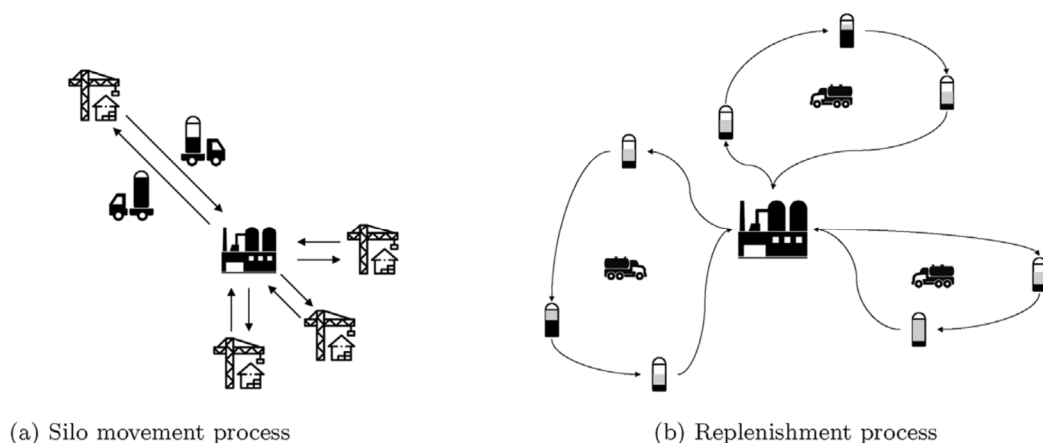


Figura 2.17: Status quo

1. Il silo viene riempito e pesato nell'impianto;
2. L'operatore logistico trasporta il silo fino al cantiere in cui l'appaltatore ha richiesto il materiale;
3. Quando l'appaltatore comunica che non vi è più bisogno del silo, quest'ultimo viene ritirato e riportato allo stabilimento dall'operatore logistico. Nello stabilimento, il silo viene nuovamente pesato. All'appaltatore viene fatturata la differenza tra il livello di riempimento originale e il materiale rimanente.

Oltre a questo tipo di processo, che possiamo anche definire “standard”, esiste un caso in cui la domanda del cantiere supera il volume di un singolo silo. Le fasi di tale processo di rifornimento sono le seguenti (confrontare con Figura 2.17 (b)):

1. L'appaltatore segnala le richieste di rifornimento allo svuotamento di un silo;
2. Un'autocisterna trasporta una quantità pesata di materiale per rifornire il silo. L'importo del rifornimento è incluso nel conto al momento della fine dell'utilizzo e della successiva restituzione.

Si noti che la fatturazione basata sul peso richiede che un silo debba sempre tornare all'impianto prima di cambiare cliente, anche se vi è potenzialmente ancora abbastanza materiale per servirne uno successivo.

I processi descritti sono ricorrenti nell'industria dei materiali sfusi da costruzione. Sono nati da una combinazione di requisiti normativi (pesatura esatta), comportamento dell'appaltatore (richieste di materiale ad-hoc) e ubicazione degli impianti. In una situazione “difficile”, possono essere considerati una forma di adattamento ottimale. È facile vedere però che, legate a questa configurazione, ci sono una serie di carenze:

- **Spostamenti eccessivi del silo tra i siti e l'impianto.** Ciò è particolarmente evidente per i cantieri in vaste aree di sviluppo urbano dove ci sono sempre più spesso ampie opportunità di business. Il problema è amplificato dal fatto che i camion per la movimentazione di silos richiedono impianti di sollevamento costosi e che necessitano di molta manutenzione. Inoltre, durante queste eccessive movimentazioni, è bene ricordare come i silos restino inattivi, e questo non è di certo da aggiungere tra i vantaggi.
- **Rischio di interruzione del lavoro nei grandi cantieri a causa di disattenzioni riguardanti il livello di riempimento del silo.** Il rifornimento può essere attivato solo quando gli appaltatori si rendono conto che un silo è esaurito. Questo in genere interromperà il lavoro fino al completamento del rifornimento, il che non fa altro che aggiungere altra pressione sul fornitore che deve cercare di soddisfare queste richieste il più rapidamente possibile.
- **Pianificazione operativa compromessa a causa della cattiva qualità delle previsioni.** Ciò è dovuto a ordini irregolari e discreti. I silos vengono posizionati nei cantieri per diverse settimane durante le quali il fornitore non ha informazioni sull'utilizzo del materiale. Può capitare che il materiale restituito possa essere ormai troppo vecchio per un ulteriore utilizzo.

Oltre a questi problemi, che derivano direttamente dal sistema di distribuzione all'ingrosso, ci sono anche conseguenze a lungo termine. Il modo ormai consolidato di gestire queste operazioni stabilisce sia il design del silo (la capacità dovrebbe corrispondere alla domanda di un tipico cantiere edile) che la composizione della “flotta” di trasporto (fatta da molti mezzi di trasporto costosi e da poche autocisterne).

Dopo aver delineato lo status quo, cioè la situazione attuale delle cose, vogliamo ora esplorare come le operazioni aziendali possano trarre vantaggio dall'espansione della rappresentazione digitale dei loro silos. Attualmente l'azienda traccia per ogni silos la tipologia (dimensione, sistema di erogazione), il materiale con cui viene riempito e la posizione (in base ovviamente allo stato dell'ordine). Per ottenere una rappresentazione digitale completa, un gemello digitale appropriato del silo, è necessario essere in grado di accedere, in tempo reale, al livello di riempimento di quest'ultimo. Chiaramente, l'integrazione di tali capacità di monitoraggio richiede l'aggiornamento dei silos con sensori di riempimento e capacità di connettività adeguate. L'aggiornamento di un ampio stock di silos comporta importanti investimenti che devono essere attentamente valutati. Chi ha il compito di decidere a tal riguardo, dovrebbe considerare i vantaggi iniziali (guadagni di efficienza derivanti dall'automazione di un processo), intermedi (processo decisionale più informato) e a lungo termine (ottimizzazione del processo e apprendimento organizzativo) che potrebbero derivare dall'uso di sistemi di informazione. Per valutare i vantaggi di questo nascente sistema informativo adottiamo il framework proposto da Mooney et al. (Mooney et al., 1996)³ che raggruppa i vantaggi della tecnologia dell'informazione (IT) in base al loro ambito, che sia informativo, automatico o trasformativo.

Le conseguenze in campo informativo corrispondono alla raccolta e alla diffusione di informazioni guidate dall'IT che a sua volta migliora la qualità decisionale, l'utilizzo delle risorse e l'efficacia organizzativa. Il monitoraggio continuo dei livelli di riempimento del silo è un esempio più che adatto in quanto gli aggiornamenti sporadici delle informazioni (pesatura presso l'impianto) sono sostituiti da un monitoraggio completo. Avere a

³ Mooney, J.G., Gurbaxani, V., Kraemer, K.L., *A process oriented framework for assessing the business value of information technology*, 1996

disposizione dati completi ci dà l'opportunità di ottimizzare in base ai fatti invece che all'istinto. I diretti vantaggi operativi derivanti dalla possibilità di monitorare il cantiere includono una migliore previsione della domanda e registrazioni di inventario corrette per tutto lo stock di silo. Inoltre, le informazioni sui clienti possono aiutare il personale di vendita nel targeting e nella comunicazione, mentre i product manager possono personalizzare le offerte di prodotti e servizi per dare ai clienti ciò che effettivamente desiderano. Infine, ai clienti possono essere offerti semplici servizi di analisi descrittiva (app, dashboard) che consentono un facile monitoraggio dei consumi e dei costi maturati.

I vantaggi dell'automazione derivano invece dal miglioramento della produttività e dalla riduzione dei costi. Attualmente, il rifornimento di un silos viene avviato solo quando quest'ultimo è esaurito; questo in genere interromperà il lavoro fino al completamento del rifornimento. Ciò spinge il fornitore a gestire le richieste di rifornimento il più rapidamente possibile. A sua volta, la pianificazione operativa dei rifornimenti viene eseguita in un breve arco temporale in quanto gli ordini arrivano senza alcun *lead time*. La possibilità di valutare il livello di riempimento di un silo apre la strada a processi di rifornimento più efficienti. In particolare può essere adottata una politica di rifornimento preventiva basata su soglie “minime” che, una volta oltrepassate, attivano automaticamente il processo di rifornimento, evitando così di avere silos vuoti in cantiere (miglior livello di servizio e maggiore soddisfazione del cliente). Pesatura e copertura automatizzati creano inoltre guadagni nella produttività, grazie ad una più rapida movimentazione dei silos e a piani di produzione nettamente più fluidi. Allo stesso modo, i processi di fatturazione possono essere a loro volta automatizzati. Ultimo ma non meno importante, la completa disponibilità dei dati operativi fornisce al management una *real time decision basis*; tali informazioni possono essere utilizzate per la negoziazione dei prezzi e la pianificazione degli investimenti.

Parliamo infine dei *transformational benefits*. Questi vantaggi si riferiscono al valore derivante dalle opportunità di innovazione e trasformazione dei processi aziendali create dalla disponibilità dei sistemi IT. Nei processi attualmente in uso la maggior parte dei silos trascorre molto tempo lungo la strada, avventurandosi avanti e indietro tra l'impianto e i vari cantieri dispersi nel territorio circostante. Tuttavia, in alcune località si svolgono regolarmente più di una singola attività di costruzione. La possibilità di rinunciare alla pesatura presso l'impianto a fini di fatturazione consente di riposizionare i silos da un cantiere ad un altro. Da un punto di vista manageriale, un tale cambiamento comporterebbe una completa ridefinizione delle transazioni commerciali dell'azienda: storicamente, i clienti hanno sempre ordinato un silo contenente una quantità di materiale sufficiente per soddisfare solo ed esclusivamente le loro necessità. Andando avanti, si potrà però passare ad una situazione in cui i cantieri ottengono materiale dai silos senza mai però aver effettuato un ordine. La Tabella 1 riassume i possibili vantaggi offerti dall'introduzione di silos intelligenti. Si noti come i vantaggi informativi e automatici possano essere realizzati abbastanza rapidamente dopo l'introduzione di un digital twin del silo. Tuttavia, sfruttare quelli che abbiamo chiamato *transformational benefits* è più complesso in quanto è richiesta l'implementazione di modifiche significative agli attuali processi aziendali.

Scope	Functionality and impact
Informational	Continuous asset tracking Improved customer insights and strategic planning
Automational	Threshold-based preventive replenishment Data-driven reporting and automated billing processes
Transformational	Adoption of new logistic processes Transformation from product to service offering

Figura 2.18: Tabella 1

L'utilizzo dei dati disponibili ci consente di rompere i processi di fornitura e rifornimento dei silos esistenti descritti ad inizio paragrafo. In contrasto con i vecchi schemi di movimento “impianto-sito-impianto”, le informazioni aggiuntive disponibili consentono di spostare i silos direttamente tra i cantieri, vedere Figura 2.19.

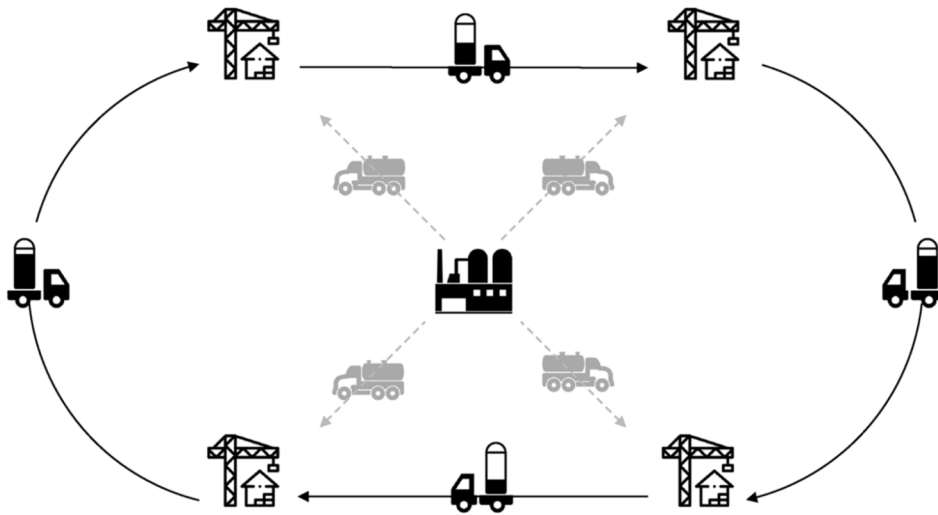


Figura 2.19: Processo di fornitura integrato

Il nuovo processo di fornitura del silo richiede di decidere quale silo viene trasportato in quale cantiere su quale camion durante la spedizione. Allo stesso tempo, è necessario rispettare una serie di vincoli operativi, come i limiti di capacità e peso per autocarri e silos, periodi massimi di inattività, o i periodi di manutenzione. Il nuovo processo è organizzato come mostrato in Figura 2.20. Con informazioni complete sugli ordini futuri questo problema di pianificazione corrisponde ad un problema di *capacitated multi-commodity vehicle routing problem with unpaired one-to-many-to-many-to-one pickup and delivery* (CMVRP- (1-MM-1) -PD).

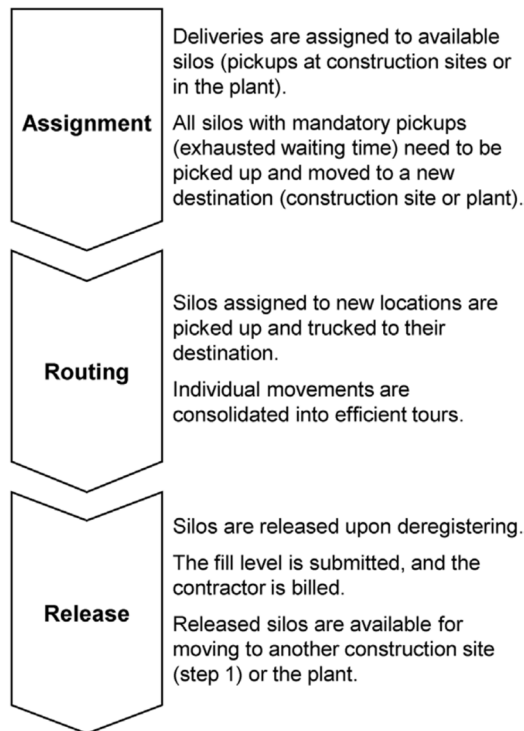


Figura 2.20: Riposizionamento del silo e successivo instradamento

Oltre al riposizionamento del silo, il nuovo processo solleva un ulteriore problema di pianificazione. Con informazioni in tempo reale sull'attuale livello di riempimento di ogni silo, i progettisti devono decidere quali devono essere riforniti con quale quantità e con quale autocisterna. Al fine di garantire una costruzione continua, ogni silo con un livello di riempimento corrente inferiore alla quantità di lavorazione giornaliera deve essere rifornito. Inoltre, tutti i silos con capacità libera consentono un rifornimento opzionale. Questi rifornimenti opzionali possono ridurre i costi operativi totali in quanto aumentano l'utilizzo delle autocisterne e aiutano ad evitare, in un secondo momento, tour sottoutilizzati. Il nuovo processo di rifornimento è organizzato come mostrato in Figura 2.21.

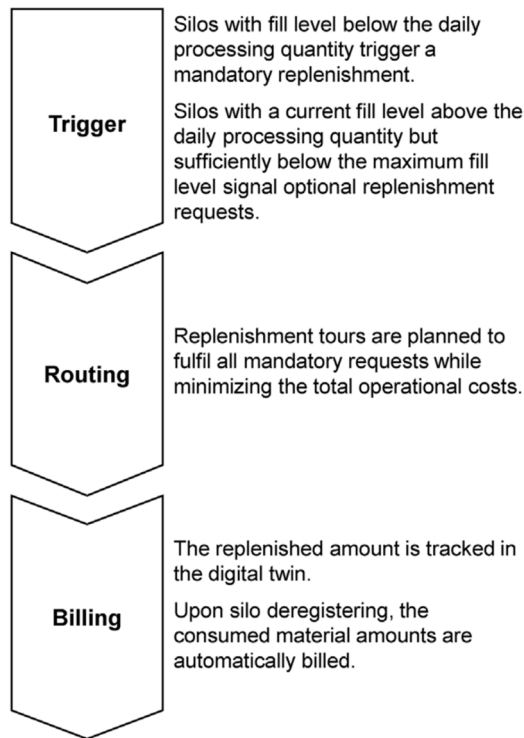


Figura 2.21: Processo di rifornimento

Questo problema decisionale può essere modellato nel senso di un *multi-compartment inventory routing problem with continuously flexible compartment sizes* (MC-IRP-FCS).

Sotto informazione completa, entrambi i suddetti sotto-processi possono essere, in linea di principio, modellati matematicamente e risolti esattamente. Tuttavia, questo non è un approccio adatto al nostro contesto per molteplici ragioni:

- Il processo di riposizionamento e instradamento del silo in Figura 2.20 richiede variabili x_{ij}^{kt} per indicare che la connessione tra i cantieri i e j è usata dal *silo-mover* k (cioè il mezzo che si occuperà della movimentazione del silo) nel giorno t . Il processo di rifornimento in Figura 2.21 richiede invece variabili y_{ij}^{vt} per indicare che il collegamento tra i cantieri i e j è utilizzato dall'autocisterna v nel giorno t . I sotto-processi isolati sono problemi complessi nel calcolo e la soluzione esatta è limitata a

richieste di problemi molto piccoli. Anche per uno scenario di gran lunga irrealistico con solo 100 cantieri, 5 giorni lavorativi e con l'utilizzo di solo due silo-mover e due autocisterne, ci sarebbero $100 \times 99 \times 5 \times 2 \times 2 = 198'000$ variabili decisionali che si traducono in numerose e necessarie variabili ausiliarie e vincoli.

- I processi di riposizionamento e rifornimento sono intrinsecamente accoppiati dal livello di riempimento giornaliero f_s^t e dall'assegnazione a_{si}^t del silo s al cantiere i .
- Le informazioni complete non sono disponibili nella configurazione descritta, in particolare a causa di ordini con breve preavviso e comportamenti di consumo incerti dei clienti.

Quindi, visto quanto riportato nelle righe soprastanti, scegliamo un approccio di tipo sequenziale in cui prima ottimizziamo i riposizionamenti e successivamente determiniamo i rifornimenti ottimali. Per il problema del riposizionamento, seguiremo il “Fisher and Jaikumar Algorithm” ed implementeremo quella che prende il nome di *cluster-first route-second heuristic*. I silos non attualmente utilizzati che richiedono un ritiro, così come le consegne richieste dai clienti, sono raggruppati in base alla loro posizione geografica. Sulla base di questi cluster, cioè gruppi, implementiamo il processo di Figura 2.20:

1. I silos “liberi” vengono assegnati quotidianamente a ordini futuri noti. Devono essere evitati quelli che in inglese vengono chiamati *backhauls* (un viaggio di ritorno di un veicolo dopo che ha trasportato e consegnato merci) dovuti a lunghi periodi di inattività. Pertanto, per stabilire la priorità tra i vari ordini ricevuti, diamo prima la precedenza a ritiri e consegne obbligatori, cioè che devono essere effettuati almeno entro la fine della giornata, e successivamente ai prelievi e le consegne opzionali.

2. L'assegnazione fissa riduce la complessità del nostro problema poiché ora consideriamo ritiri e consegne accoppiati su base giornaliera. Inoltre, i così detti riposizionamenti opzionali vengono eseguiti in giornata solo se sono congrui al tour che si sta svolgendo. Il modulo di riposizionamento del percorso risolve euristicamente diversi piccoli casi (ogni giorno uno per ogni cluster, cioè gruppo) del *capacitive vehicle routing problem with selective paired pickup and delivery* (CVRP-SPPD).

Per determinare dei tour di rifornimento efficienti utilizziamo l'algoritmo di risparmio di Clarke e Wright. Per implementare il processo di Figura 2.21 modifichiamo l'algoritmo ponderando le distanze dei potenziali reintegri con le loro potenziali quantità. Inoltre, lasciamo che l'algoritmo si interrompa una volta che tutti i rifornimenti obbligatori sono stati assegnati alle varie autocisterne.

A causa dell'elevato numero di variabili e vincoli decisionali, la complessità del nuovo processo incorporato può facilmente sopraffare un decisore umano. Cerchiamo dunque di progettare un *decision support system* (DSS) adatto per sfruttare i transformational benefits dei silos “intelligenti” e per supportare i pianificatori nel loro processo decisionale. Successivamente, sfruttiamo il DSS, più che altro il suo prototipo, per eseguire simulazioni dettagliate.

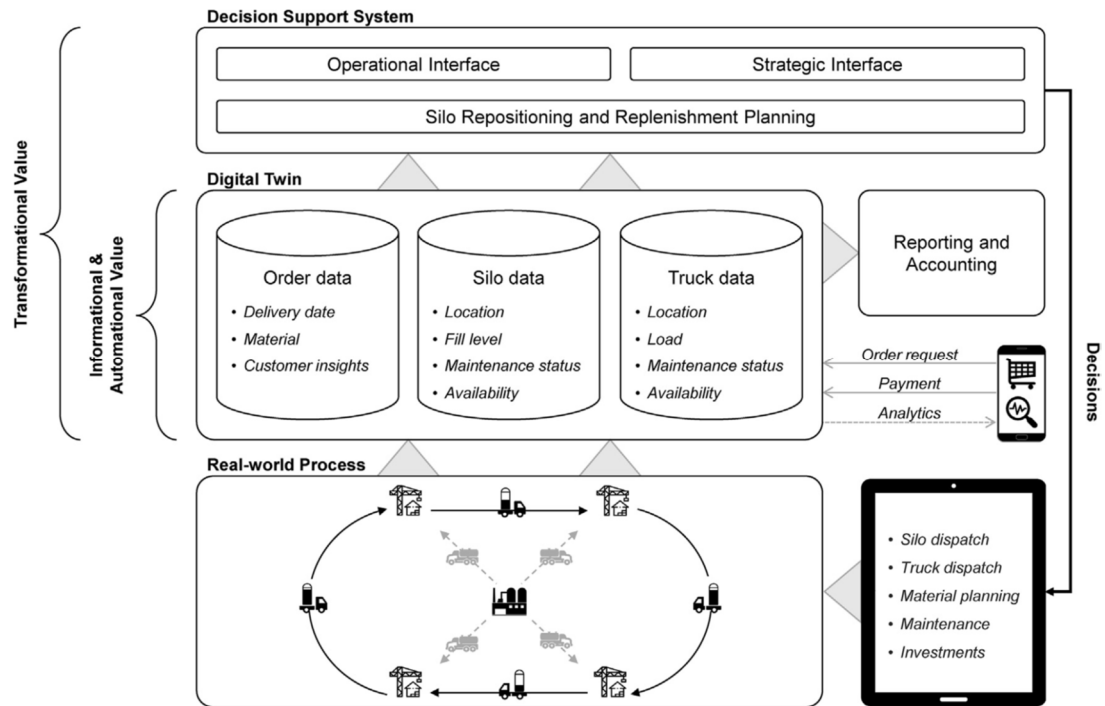
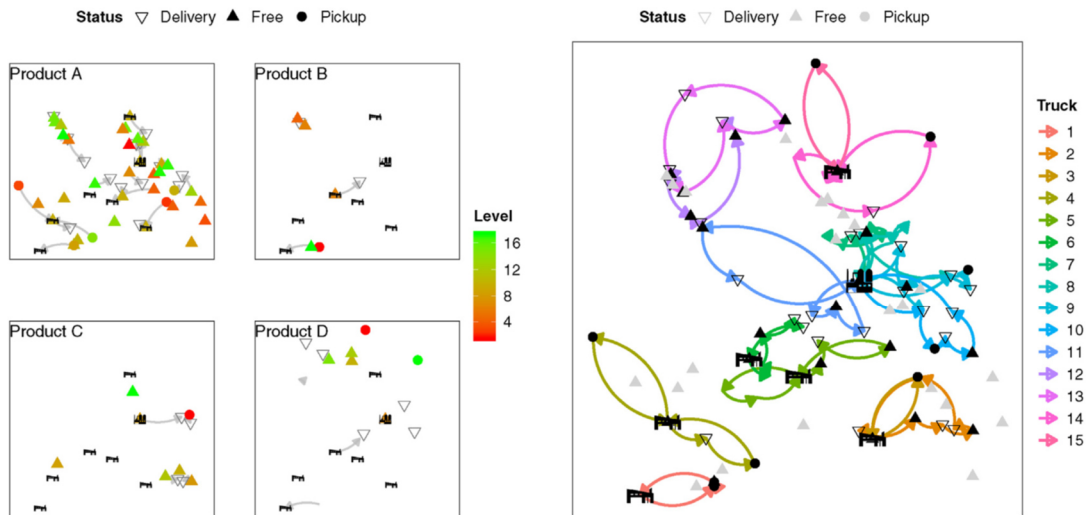


Figura 2.22: System design and system information flow

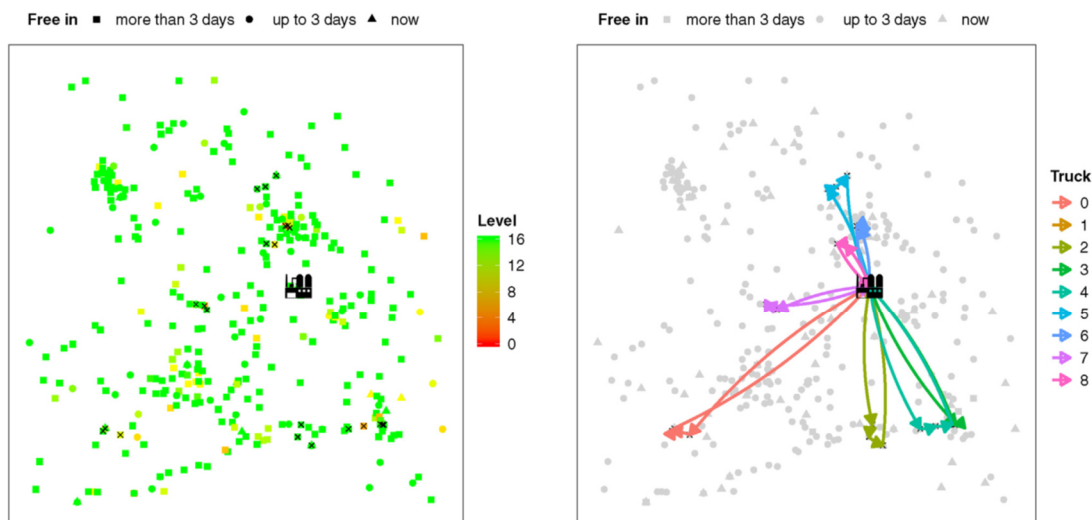
Il nostro DSS si basa sul digital twin, come mostrato in Figura 2.22. Dimostriamo la sua funzionalità per una giornata normale caratterizzata da ritiri, consegne e rifornimenti. Oltre ai risultati numerici rilevanti, una rappresentazione visiva e ben strutturata delle varie informazioni utili, è una componente chiave di un solido DSS. Pertanto, l'interfaccia operativa fornisce varie visualizzazioni e tabelle che supportano la logistica nel processo decisionale operativo. Le interfacce prototipo riguardanti la *step-by-step planning* sono illustrate in Figura 2.23 per il movimento del silo e in Figura 2.24 per il processo di rifornimento.



(a) Silo and order overview

(b) Repositioning routes

Figura 2.23: Processo di movimentazione dei silos



(a) Replenishment overview

(b) Replenishment routes

Figura 2.24: Processo di rifornimento dei silos

Silo and order overview: La prima schermata di pianificazione in Figura 2.23 (a) mostra la posizione geografica di tutti i silos liberi e il loro livello di riempimento corrente sulla base delle informazioni che il gemello digitale ci fornisce in tempo reale. Inoltre, come informazioni puramente aggiuntive, i silos che richiedono un ritiro obbligatorio sono

contrassegnati separatamente. Per quanto riguarda i vari incarichi da assegnare, tutte le consegne e gli impianti che sono ancora in sospeso vengono visualizzati in parallelo. L'impianto centrale, da cui deve essere fornito il materiale, viene visualizzato in una forma diversa. Le proposte di assegnazione, completamente automatiche, dei vari incarichi sono raffigurate direttamente in questa panoramica e possono essere modificate o accettate manualmente. A causa dei limiti tecnici dei silos, questa panoramica è specifica per il materiale.

Repositioning routes: In base alle assegnazioni, il sistema determina i possibili percorsi dei camion e li visualizza come mostrato in Figura 2.23 (b). A questo punto l'utente può accettare la proposta, aggiungere manualmente consegne o pickup o modificare le rotte dei camion di riposizionamento. Contrariamente all'assegnazione del silo, l'instradamento viene eseguito contemporaneamente sia per tutti i materiali che per le tecnologie dei silos.

Replenishment overview: Per sostenere il processo di rifornimento, al pianificatore viene fornita una rappresentazione visiva di tutti i silos sul campo. Come è possibile vedere dalla Figura 2.24 (a), questa vista mostra sia il livello di riempimento corrente che il tempo rimanente previsto fino alla distribuzione di tutti i silos. Inoltre, vengono evidenziati sia i silos con rifornimenti obbligatori così come quelli con rifornimenti proposti dal sistema.

Replenishment routes: Sulla base di queste informazioni, il sistema determina possibili percorsi di rifornimento come illustrato in Figura 2.24 (b). Analogamente alle rotte di riposizionamento dei silos, il progettista può o accettare le proposte oppure eseguire lui stesso regolazioni manuali.

Questo supporto decisionale strategico si basa principalmente sull'analisi dei dati storici. Le simulazioni basate sui dati degli ultimi tre anni per vari stabilimenti mostrano che i costi totali dei camion possono essere ridotti del 25% rispetto allo status quo, vedi Figura 2.25. L'approccio ingenuo di spostare i silos direttamente tra i cantieri e il *operating threshold-based replenishment* fornisce un ulteriore parametro di riferimento. Le autocisterne sono una tecnologia di trasporto che possiamo definire “standard”, in modo che i servizi di rifornimento possano essere esternalizzati a fornitori terzi ed addebitati ad un tasso di costo fisso (€ per chilometro). Gli autocarri che si occupano del trasporto dei silos, devono essere equipaggiati di appositi mezzi di sollevamento; pertanto l'azienda, per poter rendere operativi questi autocarri, deve investire del denaro (€ per autocarro e anno) al quale si vanno a sommare costi di esercizio variabili (€ per chilometro). Le simulazioni sembrano essere sensibili a questi svariati parametri di costo. Ad esempio, l'aumento della domanda di autocisterne può influire sul loro tasso di costo. I vari stabilimenti si differenziano per volume di distribuzione, distanze di consegna e mix di prodotti. È facile osservare come le potenziali riduzioni dei costi siano fortemente collegate a queste strutture. Dalla Figura 2.25 è possibile identificare due diversi tipi di potenziale risparmio sui costi:

1. Riduzione immediata grazie all'approccio più semplice di spostare i silos direttamente tra i cantieri;
2. Sfruttare i dati dei gemelli digitali per aggiornare in tempo reale le decisioni di rifornimento intelligente.

Quello che definiamo come approccio “semplice” può portare però a costi aggiuntivi causati da processi di rifornimento inefficienti. Sia il grado di trasformazione che la complessità del gemello digitale hanno un impatto significativo sui costi. Investimenti possibilmente non

redditizi oggi, rappresentano però un investimento per il futuro e da loro il corrispondente modello di business può migliorare la propria efficienza e ridurre dunque i costi operativi. Quando le aziende decidono di introdurre sistemi di supporto decisionale basati su dei dati, è importante formare i propri dipendenti non solo nell'uso del nuovo sistema ma anche nei nuovi processi aziendali ad esso associati. Dalla struttura dei costi, Figura 2.25, osserviamo uno spostamento nell'infrastruttura. Da quando i silo-mover sono gestiti a livello regionale, sono necessari meno camion. Allo stesso tempo, il nuovo sistema logistico aumenta il numero di autocisterne utilizzate, in quanto i silos vengono ora prevalentemente riforniti nei cantieri. L'esternalizzazione delle distanze di trasporto è un pilastro su cui i leader del settore fanno affidamento per contenere l'aumento dei costi di trasporto.

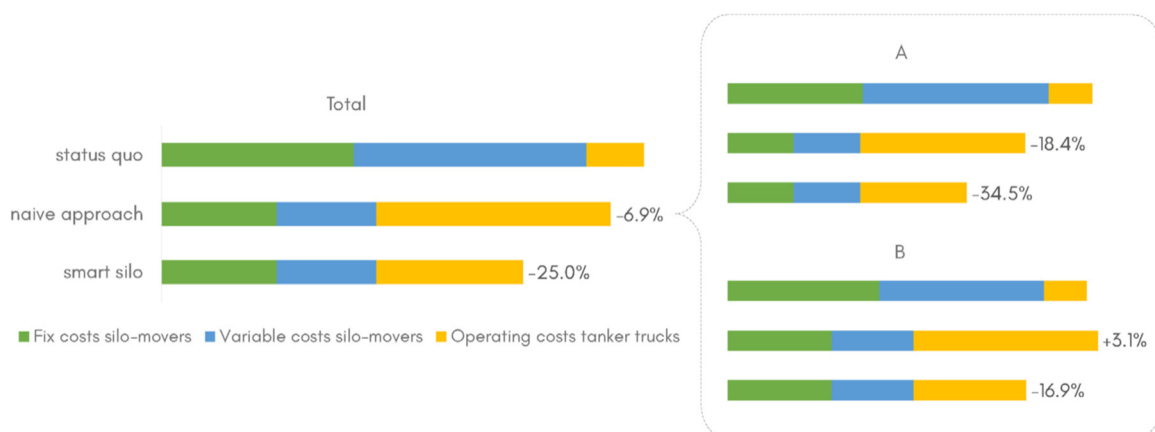


Figura 2.25: Costi totali dei camion

Dunque, riassumendo, trasformando silos “semplici” in unità di elaborazione dati intelligenti è possibile stabilire un nuovo sistema logistico in grado di ridurre direttamente i costi. Inoltre, ogni chilometro risparmiato ha ovviamente un effetto positivo sullo sviluppo delle emissioni di CO₂. L'installazione dei sensori consente il monitoraggio permanente del silo e il threshold-based filling. I sensori facilitano la trasformazione del processo verso il riposizionamento diretto del silo con limitato traffico di backhaul. Tuttavia, mantenere una

semplice politica basata sul threshold-based replenishment non porta necessariamente ad una riduzione dei costi. Per questo motivo, il nuovo sistema logistico può realizzare appieno tutte le sue potenzialità solo attraverso la combinazione di silo e *inventory routing* in un ambiente dinamico. Questa nuova politica ridisegna le relazioni che intercorrono tra stabilimenti centrali e i depositi distribuiti su tutto il territorio. L'approvvigionamento di materiale deve continuare a provenire direttamente dall'impianto, ma tutti gli altri compiti (manutenzione, riposizionamento, stoccaggio intermedio) dei silo-mover e dei silos possono essere eseguiti a livello regionale. Per sfruttare appieno le potenzialità del nuovo sistema logistico a lungo termine, l'azienda ha il compito di allineare gli investimenti futuri (come ad esempio infrastrutture e asset operativi) con le pratiche operative. Il nostro DSS simula diversi intervalli di manutenzione, nuove posizioni strategiche, varie configurazioni della flotta su diverse gamme di requisiti di livello di servizio. Sulla base di queste simulazioni, l'azienda ha iniziato a ristrutturare i propri camion e silos. Uno dei principali fattori riguardanti i costi logistici è lo spazio di archiviazione, soprattutto nelle aree urbane più costose. Per questo motivo, i silos funzionano sia come unità di trasporto ma allo stesso tempo anche come veri e propri magazzini mobili intelligenti per quanto riguarda lo spazio di stoccaggio temporaneo; in questo modo, un silo che si trova all'interno di un cantiere può essere trasformato in un deposito temporaneo di materiale. Ciò ci consente di stoccare del materiale anche nelle principali aree urbane, senza però incorrere in relativi costi aggiuntivi. Oltre ai costi totali, il sistema valuta queste strategie sulla base di indicatori di prestazione come il numero di silos, camion in uso, distanze di guida e fattori di carico. Oltre agli aspetti economici difficili, possono essere perseguiti un altro genere di fattori come la soddisfazione di dipendenti e clienti, nonché iniziative di sostenibilità.

La ricerca futura sarà multiforme: per una migliore qualità ed efficienza dei processi decisionali e della pianificazione, vogliamo estendere il nostro digital twin, che attualmente può essere definito “leggero”, includendo al suo interno dati che descrivono ancor di più quella che è la situazione reale delle cose. I primi approcci promettenti includono il tipo e l'ambito del cantiere, le condizioni delle strade di accesso a quest'ultimo, nonché l'evoluzione dei prezzi nei servizi di trasporto e nei materiali da costruzione. Una delle maggiori sfide che caratterizza questo genere di casi di studio rimane l'incertezza che vi è nei vari processi integrati. In futuro, le società cercheranno di sfruttare l'analisi predittiva per prevedere ad esempio quella che è la quantità di lavorazione giornaliera dei singoli clienti, gli ordini in entrata, l'andamento dei prezzi e le condizioni del traffico; gli effetti della rete su impianti e prodotti, con l'introduzione ovviamente del nuovo sistema logistico, permetteranno di risparmiare maggiormente sui costi. È bene sottolineare come autocisterne e silos vengano ampiamente utilizzati anche in altri settori, come quello alimentare, agricolo e addirittura nell'ambito della lavorazione della plastica. Analogamente però, si vogliono valorizzare anche nuovi mezzi di trasporto come camion elettrici all'interno delle aree urbane o la funzionalità dei vari *regional hub*. Infine, si desidera esaminare quella che è l'interazione con i diversi accordi sul piano di servizio e la loro robustezza in situazioni critiche, nonché l'impatto dei processi di cambiamento basati sul IoT nelle relazioni con i clienti.

CONCLUSIONI

Il futuro del digital twin è essenzialmente collegato al modo in cui verrà utilizzato insieme a quelle che sono le altre tecnologie emergenti come machine learning, object recognition, analisi acustica, elaborazione avanzata del segnale e Natural Language Processing (NLP), tanto per citarne alcune. In questo documento abbiamo visto come attraverso l'utilizzo del digital twin un'azienda può migliorare in modo significativo la propria produttività ed avere allo stesso tempo un notevole risparmio sui costi. In un settore come quello manifatturiero, in cui raggiungere il prima possibile i propri obiettivi è fondamentale, la possibilità di utilizzare un gemello digitale garantisce enormi vantaggi, in quanto ci permette ad esempio di effettuare svariate simulazioni nonostante l'assenza di prototipi fisici e di prevedere inoltre possibili guasti futuri. Inoltre, il digital twin aiuta le aziende a soddisfare come mai era stato fatto prima quelle che sono le esigenze dei propri clienti e ad adattarsi rapidamente alle nuove richieste di mercato, che di giorno in giorno variano. Ovviamente, come visto anche nei tre casi di studio affrontati, l'utilizzo della prototipazione virtuale è ancora ad uno stadio che possiamo definire quasi "embrionale" e nonostante ciò ha già praticamente rivoluzionato l'industria manifatturiera e non solo. Perciò, non ci resta che aspettare e lasciare che la ricerca faccia il suo percorso, perché è facile intuire come ci sia ancora molto da scoprire.

SITOGRAFIA

- Laura Zanotti, *Digital twin: cos'è e come funziona il modello del gemello digitale*, URL:<https://www.digital4.biz/executive/digital-twin-cose-e-come-funziona-il-modello-del-gemello-digitale/> , 2020
- Fluentis, *Digital Twin e la simulazione di produzione in campo manifatturiero*, URL:<https://www.fluentis.com/blog-articoli/trend-tecnologici/digital-twin-e-la-simulazione-di-produzione-in-campo-manifatturiero/> , 2019
- Cadlog, *Digital Twin: la nuova era dell'Industria 4.0 che segue in parallelo tutto il ciclo di vita fisico del prodotto*, URL:<https://www.cadlog.it/2018/03/27/digital-twin-la-nuova-era-industria-4-0-segue-il-ciclo-di-vita-del-prodotto/> , 2018
- Cadlog, *Industria 4.0: come creare flussi di entrate supplementari con il Digital Twin*, URL:<https://www.cadlog.it/2019/02/06/industria-4-0-come-creare-flussi-di-entrate-supplementari-con-il-digital-twin/> , 2019
- Piero Todorovich, *L'Internet delle cose (IoT): cos'è e come rivoluzionerà prodotti e servizi*, URL:<https://www.zerounoweb.it/analytics/big-data/internet-of-things-iot-come-funziona/> , 2020
- Osservatori.net, *Internet of Things (IoT): significato, esempi, ambiti applicativi e prospettive di mercato in Italia*, URL:https://blog.osservatori.net/it_it/cos-e-internet-of-things , 2019
- Roberto Saracco, *Industry 4.0, come il modello "digital twin" migliora sviluppo e prodotti*, URL:<https://www.agendadigitale.eu/industry-4-0/industry-4-0-modello-digital-twin-migliora-sviluppo-prodotti/> , 2018

- Wikipedia, *Industria 4.0*, URL: https://it.wikipedia.org/wiki/Industria_4.0#:~:text=Il%20termine%20Industria%204.0%20indica,la%20qualit%C3%A0%20produttiva%20degli%20impianti
- Andrea Balocchi, *Digital twin: cos'è, come funziona e perché è utile agli smart building*, URL: <https://www.lumi4innovation.it/digital-twin-cos-come-funziona-e-perche-e-utile-agli-smart-building/>, 2019
- Mooney, J.G., Gurbaxani, V., Kraemer, K.L., *A process oriented framework for assessing the business value of information technology*, 1996
- Abderrahim Ait-Alla, Markus Kreutz, Daniel Rippel, Michael Lütjen, Michael Freitag, *Simulation-based Analysis of the Interaction of a Physical and a Digital Twin in a Cyber-Physical Production System*, 2019
- Yi Cai, Yi Wang, Morice Burnett, *Using augmented reality to build digital twin for reconfigurable additive manufacturing system*, 2020
- Toni Greif, Nikolai Stein, Christoph M. Flath, *Peeking into the void: Digital twins for construction site logistics*, 2020

ELENCO DELLE FIGURE

Figura 0.1: Insieme di esempi riguardanti l'utilizzo dell'analisi dei dati.....	1
Figura 1.1: Esempio di digital twin	3
Figura 1.2: Come è strutturato un digital twin	6
Figura 1.3: Digital twin di una linea di montaggio.....	9
Figura 1.4: Tasso di crescita del Digital Twin in base alla località (2019-2024).....	10
Figura 1.5: Le 4 rivoluzioni industriali.....	11
Figura 1.6: Digital twin in ambito ospedaliero.....	25
Figura 1.7: Digital twin di una monoposto di Formula 1	25
Figura 1.8: Digital Twin della città di Singapore	26
Figura 1.9: Digital twin di un'automobile da competizione sviluppato dalla Dallara	27
Figura 2.1: Sistema fisico alla base della simulazione	28
Figura 2.2: Rappresentazione del frontend model.....	30
Figura 2.3: Schema dell'interazione tra frontend e backend model	32
Figura 2.4: Tabella 1.....	32
Figura 2.5: Tabella 2.....	34
Figura 2.6: Tempo di elaborazione medio degli scenari	35
Figura 2.7: Numero totale di messaggi scambiati tra il frontend e il backend model.....	36
Figura 2.8: Rapporto tra messaggi persi e messaggi totali.....	37
Figura 2.9: Miglioramento medio relativo del tempo di elaborazione tra scenari corrispondenti con un numero crescente di sensori.....	38
Figura 2.10: Sistema di prototipazione virtuale per la pianificazione dei processi di produzione additiva con più bracci robotici	41

Figura 2.11: Panoramica dello spazio di lavoro: (a) vista frontale, (b) vista dall'alto e (c) Dobot Magician robot.....	43
Figura 2.12: Sistemi di riferimento degli oggetti presi in considerazione.....	45
Figura 2.13: Positioning card	47
Figura 2.14: Layout di prova per la lettura.....	49
Figura 2.15: Tabella 1.....	50
Figura 2.16: Utilizzo della realtà aumentata per l'implementazione del layout.....	51
Figura 2.17: Status quo.....	56
Figura 2.18: Tabella 1.....	61
Figura 2.19: Processo di fornitura integrato	62
Figura 2.20: Riposizionamento del silo e successivo instradamento	63
Figura 2.21: Processo di rifornimento	64
Figura 2.22: System design and system information flow	67
Figura 2.23: Processo di movimentazione dei silos	68
Figura 2.24: Processo di rifornimento dei silos.....	68
Figura 2.25: Costi totali dei camion	71