



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Gestionale

Prospettive emergenti dalla letteratura scientifica riguardanti la supply chain

Emerging perspectives from the scientific literature regarding the supply chain

Relatore: Chiar.mo/a
Prof.ssa Sara Antomarioni

Tesi di Laurea di:
Andrea Sigona

A.A. 2025/2026

Sommario

INTRODUZIONE.....	4
1. LA SUPPLY CHAIN: CONCETTI CHIAVE E DEFINIZIONE.....	5
1.1 Il ruolo strategico della supply chain.....	6
1.2 Funzioni principali della supply chain.....	7
1.3 La tracciabilità delle merci nella supply chain.....	7
1.4 il controllo dei KPI nella supply chain.....	8
1.5 La gestione del magazzino.....	9
1.6 Pianificazione e gestione dei trasporti.....	10
2. GLI ATTORI DELLA SUPPLY CHAIN.....	11
2.1 Classificazione degli attori della supply chain.....	11
2.2 I fornitori.....	11
2.3 I produttori.....	12
2.4 Distributori e grossisti.....	12
2.5 Rivenditori e dettaglianti.....	12
2.6 Clienti e consumatori finali.....	13
2.7 Operatori logistici e di trasporto.....	13
2.8 Enti regolatori e organismi di controllo.....	13
2.9 Provider tecnologici e servizi IT.....	14
3. POLITICHE DEL RIORDINO DELLE SCORTE.....	14
3.1 Importanza della gestione dello stock in magazzino.....	14
3.2 Metodi di gestione dello stock.....	14
3.3 Criticità e sfide nella gestione delle scorte.....	15
3.4 Decisione di riordino delle scorte.....	15
3.5 Politica a quantità fissa di riordino (Fixed Order Quantity).....	15
3.6 Politica a periodo fisso (Fixed Period/ Variable order Quantity).....	16
3.7 Politica (s,S).....	16
3.8 Politica dei due contenitori.....	17
3.9 Classificazione ABC delle scorte.....	17
4. RACCOLTA DEI SOFTWARE DI SIMULAZIONE DELLA SUPPLY CHAIN ESISTENTI IN COMMERCIO E LE LORO CARATTERISTICHE PRINCIPALI.....	19
4.1 Software di Simulazione e Modellazione Avanzata.....	19
4.2 Software di Ottimizzazione della Supply Chain.....	20

4.3 Software per la Logistica e la Gestione dei Magazzini.....	21
4.4 Nuovi software con funzionalità innovative.....	21
5. ESEMPI PRATICI DEI VARI UTILIZZI DEI SOFTWARE DELLA SUPPLY CHAIN.....	22
5.1 AnyLogic: simulazione multi-periodo.....	22
5.2 Arena e Flexsim: simulazione 3D.....	23
5.3 Llamasoft: ottimizzazione della supply chain.....	24
5.4 Blue yonder e Manhattan Associates: logistica e gestione dei magazzini.....	24
6. SOFTWARE ANYLOGIC.....	24
6.1 Utilizzi per simulazione e previsione di eventi.....	24
6.2 Utilizzo del software (Anylogic) in catene di forniture.....	31
6.3 Come funziona una supply chain, dalla storia al suo funzionamento.....	34
7. SOFTWARE SIMIO.....	39
7.1 Utilizzo del software per logistica, simulazione e previsioni.....	39
7.2 Utilizzo del software in ambiti farmaceutici.....	44
7.3 Implementazioni e collaborazioni con altri software.....	49
7.4 Esperimenti svolti attraverso il software Simio.....	53
8. SOFTWARE FLEXSIM.....	56
8.1 Utilizzi (software Flexsim) per simulazione e previsione di eventi.....	56
9. SOFTWARE ARENA.....	60
9.1 Utilizzi per simulazione e previsione di eventi.....	60
9.2 Utilizzo del software (Arena) per la sostenibilità.....	65
9.3 Utilizzo del software (Arena) per previsione e previsioni.....	70
9.4 Utilizzo del software (Arena) per la sostenibilità.....	73
9.5 Utilizzo del software (Arena) in catene di forniture.....	77
9.6 Utilizzo del software (Arena) in catene di forniture.....	80
10. ANALISI DELL'ELABORATO.....	84
CONCLUSIONE.....	87
BIBLIOGRAFIA.....	89
RINGRAZIAMENTI.....	91

INTRODUZIONE

Il presente elaborato, dal titolo “Dalla produzione al consumatore: un’analisi degli attori, delle strategie e delle prospettive emergenti dalla letteratura scientifica riguardanti la supply chain”, rappresenta il lavoro finale del percorso di laurea triennale in Ingegneria Gestionale presso l’Università Politecnica delle Marche. In accordo con la professoressa Sara Antomarioni, la tesi affronta i principali temi legati alla supply chain, intesa come l’insieme di attività, risorse, organizzazioni e flussi che accompagnano un prodotto o un servizio lungo l’intero processo, dall’approvvigionamento delle materie prime fino alla consegna al cliente finale. L’elaborato prende avvio dalla definizione del concetto di supply chain e dalla sua evoluzione nel tempo, per poi analizzarne le principali componenti, quali l’approvvigionamento, la produzione e trasformazione, le diverse tipologie di stoccaggio, il trasporto e la distribuzione. Attraverso tale analisi emerge come l’obiettivo fondamentale della supply chain sia quello di garantire la disponibilità del prodotto giusto, nel luogo e nel momento adeguati, massimizzando il valore per l’azienda e la soddisfazione del cliente. Una parte del lavoro è dedicata all’analisi dei software utilizzati nella gestione della supply chain, mettendo in evidenza le differenze tra i vari strumenti, i loro ambiti di utilizzo e le funzioni offerte. La tesi è completata infine dallo studio di contributi tratti dalla letteratura scientifica, che consentono di collegare la trattazione teorica alle applicazioni pratiche, fornendo una visione concreta del ruolo della supply chain nel contesto aziendale attuale.

1. LA SUPPLY CHAIN: CONCETTI CHIAVE E DEFINIZIONE

I primi a parlare di Supply Chain Management furono due studiosi, Oliver e Webber che nel 1982 definirono questa realtà come una “tecnica di riduzione delle scorte in azienda”. Fu così che si iniziò ad utilizzare questa definizione in riferimento alle operazioni di gestione del magazzino e delle scorte. Oggi, con il termine Supply Chain – in italiano comunemente nota come “catena di approvvigionamento” o di “distribuzione” - intendiamo quel complesso processo che permette di portare sul mercato un prodotto o un servizio, trasferendolo dal fornitore al cliente. Si tratta pertanto di un processo complesso che coinvolge più figure professionali, attivando numerosi processi dell'ecosistema-impresa: dal flusso di materie prime legato ai processi di produzione, fino alla logistica distributiva che provvede a far arrivare il bene acquistato al cliente. Allo stesso tempo con l'espressione supply chain si può fare riferimento agli aspetti più manageriali della catena di distribuzione. In questo caso sarebbe più opportuno utilizzare l'espressione supply chain management (SCM), con cui ci si riferisce alle attività di coordinamento che servono ad ottimizzare i singoli anelli della catena di rifornimento. In altre parole, quando si parla di supply chain ci possiamo riferire a due aspetti: da un lato alle fasi "pratiche" di pianificazione, esecuzione e controllo di tutte le attività legate al flusso di materiali (e informazioni) che si producono da quando viene ricevuto un ordine da parte di un cliente; dall'altro, con questa espressione possiamo indicare l'insieme di elementi che rendono possibile lo svolgimento di tali fasi. (2) Con l'evoluzione tecnologica, lo sviluppo dei trasporti e la riduzione del time to market, oggi la gestione della catena di approvvigionamento è più complessa che mai. Tempestività, efficienza e rapidità sono le parole d'ordine di un settore che continua ad evolversi giorno dopo giorno. Una gestione efficiente della Supply Chain sta alla base del successo di un'azienda, quindi, è fondamentale saper rispondere alle esigenze dei clienti e dei fornitori in tempi rapidi per offrire un servizio impeccabile sotto molteplici punti di vista. Il Supply Chain Management (SCM) è quell'attività di gestione e ottimizzazione della catena di approvvigionamento punto il suo funzionamento si articola in 5 passaggi fondamentali:

Pianificazione: soddisfare la domanda di prodotto da parte dei clienti è fondamentale. Ecco perché la Supply Chain deve attentamente pianificare e gestire tutte le risorse disponibili definendo tutti gli indici e i parametri necessari a misurare l'efficienza delle operazioni virgola e l'efficacia nel raggiungimento degli obiettivi aziendali;

Approvvigionamento: scelta e selezione dei fornitori sono operazioni all'ordine del giorno. Una Supply Chain Management efficace deve riuscire a stabilire i processi per tenere sotto controllo il rapporto coi fornitori, e gestire tutte le attività in essere con quest'ultimi;

Produzione: pianificare tutte le attività per l'approvvigionamento delle materie prime, dall'accettazione, alla fabbricazione del prodotto, dalla verifica della qualità, ha l'imballaggio per la spedizione, fino alla programmazione e consegna finale;

Consegna e logistica: gestire gli ordini dei clienti, pianificare le consegne, emettere e contabilizzare le fatture, inviare i carichi e monitorare i pagamenti;

Gestione resi: i servizi di reso sono sempre più semplificati ed estesi nel tempo. Un'efficiente Supply Chain deve essere in grado di gestire i flussi di ritorno di prodotti difettosi e/o non più desiderati dall'acquirente in maniera snella e flessibile.



Fig.1 Catena del prodotto

1.1 Il ruolo strategico della supply chain

Una Supply chain efficiente ad oggi è fondamentale per offrire un servizio impeccabile ai propri clienti: tanto più efficace è la gestione della catena di approvvigionamento, tanto più migliora la reputazione aziendale e la fidelizzazione degli utenti. Per poter soddisfare queste richieste e offrire un servizio efficiente e impeccabile, la nostra supply Chain deve essere connessa, ovvero essere integrata e sempre collegata con tutti i sistemi di dati derivanti dai social media, dalle piattaforme IoT (IoT, ovvero rete di oggetti e dispositivi connessi (detti "cose") dotati di sensori (e altre tecnologie) che consentono loro di trasmettere e ricevere dati, da e verso altre cose e sistemi. Oggi l'IoT è ampiamente utilizzato in ambito industriale (IIoT) ed è sinonimo di Industry 4.0.) e dagli strumenti ERP e B2B. Deve essere collaborativa in modo che le relazioni con i collaboratori e i fornitori devono essere continue e coinvolgenti, per favorire lo sviluppo delle reti commerciali. Deve essere sicura e quindi in grado di potenziare i propri sistemi informatici e proteggerli dalle intrusioni informatiche e violazioni da parte di hackers. Intelligente, ovvero deve essere scalabile e predittiva, ossia capace di sviluppare una propria intelligenza artificiale per coordinare e gestire tutte le azioni lungo l'intera catena di approvvigionamento punto le tecnologie AI sono in tal senso un prezioso strumento a supporto di tutte le operazioni di logistica. Ovviamente deve essere completa e

tempestiva in modo di essere in grado di ricevere, elaborare e restituire dati in tempo reale.

1.2 Funzioni principali della supply chain

Le catene di approvvigionamento sono oggi sempre più complesse e in continua evoluzione. Hanno diverse funzioni principali quali:

1. Gestione dello stock in magazzino: i grandi volumi di merci rendono necessario l'implementazione di sistemi informatici che siano in grado di rendere più efficienti le operazioni di movimentazione.
2. Tracciabilità delle merci: i flussi in entrata e uscita devono essere costantemente monitorati e tracciati. In questa attività è fondamentale l'utilizzo di sistemi di codici a barre o tag RFID che permettono di raccogliere e condividere informazioni sulle merci lungo l'intera Supply Chain
3. Controllo dei KPI: il monitoraggio degli indicatori di performance deve essere sempre accurato e puntuale. Il confronto è l'incrocio di questi dati consente di individuare i punti critici della catena di approvvigionamento, e intervenire tempestivamente con una nuova ottimizzazione.
4. Relazione con i fornitori: lo scambio reciproco e collaborativo con i fornitori è un'attività fondamentale nella Supply Chain. L'obiettivo è quello di standardizzare e integrare i processi in maniera completa.
5. Gestione delle automazioni: lo sviluppo, l'introduzione e la manutenzione delle automazioni sono funzioni tipiche di una catena di approvvigionamento.
6. Gestione delle attività di magazzino: i software e i macchinari utilizzati sono strumenti essenziali per l'organizzazione delle operazioni di inventario di magazzino e di picking delle merci.
7. Pianificazione e gestione dei trasporti: tutte le fasi di distribuzione delle merci devono essere attentamente pianificate sulla base di diversi parametri logistici, quali ad esempio i tempi di consegna, le modalità di spedizione ecc. (1)

1.3 La tracciabilità delle merci nella supply chain

La tracciabilità delle merci nella Supply Chain è un elemento chiave per garantire efficienza, sicurezza e conformità alle normative. Permette di monitorare il percorso di un prodotto dalla produzione alla consegna finale, riducendo il rischio di errori, contraffazioni e ritardi. Una

corretta tracciabilità consente di migliorare la gestione dell'inventario, garantire la qualità e la sicurezza dei prodotti. Rispettare le normative e gli standard internazionali, prevenire perdite e furti lungo la catena di approvvigionamento e aumentare la fiducia dei clienti in modo anche di migliorare la reputazione aziendale. Esistono diversi sistemi per tracciare le merci. I Codici a barre sono il sistema più economico e ampiamente utilizzato, richiede degli scanner per la lettura dei codici. RFID (Radio-frequency Identification): permette la lettura automatizzata dei prodotti senza contatto diretto ottenendo una maggiore efficienza rispetto ai codici a barre. GPS e IoT (Internet of Things): monitoraggio in tempo reale della spedizione avendo così maggiore visibilità e gestione delle rotte di trasporto o in alternativa la Blockchain che ci garantisce sicurezza e trasparenza nella condivisione delle informazioni evitando manipolazioni andando a migliorare anche la fiducia tra gli attori delle supply Chain.

La tracciabilità della Supply Chain ci porta ad avere numerosi vantaggi quali: la riduzione dei costi operativi grazie a un migliore controllo dell'inventario con una riduzione degli sprechi, un aumento dell'efficienza con processi più rapidi e precisi. Una migliore gestione dei richiami di prodotti avendo un'identificazione immediata dei lotti difettosi e conformità normativa ovvero rispettare gli standard e le regolamentazioni settoriali. Le principali sfide legate alla tracciabilità includono l'integrazione tra sistemi diversi dove per risolvere questa sfida possiamo adottare piattaforme interoperabili, i costi di implementazione e protezione dei dati sensibili. La soluzione per i costi di implementazione e l'utilizzo di tecnologie scalabili mentre la soluzione per la protezione dei dati sensibili è l'applicazione di misure di sicurezza avanzate. La tracciabilità delle merci rappresenta un vantaggio competitivo fondamentale per le aziende che operano nella Supply Chain. L'adozione di tecnologie innovative e una gestione efficiente dei dati permettono di migliorare la trasparenza, la sicurezza e la sostenibilità delle operazioni, assicurando benefici sia per le aziende che per i consumatori finali.

1.4 il controllo dei KPI nella supply chain

Il controllo dei KPI (Key Performance Indicators) nella Supply Chain è fondamentale per misurare e migliorare l'efficienza, la produttività e la competitività delle aziende. I KPI forniscono dati quantitativi e qualitativi per monitorare le performance e individuare aree di miglioramento. Un efficace monitoraggio dei KPI consente di migliorare la gestione delle risorse e dei processi, identificare inefficienze e opportunità di ottimizzazione, riduzione dei costi e aumento produttività, garantisce il rispetto degli standard di qualità e servizio con un

aumento della soddisfazione del cliente con la fidelizzazione. Esistono diversi indicatori chiave per valutare le performance della Supply Chain, tra cui:

- On-time Delivery (OTD): misura la puntualità delle consegne ai clienti grazie ad una formula $(\text{Numero consegne puntuali} / \text{Totale consegne}) \times 100$
- Lead time di Approvvigionamento: tempo totale tra l'ordine e la consegna del materiale, andando a ridurre il lead time miglioriamo l'agilità della Supply Chain
- Fill Rate: ovvero la percentuale di ordini evasi completamente alla prima spedizione, indica la capacità di soddisfare la domanda senza ritardi.
- Costo della Supply Chain: vengono inclusi i costi logistici, operativi e di magazzino. (Formula: $\text{costo totale della Supply Chain} / \text{Fatturato totale}) \times 100$
- Tasso di rottura di stock: ovvero la frequenza con cui un'azienda esaurisce le scorte di prodotto, una bassa percentuale indica una gestione ottimale delle scorte
- Return rate (Tasso di resi): va ad indicare la percentuale di prodotti restituiti dal cliente e indica problemi di qualità o errori nella gestione degli ordini
- Precisione dell'inventario: andiamo ad avere una differenza tra stock registrato e stock effettivo, un'elevata accuratezza riduce sprechi e costi operativi.

Per un monitoraggio efficace dei KPI, le aziende utilizzano Software ERP per una gestione integrata dei dati, Dashboard e Business Intelligence per visualizzare i KPI in tempo reale, Big data e Analytics per analisi predittive e miglioramenti strategici e infine automazione e Intelligenza Artificiale per ottimizzare la gestione della Supply Chain. Le principali sfide nella misurazione dei KPI includono i dati inaccurati o incompleti dove la soluzione è migliorare la raccolta e l'analisi dei dati, la difficoltà nell'integrazione dei sistemi e mancanza di obiettivi chiari. La soluzione è l'utilizzo di piattaforme digitali interoperabili nel caso della difficoltà nell'integrazione dei sistemi mentre la soluzione alla mancanza di obiettivi chiari è la definizione di KPI specifici, misurabili e raggiungibili

1.5 La gestione del magazzino

La gestione del magazzino è una componente fondamentale della Supply Chain, poiché influisce direttamente sull'efficienza operativa e sulla soddisfazione del cliente. Un magazzino ben organizzato garantisce un flusso ottimale di materiali, riduce i costi operativi e migliora la precisione nelle consegne. L'implementazione di tecnologie avanzate e strategie di gestione efficaci consente di ottimizzare le operazioni di stoccaggio, movimentazione e distribuzione delle merci. Le strategie per garantire un magazzino ben

organizzato ed efficiente sono diverse; organizzare dello spazio di magazzino. Utilizzo di layout ottimizzati per ridurre i tempi di movimentazione. Automazione dei processi: implementazione di robotica, picking automatizzato e software di gestione del magazzino (WMS). Gestione delle scorte: adozione di metodologie come just-in-Time (JIT) e il metodo FIFO/LIFO per un corretto turnover delle merci. Utilizzo di tecnologie di tracciamento RFID; codici a barre e IoT per un monitoraggio accurato delle scorte. Ottimizzazione dei processi di picking e packing: implementazione di strategie di. Picking avanzate per ridurre gli errori e migliorare la velocità delle operazioni e l'analisi e previsione della domanda: utilizzo di strumenti di analisi per ottimizzare la gestione delle scorte e ridurre i tempi di approvvigionamento. Nonostante i numerosi vantaggi, la gestione delle attività di magazzino presenta alcune sfide come gli elevati costi di implementazione, la complessità operativa, la sicurezza e conformità, la gestione della domanda variabile e la resistenza al cambiamento. Tuttavia, è fondamentale affrontare le sfide operative con un approccio strategico e innovativo. Investire nella modernizzazione dei magazzini significa rendere la Supply Chain più agile, efficiente e resiliente alle sfide del futuro.

1.6 Pianificazione e gestione dei trasporti

Una gestione efficace dei trasporti offre numerosi vantaggi, tra cui, la riduzione dei costi di trasporto ottimizzando le rotte. L'aumento della puntualità nelle consegne in modo da minimizzare i ritardi grazie a una migliore pianificazione logistica, migliorare l'utilizzo di risorse, sostenibilità ambientale e maggiore tracciabilità e controllo con l'utilizzo di tecnologie di monitoraggio in tempo reale. Per ottimizzare i processi di trasporto le aziende possono adottare diverse strategie come: la pianificazione delle rotte, il consolidamento delle spedizioni, la scelta del mezzo di trasporto adeguato in base a costi e tempi, la collaborazione con partner logistici per migliorare la flessibilità, il monitoraggio in tempo reale attraverso il GPS per prevenire ritardi e la gestione delle scorte e della domanda. Le sfide che la gestione dei trasporti devono affrontare sono la volatilità dei costi del carburante ovvero la fluttuazione ai prezzi che incidono sui costi operativi, la regolamentazione e normative cioè l'adeguamento a normative internazionali e locale in continua evoluzione, la gestione delle emergenze e imprevisti come ritardi, guasti e condizioni meteorologiche avverse, l'ottimizzazione della capacità dei mezzi e la sostenibilità ambientale in modo da ridurre l'impatto ecologico con soluzioni di trasporto green.

2. GLI ATTORI DELLA SUPPLY CHAIN

2.1 Classificazione degli attori della supply chain

I principali attori della Supply Chain si possono suddividere in diverse categorie, in base alla loro funzione all'interno del processo di approvvigionamento e distribuzione.

2.2 I fornitori

Fornitori: forniscono le materie prime e i componenti necessari per la produzione. Possono essere suddivisi in fornitori di primo livello (che lavorano direttamente con i produttori) e fornitori di secondo livello (che forniscono materiali ai fornitori di primo livello). La gestione della relazione con i fornitori è un aspetto cruciale della supply chain management. Un'efficace collaborazione con i fornitori può migliorare la qualità dei prodotti, ridurre i costi operativi e aumentare la competitività aziendale. Questa relazione si basa su fiducia, trasparenza e obiettivi condivisi per garantire efficienza e sostenibilità lungo l'intera catena di approvvigionamento. I vantaggi che possiamo avere riguardano la riduzione dei costi, il miglioramento della qualità, una maggiore efficienza, innovazione e sostenibilità. Per sviluppare una collaborazione solida ed efficace con i fornitori, le aziende possono adottare diverse strategie a partire dalla selezione accurata dei fornitori stessi, ciò permette di valutare i fornitori in base a criteri di qualità, affidabilità, capacità produttiva e sostenibilità. È fondamentale instaurare una comunicazione chiara e costante in modo da avere comunicazioni efficaci per condividere informazioni e risolvere rapidamente eventuali problemi. Importanti sono contratti e accordi chiari in modo da stabilire aspettative, standard di qualità e termini di consegna. Il monitoraggio delle performance ci permette di utilizzare KPI per valutare le prestazioni dei fornitori e identificare aree di miglioramento. La collaborazione e lo sviluppo congiunto ci permette di coinvolgere i fornitori nei processi di innovazione in modo da avere un miglioramento continuo. Attraverso la gestione del rischio si possono identificare e mitigare i potenziali rischi di approvvigionamento attraverso strategie di diversificazione e piani di emergenza. Per migliorare le relazioni con i fornitori esistono tecnologie avanzate tra cui i sistemi ERP (Enterprise resource Planning) per centralizzare e gestire i dati relativi ai fornitori, la blockchain che ci garantisce tracciabilità e trasparenza nelle transazioni, Intelligenza Artificiale e Big Data: per analizzare le performance dei fornitori e prevedere potenziali problemi e piattaforme di e-Procurement (per automatizzare i processi di acquisto e migliorare l'efficienza operativa). In conclusione,

possiamo dire che investire nella costruzione di rapporti basati su fiducia, innovazione e sostenibilità porta benefici significativi in termini di efficienza, qualità e competitività. L'adozione di strategie e tecnologie avanzate consente di ottimizzare questi rapporti e affrontare con successo le sfide del mercato globale. (4)

2.3 I produttori

Produttori: trasformano le materie prime in prodotti finiti attraverso processi di produzione. Possono includere industrie manifatturiere, assemblatori e aziende di trasformazione. Troviamo una diversificazione in base al ruolo del produttore: i produttori di materie prime che forniscono materiali base, i produttori di componenti che creano parti per altri prodotti, i produttori di beni di consumo, i quali producono prodotti destinati al consumo finale e produttori di beni industriali che producono macchinari e attrezzature per altre aziende.

2.4 Distributori e grossisti

Distributori e Grossisti: fungono da intermediari tra i produttori e i dettaglianti. Acquistano grandi quantità di prodotti per ridistribuirli su scala più piccola ai rivenditori, acquistando grandi volumi cercano di ottenere prezzi competitivi. Vendono a rivenditori e aziende quindi raramente ai consumatori e gestiscono magazzini e stock per ridurre il rischio di carenze del prodotto. Le differenze principali tra i distributori e i grossisti sono il volume di vendita (Medio grande per i distributori mentre molto grande per i grossisti) e il rapporto con il produttore (più esclusivo e più ristretto per i distributori, mentre i grossisti acquistano da vari fornitori).

2.5 Rivenditori e dettaglianti

Rivenditori e Dettaglianti: vendono i prodotti direttamente ai consumatori finali. I rivenditori acquistano prodotti da grossisti o distributori li vendono ai clienti finali, gestendo il rapporto diretto con il consumatore. Operano selezionando i prodotti ai fornitori e mantenendo un livello di scorta adeguato, offrono prodotti nei punti vendita fisici o online, creano strategie per attirare e fidelizzare clienti, offrono supporto post-vendita e gestione dei resi cercando di migliorare l'interazione con il cliente anche tramite offerte mirate e customer service. I dettaglianti invece sono una sottocategoria dei rivenditori e si concentrano esclusivamente sulla vendita al cliente finale attraverso negozi fisici tradizionali come, ad esempio, supermercati, boutique, farmacie e negozi di elettronica. Sempre più diffusi gli E-commerce come Amazon, Zalando, Shopify e altre piattaforme digitali. Sicuramente troviamo una

distinzione sulla tipologia di vendita in quanto i rivenditori lavorano principalmente all'ingrosso o al dettaglio mentre i dettaglianti solo al dettaglio e anche i canali di distribuzione sono diversi in quanto i dettaglianti solo B2C mentre i rivenditori B2B e B2C.

2.6 Clienti e consumatori finali

Clienti e Consumatori Finali: sono il punto finale della Supply Chain. Possono essere aziende (B2B) o consumatori individuali (B2C).

2.7 Operatori logistici e di trasporto

Operatori Logistici e di Trasporto: gestiscono il trasporto e lo stoccaggio dei beni lungo tutta la Supply Chain. Possono includere corrieri, spedizionieri e aziende di logistica. Una gestione efficace dei trasporti offre numerosi vantaggi, tra cui, la riduzione dei costi di trasporto ottimizzando le rotte. L'aumento della puntualità nelle consegne in modo da minimizzare i ritardi grazie a una migliore pianificazione logistica, migliorare l'utilizzo di risorse, sostenibilità ambientale e maggiore tracciabilità e controllo con l'utilizzo di tecnologie di monitoraggio in tempo reale. Per ottimizzare i processi di trasporto le aziende possono adottare diverse strategie come: la pianificazione delle rotte, il consolidamento delle spedizioni, la scelta del mezzo di trasporto adeguato in base a costi e tempi, la collaborazione con partner logistici per migliorare la flessibilità, il monitoraggio in tempo reale attraverso il GPS per prevenire ritardi e la gestione delle scorte e della domanda. Le sfide che la gestione dei trasporti devono affrontare sono la volatilità dei costi del carburante ovvero la fluttuazione ai prezzi che incidono sui costi operativi, la regolamentazione e normative cioè l'adeguamento a normative internazionali e locale in continua evoluzione, la gestione delle emergenze e imprevisti come ritardi, guasti e condizioni meteorologiche avverse, l'ottimizzazione della capacità dei mezzi e la sostenibilità ambientale in modo da ridurre l'impatto ecologico con soluzioni di trasporto green.

2.8 Enti regolatori e organismi di controllo

Stabiliscono normative e regolamenti che disciplinano le operazioni della Supply Chain. Possono includere governi, enti di certificazione e organizzazioni internazionali.

2.9 Provider tecnologici e servizi IT

Provider di Tecnologia e Servizi IT: forniscono software e soluzioni digitali per ottimizzare la gestione della Supply Chain. Comprendono aziende specializzate in sistemi ERP, IoT, blockchain e intelligenza artificiale.

3. POLITICHE DEL RIORDINO DELLE SCORTE

3.1 Importanza della gestione dello stock in magazzino

Analizzando nello specifico possiamo dire che la gestione dello stock in magazzino è una componente cruciale della Supply Chain, in quanto influisce direttamente sulla disponibilità dei prodotti, sui costi operativi e sulla soddisfazione del cliente. Un'efficace gestione dello stock consente di ottimizzare il flusso delle merci, ridurre gli sprechi e migliorare la redditività aziendale. È così importante la gestione dello stock perché ci permette di ridurre i costi di stoccaggio e mantenimento delle scorte, evitare eccessi o carenze di inventario, ottimizzare il flusso di approvvigionamento, migliorare il servizio clienti garantendo disponibilità e tempi di consegna ridotti e prevenire l'obsolescenza dei prodotti e la deperibilità delle merci.

3.2 Metodi di gestione dello stock

Esistono diversi metodi per gestire in modo efficace lo stock in magazzino:

- Just in Time (JIT): in cui si minimizzano le scorte mantenendo solo il necessario per la produzione o la vendita. Questa tecnica riduce i costi di stoccaggio ma richiede una Supply Chain altamente sincronizzata.
- Metodo FIFO (First In, First Out): gli articoli più vecchi vengono venduti o utilizzati per primi, ottimo per prodotti deperibili o con scadenza
- Metodo LIFO (Last In, First Out): Simile al precedente ma vengono utilizzati o venduti gli articoli più recenti, utile in contesti in cui i prezzi aumentano nel tempo.
- Economic Order Quantity (EOQ): Determina la quantità ottimale di riordino per minimizzare i costi totali di acquisto e stoccaggio.
- Metodo ABC: viene fatta una classifica dei prodotti in base al loro valore e importanza. Gli articoli A hanno un alto valore e bassa quantità mentre gli articoli C hanno basso valore ma alta quantità

3.3 Criticità e sfide nella gestione delle scorte

Le principali sfide nella gestione dello stock includono: la variazione della domanda, l'eccesso di scorte, la carenza dei prodotti e gli errori nei dati di inventario. Per quanto riguarda la variazione della domanda troviamo la soluzione nell'utilizzo dell'analisi predittiva mentre per l'eccesso di scorte troviamo soluzione nell'implementazione del metodo JIT. Con un miglior coordinamento con i fornitori possiamo risolvere il problema della carenza dei prodotti invece per quanto riguarda gli errori nei dati di inventario troviamo soluzione con l'utilizzo di software di gestione avanzati.

3.4 Decisione di riordino delle scorte

Giocano un ruolo importante le scelte prese per quanto riguarda la gestione del riordino delle scorte, in questo caso le decisioni possono essere “quanto ordinare” e “quando ordinare”. Le principali politiche decisionali sono: “Fixed order quantity” ovvero punto di riordino costante, “Fixed period” periodo di riordino costante, Politica (s,S) e il metodo dei due contenitori. Le prime tre fanno uso di stime (previsioni) delle grandezze aleatorie, la quarta invece è molto più semplice ed è usata per i prodotti meno importanti.

3.5 Politica a quantità fissa di riordino (Fixed Order Quantity)

Andando ad utilizzare il metodo Fixed order quantity si ordina una quantità fissa di beni q ogni volta che la posizione d'inventario (scorte in magazzino + in transito) scende sotto un prefissato valore s (punto di riordino). Il periodo varia a causa della aleatorietà del tasso di domanda d e del lead time L (Fig.1). Il punto di riordino (reorder point) s corrisponde alla minima quantità di scorte (in magazzino + in transito) necessaria per soddisfare (con una certa probabilità α) la domanda durante il lead time L . Si ha $S = d \cdot L + I_s$, dove I_s è la scorta di sicurezza (safety stock) per poter soddisfare con probabilità $\alpha \geq 0,5$ la domanda totale durante il lead time L a causa della aleatorietà di d e di L .

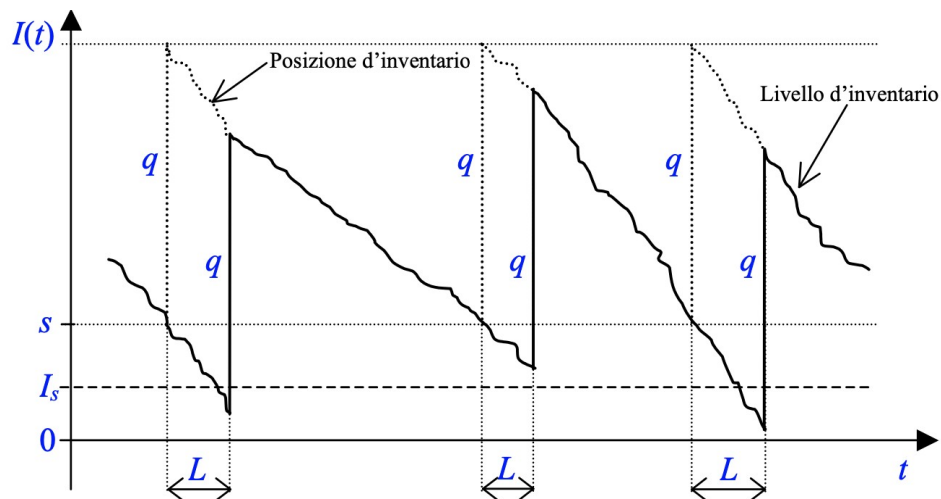


Fig.1 Come avviene il riordino

La politica fixed order quantity è preferibile quando abbiamo la possibilità di un continuo monitoraggio e quindi un inventario computerizzato o quando gli ordini d'acquisto ad intervalli irregolari non hanno effetto sulla produzione o sui fornitori.

3.6 Politica a periodo fisso (Fixed Period/ Variable order Quantity)

Nel Fixed period (variable order quantity) gli ordini vengono effettuati con cadenza fissa (periodo costante T , calcolato ad esempio con EOQ) e per una quantità variabile sufficiente a riportare la posizione di inventario al livello S (order-up-to-level) tale da soddisfare con probabilità α la domanda totale che si presenta fino all'arrivo della merce del successivo ordine. Ad ogni istante t_i , viene emesso un. Ordine di reintegro di dimensione q_i , pari alla differenza tra l'order-up-to-level S e la posizione d'inventario $I'(t_i)$. L'order-up-to-level S corrisponde alla quantità di scorte (in magazzino + in transito) necessaria per soddisfare (con una certa probabilità α) la domanda durante il periodo $(L+T)$. Si ha $S = d(L+T) + I_s$ dove I_s è la scorta di sicurezza (safety stock) per far fronte a picchi di domanda e soddisfare la domanda con probabilità $\alpha \geq 0,5$. Questa politica è preferibile quando l'inventario non è computerizzato e quindi conviene ordinare con cadenza regolare, quando c'è convenienza nel fare ordini di grossi quantitativi di bene e quando gli ordini d'acquisto ad intervalli irregolari avrebbero un effetto non trascurabile sulla produzione o sui fornitori.

3.7 Politica (s,S)

Secondo la politica (s,S) , ovvero una variante dei due metodi precedenti, la posizione d'inventario viene revisionata periodicamente con periodo T e se all'istante t_i di revisione

risulta che il livello della posizione d'inventario è inferiore ad una soglia minima s , si emette un ordine q_i tale da riportare la posizione d'inventario al massimo valore S . (Fig.1)

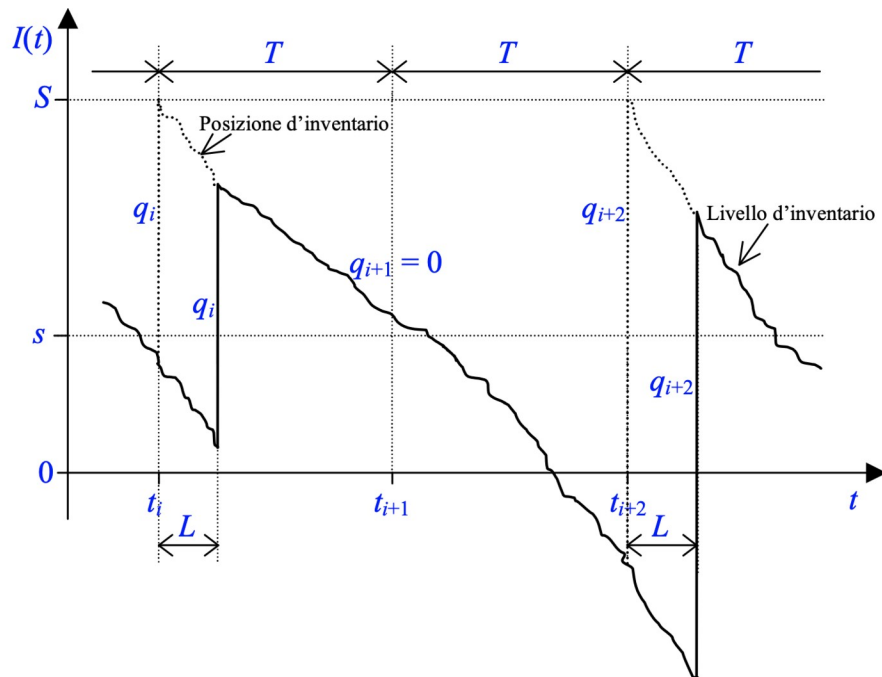


Fig.1 Politica s, S , quando riordinare la merce

In pratica, s è il reorder point e S è order-up-to level. Se $T \rightarrow 0$ e $S = s + q$ la politica (s, S) tende a fixed order quantity, scegliendo opportunamente q e s . Se $s \rightarrow S$ la politica (s, S) tende a fixed period, scegliendo opportunamente T e S . La politica (s, S) può considerarsi come soluzione di compromesso tra "fixed period" e "fixed order quant". Un'adeguata scelta di valori per le variabili s , S e T può dar luogo a risultati migliori, tuttavia, la determinazione ottima (what best) di tali valori è un problema complesso da formalizzare e risolvere con metodi analitici. Spesso i valori per s , S e T vengono determinati con analisi what if.

3.8 Politica dei due contenitori

Nella politica dei due contenitori si considera il magazzino partizionato in due parti uguali. Non appena uno dei due sotto magazzini si svuota, viene effettuato un ordine di approvvigionamento che ammonta alla sua capacità punto può interpretarsi come una variante della politica appunto di riordino costante (fixed order quantity). Non sono richiesti dati previsionali per valutare il punto di riordino e la quantità da ordinare.

3.9 Classificazione ABC delle scorte

Nella gestione di un inventario multiprodotto occorre decidere quale livello di inventario, per articolo, controllare più accuratamente o meno. A tale scopo si suddividono i prodotti in tre

classi A, B, C. La classe A sta ad indicare prodotti ad alto valore unitario il cui valore complessivo ammonta all'80% del valore totale delle scorte. I prodotti Classe B sono prodotti di medio valore unitario il cui valore complessivo ammonta al 15% del valore totale delle scorte mentre i prodotti di Classe C rappresentano i prodotti basso valore unitario il cui valore complessivo ammonta al 5% del valore totale delle scorte.

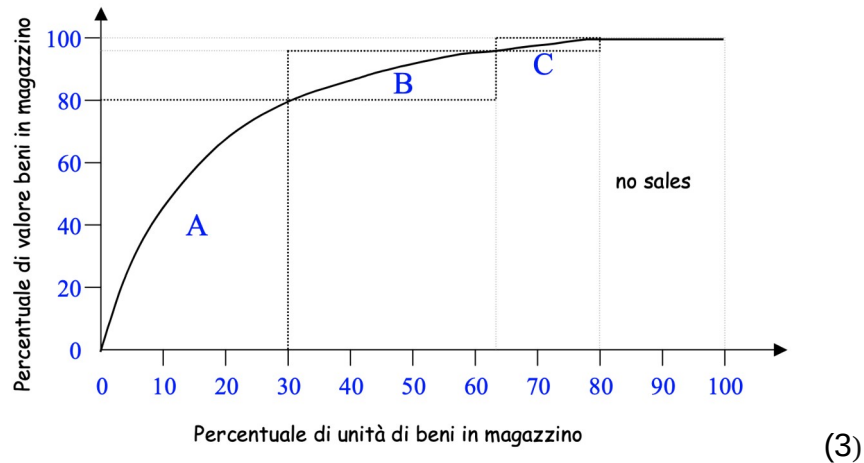


Fig.1 Rapporto nella classificazione ABC delle scorte

4. RACCOLTA DEI SOFTWARE DI SIMULAZIONE DELLA SUPPLY CHAIN ESISTENTI IN COMMERCIO E LE LORO CARATTERISTICHE PRINCIPALI

4.1 Software di Simulazione e Modellazione Avanzata

Software	Costo	Campi di applicazione	Parametri progettuali	Vincoli
AnyLogic	A pagamento (con versione gratuita limitata)	Supply chain, produzione, logistica, trasporti	Domanda, capacità di magazzino, tempi di consegna, lead time, percorsi di trasporto, costi	La versione gratuita non permette simulazioni complesse
Simio	A pagamento	Produzione, gestione scorte e trasporti	Risorse disponibili, flussi di materiali, capacità di produzione	Richiede conoscenze avanzate di modellazione
Arena	A pagamento (trial disponibile)	Produzione, logistica, trasporto merci	Processi, flussi di materiali, capacità impianti, variabilità dei tempi	Costo elevato, apprendimento non immediato
FlexSim	A pagamento (con versione trial)	Magazzini, logistica, sanità, produzione	Percorsi di movimentazione, layout di magazzino, capacità operativa	La versione trial ha limitazioni sulle funzionalità avanzate

Esistono diversi software per la simulazione della supply chain, utilizzati per ottimizzare i processi logistici, migliorare la pianificazione della domanda e ridurre i costi operativi. Si differenziano a seconda del loro utilizzo, ad esempio i software di simulazione e modellazione avanzata, tra i più famosi abbiamo AnyLogic uno dei software più avanzati per la simulazione della supply chain, Simio un potente strumento di simulazione basato su eventi discreti con capacità di modellazione della supply chain, oppure Arena o FlexSim che offre simulazioni 3D avanzate per la logistica, la gestione dei magazzini e la produzione. Andando ad analizzare i software nello specifico sopra citati, il primo software citato (AnyLogic) ci propone una versione a pagamento e una versione gratuita però limitata. I campi di applicazione riguardano la produzione, la logistica e i trasporti avendo come parametri progettuali la capacità di magazzino, tempi di consegna, lead time e percorsi di trasporto. Ovviamente la versione gratuita non permette simulazione complesse. Differente il secondo software Simio che non ha una versione gratuita quindi solo a pagamento, simili i campi di applicazione mentre i parametri progettuali sono leggermente differenti avendo risorse disponibili, flussi di materiali e capacità di produzione. Non avendo una versione gratuita, una volta che si è in possesso del software non si hanno vincoli tranne per il fatto di richiedere conoscenze avanzate di modellazione. Arena e FlexSim sono entrambe a pagamento con una versione trial, le applicazioni sono differenti perché in Arena abbiamo

applicazioni per la produzione, logistica, trasporto e merci mentre Flexsim ha applicazioni riguardanti magazzini, logistica, sanità e produzione. I parametri progettuali sono simili mentre abbiamo diversi vincoli per i due software, nel caso di Arena oltre ad avere un costo elevato, l'apprendimento non è molto immediato. Nel caso di FlexSim la versione trial ha delle limitazioni sulle funzionalità più avanzate.

4.2 Software di Ottimizzazione della Supply Chain

Software	Costo	Campi di applicazione	Parametri progettuali	Vincoli
Llamasoft	A pagamento	Pianificazione strategica, ottimizzazione della supply chain	Rete logistica, capacità produttiva, livelli di inventario, costi di trasporto	Alto costo, complesso da configurare
SAP IBP	A pagamento	Pianificazione della domanda, gestione delle scorte, ottimizzazione della supply chain	Dati storici delle vendite, lead time, capacità di fornitura	Richiede integrazione con SAP
IBM Sterling Supply Chain Suite	A pagamento	Visibilità e gestione della supply chain, analisi predittiva	Previsioni della domanda, eventi di rischio, capacità dei fornitori	Costo elevati e necessità di personalizzazione
Oracle SupplyChain Planning	A pagamento	Pianificazione, ottimizzazione dell'inventario	Livelli di stock, domanda prevista, rete di distribuzione	Richiede un'infrastruttura IT adeguata

I software di ottimizzazione della supply chain come Llamasoft che permette di modellare, ottimizzare e simulare le reti della supply chain oppure come SAP Integrated Business Planning (IBP) che offre strumenti per la pianificazione della domanda e l'ottimizzazione della supply chain. Altri software sono specifici per i magazzini e per la logistica come Blue Yonder (ex JDA Software) che ci fornisce soluzioni per la pianificazione della supply chain e il magazzino basate sull'AI o Manhattan Associates un software specializzato nella gestione dei magazzini e della logistica. Llamasoft e SAP IBP sono entrambe a pagamento, con campi di applicazione simili riguardanti la pianificazione strategica, gestione delle scorte e l'ottimizzazione della supply chain. Per quanto riguarda i parametri progettuali nel caso di Llamasoft andiamo ad avere una rete logistica, capacità produttiva, livelli di inventario e costi di trasporto differenti da SAP IBP dove i parametri sono i dati storici delle vendite, lead

time e capacità di fornitura. SAP IBP ha come vincolo il fatto di richiedere l'integrazione con SAP, mentre Llamasoft ha come vincolo l'alto costo e la sua complessità nella configurazione che richiede tempo e capacità.

4.3 Software per la Logistica e la Gestione dei Magazzini

Software	Costo	Campi di applicazione	Parametri progettuali	Vincoli
Blue Yonder	A pagamento	Magazzini, trasporti, previsione della domanda	Domanda, livelli di scorta, costi logistici	Costi elevati, necessita di esperienza per configurazione
Manhattan Associates	A pagamento	Logistica, magazzini, gestione ordini	Percorsi, movimentazione scorte, lead time	Complessità nell'integrazione con altri sistemi
Infor SCM	A pagamento	Logistica, distribuzione, produzione	Capacità produttiva, supply chain, costi di distribuzione	Richiede esperienza per ottimizzare i parametri

Blue Yonder e Mahattan sono entrambi a pagamento e sono software per la logistica e la gestione dei magazzini. I campi di applicazione sono simili andando a interessare magazzini, trasporti, previsione della domanda e gestione ordini. Anche i parametri progettuali si somigliando andando ad interessare i livelli di scorta, i costi logistici, i lead time e la domanda. Il primo (Blue Yonder) ha dei costi elevati, con la necessità di avere competenze ed esperienza per la configurazione mentre il secondo (Manhattan) ha come complessità l'integrazione con altri software (5)

4.4 Nuovi software con funzionalità innovative

Negli ultimi anni sono stati rilasciati nuovi software con funzionalità innovative, come Streamline. Streamline è la piattaforma di pianificazione aziendale collaborativa leader a livello mondiale basata sull'intelligenza artificiale per la produzione, la distribuzione, la vendita all'ingrosso e la vendita al dettaglio. Si basa su una tecnologia proprietaria e copre ogni aspetto della pianificazione della domanda e dell'offerta, offrendo completa trasparenza lungo l'intera catena di fornitura. Con un gruppo di esperti leader in analisi dei dati, sviluppo software, previsioni aziendali e gestione della catena di fornitura, Streamline rende gli algoritmi di modellazione e previsione accessibili ai non matematici, consentendo previsioni

accurate e flessibili per le aziende. Uno dei principali vantaggi di Streamline è la perfetta integrazione con i sistemi e i database ERP/MRP, che consente alle aziende di incorporarli facilmente nei flussi di lavoro esistenti. I vantaggi che si sono riscontrati sono che questo software intelligente utilizza algoritmi matematici avanzati per determinare con precisione i livelli di scorte ideali per le nostre operazioni commerciali. Come contro dell'utilizzo abbiamo che l'aspetto dell'applicazione non è user-friendly, c'è ancora del lavoro da fare per migliorarlo. Tuttavia, l'azienda si sta muovendo nella giusta direzione e ci sono già cambiamenti tangibili in meglio e che sicuramente è un programma molto sofisticato e ci è voluto un po' di tempo per capirlo. Forse alcune semplici indicazioni 1-2-3 per facilitare la configurazione sarebbero fantastiche. Altri software utilizzabili in alternativa a Streamline sono E2open e Anaplan. Come vantaggi hanno che sono entrambi estremamente semplici da gestire, adottano un design minimalista senza compromettere l'efficacia operativa. Abbiamo degli svantaggi, la mancanza di capacità di comunicare con tutti gli altri software in funzione, la raccolta di dati richiede un po' più di tempo del previsto e il sistema di tanto in tanto si blocca, principalmente a causa delle funzionalità ricche di dati offerte. Anche i grafici e la visualizzazione dei dati sono molto carenti rispetto a Tableau o persino a Excel.

(6)

5. ESEMPI PRATICI DEI VARI UTILIZZI DEI SOFTWARE DELLA SUPPLY CHAIN

Possiamo portare degli esempi lampanti di come vengono utilizzati questi software nello specifico con degli esempi in modo da facilitarne la comprensione.

5.1 AnyLogic: simulazione multi-periodo

AnyLogic è un potente software di simulazione multi-metodo utilizzato per modellare e analizzare il flusso dei passeggeri negli aeroporti e viene utilizzato per diversi scopi in modo da raggiungere i diversi obiettivi che vengono posti. Ad esempio, può essere utilizzato per simulare la gestione delle code ai controlli di sicurezza con l'obiettivo di ridurre i tempi di attesa e ottimizzare il numero di linee di sicurezza. I passeggeri vengono modellati come agenti con tempi di arrivo e percorsi variabili, vengono simulate diverse configurazioni delle file come code singole o multiple e si testa l'impatto dell'aggiunta del personale o l'inserimento di nuove corsie di controllo andando ad analizzare il tempo medio di attesa e throughput. Un altro esempio è la simulazione dell'imbarco per ottimizzare le procedure in modo da ridurre i ritardi causati da ingorghi o imbarchi insufficienti. Si modellano diverse

strategie in modo da avere diverse combinazioni (fila unica, gruppi, zone) e si valutano i tempi di imbarco in base al numero di passeggeri e in base anche alla tipologia di aereo. Si simula infine l'interazione tra l'equipaggio, i passeggeri e i ritardi in modo da avere uno scenario il più veritiero possibile. Gli esempi che sono stati riportati sono solo una piccolissima parte di tutte le funzioni presenti nel software, dato che viene utilizzato per la modellazione di altri mille scenari: simulare carichi sfusi e trasferimenti di liquidi in settori come quello minerario o quello petrolifero e del gas, per il trasporto ferroviario, i terminal e gli scali. Flussi pedonali in aeroporti, stadi, stazioni o centri commerciali, circolazione di auto, camion e autobus su strade, parcheggi e siti industriali o anche più semplicemente la movimentazione dei materiali per processi di produzione e magazzino. (7)

5.2 Arena e Flexsim: simulazione 3D

Per quanto riguarda Arena o Flexsim parliamo di software potenti che grazie alla simulazione 3D vengono utilizzati in vari settori per analizzare, ottimizzare e prevedere il comportamento di sistemi complessi. Da una linea di produzione, quindi una fabbrica di automobili, per esempio, simulando dall'arrivo dei materiali alla catena di montaggio fino all'uscita del prodotto finito in modo da identificare eventuali colli di bottiglia in modo da ottimizzare tempo e costi o alla logistica e i trasporti in modo da andare a simulare il traffico di una città, analizzando e pianificando le strade più efficienti in modo da ridurre l'utilizzo di carburante, i costi e i tempi di attesa. Arrivando all'utilizzo in settori come la sanità per la gestione dei pazienti negli ospedali dall'arrivo in ospedale, ai reparti di degenza e alle sale operatorie in modo da ridurre i tempi di attesa e ottimizzare le risorse e la qualità dell'assistenza. Questi esempi che ho riportato per i diversi software ci permettono di capire che questi software di simulazione e modellazione avanzata si concentrano sulla creazione di modelli dettagliati di sistemi complessi per comprenderne il comportamento e identificarne i problemi. A differenza dei software di ottimizzazione della supply chain sopra riportati che si concentrano sulla pianificazione strategica e sull'ottimizzazione dell'intera catena di approvvigionamento. Un esempio lampante potrebbe essere una grande azienda di bevande, come la Coca-Cola o la Pepsi, che deve far arrivare i suoi prodotti in migliaia di punti vendita in tutto il mondo. Il software potrebbe aiutare a decidere dove posizionare i magazzini e i centri di distribuzione, in modo da ridurre i costi e garantire che i prodotti arrivino nei negozi il più velocemente possibile.

5.3 Llamasoft: ottimizzazione della supply chain

Llamasoft potrebbe suggerire di aprire un nuovo magazzino in una certa area geografica, perché questo permetterebbe di servire meglio i clienti in quella zona, oppure potrebbe prevedere che ci sarà un aumento della domanda durante l'estate in modo che l'azienda può aumentare la produzione in anticipo, stesso discorso per quanto riguarda la produzione per non produrre troppo o troppo poco. (8)

5.4 Blue yonder e Manhattan Associates: logistica e gestione dei magazzini

Molte aziende di fama mondiale utilizzano Blue Yonder, software molto diffuso e utilizzato dalle aziende più grandi del mondo come DHL per migliorare l'efficienza dei percorsi e riducendo i costi, Coca-Cola per la gestione della supply Chain o come Walgreens, una delle principali catene di farmacie negli Stati Uniti, utilizza Blue Yonder per gestire gli ordini e migliorare l'esperienza dei clienti. Utilizzando strategie come FIFO (First In, First Out) o LIFO (Last In, Last Out), utilizzati anche da Manhattan Associates WMS, andiamo a ottimizzare lo stoccaggio e il prelievo di merce. I vantaggi che andiamo ad ottenere sicuramente sono collegati ad una riduzione degli errori e un'automazione dei processi, un migliore utilizzo degli spazi e dei mezzi di trasporto, un monitoraggio preciso delle merci e riduzione delle perdite e una previsione della domanda e gestione delle scorte più accurata. (9)

6. SOFTWARE ANYLOGIC

6.1 Utilizzi per simulazione e previsione di eventi

Oltre l'80% delle merci a livello globale viene trasportato via mare, rendendo i porti infrastrutture fondamentali per garantire una distribuzione efficiente, puntuale e sicura. La logistica, infatti, punta a rendere il movimento delle merci il più rapido ed economico possibile, mantenendo standard precisi in termini di tempistiche, quantità e qualità. Con l'avvento della digitalizzazione e dell'Industria 4.0, si è affermato il concetto di "logistica 4.0" o "logistica intelligente", che mira a pianificare e gestire le attività logistiche in modo automatizzato e basato sui dati. La raccolta e l'analisi delle informazioni sono centrali in questo processo, in quanto permettono di migliorare i flussi e ottimizzare le operazioni. Anche la gestione dei container nei terminal portuali sta evolvendo verso soluzioni più smart, spinte dalla crescente domanda, dalla scarsità di spazio e dalla necessità di ridurre i costi. La standardizzazione dei container ha contribuito a rendere più efficienti le operazioni e ha

favorito la diffusione della containerizzazione su larga scala. I terminal container, infrastrutture chiave per il carico, scarico e trasferimento dei container, devono quindi ottimizzare la propria configurazione logistica per favorire operazioni rapide ed economiche. In questo scenario, i porti e terminal container diventano snodi vitali per le catene di fornitura globali. Il concetto emergente di “porto intelligente” si basa sull’uso di tecnologie avanzate per aumentare la produttività e l’efficienza, portando benefici a tutti gli attori coinvolti. Un esempio sono i cosiddetti “smart gate”, ovvero ingressi automatizzati che riducono al minimo l’intervento umano, grazie a sistemi di scansione, riconoscimento targhe, identificazione biometrica, e monitoraggio in tempo reale dei flussi veicolari. Questi sistemi migliorano il processo decisionale e aiutano a gestire in modo più bilanciato i flussi di mezzi all’interno dell’area portuale. Tuttavia, le operazioni ai gate influiscono direttamente anche sul traffico esterno e sulle attività interne al terminal. Problemi in quest’area possono generare congestione, inefficienze e rischi per la sicurezza. In questo contesto, il porto di Sines – uno degli scali marittimi più importanti d’Europa – sta affrontando la sfida della congestione dei camion all’ingresso del Terminal XXI, causata da inefficienze operative, burocrazia e carenza di tecnologia. Per superare questo problema, si sta sviluppando un sistema smart di “pre-gate”, che permetta di gestire e indirizzare meglio il traffico in arrivo, riducendo i tempi di attesa e l’impatto ambientale. Lo studio descritto si concentra proprio su questa problematica, utilizzando un modello di simulazione per prevedere il comportamento del nuovo sistema di accesso stradale. La simulazione considera vari scenari e parametri (come numero di corsie, parcheggi, percorsi e check-point), e ha l’obiettivo di supportare APS (l’ente portuale) nel prendere decisioni informate sulla progettazione e costruzione del nuovo pre-gate. La domanda chiave a cui lo studio cerca di rispondere è: “Come può un modello di simulazione diventare uno strumento decisionale per prevedere il funzionamento del pre-gate del Terminal XXI e quali implicazioni ha per il futuro dei gate intelligenti con digital twin?”. Si ipotizza che l’uso della simulazione non solo possa aumentare l’efficienza operativa, ma anche fungere da base per progettare futuri sistemi automatizzati, più intelligenti e sostenibili. Il modello può infatti testare diverse configurazioni in base a condizioni variabili, offrendo uno strumento prezioso per il supporto alle decisioni. Lo studio mostra quindi come un modello di simulazione possa essere usato per valutare soluzioni progettuali e proporre modalità operative ottimali per i gate, in linea con la crescente automazione delle operazioni portuali. Per rispondere a queste sfide, il settore sta adottando il concetto di “logistica 4.0” o “logistica intelligente”, che mira a rendere le catene logistiche flessibili, autonome e connesse. Tecnologie come RFID, GPS, AGV, cloud computing,

intelligenza artificiale e sensori smart giocano un ruolo centrale in questo processo, permettendo decisioni basate su dati e un'ottimizzazione continua dei flussi logistici. Anche i porti intelligenti (smart ports) stanno emergendo come risposta a queste esigenze. Un porto smart non è solo un insieme di macchinari automatizzati, ma un sistema integrato che sfrutta le tecnologie digitali per migliorare l'efficienza, ridurre l'impatto ambientale e soddisfare aspettative sempre più elevate da parte degli utenti. L'automazione delle porte di accesso (smart gates) è uno degli aspetti più significativi: queste utilizzano tecnologie di riconoscimento automatico, chioschi self-service e sistemi biometrici per snellire le operazioni di ingresso e uscita, riducendo al minimo l'intervento umano e migliorando la fluidità del traffico. L'approccio metodologico generale può essere riassunto come segue: Utilizzare il process mapping per identificare e analizzare le attuali capacità del gate; Progettare lo stato futuro utilizzando previsioni sul traffico stradale e proposte per il gate e il pre-gate; Costruire modelli di simulazione per rappresentare gli esiti potenziali e valutare diverse opzioni. È stato fondamentale determinare la capacità attuale dei varchi del porto di Sines, l'infrastruttura stradale e i colli di bottiglia associati, per comprendere il problema. Questo ha richiesto la raccolta di dati da fonti diverse: riunioni, sessioni di brainstorming con stakeholder, registrazioni video, rapporti e dataset da enti gestori del terminal. Un modello preliminare è stato costruito tenendo conto delle limitazioni geografiche. Il modello concettuale è stato creato insieme alla mappatura dei processi secondo la Business Process Model and Notation (BPMN 2.0), con l'obiettivo di definire gli elementi del sistema e chiarire le loro interazioni. Per restare competitivi nel mercato digitale e migliorare la qualità ed efficienza dei processi, l'integrazione della gestione dei processi aziendali (BPM) nelle procedure operative può essere un passo critico. Il BPM include tecniche e strumenti per scoprire, analizzare, progettare, eseguire e monitorare processi. Il linguaggio BPMN è molto usato per la visualizzazione, grazie ai suoi simboli grafici chiari. Le componenti principali sono: attività, punti decisionali, eventi e sotto-processi, collegati in sequenza. Si possono anche includere oggetti dati per descrivere input/output delle attività. Il BPMN è stato usato per mappare una parte specifica del processo studiato. Il settore della logistica affronta varie sfide: ricerca continua dell'efficienza, condizioni operative imprevedibili, adattamento a nuove aspettative dei clienti e cambiamenti dovuti all'innovazione. Per questo, i processi vanno spesso migliorati, specialmente dal punto di vista "intelligente" (automazione, gestione informativa, adattabilità), come nei varchi "smart". Dopo la mappatura, si è identificato il tipo di simulazione più adatto al processo logistico: la simulazione a eventi discreti (DES), che si basa sulla codifica del sistema come una serie

di azioni che accadono in momenti discontinui con intervalli casuali. DES è una tecnica comune per simulare sistemi industriali dinamici. Tuttavia, con l'aumento della complessità, può diventare meno efficiente. È essenziale costruire il modello in modo corretto per replicare il comportamento reale del sistema. Questo processo include definizione del problema, raccolta dati, modellazione concettuale, verifica, validazione e analisi dei risultati. I vantaggi della simulazione includono la possibilità di analizzare sistemi senza le limitazioni del mondo reale, valutare scenari multipli, generare animazioni, prevedere problemi, e ridurre costi tramite modifiche virtuali. Gli svantaggi includono la necessità di formazione, la complessità dell'analisi dei risultati, i costi, la dipendenza dall'accuratezza dei dati e la difficoltà a fornire risposte semplici. Nel DES, il mondo non è rappresentato in modo continuo: gli eventi accadono in momenti precisi, e le entità coinvolte cambiano solo in quei momenti. In questo studio, le azioni del processo sono descritte in ordine sequenziale: l'arrivo dei camion cambia lo stato del sistema, permettendo di prevedere il funzionamento del pre-gate. Durante la costruzione del modello sono stati identificati attori e fonti di dati, oltre alla progettazione del nuovo layout del gate e pre-gate. I dati (frequenza di arrivo dei camion, tempi di elaborazione, ecc.) sono stati raccolti da studi precedenti e dataset forniti da PSA Sines S.A., l'ente che gestisce il Terminal XXI. In mancanza di dati reali, si sono fatte alcune ipotesi. Una volta definiti parametri e assunzioni, il modello è stato sviluppato con Anylogic 8.9.0, un software di simulazione basato su Java. Questo programma include librerie specifiche per il traffico stradale e tratta risorse e veicoli come agenti. Permette anche di raccogliere metriche, tempi e lunghezze delle code. Il modello a flowchart facilita la pianificazione e modifica dei processi. Infine, sono state testate alternative del modello e condotte simulazioni "what if" per prevedere comportamenti e miglioramenti. La validazione è avvenuta tramite presentazioni agli stakeholder per assicurare l'aderenza alla realtà. Gli indicatori di performance sono stati mostrati tramite dashboard e strumenti integrati nel software.

Una rappresentazione schematica della metodologia è fornita nella Figura 1.

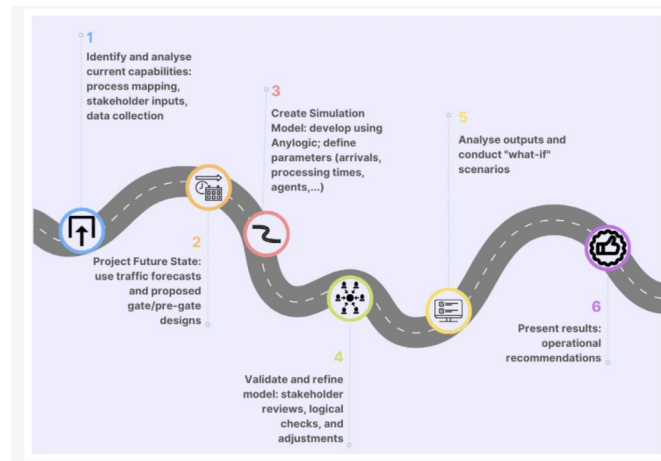


Fig.1

Il traffico marittimo in crescita porta benefici alle comunità, ma crea anche problematiche gestionali nei porti, specialmente nei terminal container. Uno dei problemi più frequenti è la variabilità negli orari di arrivo dei camion, che rende difficile la gestione efficiente delle risorse, generando congestione, lunghe attese e inquinamento. Al Terminal XXI del porto di Sines (Portogallo), per affrontare questo problema è stato deciso di costruire un pre-gate — una sorta di area di controllo preliminare — e di modernizzare alcuni processi operativi. Il porto di Sines, costruito nel 1973, è il primo porto artificiale del Portogallo e il più importante per traffico internazionale via Atlantico. Il Terminal XXI, gestito da PSA Sines S.A., ha visto una forte espansione, diventando il principale terminal container del Paese. Tuttavia, negli ultimi anni, è aumentato il traffico stradale diretto al terminal, causando congestione fino alla rotatoria d'accesso. L'obiettivo dello studio è quindi prevedere il flusso logistico con la nuova struttura del pre-gate, usando una simulazione ad eventi discreti (DES), e proporre miglioramenti basati su questo modello. Attualmente, il processo inizia con la richiesta di servizio al camionista (per consegna o ritiro container), che deve registrarsi e ottenere autorizzazioni. Le prenotazioni possono essere fatte tramite il sistema GAS (digitale) o manualmente al chiosco documentale. Il sistema GAS è più efficiente e permette l'accesso tramite un PIN e controllo automatico ai cancelli espressi. Il processo manuale è invece lento e soggetto a errori, con controlli cartacei e attese inutili. Sono presenti due cancelli: uno "espresso" per prenotazioni digitali e uno "normale" per quelle manuali. Tuttavia, la scarsa separazione fisica tra i due percorsi causa spesso confusione e manovre pericolose. I problemi principali rilevati includono: eccessiva dipendenza dalla documentazione cartacea, soste inutili, carenza di tecnologie ICT, infrastrutture inadeguate, progettazione obsoleta e scarsa integrazione tra i sistemi.



Fig.2 Porto di Sines

Nel nuovo processo proposto, l'intera infrastruttura anteriore ai cancelli sarà sostituita da un pre-gate digitale e automatizzato. Qui il camionista attraversa diversi checkpoint:

Checkpoint 1: lettura automatica della targa con telecamere e indirizzamento su schermi.

Checkpoint 2: verifica integrità del container, controllo appuntamento e peso.

Checkpoint 3: parcheggio con chioschi di assistenza per problemi.

Checkpoint 4: rientro in percorso normale se l'autorizzazione è stata regolarizzata.

Superati questi controlli, il camionista può accedere al terminal con l'app, PIN e controllo biometrico. Il processo è stato mappato dettagliatamente in BPMN per costruire un modello concettuale utile alla simulazione.

Figure 4. BPMN mapping of the "road transportation" macro process.

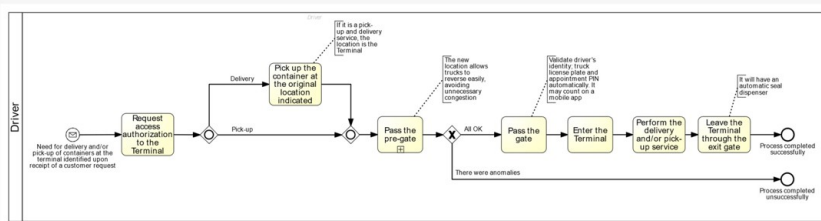
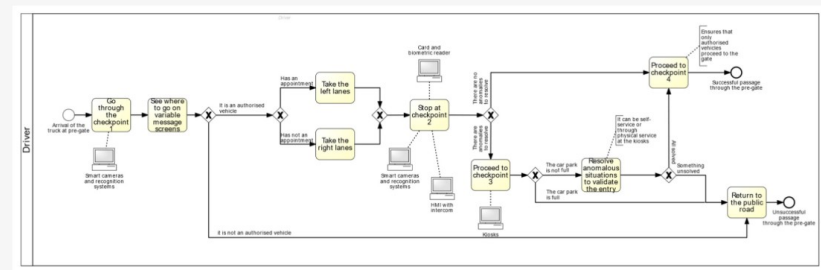


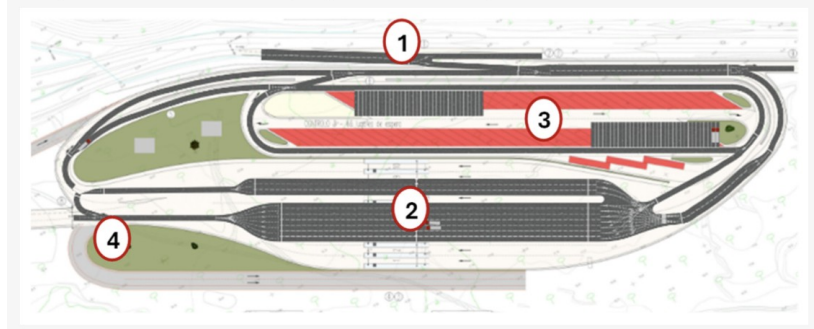
Figure 5. BPMN mapping of the "passage through the pre-gate" process.



Per realizzare la simulazione, è stato prima necessario raccogliere i dati di input fondamentali, come la frequenza di arrivo dei veicoli e i tempi di elaborazione ai vari checkpoint. I dati disponibili, forniti da PSA, comprendevano gli orari di entrata e uscita dei camion. Non avendo dati reali completi, sono state fatte delle assunzioni basate su studi di capacità precedenti e con il supporto della teoria delle code e dei pareri degli stakeholder.

Una volta chiariti i parametri e le attività da simulare, si è passati alla scelta del software più adatto. È stato scelto AnyLogic, perché offre un ambiente flessibile basato su Java, una versione gratuita per uso accademico, librerie specifiche per il traffico stradale, animazioni 2D/3D e dashboard per la visualizzazione dei risultati. Inoltre, supporta la simulazione ad eventi discreti, particolarmente adatta per modellare sistemi con agenti distinti (come camion e personale) e per calcolare indicatori come tempi di attesa, lunghezza delle code e utilizzo delle risorse. AnyLogic è risultato preferibile ad altri software noti (Arena, Simio, Simul8, Witness, FlexTerm) grazie alle sue caratteristiche tecniche, alla facilità d'uso, e al supporto per personalizzazioni tramite codice Java. È riconosciuto per la sua versatilità in contesti sia accademici sia industriali e già impiegato per simulare sistemi complessi di gestione del traffico urbano. La simulazione rappresenta il percorso dei camion dalla strada pubblica fino al gate del porto, passando attraverso una serie di checkpoint. I dati reali sono stati usati per determinare le distribuzioni di probabilità che meglio descrivono il comportamento dei veicoli (es. tempo tra gli arrivi, tempo di servizio). I checkpoint principali sono modellati con risorse distinte e corsie parallele, alcune delle quali (fino a 10) saranno aperte solo in base alla domanda futura. Le assunzioni principali includono: Gli arrivi dei camion seguono una distribuzione di Weibull, I tempi ai checkpoint 2 e 3 sono modellati con distribuzioni probabilistiche, stimate sulla base dei dati PSA e studi precedenti, Sono stati creati due agenti: uno per il camion (lunghezza media 16,5 m, velocità prefissata) e uno per le risorse nei checkpoint, Il 25% dei camion va al checkpoint 3 (senza appuntamento), con soste in un parcheggio dedicato, Alcuni errori sono stati modellati (es. veicoli che sbagliano percorso o devono tornare indietro). La simulazione prevede anche scenari alternativi, modificando il numero di corsie attive o la variabilità nei tempi di servizio, per testare condizioni meno favorevoli. Sono stati effettuati 10 repliche per garantire intervalli di confidenza del 95% sui risultati.

Figure 9. 2D animation of the pre-gate with the checkpoints numbered 1–4.



Il modello è stato validato progressivamente con il coinvolgimento degli stakeholder, che hanno contribuito con osservazioni utili a migliorarne l'accuratezza. Tuttavia, ogni

simulazione presenta sfide uniche e non esistono test universali o automatizzati per garantirne la validità assoluta. Inoltre, i risultati ottenuti sono validi solo per questo porto: l'applicazione ad altri contesti richiederà adattamenti alle condizioni locali. Il modello dovrà essere ulteriormente verificato con dati empirici reali una volta che il sistema sarà operativo. A seconda degli scenari si hanno diverse soluzioni come: l'aggiunta di una corsia che inizialmente migliora le performance ma oltre una certa soglia questo beneficio si riduce indicando un punto di saturazione mentre una riduzione delle corsie genera un collo di bottiglia ovvero un aumento delle attese e code. Si trova un buon equilibrio nello scenario numero 3 in cui si ha una bassa congestione, utilizzo delle risorse sotto controllo e throughput accettabile. Si sottolinea anche che il tempo di elaborazione al checkpoint 2 ha un impatto critico su tutti gli indicatori, il numero di corsie attive ha un effetto esponenziale fino a saturazione, poi marginale, i risultati dimostrano l'utilità della simulazione per la pianificazione strategica nei porti, soprattutto in contesti di trasformazione digitale e le tecnologie smart gate e dati in tempo reale sono identificati come futuri sviluppi promettenti del modello. Lo studio ha dimostrato di stimare tempi di sistema, attese e code nel pre-gate del Terminal XXI del porto di Sines, tramite simulazione a eventi discreti con Anylogic. È stato sviluppato un modello logico con animazioni 2D/3D basato su dati attuali e layout proposti, validato con stakeholder e intervalli di confidenza al 95%. I risultati mostrano che l'apertura di un numero sufficiente di corsie migliora le prestazioni, ma dopo un certo punto i benefici si riducono. Sono stati individuati quattro scenari ottimali tra 20 simulati, che mostrano un buon equilibrio tra uso delle risorse, tempi d'attesa ridotti, code minori e maggiore throughput. Il modello dimostra l'utilità di strumenti flessibili per la gestione delle smart gates, fornendo supporto alle decisioni attraverso l'analisi di configurazioni alternative. La simulazione, se integrata già in fase progettuale, può evolversi in un "gemello digitale" per una gestione adattiva e in tempo reale. Nonostante i vantaggi, il modello può essere migliorato includendo variabili come flussi di traffico più realistici, condizioni esterne (es. meteo, guasti), e ottimizzazione automatica (es. apprendimento automatico). In futuro, si suggerisce di includere anche analisi di costi ed emissioni. (10)

6.2 Utilizzo del software (Anylogic) in catene di forniture

La supply chain è una rete strutturata che integra la logistica diretta, il flusso di informazioni di ritorno e i flussi di capitale come strumenti per collegare fornitori iniziali e utenti finali, al fine di ottenere materie prime, produrre beni e gestire le informazioni nel sistema. bCon

l'intensificarsi della concorrenza sul mercato, la gestione della supply chain diventa cruciale. Poiché il sistema è complesso e dinamico, è vulnerabile a eventi improvvisi che possono comprometterne il funzionamento. Alcuni esperti sostengono che la competizione tra aziende è, in sostanza, una competizione tra supply chain. Molti studiosi hanno studiato la non linearità dinamica della supply chain e la gestione finanziaria associata. Sono stati proposti modelli matematici e algoritmi per ottimizzare produzione, distribuzione, selezione dei fornitori e gestione finanziaria (come l'uso di algoritmi genetici). Tuttavia, gli studi che trattano l'evoluzione dinamica e non lineare della supply chain e la sua integrazione con la gestione finanziaria sono ancora limitati. Per questo, è stato sviluppato un modello dinamico non lineare della supply chain aziendale, basato sulla gestione finanziaria e sui principi evolutivi delle reti logistiche. Il modello analizza il comportamento della supply chain prima e dopo eventi imprevisti, con l'obiettivo di offrire linee guida per l'ottimizzazione della rete logistica e della gestione finanziaria aziendale. La teoria della complessità è fondamentale per lo studio delle reti complesse e gioca un ruolo importante nell'analisi dei sistemi articolati. Durante lo sviluppo aziendale, la rete di distribuzione logistica diventa un elemento chiave per fornire servizi efficienti ai clienti finali e per valorizzare l'efficacia della supply chain. Questo sistema è dinamico e non lineare, con caratteristiche multifunzionali e multilivello, ma anche vulnerabile a molti fattori, rendendo difficile ottimizzarlo con metodi tradizionali. Per questo motivo viene adottata la teoria dei sistemi complessi. Tra le reti complesse principali vi sono: reti casuali, reti scale-free e reti small-world, che si distinguono principalmente per il coefficiente di clustering. Le reti logistiche hanno caratteristiche scale-free. Un'impresa è vista come un sistema capace di combinare risorse materiali e culturali, includendo produzione, finanza e R&D. La capacità finanziaria – come la capacità di finanziare, investire, distribuire redditi e gestire capitali – riflette direttamente la competitività aziendale. In questa prospettiva, la rete di distribuzione logistica è un insieme di strutture e organizzazioni interconnesse che operano nel processo distributivo, considerate qui anche sotto l'aspetto della gestione finanziaria. Il sistema è rappresentato da una rete composta da nodi dati e collegamenti, spesso con topologie a stella, dove i dati o i prodotti si muovono in base ai segnali ricevuti. Nel sistema, si usa una mappatura non lineare rappresentata dalla funzione:

$$F: R^n \rightarrow R^n$$

$$St+1=F(st,it,t)$$

Dove:

- st: stato attuale del sistema
- it: input
- t: tempo
- F: funzione non lineare che determina lo stato successivo

Questo sistema produce una sequenza temporale di stati. Poiché è non lineare (con funzioni esponenziali, paraboliche, trigonometriche), è difficile ottenere soluzioni precise. Esempi noti sono il sistema dei tre corpi o la turbolenza. La supply chain è quindi vista come un sistema dinamico non lineare complesso, molto sensibile alle condizioni iniziali e soggetto a instabilità ed emergenze. L'evoluzione di tale sistema segue due fasi principali: da statico a dinamico casuale, e da centralizzato a distribuito. Per analizzarne la stabilità, viene proposto un modello dinamico non lineare che integra anche la gestione finanziaria aziendale. Dal punto di vista aziendale, una supply chain completa è formata dalla collaborazione tra più imprese. Questo processo cooperativo migliora l'efficienza. Una supply chain include un'impresa "core" e altre imprese collegate: fornitori (materiali), produttori (produzione), distributori (distribuzione) e rivenditori (vendita). Questi soggetti formano una rete interconnessa. Eventi imprevisti, come errori nei dati finanziari, possono generare effetti a catena in tutto il sistema. Viene proposto un modello matematico dinamico non lineare che descrive l'evoluzione delle scorte, dei costi e dei capitali nei vari nodi della supply chain, tenendo conto della gestione finanziaria. Equazioni chiave del modello:

1. Fornitore:

- Inventario:

$$x_{t+1} = \delta x_t + c_t - K_t \phi^{-1}$$

- Dove δ è il tasso di conservazione dell'inventario.

2. Produttore:

- Inventario:

$$y_{t+1} = \varepsilon y_t + \vartheta A_0(t)(1 + \lambda)^t L_t^\alpha K_t^\beta \mu - s_t$$

- Produzione (funzione di Cobb-Douglas):

$$p_t = A_0(t)(1 + \lambda)^t L_t^\alpha K_t^\beta \mu$$

3. Capitale investito e costi:

- Capitale:

$$K_{t+1} = r A_0(t)(1 + \lambda)^t L_t^\alpha K_t^\beta \mu$$

- Costo:

$$C = p_k K_t + p_l L_t \quad ; \quad L_{t+1} = \frac{C}{p_t} - \frac{p_k K_{t+1}}{p_t}$$

4. Rivenditore e Distributore:

- Inventario rivenditore:

$$z_{t+1} = w z_t + s_t - g_t$$

- Inventario distributore:

$$z'_t + 1 = \gamma z'_t + \eta q_t - d_t$$

5. Domanda di mercato (previsione esponenziale):

$$q_{t+1} = a d_t + (1 - a) q_t$$

Fig.1 Equazioni chiave per il modello

Per analizzare questo sistema complesso, si usa AnyLogic, un software avanzato di simulazione che permette di modellare sistemi dinamici non lineari. È adatto sia per sistemi continui che discreti e molto efficace nel contesto della gestione finanziaria aziendale. Nel caso di studio, viene simulato un evento imprevisto il giorno 100, che causa un brusco cambiamento della domanda di mercato. Il sistema mostra una mutazione che si stabilizza intorno al giorno 170. Si analizzano variabili come inventario, costi e profitti, per osservare l'evoluzione e l'adattamento del sistema. Lo studio analizza le variazioni degli inventari nei diversi nodi della supply chain (fornitore, produttore, distributore, rivenditore) prima, durante e dopo un evento accidentale, basandosi su un modello dinamico non lineare integrato con la gestione finanziaria dell'impresa manifatturiera. In condizioni normali, gli inventari di tutti i nodi mostrano fluttuazioni periodiche. Il distributore presenta una variazione molto più stabile rispetto agli altri nodi, i cui inventari oscillano maggiormente. Al giorno 100, si verifica un evento imprevisto che causa un forte calo della domanda di mercato. Il distributore è il nodo più colpito: continua ad acquistare normalmente, ma la domanda si blocca, portando a un accumulo rapido di inventario. Dopo l'evento:

- Inventario del produttore: 43 unità
- Inventario del rivenditore: 49 unità
- Inventario del fornitore: 59 unità

Quando la domanda si riprende, gli inventari iniziano a diminuire rapidamente in tutti i nodi. Entro il giorno 251, distributore e rivenditore tornano a una distribuzione simile a quella pre-evento. Tuttavia, produttore e fornitore non riescono a ritornare ai livelli precedenti, probabilmente a causa di ritardi informativi. Questo dimostra che, per ridurre le perdite in caso di eventi imprevisti, è cruciale una reazione rapida e tempestiva da parte dei vari attori della supply chain. Un modello dinamico non lineare della supply chain basato sulla gestione finanziaria logistica dell'impresa è stato costruito considerando la rete di distribuzione logistica e il sistema non lineare. L'analisi di simulazione conferma che gli eventi accidentali in un sistema di supply chain complesso hanno impatti significativi su inventari, costi e profitti dei soggetti coinvolti: fornitore, distributore, rivenditore e produttore. La collaborazione operativa e la condivisione delle informazioni all'interno dell'intera supply chain risultano essenziali per favorire lo sviluppo e l'ottimizzazione della gestione finanziaria logistica dell'impresa. Tuttavia, a causa di limiti oggettivi, l'analisi non ha considerato l'impatto della domanda di mercato prima e dopo un crollo della domanda stessa. Inoltre, l'attenzione si è concentrata principalmente sulla logistica, senza entrare nei

dettagli della gestione finanziaria. Nei lavori futuri, si prevede di approfondire: l'andamento della domanda di mercato in caso di crolli improvvisi, l'analisi dei dati finanziari nella gestione finanziaria dell'impresa. (11)

6.3 Come funziona una supply chain, dalla storia al suo funzionamento

Le condizioni di un mondo sempre più globalizzato offrono grandi opportunità di mercato alle imprese. Nel 2020, il mercato globale della gestione della supply chain era valutato 15,85 miliardi di dollari e si prevede che raggiungerà quasi 31 miliardi entro il 2026. Per ottenere un vantaggio competitivo, le aziende danno sempre più importanza alla progettazione e gestione delle reti di supply chain, strutture complesse composte da fornitori, produttori, centri di distribuzione, rivenditori, clienti e i flussi che li collegano. Le supply chain tradizionali seguono un flusso diretto: dai fornitori di materie prime alla produzione, fino alla consegna ai clienti finali tramite distributori e rivenditori. Analizzare e gestire questa struttura è essenziale per migliorare l'efficienza aziendale. Tuttavia, da un'indagine del 2020, emergono grandi difficoltà, soprattutto legate alla velocità di risposta alla domanda. Allo stesso tempo, le attività della supply chain hanno gravi impatti ambientali, tra cui: perdita di biodiversità, deforestazione, esaurimento delle risorse, rifiuti tossici ed emissioni nocive, danni agli ecosistemi e saturazione delle discariche. Secondo il WWF, fino al 1970 l'impronta ecologica dell'umanità era in equilibrio con la capacità del pianeta. Ma negli ultimi 50 anni, a causa della crescita della popolazione, del commercio e dell'urbanizzazione, l'umanità consuma 1,56 volte le risorse che la Terra può rigenerare. Inoltre, le popolazioni di vertebrati sono calate del 68% tra il 1970 e il 2016. Oggi c'è un bisogno crescente di affrontare l'impatto ambientale delle supply chain e contenerne gli effetti negativi. Per questo motivo, concetti come sostenibilità, logistica inversa e impronta ecologica stanno diventando sempre più centrali. Le aziende stanno integrando flussi inversi nelle loro reti logistiche per: ridurre consumo di risorse e energia, produrre meno rifiuti, rispondere alle aspettative dei clienti e stakeholder consapevoli e rispettare leggi ambientali e di gestione dei rifiuti. Nascono così le reti di supply chain a ciclo chiuso (CLSC - Closed-Loop Supply Chain), che gestiscono sia il flusso diretto (dal fornitore al cliente), sia quello inverso (recupero e smaltimento dei prodotti usati). In queste reti sono inclusi centri di raccolta, smontaggio, riparazione, riciclo, rigenerazione, remanufacturing e discariche. Una progettazione efficiente delle reti CLSC è fondamentale per gestire correttamente i flussi diretti e inversi e il funzionamento coordinato di tutti questi centri. La rete della catena di approvvigionamento è, nella sua forma più semplice, l'insieme di tutte le connessioni che

assicurano il flusso di prodotti tra fornitori, produttori, centri di distribuzione e clienti. Dopo la consegna ai clienti, a causa di fine vita o fine utilizzo, copertura di garanzia, consegna errata o difettosa, i prodotti possono rientrare nella catena di approvvigionamento. Dopo la separazione e l'ispezione, si decide se adottare una delle opzioni di logistica inversa, come riparazione, rigenerazione, ricondizionamento, riciclaggio e cannibalizzazione, in base alla qualità del prodotto restituito e alle possibilità tecniche ed economiche. A seconda dell'opzione di logistica inversa da applicare, potrebbe essere necessario un diverso livello di smontaggio. Il recupero potrebbe non essere sempre possibile. In questi casi, i prodotti restituiti vengono smaltiti correttamente, in modo da non danneggiare l'ambiente e la salute umana. Non va dimenticato che l'origine del flusso inverso nella catena di approvvigionamento non deve essere sempre il cliente. Il flusso inverso può anche essere attivato tra gli altri membri della catena a causa di accordi commerciali, consegne errate e richiami di prodotti. I sistemi che gestiscono i flussi diretti e inversi nel loro complesso sono chiamati CLSC.

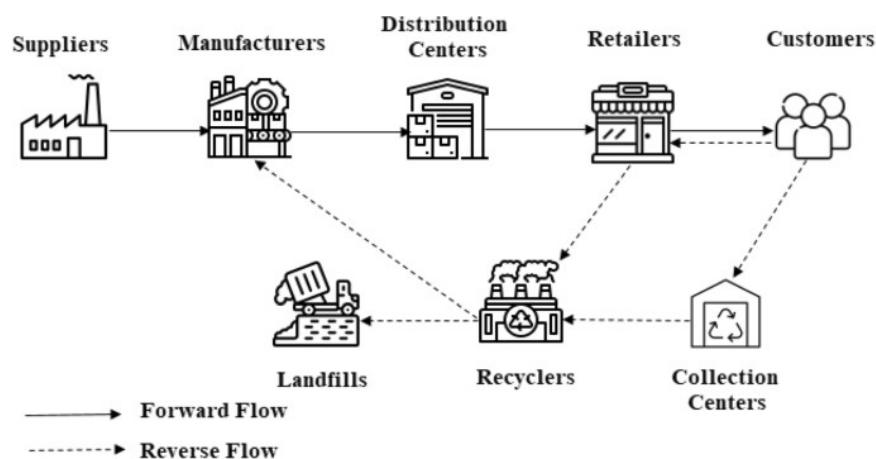


Fig.1 Ciclo del prodotto

La modellazione basata su agenti (ABM) utilizza agenti autonomi che interagiscono tra loro per rappresentare sistemi complessi. Poiché gli agenti comunicano tra loro e con l'ambiente, ABM è particolarmente adatto alla risoluzione di problemi distribuiti e complessi, come: problemi su larga scala, situazioni che richiedono risposte rapide e problemi dinamici. Il vantaggio è che il problema viene suddiviso in sottoproblemi locali, più facili da risolvere. Gli agenti possono prendere decisioni individuali in tempo reale senza attendere altri, portando a soluzioni rapide. Inoltre, ABM è flessibile: è facile aggiungere o rimuovere agenti nel sistema dinamico durante l'analisi. Le caratteristiche chiave degli agenti in una supply chain sono: autonomia, abilità sociali, realismo, cooperazione, reattività e adattabilità. Rispetto ai metodi di ottimizzazione classici, ABM presenta diversi vantaggi nella progettazione

delle reti di supply chain a ciclo chiuso (CLSC): Gestisce meglio i problemi di grandi dimensioni grazie all'approccio modulare. È più realistico perché richiede meno assunzioni rigide e reagisce più velocemente ai cambiamenti rispetto ai modelli analitici, che spesso richiedono tempi di calcolo più lunghi. Negli ultimi anni, ABM ha guadagnato popolarità in molti campi. Alcuni esempi: Chen e Wang hanno usato ABM per prevedere i tempi di produzione in un impianto di semiconduttori. Colon et al. lo hanno applicato per simulare l'impatto dei disastri sulla logistica. Ying e O'Clery lo hanno impiegato per modellare la trasmissione virale nei supermercati. Rahbar et al. hanno combinato ABM e deep learning per generare layout architettonici automatizzati. Nel presente studio, è stata progettata una rete CLSC generica con: Flusso diretto: fornitore, produttore, centro di distribuzione, cliente. Flusso inverso: centro di raccolta, smontaggio, scarica. Il modello gestisce contemporaneamente la domanda di nuovi prodotti e la domanda di prodotti rigenerati (recuperati, aggiornati, riparati e reintrodotti sul mercato). Grazie alla metodologia ABM, sono stati inclusi parametri spesso ignorati nei modelli analitici, come: tempi di produzione e smontaggio e durata economica dei prodotti. Ciò consente una rappresentazione più realistica e dinamica della supply chain, eliminando molte assunzioni semplificative tipiche dei metodi analitici. Negli ultimi anni, l'interesse verso le reti di approvvigionamento chiuse (CLSC) è cresciuto, spinto da preoccupazioni ambientali e richieste dei clienti. Studi accademici si sono concentrati su progettazione e modellazione della rete, affrontando incertezza, costi, sostenibilità, e reverse logistics. Diversi modelli matematici (MILP, non lineari, stocastici, fuzzy, multi-obiettivo) sono stati sviluppati per settori specifici (automotive, farmaceutico, alimentare, ecc.), usando tecniche esatte, euristiche e metaeuristiche. Uno degli aspetti finora trascurati è il comportamento del cliente nel disegno della rete, specie nei flussi inversi. L'approccio proposto in questo studio utilizza Agent-Based Modeling (ABM) per integrare in modo dinamico le decisioni e i comportamenti dei clienti nella CLSC. Il modello considera la domanda per prodotti nuovi e ricondizionati, fattori come pubblicità, esperienza di altri utenti, tempi di consegna, e possibilità di cambiare prodotto preferito. Viene inoltre affrontata la complessità computazionale tramite simulazioni ABM, evitando molte assunzioni rigide. L'efficacia del modello è dimostrata tramite scenari realistici. Nelle reti CLSC (Closed-Loop Supply Chain), che includono sia il flusso diretto che quello inverso, il flusso diretto inizia con l'acquisto di materiali dai fornitori e termina con la consegna dei prodotti ai clienti. Tuttavia, i clienti non sono solo il punto finale del flusso diretto, ma anche l'inizio del flusso inverso, che riguarda la raccolta e il trattamento dei prodotti a fine vita o non più utilizzati. Questi prodotti possono

essere riutilizzati (dopo ispezione, smontaggio e produzione di beni ricondizionati) oppure smaltiti in discarica. Lo studio si concentra sulla gestione efficiente di entrambi i flussi, progettando una rete CLSC generica tramite un approccio ABM (Agent-Based Modeling). Questo metodo considera dinamiche come la domanda dei clienti per prodotti nuovi e ricondizionati e l'impatto di queste dinamiche sul comportamento della rete. Ogni attore della catena (fornitori, produttori, centri di distribuzione, clienti, centri di raccolta e smontaggio, discariche) è modellato come un agente con obiettivi, capacità e comportamenti specifici. La rete simula anche la variabilità nel comportamento dei clienti, come la preferenza tra nuovo o ricondizionato, la disponibilità ad aspettare un prodotto, e la decisione di restituire o meno un prodotto a fine vita. Lo studio presenta un modello a stati per ogni attore della catena di fornitura chiusa (CLSC), basato su modelli agent-based (ABM). Il cliente entra dinamicamente nel sistema, acquista prodotti nuovi o ricondizionati a seconda delle preferenze e della disponibilità, e può restituire o meno il prodotto dopo l'uso. I centri di distribuzione soddisfano la domanda finché c'è disponibilità, e riforniscono l'inventario ordinando ai produttori. I produttori realizzano sia prodotti nuovi (con parti da fornitori) che ricondizionati (con parti smontate). Le parti riutilizzabili arrivano dai centri di smontaggio, i quali ricevono i prodotti dai centri di raccolta, che ne valutano le condizioni. L'intero flusso considera le scelte individuali, la disponibilità di prodotti, e la qualità degli articoli restituiti, per rappresentare in modo realistico una supply chain sostenibile ed efficiente. Il problema proposto è stato risolto per un esempio composto da 2 fornitori, 1 produttore, 5 centri di distribuzione, 3 centri di raccolta, 1 centro di smontaggio, 1 discarica e diversi clienti che accedono al sistema in modo dinamico. Per l'esempio è stato selezionato un piccolo insieme di parametri che riflette un caso industriale reale. Il costo unitario di trasporto è ipotizzato pari a 0,2 unità monetarie per chilometro e il costo unitario di acquisto dei componenti dai fornitori è considerato pari a 2 unità monetarie. Il costo unitario di produzione per prodotti nuovi e ricondizionati è ipotizzato uguale e considerato pari a 7 unità monetarie. I costi di raccolta, smontaggio e smaltimento dei prodotti usati sono determinati rispettivamente in 2, 5 e 3 unità monetarie. La capacità di tutti i fornitori è considerata la stessa, ovvero 50 unità a settimana. Il modello simula clienti che entrano nel sistema con posizione, intenzione e pazienza casuali. Le loro decisioni di acquisto (nuovo vs ricondizionato) dipendono da preferenze personali, pubblicità, influenza sociale e incentivi di mercato. Solo una piccola parte entra per restituire prodotti usati, ma molti di loro ricomprano. I tempi di ispezione e smontaggio, e la probabilità di riutilizzo dei pezzi, sono calibrati per riflettere operazioni realistiche. I risultati mostrano che i costi di trasporto aumentano quando i fornitori hanno

bassa capacità. Nello scenario 6, che ha fornitori con capacità ridotta, si registrano ricavi e profitti minimi, anche se i costi totali sono bassi. Il massimo ricavo totale si osserva nello scenario 14, ma il massimo profitto è nello scenario 2, grazie ai costi minimi. Lo scenario 6 si differenzia dagli altri per la bassa capacità del fornitore, mentre la differenza tra lo scenario 2 e 14 sta nel valore della soglia d'incentivo di mercato: è più alta nello scenario 2. Aumentare la capacità dei fornitori è essenziale per incrementare i ricavi. Raccogliere più prodotti restituiti è cruciale, poiché la domanda di ricondizionati è alta ma l'offerta scarsa. Lo scenario 2 è il più profittevole, con: pubblicità 1 ogni 2 giorni, bassa consapevolezza ambientale, capacità fornitori: 100, soglia incentivi mercato: 1.5 La scarsità di prodotti ricondizionati causa aumento dei costi per domanda non soddisfatta. Nei 3 scenari più redditizi, i fattori che stimolano l'acquisto di prodotti ricondizionati sono bassi. Per quanto riguarda le conclusioni possiamo dire che il modello ABM è adatto a gestire le complessità delle CLSC, in particolare quando ci sono flussi inversi difficili da modellare con approcci tradizionali. Il comportamento del cliente, dinamico e incerto, è modellato in modo realistico, migliorando la qualità delle decisioni strategiche. L'architettura proposta è flessibile e può essere estesa in studi futuri considerando: tempi di trasporto, tassi di occupazione dei veicoli, costi di stoccaggio, concorrenza tra produttori e scelte sociali e sostenibilità. Il modello ha potenziale per essere applicato a casi reali, offrendo un vantaggio competitivo grazie alla capacità di adattarsi in tempo reale ai cambiamenti del sistema.

(12)

7. SOFTWARE SIMIO

7.1 Utilizzo del software per logistica, simulazione e previsioni

Le catene di fornitura sono reti complesse e dinamiche che collegano diverse aziende e attività come produzione, spedizione e consegna. La logistica è cruciale per coordinare il movimento dei prodotti in modo tempestivo, sicuro ed efficiente. Un aspetto chiave è la gestione corretta dei materiali in entrata e la pianificazione delle consegne, per soddisfare gli ordini dei clienti. In linea con gli obiettivi dell'Industria 4.0, il progetto UH4SP (Unified Hub for Smart Plants) è stato sviluppato dall'azienda portoghese Cachapuz, in collaborazione con l'Università del Minho. L'obiettivo è integrare e condividere informazioni tra tutti gli attori della supply chain, con una soluzione architeturale conforme ai principi dell'Industria 4.0. Il sistema è pensato per essere usato non solo da Cachapuz, ma anche da altre aziende con operazioni simili (es. pesatura e carico/scarico di camion), in settori come cemento, cereali,

pomodoro, ecc. La simulazione è stata impiegata per visualizzare i flussi di veicoli e navi attraverso diversi mezzi di trasporto (strada, ferrovia, mare), facilitando la pianificazione industriale. Un caso studio è stato realizzato in uno stabilimento del settore cementiero a Maia (Portogallo), dove sono stati raccolti dati per sviluppare un modello di simulazione realistico con Simio, uno strumento di simulazione orientato agli oggetti. Questo ha permesso di: modellare il comportamento dei singoli elementi fisici del sistema, automatizzare la creazione di modelli simili per altri impianti industriali e rispettare gli standard dell'Industria 4.0. L'obiettivo del documento è presentare i risultati ottenuti da una specifica istanza del modello di simulazione applicato all'impianto cementiero. I prodotti considerati in questi settori sono materiali ingombranti, con elevati costi di trasporto e che non aggiungono valore diretto al prodotto finale. I costi nell'industria del cemento dipendono essenzialmente dalla posizione geografica dello stabilimento e da altre caratteristiche del layout che possono influenzare le operazioni logistiche. Le aziende tendono a localizzarsi vicino alle fonti di materie prime, come cave di pietra. Tuttavia, la presenza di materie prime non garantisce automaticamente la costruzione di una fabbrica, poiché devono essere considerati anche i costi di estrazione, l'investimento necessario e i costi di trasporto. Secondo Kamble et al., nell'industria del cemento si utilizzano tre modalità di trasporto per le merci in entrata e uscita: strada, ferrovia e trasporto marittimo. Ad esempio, può risultare più conveniente trasportare materiale dal Portogallo a Manaus (Brasile) via nave, piuttosto che da un'altra città brasiliana via strada. Questo dimostra quanto siano rilevanti i costi di trasporto e la necessità di valutarli accuratamente. Srisurin e Singh hanno proposto un modello di simulazione per il processo di carico del cemento sfuso in una fabbrica thailandese, con l'obiettivo di massimizzare l'utilizzo dei tempi di attesa dei camion e il tempo di inattività dei macchinari. Sebbene simile all'approccio del presente caso studio, il loro modello si concentra solo sul processo di carico. Vik et al. hanno utilizzato Simio per simulare le operazioni logistiche di un impianto cementiero generico, con l'obiettivo di valutare il layout ideale e generare automaticamente modelli applicabili a diversi impianti. Tuttavia, modificare strutture fisiche (es. costruire o demolire impianti) è economicamente non sostenibile in questo settore. Pertanto, i loro modelli sono stati pensati per testare scenari con diversi livelli di domanda senza modificare le strutture esistenti. Abogrean ha invece analizzato i problemi di manutenzione in una fabbrica libica, sviluppando un modello in WITNESS, che combina simulazione discreta e continua. Questo modello valuta i rischi di guasti e consente di pianificare la manutenzione preventiva o correttiva, testando diversi parametri in base a scenari di domanda. Lo stabilimento

analizzato in questo studio si trova a Maia, Oporto (Portogallo) ed è di proprietà di InterCement. Non si occupa della produzione di cemento o clinker, ma funge da centro di distribuzione, utilizzando anche soluzioni di pesatura per i clienti che caricano materiali dalla fabbrica. La fabbrica è collegata da tre rotte principali: ferrovia (interna, condivisa con un ente pubblico), strada (camion) e Mare (porto a circa 21 km).

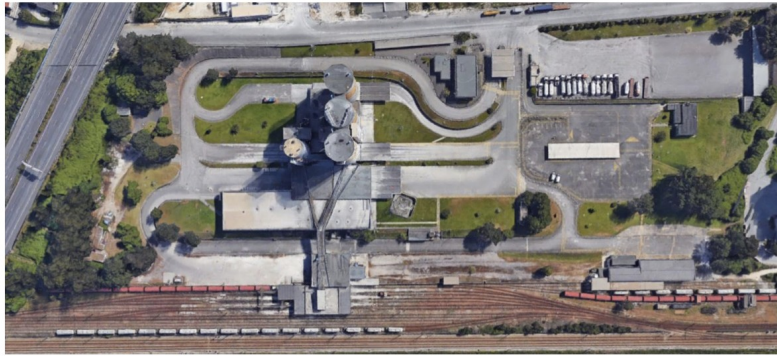


Fig.1 Stabilimento Oporto (Portogallo)

Le ferrovie sono automatizzate e non costituiscono un vincolo logistico, ma sono comunque incluse nel modello perché in altri contesti potrebbero esserlo. Al contrario, il trasporto su strada è critico perché: serve a consegnare materiali ai clienti e porta materiali dalle navi alla fabbrica. Questa seconda funzione è problematica per via delle restrizioni portuali: tempi di ormeggio limitati, concorrenza per gru e risorse, e orari ridotti. Quando una nave arriva, la fabbrica deve dare priorità ai camion che trasportano i materiali scaricati, per evitare costi di trattenimento elevati della nave. Un ulteriore problema è il mancato monitoraggio dei camion in attesa nel parcheggio: la fabbrica non sa quanti siano. Alcuni autisti, stanchi di aspettare, abbandonano la coda, causando perdita di clienti. Lo studio si è focalizzato sull'analizzare code di attesa e vincoli di capacità interni nello scenario attuale e in scenari proposti, valutare il tasso di occupazione e tempo di sosta dei camion nel parcheggio (attualmente ignoti alla fabbrica) e realizzare simulazioni con diversi scenari di domanda. Il primo passo nello sviluppo del modello è stata un'indagine sui requisiti, svolta tra i portatori di interesse: membri dell'azienda e dell'università. Si è deciso che il modello si sarebbe concentrato sui flussi logistici e sull'impatto delle operazioni, piuttosto che su una modellazione dettagliata dei processi produttivi (es. produzione di materie prime). Materiali infiniti: si assume che i materiali siano sempre disponibili. Anche se mancanze possono causare ritardi, le osservazioni hanno mostrato che è un evento raro. Caratteristiche dei

camion (dimensioni, accelerazione) non considerate. Ogni camion trasporta un solo tipo di prodotto e carica/scarica in un solo punto.

Il modello è stato diviso in quattro componenti:

- Strade e percorsi: costruiti usando oggetti "Path" e "TransferNode" in Simio, con l'aggiunta di texture realistiche.
- Infrastrutture: cancelli di entrata/uscita, silos e magazzini.
- Veicoli: tipi di camion con regole di ingresso diverse.
- Elementi esterni: ferrovia, ponti e strutture realistiche in 3D.

Camion per carico sfuso: seguono la regola FIFO ma non si fermano al cancello; la tara viene registrata nei silos. Camion per carico confezionato: anche questi seguono FIFO ma devono fermarsi e pesarsi all'ingresso; il buffer di ingresso è impostato a zero per gestire le code prima del cancello. I silos: 4 silos, ciascuno serve 1 camion alla volta, mentre il magazzino ha capacità per 4 camion contemporaneamente. Si è usata la funzione "Routing by Sequence" di Simio per definire i percorsi fissi dei camion. Inoltre, sono stati integrati oggetti 3D realistici (come ferrovie e ponti) per rendere il modello più comprensibile e visivamente accattivante.



Fig.1 Progetto 3D in analisi

Il modello simulativo, basato su Simio, rappresenta fedelmente la logistica dello stabilimento InterCement e consente di analizzare le prestazioni operative considerando diversi tipi di camion, infrastrutture e percorsi, con un elevato livello di realismo e flessibilità. Al fine di valutare il sistema e gli effetti causati dal flusso di veicoli, sono stati considerati alcuni parametri, ovvero: tempo medio di attesa delle entità nel parcheggio, tempo medio delle entità nel sistema, numero medio di camion in percorso verso il magazzino e numero medio

di camion in percorso verso i silos. Le seguenti sottosezioni di questa sezione si concentrano sulla conduzione di esperimenti di simulazione, utilizzando il modello di simulazione sviluppato e analizzando i risultati ottenuti. A tale proposito, la sezione successiva si concentra sull'esecuzione di uno scenario equivalente allo scenario attuale nell'impianto analizzato. A sua volta, la seconda sottosezione si concentra sulla valutazione della capacità massima dell'impianto e l'ultima sottosezione si concentra sull'impatto dell'arrivo di una nave cargo sull'impianto. Andando ad analizzare sul campo i dati si è evidenziato che il sistema è sottoutilizzato: nessuna coda significativa né tempi di attesa rilevanti. I camion cisterna e per materiali insaccati operano con alta efficienza. Il tempo medio nel sistema per i camion cisterna aumenta di circa 1h30m. La capacità effettiva del magazzino è 30.000 sacchi, non 50.000 come dichiarato. Per quanto riguarda lo scenario dell'arrivo della nave cargo possiamo dire che i camion per scaricare la nave hanno lunghi tempi di attesa (87 min). La fabbrica non riesce a scaricare tutto in un giorno lavorativo: servono oltre tre giorni. Il problema è nel circuito d'ingresso, non nel magazzino o nei silos. Questo articolo presenta il lavoro svolto nell'ambito di un progetto sviluppato in collaborazione tra l'Università del Minho e Cachapuz, un'azienda di proprietà del Gruppo Bianciai. L'obiettivo generale del progetto è integrare e fornire informazioni sulla catena di approvvigionamento, attraverso lo sviluppo di un'architettura allineata all'Industria 4.0, mentre lo scopo concreto della simulazione è modellare le operazioni logistiche di un cementificio, ma anche di altre aziende di settori simili. Le attività principali includono: l'ingresso dei camion da caricare, la pesatura dei camion in arrivo, il carico dei camion con il materiale e la pesatura dei camion in uscita con il materiale. Pertanto, diversi settori possono incorporare queste attività, ad esempio cemento, cereali e pomodoro. In questo modo, la simulazione consente la visualizzazione dei flussi di entità (veicoli e navi cargo) in entrata e in uscita dall'impianto, attraverso diverse tipologie di percorso (ad esempio, via mare, strada, ferrovia), concentrandosi sulle attività precedentemente identificate, applicate a un caso di studio selezionato dell'industria del cemento. Sebbene non trattati in questo articolo, i modelli possono anche essere creati automaticamente. Dopo aver presentato il caso di studio e il processo di raccolta dati condotto, il modello è stato validato per condurre una serie di esperimenti che hanno permesso di valutare la capacità massima dell'impianto e l'impatto sulle sue prestazioni dell'arrivo di una nave cargo. A tal proposito, è stato possibile verificare che sono necessari almeno 3 giorni lavorativi (circa 26 ore) per recuperare tutto il carico dalle navi, pur mantenendo un flusso di lavoro e operazioni logistiche costanti all'interno dell'impianto. È interessante notare che, senza questo modello di simulazione, i responsabili

dell'impianto non sapevano quanto tempo sarebbe stato necessario per recuperare tutto il carico dalle navi. Pertanto, grazie all'artefatto proposto, i responsabili dell'impianto possono ora applicare lo strumento a impianti con attività simili, visualizzarne i flussi logistici per individuare modelli insoliti e persino testare scenari alternativi, consentendo un approccio proattivo anziché reattivo. Con il lavoro proposto, gli autori sperano anche di contribuire alla letteratura sui casi industriali di simulazione nei contesti dell'Industria 4.0, poiché alcuni degli studi esaminati hanno suggerito la scarsità di tali studi. Come lavoro futuro, l'obiettivo principale è pubblicare il lavoro relativo alla generazione automatica di modelli di simulazione, al fine di applicare questa soluzione a diversi impianti di settori simili. Questo lavoro è già in corso. (13)

7.2 Utilizzo del software in ambiti farmaceutici

Per mantenere competitive le operazioni manifatturiere, è essenziale una continua ricerca di opportunità di ottimizzazione, oggi più che mai (Spath et al. 2017). Questo è particolarmente vero nell'industria farmaceutica, dove la fornitura continua di prodotti critici è fondamentale. Si può sostenere che tempi di consegna brevi e puntualità nella distribuzione siano importanti tanto quanto la maturità tecnologica dei prodotti (März et al. 2011). Per questo, è cruciale comprendere bene i parametri controllabili nell'ambiente produttivo. Conoscere come adattare questi parametri in tempo reale, in base al carico di lavoro e alla domanda, è essenziale per raggiungere tali obiettivi. Si stima che il potenziale complessivo di ottimizzazione dei processi (ad esempio tramite simulazioni) possa arrivare fino al 40% (Blocher et al. 1999; Nunnally e McConnell 2007). Solo la pianificazione della produzione può migliorare l'efficienza fino al 7,9% (Eberle et al. 2016). I Digital Twin (gemelli digitali) sono strumenti potenti per il supporto decisionale in tempo reale nei contesti produttivi complessi. Utilizzano dati in tempo reale per supportare simulazioni, previsioni e ottimizzazioni, migliorando la qualità del prodotto, l'efficienza e riducendo i costi (Lu et al. 2020; Negri et al. 2017). Essi possono essere impiegati in: pianificazione e controllo della produzione, manutenzione predittiva e gestione dello stato delle macchine e pianificazione e ottimizzazione del layout. In futuro, è probabile che la maggior parte dei sistemi fisici abbia un proprio gemello digitale, anche se la loro implementazione richiede tempo e modellazione dettagliata (Qi et al. 2019). I Digital Twin possono essere applicati a livello di stazione di lavoro, di sistema produttivo o di prodotto. Tre categorie di modelli digitali (Kritzinger et al. 2018): Digital Model – modello basato su input manuali. Digital Shadow – modello con flusso dati automatico dal fisico al digitale. Digital Twin – flusso dati automatico

bidirezionale tra fisico e digitale. L'industria farmaceutica è lenta nell'adozione delle tecnologie digitali, per motivi regolatori e per la complessità dei suoi processi (Markarian; Boukouvala & Ierapetritou 2013). Tuttavia, con la scadenza di brevetti e la carenza di personale qualificato, cresce la necessità di digitalizzazione (Steinwandter et al. 2019). L'iniziativa Quality by Design (QbD) della FDA promuove l'uso di approcci basati su dati e rischi. In questo contesto, l'ottimizzazione della produzione mira più alla robustezza del processo e alla trasparenza, che alla semplice riduzione dei lotti difettosi. La simulazione, base dei Digital Twin, consente: ottimizzazione economica e ambientale, sviluppo integrato di prodotto e processo e intensificazione del processo (consolidamento delle fasi). I benefici stimati sono significativi: fino al 7,9% solo dalla pianificazione e fino al 40% grazie a una piena ottimizzazione tramite simulazione. L'adozione dei Digital Twin può rivoluzionare la produzione farmaceutica, migliorando efficienza, qualità, sostenibilità e reattività, pur richiedendo tempo e risorse per l'implementazione completa. Il termine "simulazione" è molto diffuso nel mondo scientifico ed è diventato un principio fondamentale, soprattutto nelle scienze naturali. Tuttavia, i benefici di questo metodo non si riflettono pienamente nella sua diffusione nell'industria. Ciò è dovuto a diversi motivi, tra cui spesso una semplice mancanza di conoscenza riguardo le applicazioni e il potenziale della simulazione (März et al. 2011). Le simulazioni sono particolarmente utili quando: Non esistono soluzioni analitiche o queste richiedono un calcolo eccessivo, gli input/output del sistema sono solo parzialmente noti o descrivibili in modo stocastico, e/o il sistema si comporta in modo dinamico, ovvero cambia nel tempo (Schulte 2017). Nel contesto delle simulazioni, si riproducono in un sistema informatico ambienti reali, pianificati o teorici, allo scopo di ottenere conoscenze utili trasferibili alla realtà (VDI 4465, 2016). Generalmente, la simulazione viene impiegata come metodo di risoluzione problemi o previsione, per supportare processi decisionali. Il modello viene caricato con carichi di sistema (attesi o reali) e si osservano gli stati che ne derivano. Da questa analisi, si possono determinare soluzioni quasi ottimali (Schulte 2017). Tuttavia, una simulazione non accompagnata da ottimizzazione rientra nell'ambito delle euristiche e quindi non garantisce una soluzione matematica ottimale. In senso ampio, il termine "simulazione" include non solo modellazione ed esperimenti, ma anche preparazione, esecuzione e valutazione (VDI 4465, 2016). Secondo Jünemann (1989), esistono quattro domande base nella simulazione: Simulazione della funzionalità tecnica e dell'organizzazione del sistema (sistema e carico noti), determinazione dei limiti prestazionali (sistema noto, carico non noto), analisi di varianti tecniche e organizzative (sistema non noto, carico noto) e affermazioni generali su strutture

di sistema (sistema e carico non noti). Questa tesi si concentra su simulazioni in cui sia il sistema che il carico sono già definiti. Infine, le simulazioni si classificano anche in base a comportamento, transizione di stato e variabili casuali del sistema (Smith et al. 2018). Lo studio in oggetto si basa su simulazioni dinamiche, discrete e stocastiche, spesso indicate come Simulazioni ad Eventi Discreti (DES). Per la simulazione, viene utilizzato il software di simulazione "Simio" dell'azienda statunitense Simio LLC (Pittsburgh), che fornisce una soluzione completa per la progettazione (modellazione), l'emulazione, la sperimentazione, la valutazione e la pianificazione (schedulazione, diagramma di Gantt, ecc.) dei sistemi. Simio persegue un concetto ibrido di filosofia di modellazione orientata agli oggetti e ai moduli. Ciò significa che la modellazione dei modelli di simulazione viene eseguita utilizzando elementi di modello standard preconfigurati (i cosiddetti moduli), che vengono collegati, parametrizzati e, se necessario, modificati dall'utente. In questo caso, ogni modulo del modello riflette un oggetto, che a sua volta riflette i componenti fisici del sistema "originale". In questo processo, gli oggetti comunicano tra loro e reagiscono agli eventi con un comportamento definito dall'utente, definito da un cosiddetto "modello interno" che specifica come un oggetto dovrebbe reagire agli eventi nel sistema (Joines e Roberts, 2015). Inoltre, va sottolineato che, in termini di qualità, la modellazione orientata agli oggetti e/o ai moduli può portare a un modello "migliore", poiché è meno soggetta a errori di programmazione e presenta una minore complessità di modellazione rispetto ad altre filosofie di modellazione (ad esempio il concetto di linguaggio). Ogni simulazione inizia con la creazione di un modello, che è una rappresentazione semplificata del sistema reale. La sfida principale è trovare il giusto livello di dettaglio: né troppo complesso né troppo semplice. Questo richiede astrazione, ottenuta attraverso: Riduzione, eliminare ciò che non è rilevante. O idealizzazione: semplificare ciò che lo è, partendo da casi generali o specifici. Il sistema viene rappresentato attraverso i suoi processi principali, ignorando elementi esterni (definiti al confine del sistema). Nel caso di studio, è stato adottato un approccio top-down e orientato agli ordini (order-oriented), dove il comportamento del sistema viene visto dal punto di vista di un ordine di produzione. Sono stati creati 15 modelli iterativi per perfezionare il livello di dettaglio. Il modello visivo è stato realizzato nel software Simio, utilizzando oggetti predefiniti (es. camere, moduli, sorgenti e destinazioni). La casualità (es. nei tempi di processo) è stata rappresentata con distribuzioni statistiche (Triangolare, Discreta, Normale, Uniforme), ma non si sono modellati guasti per mancanza di dati. Il modello si basa su dati tabellari per guidare il flusso degli ordini e utilizza un sistema interno simile a un MES. Infine, la logica operativa è stata implementata tramite low-code

programming con 23 processi attivati da eventi (es. entrata, uscita, ecc.). La simulazione richiede prima la creazione di un modello che rappresenti il sistema in modo semplificato. La modellazione implica scegliere un livello di dettaglio adeguato all'obiettivo, con l'approccio "dettagliato quanto basta". Si usano metodi di astrazione come riduzione e idealizzazione. Il sistema è stato modellato in modo orientato ai processi e agli ordini, con 15 versioni iterative secondo un approccio top-down. È stato utilizzato il software Simio per costruire un modello visivo composto da oggetti come camere e moduli, parametrizzati con proprietà fisiche e operative. Il modello include la variabilità casuale (es. tempi di lavorazione) usando distribuzioni statistiche, ma esclude guasti. Il flusso degli ordini è gestito tramite tabelle dati collegate da un "task sequence router", e la logica operativa è stata programmata tramite processi automatizzati (23 in totale), attivati da eventi specifici nel sistema.

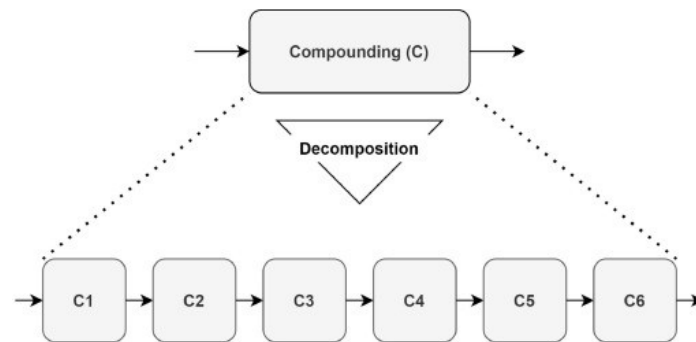


Fig.1 Tabella dati collegati da "Task sequence router"

Per quanto riguarda i risultati l'analisi di sensitività valuta quanto un parametro di input influenzi una variabile di output del modello (in questo caso, il lead-time, cioè il tempo totale per completare un ordine). Si è cercato di capire quali fasi di processo influiscono maggiormente e quali invece possono essere trascurate. Percorso critico: è stato individuato il percorso critico del processo, ovvero la sequenza di fasi in cui un ritardo genera un ritardo complessivo. Per ogni prodotto, questo percorso può variare. Per esempio, i prodotti A, B, E e G hanno due passaggi "S" (fasi S), mentre C, D e F ne hanno uno solo. Analisi di regressione e correlazione: ogni fase è stata analizzata facendo variare la sua durata tra 0% e 200% rispetto al tempo obiettivo. Si è osservato come il lead-time reagisce a questi cambiamenti usando regressione multidimensionale e correlazione di Pearson. Per il prodotto A, 6 fasi risultano critiche, 5 tecniche e 1 organizzativa. Quattro mostrano una correlazione quasi lineare con il lead-time. Implicazioni pratiche: una tale analisi consente di identificare in anticipo i colli di bottiglia, così da intervenire tempestivamente e non agire

sotto pressione. Le campagne di produzione e i cambi di lotto hanno analizzato che con la produzione di campagne si simula l'effetto del raggruppamento di ordini simili (campagne), ottenendo un miglioramento medio del 4,3% nel lead-time. La validazione della matrice di cambio lotto: si è invertita la sequenza ottimale di cambi tra prodotti (es. $A \rightarrow B$ diventa $B \rightarrow A$) per verificare se il tempo si riduce. Alcuni ordini inversi (es. A prima di B, C prima di D) hanno portato a una riduzione del lead-time tra il 2,4% e il 7%. La riduzione media complessiva è stata del 5,03%. I vantaggi ottenuti riguardano la simulazione che aiuta i pianificatori a gestire meglio le complesse interazioni di sistema e a ridurre il lavoro manuale. Sono poi stati testati modelli a 2 e 3 turni su diverse combinazioni di giorni lavorativi (lun-ven, lun-sab, lun-dom), con estensioni orarie opzionali. Come risultati si hanno che i valori mediani di output mostrano quale combinazione turno/giorni sia più efficace. La simulazione consente anche di prevedere in anticipo eventuali ritardi e scegliere la strategia più adatta. Importante la schedulazione degli ordini, si è quindi simulata l'ottimizzazione della sequenza tramite permutazioni: 120 sequenze generate (da 5 campagne), 9 delle quali hanno ridotto il lead-time fino al 5,7%. Conclusione: la simulazione permette di automatizzare e ottimizzare la pianificazione degli ordini, con maggiore precisione rispetto ai sistemi ERP/MES. Infine, si è analizzata anche la valutazione del rischio dovuto alla mancata consegna il cui obiettivo è quello di verificare se è possibile completare l'80% del volume annuale rimanente con il 50% della disponibilità residua. Scenario 1: turnazione continua 3-turni lunedì-domenica. Risultato: tutti gli ordini completati con 8,2% di disponibilità residua, con un output effettivo stimato maggiore del 2,3%. Rischio di mancato completamento: 0% (worst case: 3,7%). Scenario 2: variazione delle caratteristiche del sistema. L'unica opzione praticabile è stata sequenziare gli ordini rimanenti in una campagna estesa, ma ciò richiede stimolare la domanda per evitare lunghi tempi di consegna. Output: 4 modelli di turno su 30 hanno garantito il volume previsto anche con un tasso di scarto del 17,5%, con relativi rischi documentati. Lo studio ha dimostrato come l'utilizzo della simulazione sia uno strumento efficace per migliorare i tempi di attraversamento (lead-time) nei processi produttivi discreti dell'industria farmaceutica, prendendo come caso studio la linea di produzione di farmaci sterili presso Roche Diagnostics GmbH a Mannheim, Germania. Risultati principali: Analisi di sensibilità: ha permesso di identificare i passaggi di processo con maggiore impatto sui lead-time, rendendo trasparente la loro influenza. Ottimizzazione della pianificazione: il miglioramento nella sequenza degli ordini e la formazione di campagne produttive (batch simili in successione) hanno portato a una riduzione significativa del lead-time. Valutazione dei rischi di consegna: ha mostrato che la simulazione può quantificare i rischi legati al

mancato raggiungimento dei volumi produttivi previsti, migliorando la gestione proattiva. Modelli di turnazione: è stato possibile stimare l'impatto quantitativo di diversi modelli di turni sulla produttività e identificare combinazioni più efficienti. Prospettive future: I risultati aprono la strada all'uso di un Digital Twin in tempo reale: una replica digitale della linea produttiva, alimentata costantemente da dati aggiornati provenienti da sistemi MES o ERP. Questo permetterà: di individuare i colli di bottiglia e i processi critici in tempo reale, di adattare dinamicamente la pianificazione produttiva in base allo stato attuale (es. guasti, velocità macchinari), di integrare dati su risorse disponibili (personale, macchinari) per ottimizzare le previsioni di performance, di condurre valutazioni probabilistiche continue sui rischi e infine, di automatizzare le decisioni con feedback diretto ai sistemi di controllo e pianificazione. Per quanto riguarda l'impatto industriale possiamo dire che l'approccio basato sulla simulazione si è rivelato efficace anche in un contesto altamente regolamentato come quello farmaceutico, migliorando la qualità della pianificazione e il supporto decisionale. Questo si traduce in: una maggiore competitività, costi più contenuti, tempi di consegna ridotti e una possibile applicazione estesa ad altre fasi produttive, come il bio-processing, seppur con attenzione alla natura continua (anziché discreta) di tali sistemi. (14)

7.3 Implementazioni e collaborazioni con altri software

Lo studio affronta l'uso avanzato della modellazione tramite simulazione come strumento decisionale nelle organizzazioni, evidenziandone le applicazioni in ambiti diversi come sanità, manifattura, servizi, supply chain e analisi dei rischi. La simulazione, oltre a fornire un'astrazione realistica del mondo reale, può giustificare modifiche nei sistemi aziendali, ma presenta dei limiti, soprattutto quando deve integrare attività decisionali umane o algoritmi di ottimizzazione complessi. Il problema affrontato riguarda software di simulazione tradizionali (es. SIMIO) riescono a gestire regole operative semplici (es. FIFO, SPT), ma: faticano a rappresentare decisioni complesse e intelligenti, non sono linguaggi di programmazione general-purpose, richiedono tempi e competenze elevate per sviluppare funzioni personalizzate e non riescono a gestire bene calcoli matematici intensivi o logiche decisionali avanzate. Un esempio concreto è presentato con un sistema di produzione a tre stadi con macchine parallele non identiche, dove la gestione ottimale della sequenza di prodotti è influenzata da tempi di setup dipendenti dalla sequenza, rendendo necessaria un'ottimizzazione dinamica e specifica. Gli autori propongono un'integrazione ibrida tra: SIMIO, che funge da motore di simulazione e MATLAB, utilizzato come gestore computazionale e strumento di ottimizzazione. Questa architettura, resa possibile grazie

all'API di SIMIO, permette al modello simulativo di invocare MATLAB in tempo reale per eseguire logiche complesse (ottimizzazione, fuzzy logic, MCDM, reti neurali, calcoli matematici, ecc.). L'obiettivo è quello di creare un nuovo step personalizzato in SIMIO che richiami MATLAB all'interno della simulazione. Presentare un modello IOS (Iterative Optimization-based Simulation) come caso di studio per validare l'approccio. Dimostrare l'efficacia della soluzione in altri settori come sanità, supply chain e gestione progetti, offrendo spunti per ricercatori e decisori. Questo approccio offre una nuova dimensione alla simulazione, aumentandone l'intelligenza, la precisione e l'adattabilità: supporta decisioni basate su logiche avanzate e dati dinamici, riduce lo sforzo di sviluppo personalizzato e rende possibile il collegamento diretto tra ambienti simulativi e strumenti di ottimizzazione già consolidati. In sintesi, lo studio propone una soluzione concreta ai limiti dei simulatori tradizionali, spingendo verso una simulazione intelligente e ibridata, capace di riflettere più fedelmente i processi decisionali reali e di supportare l'adozione pratica in diversi settori. La Discrete Event Simulation (DES) è efficace per modellare sistemi complessi, ma ha limiti nell'integrare logiche decisionali avanzate. Per superarli, molti studi hanno unito la simulazione con moduli intelligenti come: Ottimizzazione, per migliorare la pianificazione; Logica fuzzy, per gestire incertezze e conoscenze soggettive; MCDM (es. AHP, TOPSIS), per supportare decisioni multi-criterio; Reti neurali, per ridurre il carico computazionale; MATLAB, per estendere le capacità matematiche dei modelli. Tuttavia, questi approcci sono spesso rigidi e personalizzati, non adatti a cambiamenti frequenti. Lo studio propone un'estensione a SIMIO, che integra MATLAB per creare un framework flessibile, capace di supportare decisioni complesse e dinamiche in modo realistico e continuo. La sezione descrive l'architettura concettuale di un framework intelligente che integra il software di simulazione SIMIO con l'ambiente computazionale MATLAB, per superare i limiti delle simulazioni tradizionali nel gestire decisioni complesse. La struttura generale: la simulazione è gestita da SIMIO, ma quando serve un calcolo avanzato (es. ottimizzazione), l'esecuzione viene pausata e viene chiamato MATLAB per elaborare e restituire il risultato. I dati vengono scambiati tramite formati comuni (es. Excel, .txt, database come MySQL), con preferenza per i database in caso di simulazioni lunghe o con molti dati. I componenti: MATLAB (Computational Manager): scelto per la sua potenza di calcolo, facilità d'uso e capacità di integrazione tramite COM. È ideale per eseguire algoritmi avanzati come MCDM, reti neurali, fuzzy logic. SIMIO (Simulation Manager): software a eventi discreti con un'interfaccia intuitiva e API potente. Permette di modificare il comportamento degli oggetti

tramite processi personalizzati. È stato creato un nuovo step chiamato CallMATLAB per integrare direttamente MATLAB nelle simulazioni.

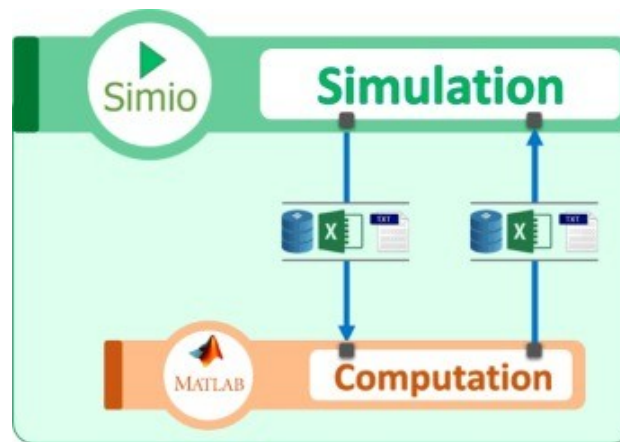


Fig.1 Collaborazione tra i due software in analisi

In questa sezione viene presentato brevemente lo step personalizzato CallMATLAB sviluppato per SIMIO. Il processo tecnico di sviluppo è descritto dettagliatamente nell'Appendice A, con linee guida e codice C# per chi vuole approfondire o personalizzare lo step. Per creare CallMATLAB, dopo aver installato SIMIO, si aggiunge un template in Visual Studio che permette di programmare nuovi "step" usando C#. CallMATLAB richiede due proprietà principali: Folder Address, il percorso della cartella dove si trova il file MATLAB, Function Name, il nome del file MATLAB da eseguire. Il problema affrontato riguarda la programmazione di lavori su macchine parallele non correlate, con tempi di lavorazione diversi per ogni macchina e tempi di setup dipendenti dalla sequenza. L'obiettivo dell'articolo è minimizzare il tempo massimo di completamento e i costi totali di anticipo e ritardo. Vengono fatte diverse assunzioni, come l'assenza di preemption e macchine indipendenti con capacità buffer illimitata. Nel modello, i lavori arrivano "on event" quando il numero di lavori in coda scende sotto una soglia, e la simulazione si ferma dopo 2 giorni. Tre eventi principali (arrivo di nuovi lavori, guasti e riparazioni delle macchine) richiedono il rilancio della schedulazione. Quando accade uno di questi eventi, la simulazione (gestita da SIMIO) si mette in pausa e chiama MATLAB per ottimizzare la nuova pianificazione. Sono usati tre algoritmi metaeuristici per l'ottimizzazione: Algoritmo Genetico (GA), Simulated Annealing (SA) e Particle Swarm Optimization (PSO). Questi generano permutazioni per assegnare i lavori alle macchine, utilizzando delimitatori per separare le sequenze di ciascuna macchina. Lo scopo non è confrontare le prestazioni degli algoritmi, ma dimostrare la capacità del sistema integrato SIMIO-MATLAB. Per validare il modello,

sono stati effettuati test numerici, debug del codice, verifica della logica di processo e controllo della robustezza tramite animazioni e tracce del sistema. L'esperimento ha confrontato tre ottimizzatori (Genetic Algorithm, Simulated Annealing e Particle Swarm Optimization) valutando tempo di esecuzione, costo medio di ritardo/anticipo e tempo massimo di completamento dei lavori. Il tempo di esecuzione è risultato simile per tutti gli algoritmi, dato che è stato fissato lo stesso numero di valutazioni della funzione obiettivo (NFE = 2000). In termini di costo medio di ritardo/anticipo, Simulated Annealing ha mostrato una performance significativamente migliore rispetto agli altri due algoritmi. Per il tempo massimo di completamento, non sono state riscontrate differenze statisticamente significative tra gli algoritmi, anche se PSO ha avuto una media leggermente inferiore. In sintesi, Simulated Annealing è risultato il miglior candidato per ottimizzare la schedulazione in questo caso. Si sono poi visto l'applicazioni in altri settori come sanità: la gestione della programmazione di pazienti e personale in ospedali, soprattutto in presenza di eventi imprevisti come guasti, emergenze o cambi di personale. Supply Chain Management: ottimizzazione dinamica di catene di fornitura con variazioni di domanda, capacità dei fornitori, trasporti e prezzi, permettendo di adattarsi rapidamente a cambiamenti. Project Management ovvero supporto nella gestione e schedulazione di progetti con vincoli di risorse e attività interdipendenti, considerando l'incertezza temporale e dei costi tramite simulazione e ottimizzazione integrate. Per i software di simulazione è difficile modellare in modo efficiente un gran numero di metodi decisionali umani e aspetti computazionali di un sistema reale. Questo articolo propone una nuova istanza del passo SIMIO che integra un software di simulazione con un agente computazionale per eseguire operazioni computazionali complesse come l'ottimizzazione. Diverse applicazioni presentate illustrano la potenziale applicabilità del passo CallMATLAB proposto, come la modellazione IOS. Questa istanza del passo non si limita all'ottimizzazione e può essere utilizzata per eseguire qualsiasi tipo di calcolo computazionale complesso. Si noti che il trasferimento dati tra MATLAB e la simulazione può essere effettuato tramite un database o altri tipi di file di dati, come Excel o file di testo. Riteniamo che questo progresso aggiunga una nuova dimensione agli approcci di modellazione simulativa. Ciò consentirebbe agli esperti di apprezzare la simulazione di modellazione implementando al contempo i propri strumenti logici e decisionali all'interno dell'esecuzione della simulazione, sfruttando potenti risorse computazionali come MATLAB. L'istanza del passo CallMATLAB proposta in SIMIO potrebbe essere utilizzata per sviluppare un framework IOS che aiuti i programmatori ad

applicare i propri algoritmi e tecniche di ottimizzazione per valutare le prestazioni a lungo termine. (15)

7.4 Esperimenti svolti attraverso il software Simio

Negli anni è stata prodotta un'ampia letteratura sugli studi di simulazione applicati alla Supply Chain (SC). Tuttavia, la maggior parte di questi studi ha adottato un approccio tradizionale, basato su distribuzioni statistiche per modellare i processi, spesso senza utilizzare dati reali. Ciò limita il realismo e il coinvolgimento degli stakeholder. L'uso di Data Warehouse (DW), che integrano dati da più fonti, è stato proposto per migliorare l'accuratezza dei modelli di simulazione. Con l'avvento dell'Industria 4.0 e delle tecnologie Big Data, è aumentato l'interesse per combinare queste tecnologie con la simulazione. Tuttavia, gli strumenti tradizionali come i DW non sono più sufficienti a gestire l'elevato volume, velocità e varietà dei dati. Di conseguenza, è necessario adottare nuove tecnologie capaci di archiviare, integrare e processare grandi quantità di dati, per estrarre valore utile. In questo contesto è stato avviato un progetto per sviluppare un sistema di supporto decisionale (DSS), composto da un Big Data Warehouse (BDW) e un modello di simulazione SC. Il BDW raccoglie e integra dati reali dei processi della catena di fornitura, che vengono poi utilizzati dal modello di simulazione per replicare i flussi di materiali e informazioni. Questo consente previsioni, analisi di scenari di rischio, virtualizzazione dei sistemi reali e altro. Il processo di sviluppo del BDW e dei relativi requisiti è stato descritto in studi precedenti, così come l'uso di dashboard interattive basate sui dati integrati. Inoltre, un modello di simulazione SC è stato utilizzato per testare scenari di rischio reali. Obiettivo di questo articolo: condividere le esperienze sull'uso di SIMIO in contesti Big Data per simulazioni di Supply Chain, analizzando le prestazioni del software durante gli esperimenti condotti. Nel corso della sua evoluzione, l'industria ha attraversato diverse rivoluzioni industriali. L'attuale quarta fase è denominata Industria 4.0, termine nato in Germania nel 2011 per promuovere l'innovazione nella manifattura. Questo concetto si basa su tecnologie come i Cyber-Physical Systems (CPS) e l'Internet of Things (IoT), che integrano mondo fisico e digitale per creare la fabbrica intelligente. Industria 4.0 implica un cambiamento di paradigma verso sistemi decentralizzati, interoperabili e modulari, in grado di virtualizzare le informazioni e adattarsi velocemente ai cambiamenti della domanda. Secondo Lasi et al., i fattori che spingono questa trasformazione includono: necessità di personalizzazione dei prodotti ("batch size one"), efficienza e flessibilità maggiori e adozione di tecnologie come automazione, digitalizzazione, miniaturizzazione e calcolo distribuito. Industria 4.0 si fonda

su sei principi chiave: Interoperabilità tra macchine, persone e sistemi. Decisioni in tempo reale, grazie all'analisi di dati interni ed esterni. Virtualizzazione tramite copie digitali del mondo reale. Autonomia operativa dei sistemi CPS. Risposta rapida alla domanda del cliente e adattabilità rapida ai cambiamenti del mercato. L'obiettivo principale è il miglioramento dei processi industriali. Kagermann et al. sottolineano l'importanza della simulazione per analizzare sistemi complessi come le supply chain, specialmente in scenari di crisi, e suggeriscono di combinare tali metodi con tecnologie Big Data per integrare dati da fonti diverse. Studi recenti (es. Vieira et al., Zhong et al., Tiwari et al.) evidenziano: Il ruolo crescente del Big Data nella gestione della supply chain (SCM), l'importanza della simulazione come metodo analitico e il potenziale della combinazione di Big Data e simulazione per analisi predittive e prescrittive (cioè per prevedere eventi futuri e testare alternative decisionali). Infine, gli autori segnalano una lacuna nella letteratura: mancano strutture concrete che raccolgano e integrino grandi volumi di dati per alimentare modelli di simulazione delle SC. Questo gap è oggetto del loro progetto attuale, che ha già prodotto esperimenti interessanti. Questa sezione descrive i materiali e i metodi utilizzati nello studio. È suddivisa in tre sottosezioni: Descrizione del sistema di supply chain (SC) modellato nel software di simulazione SIMIO. Descrizione del framework adottato per gestire e processare i dati. Descrizione degli esperimenti, con i dati registrati per ciascuno. Il sistema modellato riguarda un produttore di elettronica per l'automotive del gruppo Bosch e la sua rete globale di fornitori. La supply chain coinvolge circa 7.000 tipi diversi di materiali, forniti da circa 500 fornitori in oltre 30 paesi. I principali paesi fornitori includono Germania, Paesi Bassi, Svizzera, Spagna, Cina, Taiwan e Malesia. La maggior parte dei fornitori proviene da Europa e Asia, con la Germania in testa (209 fornitori). Analizzando il problema chiave vediamo che i produttori automobilistici devono soddisfare rigorose norme di sicurezza e fornire alta personalizzazione del prodotto, rendendo la SC vulnerabile a interruzioni se un singolo fornitore non è disponibile. È quindi fondamentale una forte interoperabilità tra gli attori della catena. Il framework adottato è illustrato in una figura (Fig.1)

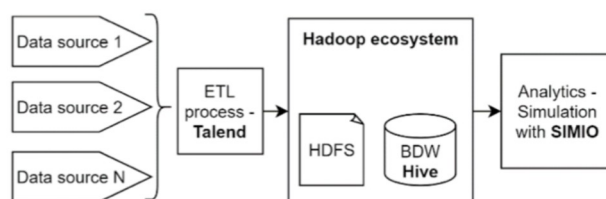


Fig.1 Componenti del framework adottato

e si compone dei seguenti passaggi: ETL (Extract, Transform, Load) dove i dati vengono estratti da diverse fonti, corretti e caricati nel sistema Hadoop (HDFS), usando il software Talend. Creazione e popolamento del Data Warehouse i dati elaborati vengono memorizzati in tabelle Hive all'interno di un Big Data Warehouse (BDW). Simulazione i dati raccolti e integrati vengono poi utilizzati in strumenti di analisi, in questo caso per modelli di simulazione sviluppati con il software SIMIO. Gli esperimenti sono stati eseguiti usando il modello di simulazione della supply chain (SC) sviluppato con SIMIO. Per ciascun esperimento, sono stati registrati e confrontati diversi elementi. Gli esperimenti sono stati i seguenti. Tipologie di esperimenti: Esperimento 1 – Include tutti i movimenti di tutti i materiali (inclusi quelli interni allo stabilimento). Esperimento 2 – Considera solo i materiali utilizzati per la produzione di beni finiti. Esperimento 3 – Basato su distribuzioni statistiche. Esperimento 4 – Basato su dati reali dal Data Warehouse (BDW), seguito da 3 anni simulati con distribuzioni statistiche. Esperimento 5 – Considera solo interruzioni nello stabilimento produttivo. Esperimento 6 – Considera interruzioni da parte dei fornitori. Esperimento 7 – Considera la variabilità dei fornitori. Esperimento 8 – Considera la variabilità dei clienti.

Gli esperimenti 1-4 mirano a riprodurre il comportamento reale della SC, usando dati reali o distribuzione statistiche, mentre gli esperimenti 5-8 testano scenari di interruzione o variabilità da parte di fornitori o clienti. Facendo delle osservazioni possiamo dire che l'esperimento 1 è stato il più pesante in termini di dati e risorse. L'esperimento 3 (solo distribuzioni statistiche) ha richiesto molto meno memoria, ma più tempo di esecuzione (180 minuti). L'esperimento 4, che combina dati reali e distribuzioni statistiche, ha richiesto fino a 600 minuti (10 ore) per una singola esecuzione. Gli esperimenti 7 e 8, con 10 repliche, hanno testato la variabilità su fornitori e clienti. Tutti gli esperimenti sono stati eseguiti su un PC con Windows Server 2016, Intel i7-6950X e 64 GB di RAM. Sono stati riscontrati problemi con i dati aziendali, come valori mancanti, errori, o fonti di dati non accessibili per motivi organizzativi. Il contesto è ritenuto Big Data, poiché il volume e la complessità dei dati hanno superato la capacità degli strumenti tradizionali. L'utilizzo del framework Hadoop e BDW è stato fondamentale per gestire quantità elevate di dati, in previsione dell'aumento dovuto all'Industria 4.0. In sintesi, la simulazione ha evidenziato come i diversi approcci (dati reali vs statistici) influenzino significativamente memoria richiesta, tempo di esecuzione e precisione del modello, confermando la necessità di tecnologie Big Data per la gestione di SC complesse. In conclusione, possiamo dire che la simulazione e il Big Data sono due ambiti di conoscenza che possono essere combinati per creare solidi sistemi di supporto alle decisioni (DSS), migliorando il processo decisionale nei

sistemi di supply chain (SC). Un DSS di questo tipo è attualmente in fase di sviluppo in uno stabilimento produttivo dell'industria elettronica automobilistica del Gruppo Bosch. Gli autori, pionieri nello sviluppo di tale strumento, hanno presentato in questo articolo i risultati di alcuni esperimenti di simulazione, sperando che servano da punto di riferimento per future ricerche. Gli esperimenti forniscono informazioni utili riguardo alla memoria richiesta, tempo di esecuzione, salvataggio e caricamento del modello, volume di dati gestiti e altri aspetti. Anche se è discutibile se il contesto possa essere definito come Big Data, il volume di dati ha comunque richiesto molta memoria e tempi considerevoli per l'esecuzione e la gestione del modello. L'esecuzione della simulazione non è stata fluida, rendendo difficile l'interazione con il modello, nonostante le elevate prestazioni del computer usato. Questo fattore, pur non evidente nei risultati numerici, può limitare l'interesse degli stakeholder verso lo strumento sviluppato. La strategia utilizzata per caricare i dati dal Data Warehouse (BDW) nel modello di simulazione ha contribuito all'elevata richiesta di memoria. Tale strategia è stata necessaria poiché connettere il modello in tempo reale al cluster Big Data rallentava eccessivamente la simulazione. Tuttavia, in futuro questa opzione potrà essere esplorata, poiché una connessione efficiente e diretta al cluster potrebbe ridurre l'uso di memoria e migliorare la fluidità della simulazione. Infine, le conclusioni del lavoro sono legate allo strumento utilizzato (SIMIO), ma gli autori ritengono che risultati simili si otterrebbero anche con altri software. Per il futuro, si auspica di aggiornare il BDW in tempo reale, dato che i dati utilizzati finora coprono solo un anno. Sarà anche utile esplorare altri strumenti di simulazione o strategie che evitino il caricamento completo dei dati nel modello.

(16)

8. SOFTWARE FLEXSIM

8.1 Utilizzi (software Flexsim) per simulazione e previsione di eventi

Nell'economia globale attuale, cresce l'attenzione non solo alla riduzione dei costi di trasporto, ma anche all'impatto ambientale. Per questo, il trasporto intermodale sta diventando sempre più diffuso, soprattutto nella logistica internazionale, grazie alla combinazione efficiente di trasporto marittimo, ferroviario e stradale. Un terminale intermodale è una componente chiave del sistema, andando oltre il semplice trasbordo: gestisce stoccaggio, consolidamento e coordinamento dei flussi di container nello spazio e nel tempo. Uno degli aspetti più importanti è il contributo alla riduzione dell'inquinamento. Secondo la politica climatica dell'UE, è necessario trasferire una parte significativa del

trasporto merci dalla strada alla ferrovia, più sostenibile, specialmente su rotte lunghe e internazionali. L'uso di container standardizzati ha facilitato questo sviluppo, migliorando la sicurezza delle merci e semplificando la movimentazione. I terminali permettono anche lo stoccaggio temporaneo, utile per sincronizzare i trasporti, gestire interruzioni, ottimizzare i carichi e fungere da depositi di container vuoti. Il processo di stoccaggio non riguarda solo il posizionamento fisico, ma anche quello strategico: ad esempio, contenitori impilati possono rendere difficili i prelievi successivi, aumentando i tempi di movimentazione. Le attrezzature di movimentazione (gru RMG, RTG, reach stacker) sono essenziali ma anche energivore. Il sollevamento dei container è una delle attività più dispendiose in termini di energia, e il consumo cresce con la massa dei container. Quindi, una buona gestione dello stoccaggio può ridurre operazioni inutili e cicli macchina, con impatto positivo sull'efficienza energetica. Inoltre, l'elettificazione delle attrezzature e l'uso di fonti rinnovabili possono ridurre ulteriormente le emissioni. I terminali intermodali devono quindi essere visti come attori attivi nella creazione di supply chain energeticamente efficienti. Con la transizione energetica in corso, il loro ruolo diventerà sempre più strategico. L'articolo analizza l'impatto del numero di strati di stoccaggio dei container sul tempo di carico dei treni intermodali. La prima parte esplora come il layout del piazzale e l'organizzazione dei container influenzino il tempo di transito. La seconda parte rivede la letteratura sul tema. La terza propone un modello di simulazione. La quarta presenta i risultati ottenuti dagli studi simulativi. Oltre ai binari di carico e alle strade di manovra, un elemento cruciale dei terminali intermodali è l'area di stoccaggio, dove i container vengono temporaneamente conservati durante il passaggio tra mezzi di trasporto. L'organizzazione dello stoccaggio incide in modo decisivo sull'efficienza operativa del terminal, in particolare sui tempi di carico/scarico. Un fattore chiave è il numero di strati di impilamento dei container: l'altezza delle pile verticali condiziona il numero e la distribuzione delle attrezzature di movimentazione necessarie, specialmente le gru, che sono i principali carichi elettrici del terminal. Anche se si possono usare macchine con motori a combustione, per blocchi di stoccaggio grandi è meno pratico. In genere, i container vengono impilati in più strati, secondo le attrezzature disponibili, lo spazio e le normative di sicurezza. Si usano gru a portale (RMG o ASC) per raggiungere impilamenti fino a 5-6 strati; con reach stacker, si arriva a 3-5. Blocchi di stoccaggio larghi e densi resistono meglio al vento, mentre blocchi con poche file impilano meno per sicurezza. Tuttavia, aumentare gli strati comporta conseguenze operative: più è alta la pila, maggiore è la probabilità che un container da caricare si trovi in basso. In tal caso, bisogna prima spostare (reshuffle) quelli sopra,

operazione che comporta ritardi, rischio di errori e costi/consumi aggiuntivi. Per esempio, se un container si trova sotto tre strati, sono necessarie tre operazioni extra, ognuna con attrezzature e costi energetici associati. Un altro aspetto chiave è il caricamento dei treni intermodali. I container variano per dimensioni e peso massimo ammesso, e ciò richiede l'uso di carri ferroviari specifici, dotati di pin di fissaggio configurabili. La posizione del container nel treno dipende quindi sia dalla sua posizione nel piazzale che dal peso e dalla configurazione dei carri. Modelli di simulazione realizzati con FlexSim hanno analizzato come le combinazioni di peso e configurazione dei pin influenzano il tempo di carico. Queste variabili sono incluse anche nella simulazione del Capitolo 3 dell'articolo. L'organizzazione dei container nel piazzale, unita ai vincoli di carico dei treni, incide direttamente sui tempi di carico e sul consumo energetico delle gru. Queste ultime, alimentate elettricamente, consumano energia non solo in base alla durata ma anche alla natura del ciclo: movimenti del carrello, della gru e sollevamenti. Studi dimostrano che: Nei porti marittimi (alte pile): il sollevamento consuma più energia. Nei terminali interni (pile più basse): prevale il consumo legato al movimento della gru. Dunque, altezza di impilamento e posizionamento container influenzano sia durata dei cicli che energia consumata, e il rapporto tempo-energia non è sempre lineare.

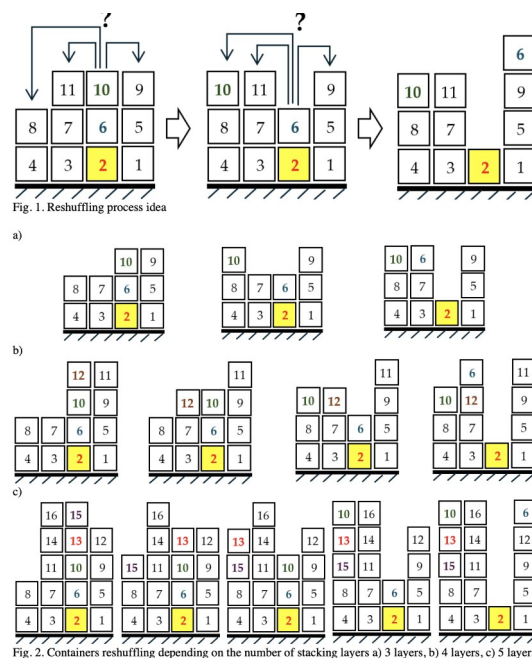


Fig. 1 Come i container vengono riorganizzati

Il problema del posizionamento dei container nei terminal intermodali, noto come CSP, è stato studiato soprattutto nei porti marittimi, mentre meno attenzione è stata data ai terminal

interni. Il problema coinvolge l'allocazione dello spazio, il posizionamento preciso e la riorganizzazione dei container. Le strategie di assegnazione seguono tre livelli: blocco, baia e pila. Per risolvere il CSP si usano approcci di ottimizzazione, intelligenza artificiale e simulazione. Uno studio ha simulato diverse configurazioni di impilamento container (da 1 a 5 strati) in un terminal ferroviario usando FlexSim, analizzando impatto su tempi, consumi e numero di movimenti delle gru. Il comportamento della gru dipende dal peso del container, e i container sono caricati su treni secondo slot compatibili scelti casualmente. È stato creato un modello di simulazione in FlexSim 2024 per analizzare come il numero di strati di container influisca sull'efficienza operativa ed energetica di un terminal intermodale ferroviario. Le variabili che sono state analizzate sono: tempo di operazione, numero di movimenti della gru (RTG), consumo energetico della gru e distanze percorse dall'equipaggiamento. Lo scenario simulato aveva 5 configurazioni di piazzale (da 1 a 5 strati), capacità nominale: 324 TEU, con riempimento all'80%, tipi di container: 20ft, 30ft, 40ft, peso massimo per tipo rispettato, la velocità di sollevamento della gru RTG dipende dal peso del container, carico su 30 carri ferroviari con slot variabili (fino a 3 TEU per carro) e i container selezionati per il carico sono scelti casualmente tra quelli presenti nel piazzale.

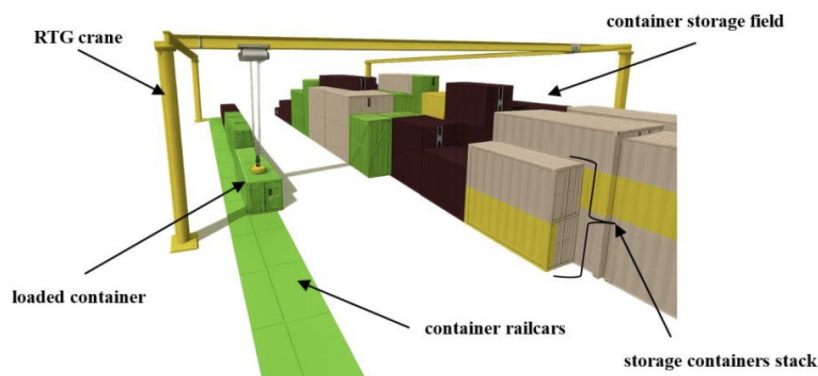


Fig. 3. Container loading front in FlexSim simulation model

Table 1. Number of containers stored in the yard in each simulation variant

Variant	Number of stacking layers	Yard utilization	Number of containers in the yard
1	1	80%	260
2	2		518
3	3		777
4	4		1035
5	5		1296

Una conclusione ovvia è che, all'aumentare del numero di strati di impilamento, la superficie necessaria per lo stoccaggio dei container diminuisce proporzionalmente. Questo comporta una maggiore capacità del piazzale in termini di numero di container che può contenere. Lo studio condotto ha inoltre mostrato che stoccare i container in uno spazio ristretto non riduce

il tempo di carico; anzi, accade il contrario. Quando i container non sono distribuiti lungo il binario di carico ma concentrati in un'unica area, i cicli operativi della gru si allungano e aumentano le distanze percorse dalla gru stessa. In conclusione, lo studio di simulazione ha permesso un'analisi dettagliata dell'impatto del numero di strati di container nel piazzale di un terminal intermodale sul tempo di carico dei treni e sul consumo energetico della gru. I risultati confermano chiaramente che un aumento degli strati comporta un significativo incremento del tempo totale di carico, delle distanze percorse dalla gru e della domanda complessiva di energia. Questo avviene principalmente a causa del crescente numero di operazioni di riorganizzazione (reshuffling), che con cinque strati rappresentano oltre il 60% dei movimenti della gru e quasi la metà del tempo totale di carico. L'analisi ha mostrato che l'aumento del tempo ciclo e del consumo energetico non è lineare: la variazione dipende dallo specifico numero di strati. Le differenze più marcate si registrano tra 1 e 2 strati e tra 4 e 5 strati. È importante notare che, nonostante l'aumento delle operazioni della gru, il consumo energetico non cresce proporzionalmente, grazie al meccanismo di recupero energetico della gru durante la fase di abbassamento del container. Questo contribuisce a rendere il processo più efficiente dal punto di vista energetico, anche se meno efficiente dal punto di vista del tempo. Da un punto di vista pratico, i risultati possono essere utilizzati come supporto decisionale per gli operatori terminalistici nella scelta del numero ottimale di strati di impilamento. Anche se si poteva intuire che un maggior numero di strati aumentasse tempi e consumi, mancavano studi che quantificassero con precisione questi effetti e identificassero i componenti di processo più critici. La simulazione sviluppata nell'ambiente FlexSim si è dimostrata uno strumento di ricerca estremamente utile per analizzare processi logistici complessi. Essa consente non solo una valutazione quantitativa degli effetti di cambiamenti organizzativi, ma fornisce anche una base solida per prendere decisioni operative e strategiche ben informate. (17)

9. SOFTWARE ARENA

9.1 Utilizzi per simulazione e previsione di eventi

La collaborazione tra organizzazioni consente vantaggi competitivi e migliori risultati ambientali, economici e sociali. Nelle catene di fornitura, un approccio collaborativo permette ai soggetti coinvolti di migliorare la quota di mercato, la crescita e i margini. La collaborazione consente inoltre una gestione più efficace delle risorse e aiuta a evitare l'effetto bullwhip, un basso livello di servizio e alti costi di gestione delle scorte. Un altro

concetto rilevante per lo sviluppo di vantaggi competitivi è la logistica snella (lean logistics), che mira a ridurre gli sprechi e le attività prive di valore lungo la catena di fornitura per generare più valore per il cliente. Molte aziende hanno adottato pratiche di produzione snella per aumentare produttività, vendite, qualità, ridurre tempi e costi, migliorare il capitale e restare competitive a livello globale. Progettare strategie collaborative e di logistica snella lungo la catena logistica migliora le performance degli attori coinvolti. Tuttavia, a causa della complessità del mercato e della quantità di informazioni disponibili, è necessario utilizzare metodi computerizzati e modelli avanzati. La simulazione è considerata il metodo standard per valutare la performance dei sistemi logistici, poiché permette di gestire la complessità e la casualità delle operazioni e confrontare scenari alternativi. Questa ricerca cerca di colmare lacune ponendo tre domande: Come contribuisce lo sviluppo di un modello di gestione logistica basato su collaborazione e logistica snella alla supply chain? Come rappresenta un modello di simulazione ad eventi discreti la performance del sistema e consente di definirne scenari di miglioramento? Quali alternative di miglioramento possono essere adottate nel settore lattiero considerando l'approccio collaborativo e lean? Si propone dunque un modello concettuale di gestione della supply chain, con approccio collaborativo e strategie di logistica snella, validato tramite lo studio del settore lattiero nella regione di Sucre, Colombia. Qui il settore presenta basso valore aggiunto, orientamento solo al mercato interno e scarsa competitività. Prevala una produzione familiare con poca tecnologia e capacità operativa limitata. Il modello è validato con una simulazione ad eventi discreti realizzata con lo strumento Arena, considerando diversi scenari per testare le relazioni tra i fattori del modello concettuale e individuare strategie per aumentare efficienza, produttività e competitività. Negli ultimi decenni la supply chain (SC) è diventata centrale nella gestione aziendale, puntando sulla collaborazione tra fornitori, produttori, distributori e clienti per creare valore e ridurre i costi. La simulazione ad eventi discreti (DES) è uno strumento molto utile per analizzare e migliorare sistemi complessi come la SC, grazie alla sua capacità di gestire variabili casuali (come la domanda o i tempi di consegna). Diversi studi mostrano come modelli DES siano stati applicati per ottimizzare: produzione e trasporto, gestione delle scorte, distribuzione urbana di cibo, impatti ambientali e congestione e sistemi flessibili di assemblaggio. Strategie di logistica snella e collaborazione tra attori della SC aiutano a migliorare produttività, efficienza e qualità, riducendo al contempo gli sprechi. Questo approccio è particolarmente rilevante per prodotti deperibili, dove velocità e precisione sono cruciali. È stato proposto un nuovo modello di simulazione ad eventi discreti per valutare le prestazioni di una supply chain

alimentare basata su collaborazione e lean manufacturing. Il modello riflette fedelmente un sistema reale. Lo studio si articola in sei fasi: Definizione del sistema, obiettivi e processi della supply chain. Raccolta e analisi dei dati, compresi materiali in ingresso, pagamenti ai fornitori e consegna ai clienti. Le osservazioni sono state effettuate per una settimana, 8 ore al giorno, registrando tempi, quantità lavorate, sequenze operative e capacità di stoccaggio. L'analisi statistica è stata fatta con Statgraphics Centurion XVI. Costruzione del modello di simulazione con Arena Simulation Software, rappresentando materiali, risorse, clienti e fornitori. Validazione del modello attraverso test statistici e confronto con i dati reali per garantire fedeltà al sistema reale. Progettazione ed analisi di scenari alternativi, per testare variabili e strategie. Analisi di sensitività e proposte di miglioramento, con raccomandazioni operative. Il modello considera fattori interni ed esterni alla supply chain. I fattori esterni includono: relazioni con fornitori (scambio di informazioni e obiettivi comuni), relazioni con i clienti (soddisfare esigenze e adattare l'offerta) e incertezza ambientale, che stimola la collaborazione e la creazione di alleanze strategiche vantaggiose.



Fig 1. Fattori interni e esterni alla Supply Chain

Un modello di simulazione ad eventi discreti è stato sviluppato per migliorare le prestazioni della supply chain lattiero-casearia di Sincelejo (Colombia), utilizzando strategie collaborative e di lean manufacturing. Il modello considera fattori esterni come: condivisione delle informazioni, sincronizzazione delle decisioni, comunicazione collaborativa, pianificazione condivisa, incertezza ambientale e fattori interni, tra cui:

- Organizzazione: fiducia, impegno, partecipazione e cultura collaborativa.
- Processi: integrazione dei flussi, pianificazione, allineamento degli obiettivi e scambio informativo.

La supply chain è suddivisa in 5 livelli: fornitori (input agricoli, veterinari, tecnici), allevamenti bovini e centri di raccolta latte (cooperative e venditori informali), trasformatori: aziende e laboratori artigianali, distributori: supermercati, intermediari, negozi locali e consumatori finali. Le variabili di simulazione includono: quantità di formaggio prodotto, siero (sottoprodotto), latte non trasformato, vendite totali. I dati sono stati raccolti tramite osservazioni dirette e interviste, analizzati con Excel e Statgraphics, e modellati con Arena Simulation Software. I fornitori sono suddivisi in 4 rotte: rotte 1 e 2: fornitori con produzione costante. Rotta 3: alcuni fornitori con produzione irregolare. Rotta 4: la maggior parte ha dati costanti, ma alcuni fornitori sono stati esclusi per mancanza di dati statistici sufficienti.

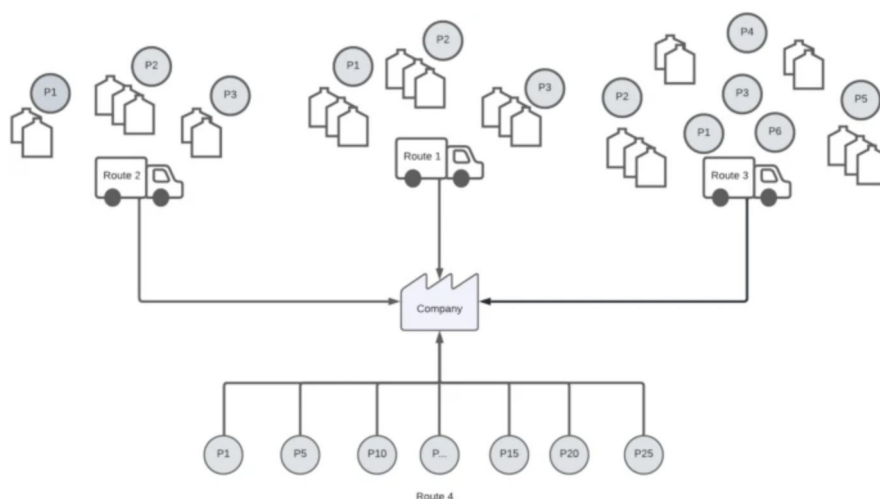


Fig.2 Rotte dei fornitori

Il processo produttivo si sviluppa in più fasi temporali, a partire dalla raccolta del latte crudo da 37 fornitori suddivisi in 4 rotte nel municipio di Galeras (Colombia): rotte 1, 2 e 3: raccolta con 2 furgoni aziendali; forniscono il 55–60% del latte. Rotta 4: fornisce il 40–45%, ma la quantità varia in base al prezzo offerto dall'azienda. Le fasi del processo di produzione sono: ricezione del latte: il latte arriva all'impianto, passa attraverso un filtro e viene versato in due vasche da 800 L e 1200 L. Caglio: si aggiungono 10 ml di caglio ogni 100 L di latte, diluito in acqua salata per favorire la coagulazione. Coagulazione: il latte riposa per 30 minuti a temperatura ambiente fino a formare la cagliata. Taglio della cagliata: con coltelli, si

effettuano tagli profondi per facilitare l'espulsione del siero (5 min per ogni vasca). Riposo e scolatura: i blocchi di cagliata riposano 1-2 minuti, poi si pressano per eliminare il siero (rimozione del 70–80% del siero, dura 10 minuti). Taglio della cagliata: i blocchi vengono tagliati in cubetti da 5×5 cm e trasferiti nella salamoia (7 min). Salamoia: si usano 50 kg di sale al giorno (25 kg per vasca). La salamoia rallenta la fermentazione, conserva e aromatizza il formaggio (dura 45 min). Si cambia ogni 2 giorni. Formatura: la cagliata salata viene inserita in stampi di PVC (bianchi o marroni), foderati di tela, dove si applica pressione (dura 10–15 min). Pressatura: il formaggio viene pressato per 20 ore con cilindri in alluminio, per compattarlo e togliere il siero. Alla fine del turno, i blocchi vengono girati. Stoccaggio: il formaggio viene conservato a 4–6 °C nella cella frigorifera (capacità: 8 tonnellate) fino alla distribuzione settimanale. Il processo è stato verificato e validato. In seguito, sono stati pianificati e valutati diversi scenari di miglioramento tramite il software Arena® (versione 14.0), utilizzato su un PC con processore Intel i7 e 16 GB di RAM. Gli scenari sono stati analizzati sulla base delle medie delle variabili in ogni replica di simulazione. La capacità giornaliera di trasformazione: 2.000 litri di latte. La capacità di stoccaggio: 8 tonnellate di formaggio Costeño. Latte ricevuto durante il periodo di analisi: 125.408 litri, ma solo il 29% è rimasto non trasformato per limiti di capacità. La domanda settimanale: 6 tonnellate (da 6 clienti). L'obiettivo per 60 giorni: 51,6 tonnellate. La produzione reale: solo 12,6 tonnellate (12.578 kg), pari al 24,38% della domanda. La produzione media giornaliera di latte nel municipio (2017): 37.434 litri. Latte ricevuto dall'azienda (2017): 1.605 litri/giorno (solo il 4,28% della produzione locale). Prezzo del latte pagato dall'azienda: in media COP\$112 in meno per litro rispetto alla media nazionale. Gli scenari che sono stati simulati sono il riutilizzo della vasca 1 per aumentare la produzione → più siero disponibile per i collaboratori. Scenario 5: Implementazione di due linee di produzione (formaggio e sottoprodotti) → incremento della produzione, nuove entrate, maggiore stabilità aziendale. Entrambi gli scenari migliorano le relazioni collaborative e l'approvvigionamento del latte. I profitti, i costi e le vendite sono stati confrontati e mostrano vantaggi economici significativi. L'azienda ha una capacità produttiva e logistica non sufficiente per soddisfare la domanda attuale. La simulazione suggerisce che, con miglioramenti tecnologici e strategie collaborative, si può aumentare la produzione, sfruttare economicamente il sottoprodotto del siero e raggiungere la redditività desiderata. In conclusione, possiamo dire che È stato proposto un nuovo modello logistico, basato su strategie lean e su un approccio collaborativo tra fornitori e produttori per migliorare la produttività e la competitività della filiera. Il modello consente di valutare lo stato attuale del settore lattiero

in Colombia e di individuare strategie per migliorarne l'efficienza. Introduzione di una linea di produzione alternativa per utilizzare il siero di latte, sottoprodotto della produzione di formaggio Costeño. È stato sviluppato un modello concettuale che integra fattori come: relazioni con i fornitori, scambio di informazioni, pianificazione congiunta, allineamento degli incentivi, fiducia tra gli attori e relazione con i clienti. Il modello è stato testato tramite simulazione a eventi discreti, rivelando problemi strutturali del sistema (bassa tecnologia, scarsa cultura collaborativa, produttività limitata) e fornendo soluzioni pratiche. La collaborazione nella filiera risulta essenziale per migliorare produttività, efficienza e redditività. I risultati della simulazione mostrano che una nuova linea di produzione e una maggiore collaborazione con i fornitori portano benefici economici e maggiore competitività per l'intero settore. È fondamentale avviare programmi di formazione tecnica per tutti gli attori della catena, focalizzati sulla qualità del latte, trasporto e processi produttivi. Integrare nuovi scenari collaborativi nel modello di simulazione, valutando impatti su costi di produzione e volumi di approvvigionamento. Esplorare tecniche lean aggiuntive, dato il carattere sequenziale della produzione lattiero-casearia. È importante approfondire temi come: Utilizzo dei sottoprodotti, la formazione di cluster produttivi, l'avanzamento tecnologico agricolo e il trasferimento tecnologico nella filiera. Confrontare i risultati del modello simulato con altri approcci di ottimizzazione della pianificazione delle attività. (18)

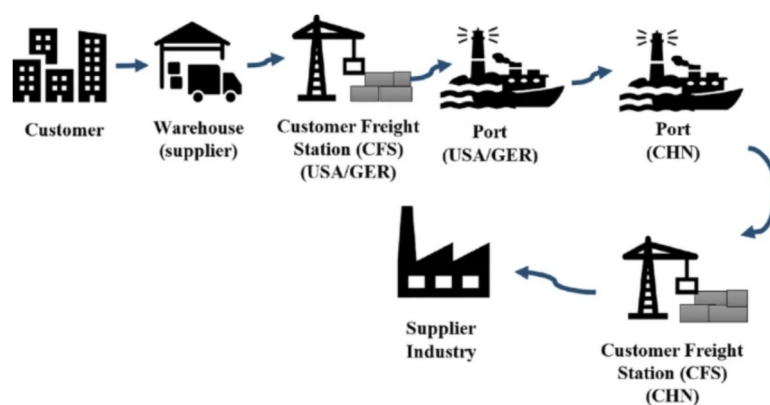
9.2 Utilizzo del software (Arena) per la sostenibilità

Una closed-loop supply chain (catena di fornitura a ciclo chiuso) è un sistema che mira a massimizzare il valore durante l'intero ciclo di vita del prodotto, recuperando dinamicamente valore da resi di diverso tipo e volume. La reverse supply chain (catena di fornitura inversa) è una sua sottosezione, e riguarda il ritorno di prodotti usati o danneggiati per essere raccolti, ispezionati, rigenerati, smaltiti o redistribuiti. Il processo di remanufacturing (rigenerazione) consente di riutilizzare componenti e ridurre l'impatto ambientale e i costi. Nel 2017, il mercato globale della logistica inversa valeva circa 415 miliardi USD e si prevede che raggiungerà 604 miliardi entro il 2025. Negli Stati Uniti, la rigenerazione ha generato 75 miliardi USD e 180.000 posti di lavoro. Le aziende che adottano catene di fornitura sostenibili riducono costi, emissioni e migliorano l'immagine del marchio, la soddisfazione del cliente e la competitività. La supply chain analysis (analisi della catena di fornitura) serve a valutare e ottimizzare ogni fase, compreso il processo inverso. Tuttavia, pochi studi analizzano la catena inversa considerando anche la sostenibilità e i colli di

bottiglia nel trasporto e nella rigenerazione. Gli obiettivi della ricerca: RO1: Modellare il funzionamento della reverse supply chain nel settore manifatturiero. RO2: Analizzare fattori chiave come il tasso di riempimento, il tempo di trasferimento, e la differenza tra tempi a valore aggiunto e non. Le novità dello studio: Include resi da due clienti internazionali, utilizza due modalità di spedizione in scenari simulati, si concentra sull'ottimizzazione dei processi, non solo sulla logistica, confronta emissioni di carbonio e costi di trasporto tra clienti e fornisce un modello utile anche per studi su riciclo elettronico e plastico. La rigenerazione (remanufacturing) è un processo industriale che riporta un prodotto alle sue condizioni originali, spesso anche migliori, ed è fondamentale per la sostenibilità. Ha applicazioni in aerospaziale, automotive, apparecchiature elettriche, sanitarie e mobili. Il concetto di reverse supply chain (RSC) è emerso negli anni '90 e ha acquisito rilevanza nei 2000. È definito come il processo di pianificazione e gestione del flusso inverso di materiali e prodotti per recuperare valore o smaltire correttamente i beni a fine vita. I primi studi si sono concentrati su casi studio, ma pochi hanno impiegato modelli matematici e simulazioni. La letteratura è stata classificata in diversi filoni, tra cui incertezza, rifiuti pericolosi e modelli stocastici. Tuttavia, molti aspetti, come il ritorno dei prodotti e i mercati secondari, sono stati poco esplorati. Alcuni studi recenti (es. Jayant et al., 2014; Kara et al., 2007) hanno analizzato casi pratici come batterie o apparecchi elettronici, ma l'impatto del trasporto e la sostenibilità sono spesso trascurati. Alcuni tentativi, come Williams et al. (2020), hanno integrato concetti di green supply chain, mentre altri hanno modellato reti globali (es. Bing et al., 2015). Modelli come quelli di Das & Dutta (2012) e Kumar & Yamaoka (2007) hanno usato la system dynamics, mentre altri hanno utilizzato discrete-event simulation (DES). Tuttavia, la simulazione nella RSC è ancora limitata, con focus su plastica e rifiuti domestici. Studi più avanzati (es. Goodarzian et al., 2022) mostrano l'uso di approcci multi-obiettivo per reti complesse (es. vaccini COVID-19), ma c'è ancora poca applicazione della simulazione in ambito manifatturiero. Inoltre, l'inclusione di fattori di sostenibilità e vari scenari di ritorno è spesso assente. Questa lacuna viene colmata dallo studio attuale, che propone una simulazione di una reverse supply chain sostenibile nel settore manifatturiero, considerando due clienti in due paesi diversi, diverse modalità di trasporto, tipi di ritorno e fattori di sostenibilità, utilizzando Arena Rockwell Simulation Software. Lo studio ha identificato le lacune presenti nella letteratura sulla simulazione sostenibile della reverse supply chain, integrandole con osservazioni di dirigenti industriali per definire un problema reale. È stato quindi sviluppato un piano di lavoro e un framework completo che descrive il funzionamento della reverse supply chain, gli attori coinvolti, i magazzini e il flusso dei

prodotti. I dati su tempi di trasferimento, processi e cicli operativi sono stati raccolti da un'azienda caso di studio. È stata scelta la simulazione a eventi discreti, utilizzando il software Arena (versione 14) di Rockwell Automation, per modellare in modo realistico il comportamento dinamico del sistema. Il modello è stato implementato su un computer Acer, e i risultati della simulazione hanno permesso di trarre implicazioni rilevanti per l'ottimizzazione della supply chain inversa. Lo studio affronta la modellazione della reverse supply chain utilizzando il caso di un'azienda manifatturiera situata a Chennai, India, scelta per la sua vicinanza ai porti e la rilevanza nel settore automobilistico. L'azienda produce componenti meccanici come stator shafts utilizzati nelle trasmissioni automobilistiche, esportati principalmente negli Stati Uniti e in Germania. I componenti possono essere restituiti per difetti o incompatibilità con altri pezzi, ed è quindi fondamentale gestire correttamente i resi. Due scenari di trasporto vengono considerati: Full Container Load (FCL) e Less than Container Load (LCL), con percorsi logistici diversi e illustrati in apposite figure. L'azienda mira a implementare una rete sostenibile di reverse supply chain, in quanto remanufacturing a Chennai è molto più economico rispetto a farlo nel paese del cliente. Per esempio, il costo per rigenerare 18 pallet di componenti in India è di circa 10.000 USD, contro 67.000 USD se rigenerati negli USA, portando a un risparmio di circa 57.000 USD per il cliente. Questi risultati supportano fortemente la convenienza economica e la sostenibilità della supply chain inversa, che lo studio contribuisce a modellare e simulare.

Fig. 3



Less than container load (LCL) mode of shipment

Dopo che i clienti (in Germania o USA) decidono di restituire i componenti, questi vengono prima inviati ai magazzini locali del fornitore. In seguito, si sceglie l'organizzazione di trasporto più adatta (tra diverse disponibili) per la spedizione a Chennai, e si generano i documenti necessari: fattura commerciale, lista di imballaggio, e bill of lading. Dopo

le procedure doganali, i componenti vengono spediti in India. Il processo varia tra Full Container Load (FCL) e Less Than Container Load (LCL). LCL comporta una maggiore complessità documentale e tempi leggermente più lunghi. Una volta ricevuti a Chennai, i componenti subiscono un nuovo controllo doganale e poi sono trasportati all'azienda fornitrice. Si generano quindi le note di ritorno, e i componenti vengono ispezionati: quelli idonei sono remanufactured, quelli non idonei sono riciclati o scartati. Le fasi di remanufacturing includono: serratura, ispezioni magnetiche, rettifica, lucidatura e controllo finale. Per modellare e simulare questo processo, si è usato Arena Simulation Software, inserendo le espressioni di tempo di trasferimento calcolate tramite test di goodness-of-fit sulle distribuzioni dei dati di spedizione. I risultati permettono una simulazione realistica dei tempi di ogni segmento della catena. Lo studio ha simulato diversi scenari di ritorno nel modello di reverse supply chain, valutando la value-added time per ciascun tipo di ritorno per misurare la qualità del processo. È stata analizzata la wait time per ogni processo per identificare colli di bottiglia, in particolare nei processi di imballaggio, separazione e serratura/deburring. Questi processi sono stati ottimizzati usando Arena Process Analyzer per ridurre a zero i tempi di attesa, individuando il numero ottimale di risorse necessarie per ciascuna attività. È stata eseguita un'analisi del punto di pareggio tra Full Container Load (FCL) e Less Than Container Load (LCL), considerando i costi di spedizione, con dati reali di maggio 2021. Si è riscontrato che spedire fino a 7 pallet in LCL è economicamente conveniente, oltre i quali conviene FCL. I tempi di trasferimento dei resi si mantengono stabili: $740,45 \pm 2,5$ h dalla Germania e $1104,5 \pm 2,5$ h dagli USA. La time efficiency migliora all'aumentare della qualità del sistema: con meno ritorni, il tempo essenziale aumenta mentre quello non essenziale diminuisce. Tuttavia, LCL mostra tempi leggermente superiori rispetto a FCL. Il confronto dei costi evidenzia differenze significative nel trasporto, mentre dogane incidono per circa il 4-5%. I costi sociali del carbonio sono maggiori negli USA rispetto alla Germania, calcolati secondo approcci activity-based e fuel-based. Le emissioni e i relativi impatti economici sono documentati in Fig 9 e 10.

Fig. 9

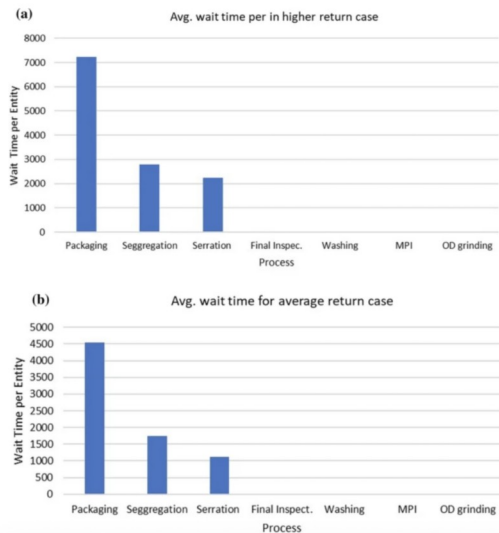
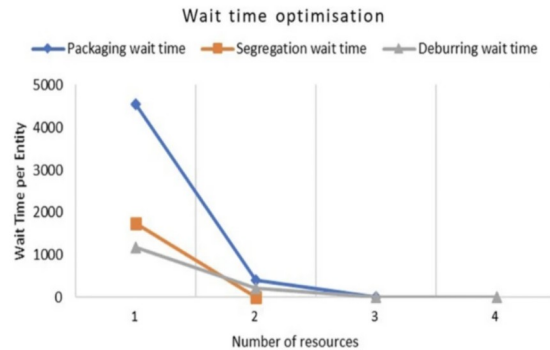


Fig.10



Lo studio contribuisce alla letteratura scientifica presentando un modello simulato di reverse supply chain sostenibile nel settore manifatturiero, utilizzando l'albero statore come entità di riferimento. Il modello, sviluppato con Arena simulation software, considera clienti in due paesi (USA e Germania) e vari tipi di ritorni per testare l'efficienza e la sostenibilità. I risultati principali includono: Tempi di trasferimento stabili: ~1104,5 ore dagli USA e ~740,45 ore dalla Germania. Emissioni di CO₂ per viaggio: 2,07 t (USA) e 1,50 t (Germania). Costi di trasporto per container: 2370 USD (USA) e 2800 USD (Germania). Costo sociale del carbonio: 100,10 USD (USA) e 20,43 USD (Germania), indicando un impatto economico minore per la Germania. Il modello affronta le lacune nella letteratura combinando sostenibilità, più modalità di spedizione, e clienti internazionali. Inoltre, supporta studi futuri su reverse supply chain con più clienti e siti di remanufacturing. Implicazioni manageriali: Il modello, validato dalla stessa azienda, funge da guida per l'implementazione reale del reverse supply chain. Aiuta nella pianificazione delle risorse e nella preparazione logistica (magazzini, manodopera, ecc.). Una demo reale con ritorno FCL dalla Germania ha confermato l'efficacia stimata del modello (tempi, costi, emissioni), incentivando l'azienda a perseguire la sostenibilità e ridurre ulteriormente le emissioni e i costi. Lo studio affronta la mancanza di un quadro strutturato per la reverse supply chain in India, proponendo un modello simulato realistico per l'industria manifatturiera. Utilizzando un caso studio con clienti esteri, lo studio sviluppa un framework applicabile anche ad altre aziende, contribuendo in modo innovativo alla letteratura grazie all'uso della simulazione (Arena software) in un contesto poco esplorato. Punti chiave dello studio: Sono stati simulati due modi di trasporto (FCL e LCL) e tre tipi di ritorni (basso, medio, alto). Metriche ambientali ed economiche sono state integrate: tempi di trasferimento, tempo di attesa

medio per entità, e tempo a valore aggiunto vs non valore aggiunto. I tempi medi di ritorno sono risultati: $1104,5 \pm 2,5$ h dagli USA e $740,45 \pm 2,5$ h dalla Germania. Le emissioni di CO₂ per container: 2,07 tonnellate dagli USA e 1,50 tonnellate dalla Germania. I costi di trasporto per viaggio: 2372 USD (USA) e 2800 USD (Germania), con la Germania più costosa ma meno impattante in termini di emissioni. Ottimizzazione delle risorse nei processi di remanufacturing tramite process analyzer per ridurre i tempi di attesa. Lo studio analizza in modo completo costi, emissioni e aspetti logistici, incluso il costo sociale del carbonio, raramente trattato nella letteratura sulla supply chain. Limite: la presenza di magazzini preesistenti ha impedito l'ottimizzazione delle loro posizioni. Futuro: esplorare casi senza magazzini esistenti, provare con prodotti diversi, studiare l'uso di trasporto aereo, simulare casi con clienti nazionali e integrare tecnologie Industry 4.0 per creare closed-loop supply chains più sostenibili. (19)

9.3 Utilizzo del software (Arena) per previsione e previsioni

Lo studio affronta il tema della production planning (pianificazione della produzione) come strumento fondamentale per ottimizzare le risorse produttive (spazio, macchinari, materiali, tempo) in risposta alla crescente competizione globale nel settore manifatturiero. In particolare, si concentra sulla Aggregate Production Planning (APP), ossia la pianificazione aggregata della produzione, utile per soddisfare la domanda prevista con il minimo costo produttivo su un orizzonte temporale medio (3–18 mesi). La APP considera un prodotto o una famiglia di prodotti simili e si fonda su otto obiettivi chiave:

1. Massimizzare il servizio al cliente
2. Minimizzare i costi di produzione
3. Ridurre l'inventario
4. Limitare le variazioni nella forza lavoro
5. Limitare le variazioni nei tassi di produzione
6. Ridurre il lead time
7. Minimizzare il subappalto
8. Massimizzare l'utilizzo di impianti e attrezzature

Per colmare questi vuoti, è stato proposto un modello integrato FAHP–MOLP–Simulation, che: usa Fuzzy AHP per selezionare gli obiettivi più importanti, applica la programmazione lineare multi-obiettivo (MOLP) per formulare il modello APP e valida il modello attraverso una simulazione basata su un caso industriale reale, confrontando le prestazioni del piano

proposto con quello esistente. Il framework fornisce un supporto decisionale pratico per: selezionare correttamente gli obiettivi, formulare una APP efficace e valutare l'effetto del piano sulle performance (throughput, lead time, utilizzo risorse). Questa ricerca rappresenta un avanzamento sia accademico sia pratico nel campo della pianificazione della produzione, offrendo una soluzione applicabile e validata per migliorare l'efficienza e la competitività delle imprese manifatturiere. Dohale et al. (2021) evidenziano che una funzione produttiva ben pianificata conferisce competitività all'azienda, rendendo la pianificazione della produzione una decisione critica nel settore manifatturiero. Mula et al. (2006) individuano sette decisioni chiave nella pianificazione della produzione, tra cui l'Aggregate Production Planning (APP), considerata fondamentale a livello tattico per migliorare le performance produttive. L'APP, sviluppata dagli anni '50, mira a stabilire livelli ottimali di produzione, tempi di consegna, utilizzo delle risorse, inventario e occupazione per soddisfare la domanda su un orizzonte temporale definito. Diversi metodi sono stati utilizzati per modellare l'APP, tra cui programmazione lineare, goal programming, simulazione e tecniche euristiche. Studi storici hanno esplorato modelli APP con obiettivi multipli (profitto, costi, equilibrio della forza lavoro), mentre ricerche recenti cercano di integrare criteri di sostenibilità e approcci fuzzy per la gestione della produzione in diversi settori. Tuttavia, la letteratura mostra lacune nell'integrazione di tecniche multicriterio (MCDM), machine learning e simulazione per migliorare la formulazione e validazione dell'APP. Questo studio propone un approccio integrato FAHP–MOLP–Simulazione con quattro fasi: Selezione degli obiettivi APP più adatti tramite Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP), che migliora il classico AHP gestendo l'incertezza e le informazioni vaghe. Formulazione del modello APP usando la programmazione lineare multi-obiettivo (MOLP), con obiettivi di minimizzazione del costo totale di produzione e del lead time. Sviluppo di un modello di simulazione su un caso reale per testare l'efficacia del modello MOLP. Analisi comparativa tra il piano di produzione esistente e quello proposto per valutare l'impatto sulle performance produttive. Il FAHP, basato sull'analisi di Chang, permette di valutare e integrare i giudizi di esperti in modo quantitativo, garantendo coerenza e affidabilità nelle decisioni su quali obiettivi perseguire nella pianificazione. In conclusione, il modello integrato consente di scegliere obiettivi rilevanti, formulare un piano produttivo efficiente e verificarne l'effetto reale, colmando così importanti lacune metodologiche presenti nella letteratura e offrendo strumenti concreti a manager e ricercatori. Lo studio illustra l'applicazione pratica della metodologia ibrida LP-Simulazione tramite un caso aziendale fittizio denominato ABC, una società manifatturiera coreana situata a Pune, India, con un fatturato annuo di 553 milioni (2018-2019). ABC

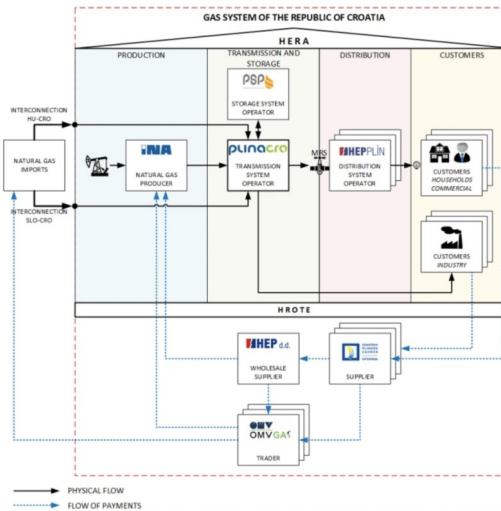
produce collettori per sistemi di condizionamento auto tramite processo a lotti, ma fatica a rispettare i tempi di consegna a causa della crescita della domanda, causando insoddisfazione dei clienti. L'obiettivo è sviluppare un piano di produzione aggregato (APP) multiprodotto e multi-periodo, basato su FAHP-MOLP-Simulazione, per minimizzare i costi totali e i tempi di consegna su un orizzonte di 6 mesi, per quattro parti diverse. I dati preliminari su domanda, inventario, costi operativi e risorse disponibili sono stati raccolti dagli esperti aziendali. La domanda prevista in unità è stata convertita in ore di lavoro per il modello LP. Attraverso il metodo FAHP, sono stati identificati otto obiettivi rilevanti per l'APP, con la selezione finale di due obiettivi prioritari: minimizzare i costi di produzione e minimizzare il lead time. Per il calcolo dei pesi, sono stati raccolti giudizi da tre esperti usando scale AHP convertite in numeri fuzzy e aggregati con il metodo della media geometrica. Il modello MOLP è stato formulato e risolto con il software Lingo©18.0, ottenendo soluzioni ottimali che rispettano i vincoli di costo e tempo per tutte le parti. Le soluzioni sono state validate tramite un modello di simulazione sviluppato con ARENA©, basato su dati reali di tempi di lavorazione rilevati tramite studio temporale. Il modello di simulazione rappresenta la creazione delle parti, l'area produttiva e la spedizione, e dopo più iterazioni è stato validato come fedele al sistema reale. La simulazione è stata eseguita per il primo mese di produzione (175 ore totali), confrontando il piano di produzione esistente con quello proposto. I risultati mostrano miglioramenti nel throughput e nell'utilizzo delle risorse, dimostrando l'efficacia del nuovo piano APP. I risultati ottenuti dall'applicazione della metodologia ibrida LP-Simulazione sono che il modello MOLP per la pianificazione aggregata della produzione (APP) è stato sviluppato per ottimizzare i costi totali mantenendoli sotto 40.000 unità monetarie e il lead time sotto 175 ore per tipo di parte. Il confronto con il piano produttivo attuale mostra che il nuovo APP consente di soddisfare la domanda prevista a costi inferiori e all'interno dei limiti accettabili dall'azienda. La simulazione per il primo mese è stata condotta con due scenari: Scenario 1 (piano attuale): non è possibile soddisfare la domanda totale di 71.235 parti, potendo produrne solo 53.775. L'utilizzo delle risorse varia molto (10%-99,99%), causando colli di bottiglia e aumento del lead time. Scenario 2 (piano proposto): la domanda viene soddisfatta integralmente con produzione conforme ai target (totale 71.235 parti). L'utilizzo delle risorse è più equilibrato (50%-80%) e il lead time reale è di 161 ore, sotto il limite di 175 ore, rendendo la produzione più efficiente e competitiva. In sintesi, la metodologia integrata FAHP-MOLP-Simulazione si dimostra efficace sia teoricamente sia praticamente per migliorare la pianificazione e le performance produttive. La pianificazione aggregata della

produzione (APP) mira a sviluppare un piano efficiente per soddisfare la domanda futura variabile, ottimizzando l'uso delle risorse aziendali e riducendo i costi di produzione, migliorando così la competitività. Lo studio propone un nuovo framework integrato che combina FAHP, programmazione lineare multi-obiettivo (MOLP) e simulazione. Per rispondere alla prima domanda di ricerca (RQ1), il FAHP è stato utilizzato per selezionare gli obiettivi prioritari della pianificazione, individuando la minimizzazione del costo totale (Z2) e del lead time (Z6) come principali. Per la seconda domanda (RQ2), è stato formulato un modello MOLP per sviluppare il piano di produzione aggregato, mentre la simulazione ha validato il modello senza interrompere la produzione reale. I risultati del primo mese di simulazione mostrano che il modello MOLP migliora costi, throughput e lead time, mantenendo l'utilizzo delle risorse nel range accettabile suggerito dagli esperti (50%-80%, con un intervallo consigliato di 40%-85%). In un contesto attuale di forti disruzioni come quelle causate dalla pandemia COVID-19, questo framework integrato può supportare manager e decisori nella selezione degli obiettivi, sviluppo e valutazione del piano produttivo. Le limitazioni dello studio riguardano le assunzioni fatte nel modello MOLP e la possibile soggettività nella selezione degli obiettivi, limitata al giudizio di soli tre esperti. Studi futuri dovrebbero considerare un numero maggiore di esperti e includere ulteriori obiettivi per meglio affrontare la natura dinamica della produzione, come la riduzione dei costi di inventario, lavoro e ordini arretrati. (20)

9.4 Utilizzo del software (Arena) per la sostenibilità

Le catene di approvvigionamento sono reti formali o informali di relazioni e attività tra soggetti aziendali che, collaborando, portano un prodotto o servizio al cliente finale. La catena di approvvigionamento del gas naturale è un sistema energetico complesso composto da cinque partecipanti fondamentali: produttore, trasportatore, stoccaggio, distributore e consumatore di gas naturale. Con la liberalizzazione e la de-monopolizzazione del mercato energetico, sono state introdotte società specializzate che operano come trader e fornitori, utilizzando l'infrastruttura tecnologica esistente. Per gestire questa complessità, i partecipanti al mercato del gas naturale sono organizzati in "gruppi di bilancio", associazioni commerciali che coordinano e ottimizzano i flussi materiali, energetici, finanziari, informativi e legali, con l'obiettivo di bilanciare e minimizzare i costi di bilanciamento, sotto la responsabilità di un leader di gruppo. (Fig. 1)

Fig.1



Il sistema di approvvigionamento del gas naturale in Croazia, conforme alla normativa UE, funziona secondo il principio del bilanciamento. I capigruppo dei gruppi di bilancio devono assicurare che il gas immesso nella rete sia equivalente a quello estratto dai distributori. Tuttavia, prevedere il consumo giornaliero reale è difficile, generando squilibri (eccesso o deficit) nel sistema. Questi squilibri comportano sanzioni per i capigruppo, che a loro volta trasferiscono i costi ai fornitori responsabili. Sebbene i sistemi tecnici di produzione, trasmissione e distribuzione siano standardizzati, esistono margini limitati di adattamento. Ad esempio, sia i sistemi di trasmissione che di distribuzione possono offrire una certa flessibilità. È stato proposto l'uso di una valvola elettromotrice per sincronizzare il sistema e correggere errori nelle previsioni di consumo in tempi brevi. Tuttavia, l'accuratezza delle previsioni rimane cruciale, e modelli predittivi (come quelli basati su machine learning) sono fondamentali per i fornitori. La ricerca mira a rispondere alla domanda se una soluzione tecnica, all'interno dei limiti della rete di distribuzione, possa compensare gli errori nelle nomine di gas e ridurre i costi di bilanciamento. Si propone un modello simulativo (discreto e continuo) per testare questa soluzione. La letteratura esistente sull'uso della simulazione per analizzare la catena di fornitura del gas naturale è limitata, ma alcuni studi hanno sviluppato modelli di simulazione (come GassOpt in Norvegia o Simone in Romania) per ottimizzare il flusso, la pressione e la pianificazione del gas. Altri modelli simulano dinamiche più complesse, come flussi energetici, allocazione ottimale, consumo di compressori o localizzazione di impianti. Sono state inoltre impiegate simulazioni discrete in altri settori (bioenergia, energia elettrica, industria del legno) per analizzare efficienza, costi e comportamenti del sistema, offrendo spunti utili per lo sviluppo del modello proposto. L'obiettivo principale dello studio è sviluppare un modello simulativo per il sistema del gas naturale che supporti una soluzione tecnica in grado di correggere errori nelle nomine e

migliorare l'efficienza del bilanciamento. Lo studio ha utilizzato la simulazione computerizzata per analizzare il comportamento del sistema di distribuzione del gas naturale. La simulazione è una tecnica utile per rappresentare il funzionamento di sistemi complessi nel tempo, offrendo un'alternativa economica alla sperimentazione sul sistema reale. È stata scelta una simulazione combinata discreta e continua, dove la parte discreta riguarda valori orari di consumo e nomina, e quella continua rappresenta il flusso di gas nel sistema. Il modello è stato sviluppato con Arena Simulation, un software commerciale che permette la creazione di modelli tramite flowchart e utilizza il linguaggio SIMAN. Arena consente sia la verifica del modello che la validazione dei risultati. Due metriche di performance sono usate nel modello: Pressione del gas nel sistema di distribuzione: il sistema è considerato stabile se la pressione resta tra 1.5 e 3 bar anche con accumulo aggiuntivo. Energia di bilanciamento (positiva e negativa) e quantità di gas accumulato: una riduzione rispetto allo stato attuale indica il successo del modello. Prima della simulazione è stato creato un modello concettuale che descrive in dettaglio il funzionamento del sistema dopo l'introduzione della soluzione tecnica proposta. Questo modello concettuale serve a tradurre il comportamento del sistema in una forma comprensibile dal computer. È importante che la complessità del modello resti proporzionata alla qualità e disponibilità dei dati. I dati utilizzati per la simulazione provengono da un'azienda che fornisce e distribuisce gas naturale e riguardano i consumi domestici nel 2017, con 8754 rilevazioni orarie. Tuttavia, il modello è stato sviluppato solo per la stazione di misura con il massimo flusso (3 milioni di kWh/giorno). La simulazione considera ogni ora di gas, con due attributi per ciascuna ora: consumo (aConsumption) e nomina (aNomination), generati tramite funzioni matematiche ottenute con lo strumento Input Analyzer del software Arena. Sono stati esclusi i mesi estivi (maggio-settembre) per cui i dati non permettevano una buona modellazione, a causa del basso consumo. Il modello simula il comportamento del sistema in funzione delle differenze tra nomina e consumo: Se il consumo supera la nomina, la valvola si chiude al raggiungimento della quantità nominata e il resto viene prelevato dall'accumulo, se possibile. Se la pressione scende sotto 1.5 bar, si attiva l'energia di bilanciamento positiva. Se la nomina è superiore al consumo, il gas in eccesso viene accumulato, ma se la pressione supera 3 bar, la valvola si chiude e si attiva l'energia di bilanciamento negativa. Per confrontare gli effetti della soluzione tecnica proposta, è stato creato anche un modello As-Is (senza accumulo). In esso, ogni differenza tra consumo e nomina attiva direttamente l'energia di bilanciamento. Entrambi i modelli sono stati simulati 50 volte per garantire stabilità e precisione. Il modello è stato verificato e validato: i risultati della simulazione sono

coerenti con i dati reali del 2017, con una differenza tra valori simulati e reali compresa tra l'1.6% e il 7.8%, ritenuta soddisfacente. La ricerca descrive la creazione di un modello di simulazione per la catena di fornitura del gas naturale, pensato per imitare il comportamento reale del sistema dopo l'introduzione di una soluzione tecnica in grado di compensare gli errori nelle nomine. Il modello combina simulazione discreta (per consumo e nomine orarie) e continua (per il flusso di gas). È stato sviluppato progressivamente, partendo dalla definizione delle variabili principali (nomine e consumi) fino all'inserimento dei moduli di processo e delle logiche decisionali. Dopo vari aggiustamenti, è stato validato con successo: l'errore tra i dati reali e simulati era compreso tra l'1.6% e il 7.8%, sotto il limite del 10%. La simulazione ha mostrato che, pur non eliminando del tutto l'energia di bilanciamento, la soluzione tecnica proposta ridurrebbe sensibilmente la sua attivazione: ottobre è il mese con la maggiore riduzione: -70% energia di bilanciamento positiva e -73% negativa. In media, l'energia di bilanciamento positiva si ridurrebbe del 32% e quella negativa del 34%. Questo miglioramento è possibile grazie all'accumulo di gas nel sistema di distribuzione, che assorbe le differenze tra nomina e consumo senza superare i limiti di pressione (2.19–2.25 bar rispetto ai 3 bar massimi ammessi). Infine, si evidenzia che la riduzione dell'energia di bilanciamento comporterebbe anche un risparmio economico rilevante, dato che l'operatore del mercato energetico croato (HROTE) calcola i costi mensili in base alle quantità di energia di bilanciamento attivate e al loro prezzo unitario. Lo scopo principale dello studio è stato sviluppare un modello di simulazione per la rete di distribuzione del gas naturale, volto a testare una soluzione tecnica in grado di compensare gli errori nelle nomine (previsioni di consumo). L'equilibrio del sistema di trasporto richiede che il gas immesso (nominato) e quello prelevato (consumato) siano uguali. Tuttavia, gli errori di previsione causano squilibri che comportano costi per i fornitori. La soluzione proposta prevede l'uso di una valvola elettromotorizzata posta all'ingresso del sistema di distribuzione, capace di gestire l'accumulo del gas: in caso di sovrannomina, il surplus viene accumulato mentre in caso di sottostima, se l'accumulo è sufficiente, si preleva da lì senza attivare energia di bilanciamento. È stato creato un modello di simulazione con Arena Simulation, usando dati reali del 2017 per il settore domestico (8754 ore di gas). La simulazione è stata effettuata su una stazione di riduzione con il massimo consumo. Sono stati creati modelli As-Is e To-Be per confrontare il sistema attuale con quello proposto. I risultati mostrano una riduzione del 32% dell'energia di bilanciamento positiva e del 34% di quella negativa, con una pressione media nel sistema di 2.23 bar, ben entro i limiti accettabili. Per il futuro, si prevede di: estendere il modello al settore commerciale e ad altre stazioni di riduzione,

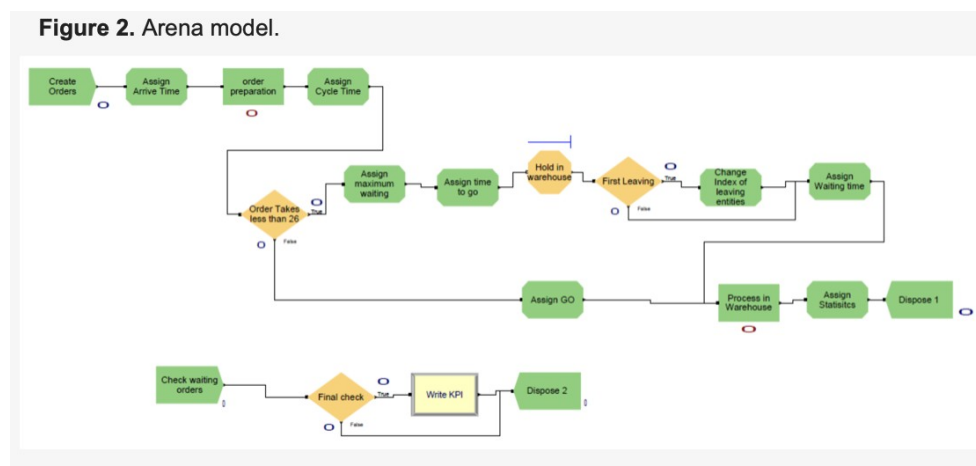
applicare il modello ad altri territori in Croazia, dove i consumi e le infrastrutture possono variare, valutare l'uso combinato con metodi di previsione avanzata, come il machine learning. Tuttavia, esistono ostacoli legali e pratici. Attualmente, la normativa non consente interventi di questo tipo. Inoltre, i distributori potrebbero non voler implementare una soluzione utile solo ai fornitori (a meno che non siano anche fornitori loro stessi), poiché dovrebbero gestire l'accumulo senza benefici diretti. In sintesi, la soluzione tecnica appare promettente per ridurre gli errori di bilanciamento e i costi associati, ma richiede un adeguamento normativo e una chiara distribuzione dei vantaggi e degli oneri. (21)

9.5 Utilizzo del software (Arena) in catene di forniture

Il paper analizza il problema della consolidazione temporale delle spedizioni per un operatore logistico terzo (3PL) che trasporta prodotti da più fornitori verso un centro di consolidamento, e da lì a numerosi rivenditori in Europa. La consolidazione temporale consiste nell'accumulare ordini nel tempo per effettuare spedizioni più grandi e meno frequenti, riducendo così i costi di trasporto, le emissioni di CO₂, il traffico e l'impatto ambientale. L'obiettivo è trovare un equilibrio tra costi di trasporto, tempi di consegna e costi di magazzino. Lo studio si concentra su un caso reale di un'azienda europea di design di mobili, che non produce ma progetta e vende mobili realizzati da oltre 20 fornitori dell'Est Europa. Il sistema logistico, gestito da un 3PL, include un centro di consolidamento nell'Europa occidentale e più di 1000 clienti distribuiti in vari paesi, rendendo impossibile l'uso di consegne dirette (milk run). Il contesto è quello della produzione make-to-order (produzione su commessa), in cui i volumi per singolo cliente sono molto bassi (anche meno di un pallet), ma le consegne sono frequenti. Attualmente si adotta una politica di consegna immediata per garantire la reattività della supply chain, senza applicare la consolidazione temporale. Tuttavia, questa politica potrebbe essere inefficiente in termini di costi e sostenibilità. Lo studio, tramite simulazioni, analizza l'impatto dell'introduzione della consolidazione temporale in un ambiente make-to-order a lunga lead time. L'obiettivo è combinare la consolidazione di prodotto (già esistente) con quella temporale, consentendo l'accumulo di ordini prima di assegnare rotte e clienti alle spedizioni. Viene proposta una formula approssimativa per aiutare i manager a decidere quando e con quali clienti applicare la strategia di consolidazione, in base al potenziale di riduzione delle spedizioni. Lo studio si distingue perché esplora una situazione poco studiata: domanda bassa, lead time lungo e rete logistica outbound estesa, offrendo una guida pratica per migliorare l'efficienza e la sostenibilità nelle spedizioni. Il paper esamina i diversi tipi

di consolidamento delle spedizioni lungo la supply chain, con particolare attenzione al consolidamento temporale nell'ambito della logistica outbound terrestre. Il consolidamento può avvenire in più fasi: all'origine (da parte dei fornitori), nei centri di consolidamento, o tramite metodi come il milk run, ovvero la raccolta di ordini da più fornitori per più clienti con lo stesso veicolo. Diversi studi hanno indagato varie configurazioni, inclusa la collaborazione tra spedizionieri, l'uso di piattaforme di cross-docking e i centri di consolidamento urbani (UCC), che tuttavia non sono rilevanti per questo studio poiché i rivenditori sono diffusi in più paesi. Il paper si concentra sulla consolidazione temporale di spedizioni da più fornitori a centinaia di rivenditori, in un contesto make-to-order con lunghi lead time e domanda bassa e irregolare. Le politiche classiche di consolidamento — basate su quantità, tempo o una combinazione di entrambi — non sono adatte in questo contesto, perché i volumi per cliente sono troppo piccoli e i tempi troppo lunghi per attendere l'accumulo di carichi completi. Pertanto, si propone una politica di consolidamento temporale personalizzata, basata su regole speciali, per decidere quando rilasciare una spedizione consolidata. Il consolidamento può essere integrato con decisioni di inventario e produzione, ma ciò è più applicabile in ambienti make-to-stock o dove si usa la strategia Vendor Managed Inventory (VMI), che richiede dati di vendita in tempo reale. Tuttavia, nel contesto dello studio (con fornitori indipendenti in vari paesi), il tempo di preparazione ordine (OPT) è stocastico e non controllabile, rendendo difficile un'integrazione piena con produzione e inventario. Infine, viene discussa la distinzione tra approcci ricorrenti (in cui la decisione di spedizione viene rivalutata ogni volta che arriva un nuovo ordine) e non ricorrenti (con regole fisse di spedizione). Questo studio adotta un approccio ricorrente, ma con regole particolari per adattarsi alla variabilità della domanda e alle lunghe tempistiche del sistema. Lo studio considera tre tipi di consolidamento nella supply chain analizzata: consolidamento da parte dei fornitori, consolidamento da parte del 3PL nel centro di consolidamento e il consolidamento temporale basato sul tempo, che è il focus principale dello studio. In questo modello, il consolidamento avviene nel centro di consolidamento a partire dall'arrivo del primo ordine per un cliente. Il tempo di attesa causato dal consolidamento è chiamato Consolidation Waiting (CW). Il tempo logistico inbound (ILT) è la somma di CW e del tempo di preparazione ordine (OPT), che include produzione e trasporto e segue una distribuzione normale. Il tempo logistico outbound (OLT) va da uno a due giorni. Il consolidamento non deve estendere troppo il tempo di consegna, altrimenti i benefici si perdono rapidamente. Il routing (milk run) viene eseguito ogni giorno, ma le decisioni di consolidamento temporale sono prese indipendentemente per ogni cliente, dato che la

domanda complessiva è stabile. Questo consente flessibilità nell'invio immediato di ordini o nel loro consolidamento. Il consolidamento temporale parte con l'arrivo di un ordine e termina quando si verifica una delle seguenti quattro condizioni (C1–C4): C1 (non ricorrente): un ordine è in magazzino da più di 26 giorni (soft deadline di 4 settimane) C2 (non ricorrente): è trascorso il tempo massimo di attesa (MAW = 7 giorni) C3 (ricorrente): arriva un ordine con OPT > 26 giorni → tutti gli ordini di quel cliente vengono spediti C4 (ricorrente): nessun ordine in fase di preparazione (OIP = 0) → spedizione immediata.



Le decisioni si basano su criteri dinamici, influenzati da: il numero medio di ordini per cliente (calcolato usando la Legge di Little: $L = \lambda w$), la distribuzione stocastica degli OPT, il fatto che non vi siano limiti alla dimensione dei lotti e la presenza di un'infrastruttura IT per monitorare gli ordini. Il modello di simulazione (realizzato in Arena Software) esegue le operazioni per un anno con 30 repliche per ciascun scenario. Gli ordini sono le entità simulate. Si controlla ogni ora la condizione degli ordini in attesa. Le decisioni vengono salvate in un file Excel. I moduli chiave includono:

- Assign Module per calcolare MAW
- Hold Module per CW
- Decide Module per contare i batch

L'obiettivo del manager è ridurre gradualmente i tempi di consegna, agendo su: tempi logistici, scelta/negoziazione con fornitori ed eliminazione di attese inutili nei centri di consolidamento. Lo studio mira a identificare quando conviene attendere per consolidare e quando invece è più efficace spedire subito, per ottimizzare costi di trasporto senza penalizzare il lead time. Analizzando i dati si è notato maggiore variabilità nei tempi di

produzione e trasporto favorisce il consolidamento, purché il sistema abbia abbastanza ordini attivi e una soft deadline ben calibrata. In conclusione, possiamo dire sottolineare l'importanza del consolidamento temporale per ridurre i costi totali di trasporto in un ambiente make-to-order, in cui il lead time è più lungo del normale. Il lavoro contribuisce alla letteratura sulla supply chain sostenibile, raggiungendo obiettivi sociali, ambientali ed economici attraverso la riduzione del numero di spedizioni. Nello studio viene analizzata una particolare forma di consolidamento basato sul tempo, in cui si considerano solo gli ordini arrivati in anticipo, mentre quelli che arrivano in ritardo non vengono inclusi nel consolidamento. È stato utilizzato un modello di simulazione sviluppato con il software Arena per rappresentare la supply chain di un'azienda di arredamento. I principali benefici economici derivanti dal consolidamento temporale riguardano il fornitore logistico 3PL, che gestisce un centro di consolidamento per rifornire centinaia di clienti nell'Europa occidentale. L'aumento del lead time medio causato dal consolidamento è stato limitato; tuttavia, con una configurazione appropriata dei parametri, la percentuale di spedizioni ridotte può superare il 30%. È stata inoltre elaborata una formula per calcolare questa percentuale di riduzione. Le opportunità di consolidamento temporale aumentano quando c'è maggiore variabilità nell'OPT e quando il tempo medio tra gli ordini è di quattro giorni o meno. I decisori possono usare questo studio per stimare quando è più conveniente applicare il consolidamento temporale e per determinare la scadenza soft più adatta (se necessaria). Quando la differenza tra il lead time medio e la scadenza soft è ampia (pari alla deviazione standard o superiore), è improbabile che il consolidamento temporale sia utile. Sono necessarie ulteriori ricerche per includere più scenari, in particolare quando la scadenza supera il lead time medio. È anche importante combinare routing e consolidamento temporale, specialmente quando la domanda varia di giorno in giorno per un gruppo di clienti. In futuro, si possono considerare approcci diversi dalla simulazione. Negli ultimi anni, e soprattutto durante la pandemia da COVID-19, si è registrata una crescente tendenza all'uso di decisioni basate sui dati, come proposto in questo studio. Tuttavia, è fondamentale mantenere un equilibrio tra tali decisioni e il giudizio esperto, per stabilire quando sia effettivamente conveniente procedere al consolidamento. (22)

9.6 Utilizzo del software (Arena) in catene di forniture

Le supply chain per la sanità pubblica trasportano prodotti dai produttori al punto di utilizzo passando attraverso diversi livelli di distribuzione, usando vari mezzi di trasporto e sistemi di stoccaggio. Le vaccinazioni presentano una complessità aggiuntiva dovuta alla necessità

della catena del freddo e alla richiesta di maggiore agilità ed efficienza per garantire la qualità e la disponibilità dei vaccini. Le catene di approvvigionamento dei vaccini (iSC) spesso non funzionano adeguatamente, rappresentando un importante ostacolo per ottenere alti tassi di copertura vaccinale nei paesi a basso e medio reddito. Molti di questi sistemi sono obsoleti, inefficaci e poco affidabili, essendo stati progettati più di 40 anni fa secondo strutture amministrative superate. Di conseguenza, frequenti esaurimenti di scorte, inefficienze dovute a eccessi di magazzino, previsioni inaccurate e guasti negli impianti della catena del freddo compromettono la distribuzione e la qualità dei vaccini. Con lo sviluppo di nuovi vaccini e l'espansione dei programmi di immunizzazione, cresce la necessità di ridurre gli sprechi, migliorare l'efficienza e la affidabilità, e introdurre maggiore flessibilità nelle catene di approvvigionamento. A tal fine, molti investimenti sono stati fatti, e diversi enti pubblici e privati hanno adottato un approccio di design sistemico per analizzare e migliorare le prestazioni della supply chain. Il paper descrive questo approccio di design sistemico applicato alle reti di iSC in Sierra Leone, Madagascar, Niger e Guinea, con l'obiettivo di identificare i colli di bottiglia, supportare i decisori nell'individuare cambiamenti progettuali e simulare l'impatto di tali cambiamenti con software di ottimizzazione di rete. L'articolo riporta sei lezioni apprese da queste esperienze, sottolineando l'importanza di decisioni basate su evidenze per migliorare le performance della supply chain vaccinale. Tra il 2018 e il 2020, quattro paesi hanno applicato un approccio di system design (Fig. 1) che prevede il coinvolgimento degli stakeholder e l'uso di vari strumenti di modellazione per analizzare quantitativamente e qualitativamente i diversi componenti della supply chain. L'obiettivo era identificare modifiche nelle interazioni tra componenti per migliorare l'efficienza. L'approccio in cinque fasi consente agli stakeholder di valutare scenari diversi, formulare domande "what if" e misurare l'impatto delle modifiche proposte. I risultati della modellazione forniscono evidenze da validare con gli stakeholder per prendere decisioni più informate sul design della supply chain vaccinale (Fig. 2). Ogni paese ha seguito questi passaggi.

Timeline	Q2 2018	Q3 2018	Q4 2018	Q1 2019	Q2 2019	Q3 2019	Q4 2019	Q1 2020	Q2 2020	Q3 2020	Q4 2020
Sierra Leone	Introduction Workshop					Data Collection	Modeling and Analysis ----- Report Back ----- Final Results				
Madagascar				Introduction Workshop		Data Collection	Report Back	Final Results			
Niger	Introduction Workshop					Data Collection	Modeling and Analysis ----- Report Back	Final Results			
Guinea			Introduction Workshop			Data Collection	Data Collection			Initial Report Back	Final Results

Fig. 2

Step 1: Advocacy e introduzione. In ogni paese è stato organizzato un workshop con ampio coinvolgimento degli stakeholder a tutti i livelli del sistema sanitario, inclusi manager dell'immunizzazione, logistici, rappresentanti di magazzini centrali e partner come UNICEF e WHO. Durante il workshop sono stati identificati i principali colli di bottiglia e punti di forza della supply chain vaccinale, definendo un obiettivo comune di performance elevata e creando una base solida per le fasi successive. Step 2: Raccolta dati e pianificazione dell'analisi. Sono stati raccolti dati su costi, risorse umane, struttura della rete, capacità e ubicazione delle attrezzature per la catena del freddo, dettagli sui vaccini e materiali di consumo. In alcuni paesi sono state considerate anche possibilità di integrazione con altri prodotti (es. ossitocina) e l'uso di veicoli aerei autonomi (AAV). I dati sono stati raccolti da fonti esistenti e tramite interviste a operatori sul campo, considerando anche costi nascosti come spese di trasporto a carico degli operatori sanitari. Sono stati individuati sette criteri decisionali quantitativi e qualitativi per valutare ogni scenario. Step 3: Analisi degli scenari di sistema con modelli di simulazione e ottimizzazione. Sono stati utilizzati software come LLamasoft Supply Chain Guru e AnyLogistix per modellare la situazione attuale e diversi scenari di miglioramento. L'ottimizzazione ha identificato le soluzioni a costo minimo senza considerare vincoli operativi, mentre la simulazione ha incluso condizioni reali come limiti di veicoli e orari di lavoro. Sono stati analizzati costi totali, costi per dose, capacità e volumi movimentati. Analisi complementari con Excel e mappe digitali hanno supportato la valutazione di aspetti aggiuntivi. Step 4: Costruzione del consenso e definizione della roadmap. I risultati sono stati condivisi con gli stakeholder tramite uno strumento di analisi a semaforo (Fig.3), che ha valutato l'impatto di ogni scenario su criteri quantitativi (es. costi) e qualitativi (es. equità e difficoltà di implementazione). Ogni criterio è stato classificato

come positivo (verde), limitato (giallo) o negativo (rosso). In un workshop finale, i partecipanti hanno discusso i risultati e definito le priorità per l'implementazione delle modifiche più efficaci.

Scenario	Total Cost	Cost per Dose	CCE Capacity	Logistics Burden on HCW	Feasibility to implement	Risk of Mis-handling	Equity
Ignore administrative boundaries for resupply points							
Adding Oxytocin into vaccine CCE							
Direct delivery to health facilities							
Using AAVs in hard-to-reach areas							

= negative effect = positive effect = limited effect

Fig. 3 Risultati suddivisi a semaforo riguardanti impatto di ogni scenario

Lezione 1: Definire gli obiettivi del sistema basandosi sulle priorità del paese. Gli stakeholder hanno individuato priorità comuni come ridurre i costi operativi, creare un sistema efficiente, equo e sostenibile, garantire la disponibilità dei vaccini soprattutto all'ultimo miglio e migliorare l'uso delle attrezzature per la catena del freddo. L'integrazione di altri prodotti sanitari nella catena del freddo è stata un'altra priorità condivisa. Lezione 2: Raggiungere consenso sugli scenari da modellare. Gli stakeholder hanno scelto scenari realistici e contestualizzati, includendo frequenze di consegna variabili, punti di rifornimento più vicini ignorando i confini amministrativi e modifiche ai livelli della catena di distribuzione. Alcuni paesi hanno esplorato l'uso di veicoli aerei autonomi e l'integrazione di prodotti nella supply chain. Lezione 3: La modellazione fornisce evidenze ma non risposte definitive. La modellazione aiuta a valutare vantaggi e svantaggi delle opzioni senza implementarle, ma le decisioni finali devono considerare il contesto politico, operativo e sociale del paese. Alcuni cambiamenti tecnici possono essere difficili da realizzare senza adeguato consenso e adattamento alle realtà locali. Lezione 4: I costi non devono prevalere su altri criteri decisionali. È importante bilanciare criteri quantitativi (es. costi) e qualitativi (es. equità, facilità di implementazione). Alcuni scenari con costi maggiori possono comunque essere preferibili se riducono il carico logistico sugli operatori sanitari o migliorano altri aspetti prioritari. Lezione 5: Raccogliere dati in modo efficiente, non necessariamente esaustivo. Bastano campioni rappresentativi di strutture per ottenere dati sufficienti a modellare la supply chain, poiché raccogliere dati dettagliati da ogni singolo punto sarebbe impraticabile. Tuttavia, è importante pulire e standardizzare i dati raccolti, spesso non uniformi e soggetti

a cambiamenti frequenti. Lezione 6: Non tutte le domande possono essere risolte con la modellazione. La modellazione aiuta a capire flussi, capacità, trasporti e inventari, ma non può fornire stime precise di risorse umane, gestione delle informazioni o fattori sociali che influenzano la copertura vaccinale. Altri strumenti e analisi sono necessari per valutare questi aspetti e per determinare i costi finanziari reali. L'approccio di system design permette di identificare modifiche alla catena di approvvigionamento per migliorarne efficienza e affidabilità. Le esperienze di quattro paesi contribuiscono alle migliori pratiche globali, sottolineando l'importanza del coinvolgimento e del consenso tra gli stakeholder, fondamentali per definire priorità spesso contrastanti (ad esempio, la consegna diretta ai centri sanitari aumenta i costi ma riduce il carico sugli operatori e può migliorare la copertura vaccinale). Un altro principio chiave è scegliere scenari fattibili, che tengano conto di risorse, politiche e contesto politico locale. La modellazione risponde a domande "what if", ma deve riflettere la realtà concreta, e l'evidenza ottenuta può o meno favorire il consenso politico necessario per cambiamenti significativi, come l'integrazione della gestione vaccinale. Una limitazione dello studio è che non affronta l'implementazione pratica delle modifiche, che richiederà advocacy e decisioni politiche basate sulle evidenze fornite. Infine, il system design offre indicazioni e confronti tra scenari, ma non risposte definitive: il buon senso e la comprensione del contesto paese rimangono fondamentali per prendere decisioni efficaci. (23)

10. ANALISI DELL'ELABORATO

Andando ad analizzare l'elaborato in questione possiamo notare come la supply chain sia possibile utilizzarla in ambienti anche molto diversi tra loro, possiamo però sottolineare un tema ricorrente: l'utilizzo della Supply Chain in ambiti di simulazione, previsione e ottimizzazione. Avendo così tanti utilizzi e spaziando molto sono stati individuati molti sotto-temi più frequenti sono: quasi tutti gli articoli utilizzano approcci di simulazione per analizzare o migliorare processi della supply chain (es. trasporto, produzione, distribuzione). Strumenti come SIMIO, MATLAB, modelli agent-based o discrete-event simulation sono citati più volte. Numerosi studi trattano di ottimizzazione dei tempi, riduzione del rischio, gestione della complessità, riduzione delle emissioni, o contenimento dei costi nei processi della supply chain. Troviamo anche collegamento tra inquinamento, riduzione degli sprechi e supply chain è oggi uno dei temi più centrali nella sostenibilità ambientale e nella transizione ecologica delle imprese. Troviamo applicazioni concrete in settori diversi: industria farmaceutica, alimentare, automotive, gas naturale, container terminal. Riportando

nello specifico gli articoli analizzati come “il porto di Sines”, “tempi di consegna e riduzione del rischio di farmaci”, “il piano di un’azienda produttrice di componenti di automobili” o “l’ottimizzazione dei costi in Croazia in una filiera di gas naturale”. Possiamo identificare un filo conduttore principale ovvero l’applicazione di modelli di simulazione per l’analisi, la previsione e l’ottimizzazione di supply chain complesse in contesti reali ricordando che sarebbe riduttivo unificare tutto in un solo tema dopo aver visto tutti gli ambiti che possono essere toccati dalla Supply Chain.

Per quanto riguarda le ripetizioni tra autori: Prosser, Wendy (Professionista sanitario esperto a livello globale con 20 anni di esperienza, più recentemente focalizzato sulla gestione, progettazione e processi di miglioramento della catena di fornitura dei vaccini.). – Spisak, Cary (Migliorare le catene di approvvigionamento dell’assistenza sanitaria per raggiungere le comunità di tutto il mondo. Austin, Texas, Stati Uniti) compaiono due volte con combinazioni simili di autori. Pubblicano su "Journal of Pharmaceutical Policy and Practice" è una rivista accademica open access che pubblica ricerche sulla politica e la pratica farmaceutica. L’obiettivo della rivista è fornire una piattaforma per i ricercatori per condividere prove, preoccupazioni e prospettive sui sistemi farmaceutici, si tratta di uno stesso gruppo di ricerca con pubblicazioni su progetti simili. Per quanto riguarda Viera lo troviamo comparire in due articoli sotto il nome di: Vieira, Antonio – FME Transactions e Vieira, A.A.C. – Procedia Manufacturing. L’unico legame è il luogo di pubblicazione, ovvero il portogallo.

Le riviste che vengono ripetute o citate più spesso sono: Sustainability Switzerland (Sustainability (ISSN 2071-1050) è una rivista accademica internazionale e interdisciplinare, ad accesso aperto, sulla sostenibilità ambientale, culturale, economica e sociale degli esseri umani, che offre un forum avanzato per studi relativi alla sostenibilità e allo sviluppo sostenibile. Pubblica recensioni, articoli di ricerca periodici, comunicazioni e brevi note, e non vi sono limiti alla lunghezza degli articoli. Il loro obiettivo è incoraggiare gli scienziati a pubblicare la loro ricerca sperimentale e teorica relativa alle scienze naturali, sociali e umanistiche nel modo più dettagliato possibile, al fine di promuovere previsioni scientifiche e valutazioni d’impatto del cambiamento globale e dello sviluppo. È necessario fornire dettagli sperimentali e metodologici completi affinché i risultati possano essere riprodotti.) E Journal of Pharmaceutical Policy and Practice (JoPP) (precedentemente nota come Southern Med Review) è una rivista Open Access sottoposta a revisione paritaria che offre ai ricercatori una piattaforma per diffondere i risultati della ricerca empirica, con l’obiettivo

che le persone, ovunque nel mondo, abbiano accesso ai farmaci di cui hanno bisogno e siano in grado di utilizzarli razionalmente. La rivista abbraccia tutti gli aspetti della farmacia, inclusi quelli clinici, sociali, amministrativi ed economici. Copre anche gli aspetti farmaceutici delle politiche sanitarie, offrendo una piattaforma a ricercatori, accademici e professionisti di tutto il mondo per condividere evidenze, preoccupazioni e prospettive sui sistemi farmaceutici, la gestione, l'etica e l'analisi finanziaria. Il collegamento con il tema della Supply chain non è causale dati gli articoli riguardanti l'ambito farmaceutico attraverso la previsione e simulazione della supply chain ma soprattutto perché parliamo di un'istituzione multidisciplinare che studia, promuove e pubblica su diversi campi. Possiamo fare un'osservazione riguardante la tendenza crescente, ovvero il picco si osserva nel triennio 2022-2024 con 8 pubblicazioni su 16 totali, quindi il 50% del totale, ciò suggerisce un interesse crescente verso i temi trattati. Troviamo la presenza di studi molto recenti (2025), con poche pubblicazioni antecedenti al 2020, questo mostra che la maggior parte dei contributi è recente, con forte sviluppo negli ultimi 5 anni.

CONCLUSIONE

In questo elaborato si è cercato di spiegare la struttura della supply chain, partendo dalla sua natura intrinseca, illustrando le sue peculiari caratteristiche, per passare poi alle sue diverse applicazioni e ai possibili sviluppi futuri. Nel corso della trattazione è risultato evidente come la supply chain abbia un ruolo fondamentale per quanto riguarda la simulazione e la previsione, destinata a diventare sempre più un elemento indispensabile nelle aziende. Nel corso delle ricerche svolte è stato doveroso chiedersi perché nel tempo la supply chain sia riuscita ad avere questo ruolo cardine e non è stato difficile capirlo, perché ai temi precedenti si aggiunge un terzo elemento di successo, a cui le aziende non possono rinunciare, cioè l'ottimizzazione. Questi fattori, simulazione-previsione-ottimizzazione, che nel tempo sono diventati sempre più precisi e accurati, hanno permesso alle aziende di limitare spese inutili, eliminare eccessi di produzione e massimizzare i guadagni, sapere quando dover riordinare pezzi, così da avere sempre a disposizione gli articoli richiesti dal compratore, eliminare tempi di attesa, migliorare la logistica dei trasporti. Il risultato finale di tutto questo processo non poteva che tramutarsi in maggiore efficienza e resa. È stato molto importante analizzare i diversi tipi di software esistenti, poiché hanno caratteristiche così come anche funzioni diverse. Un eventuale miglioramento dell'elaborato potrebbe contenere una dimostrazione del reale valore di questi software, che molto spesso hanno notevoli differenze a seconda delle versioni, gratuite o a pagamento, così da poter analizzare anche questi aspetti. Ad oggi già sono presenti numerosi software specifici, ma è già possibile fare una previsione concreta di un aumento esponenziale nel corso degli anni di software sempre più precisi e performanti; potrebbe essere interessante quindi confrontare i primi software con gli ultimi usciti, in modo da poterli paragonare e sottolineare il progresso della tecnologia nel tempo. È stato quindi necessario riflettere, prove alla mano, sul concreto utilizzo della supply chain attraverso i report degli articoli scientifici che mostrano l'utilizzo della supply chain nel mondo reale. Questo passaggio è stato molto importante perché ha permesso di considerare non solo un'unica visione, ma anche di spaziare attraverso i più disparati utilizzi e infinite funzionalità, anche molto diverse tra loro. Citando solo alcuni di questi articoli (14), (10), (20), si passa dall'utilizzo farmaceutico a quello in un piazzale per ottimizzare lo spazio dei container, al settore automotive e persino alla riduzione di emissioni. Tutto questo è possibile grazie al fatto che la supply chain è dotata di notevoli capacità che consentono duttilità in ambiti e contesti anche molto differenti tra loro. L'argomento nel suo insieme andrebbe ulteriormente ampliato e sarebbe opportuno aggiungere altri dati o ricerche, sul come ad esempio l'intelligenza artificiale possa

modificare, ampliare e migliorare il tutto. Quest'ultimo aspetto è molto attuale e di sicuro non ancora del tutto approfondito in articoli scientifici, ma sarebbe molto interessante svilupparlo perché sicuramente queste due strade sono destinate ad incontrarsi.

BIBLIOGRAFIA

1. Supply Chain <https://edalab.it/supply-chain-significato/>
2. Supply Chain.: cos'è, definizione e gestione <https://www.mecalux.it/blog/supply-chain-cos-e>
3. Gestione delle scorte
[http://people.uniroma2.it/stefano.giordani/didattica/logistica/Dispense/8.GestioneInventario\(Stocast\).pdf](http://people.uniroma2.it/stefano.giordani/didattica/logistica/Dispense/8.GestioneInventario(Stocast).pdf)
4. Importanza dei fornitori <https://www.ibm.com/it-it/topics/supplier-management>
5. Considerazioni generali sui software trovate in rete
6. Software simulazione Supply Chain <https://gmdhsoftware.com/it/supply-chain-planning-software/>
7. AnyLogic <https://www.anylogic.com>
8. Llamasoft <https://www.coupa.com/products/supply-chain-design/>
9. Blue Yonder <https://it.blueyonder.com>
10. Uno strumento di simulazione per prevedere il comportamento di un nuovo pre-gate intelligente presso il terminal container di Sines <https://www.mdpi.com/2071-1050/17/1/153>
11. La complessità della gestione finanziaria logistica e del sistema dinamico non lineare del sistema della catena di fornitura
<https://www.worldscientific.com/doi/epdf/10.1142/S0218348X2240059X>
12. Un framework di modellazione basato su agenti per la progettazione di una rete di supply chain dinamica a ciclo chiuso.
<https://link-springer-com.ezproxy.cad.univpm.it/article/10.1007/s40747-022-00780-z>
13. Utilizzo della simulazione per modellare le operazioni logistiche di un'azienda del settore del cemento <https://scindeks-clanci.ceon.rs/data/pdf/1451-2092/2019/1451-20921904683V.pdf>
14. Valutazione dei tempi di consegna e della riduzione del rischio di una linea di produzione di farmaci sterili mediante simulazione <https://www-sciencedirect-com.ezproxy.cad.univpm.it/science/article/pii/S0098135421001794?via%3Dihub>
15. Simulazione intelligente: integrazione di SIMIO e MATLAB per implementare sistemi di supporto alle decisioni nell'ambiente di simulazione <https://www-sciencedirect-com.ezproxy.cad.univpm.it/science/article/pii/S1569190X16301356?via%3Dihub>
16. Gli strumenti di simulazione sono pronti per i Big Data? Esperimenti computazionali con modelli di Supply Chain sviluppati in Simio <https://www-scopus->

com.ezproxy.cad.univpm.it/record/display.uri?eid=2-s2.0-85084243631&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&sot=b&sdt=b&s=TITLE-ABS-KEY%28simulation+tools+ready+for+big+data%29&sessionSearchId=de0cb6f07100e6255d33659e4f18d360&relpos=9

17. l'impatto della disposizione del piazzale container sui tempi di movimentazione del carico dei veicoli di trasporto esterni in un terminal intermodale <https://www.archivesoftransport.com/index.php/aot/article/view/755/602>
18. Un modello di simulazione di eventi discreti con un approccio logistico collaborativo e snello applicato all'industria lattiero-casearia <https://link-springer-com.ezproxy.cad.univpm.it/article/10.1007/s12597-024-00863-0>
19. Analisi ambientale ed economica di scenari di catena di fornitura inversa per la rigenerazione utilizzando un approccio di simulazione di eventi discreti <https://link-springer-com.ezproxy.cad.univpm.it/article/10.1007/s10668-023-03141-z>
20. Un piano di produzione aggregato multiprodotto e multiperiodo: il caso di un'azienda produttrice di componenti per automobili <https://www-emerald-com.ezproxy.cad.univpm.it/insight/content/doi/10.1108/bij-07-2021-0425/full/html>
21. Modello di simulazione della filiera del gas naturale in funzione dell'ottimizzazione dei costi: il caso della Croazia <https://link-springer-com.ezproxy.cad.univpm.it/article/10.1007/s42452-021-04901-0>
22. Modellazione del consolidamento del trasporto merci in una catena di fornitura su ordinazione: un approccio di simulazione <https://www.mdpi.com/2227-9717/9/9/1554>
23. Progettare catene di approvvigionamento per soddisfare la crescente domanda di vaccini: evidenze da quattro paesi <https://joppp-biomedcentral-com.ezproxy.cad.univpm.it/articles/10.1186/s40545-021-00368-x>

RINGRAZIAMENTI

Concludo questo percorso di studi, ricco di cambiamenti e crescita personale, ringraziando di cuore le persone a me care, che mi hanno sostenuto, creduto in me e accompagnato passo dopo passo fino a questo traguardo.

Un sentito ringraziamento va alla Professoressa Sara Antomarioni, relatrice della tesi, che ha dimostrato grande umanità e comprensione nei confronti delle mie difficoltà legate al lavoro. Grazie alla sua guida, al suo supporto e alla sua visione, è stato possibile portare a compimento questo percorso di studi con il coronamento della tesi.

A mia madre, emblema di forza e determinazione, che ha voluto fortemente questo mio percorso ed è stata la prima a credere nella mia riuscita.

A mio padre, esempio di equilibrio, mi ha insegnato il valore della responsabilità e il coraggio di affrontare i problemi.

Ai miei nonni, il tempo che mi avete dedicato nell'adolescenza e il vostro amore infinito sono la forza che guida ogni mio traguardo.

Alle mie sorelle, Maria e Elena, perché possiate vedere in me un punto di riferimento e perché questo lavoro dimostri che, con determinazione e forza di volontà, nulla è impossibile.

Ai miei compagni, Giovanni, Francesco, Matteo e Luca, con cui ho condiviso il percorso universitario: senza di voi nulla sarebbe stato così magico e significativo.

A Michele, alla mia squadra e ai vecchi compagni, la pallavolo mi ha insegnato tanto: gli obiettivi si conquistano con determinazione, passione e soprattutto unendo le forze, mai da soli.

Al mio gruppo di amici, per aver portato leggerezza e sorrisi anche nei miei giorni più difficili.

Infine, ringrazio me stesso per non essermi lasciato condizionare da nessuno, per essere rimasto fedele a me stesso in ogni situazione, per non aver ceduto nei momenti più difficili e per aver creduto con determinazione di poter raggiungere questo traguardo.

Concludo con una citazione che mi accompagna:

"Se fossi in te ...

... ma Patroclo morì un'ora dopo aver indossato l'armatura di Achille"