

Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia
Dipartimento di scienze e Metodi dell'Ingegneria

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Gestionale

**Verso supply chain resilienti: analisi delle
disruption, metodi di valutazione della resilienza e
modelli di progettazione.**

Relatore:

Prof. Francesco Lolli

Laureando:

Fresnel Cabrel Tchoudjeu

Correlatore:

Prof. Antonio Maria Coruzzolo

AA. 2023/2024

SOMMARIO

CAPITOLO 1- INTRODUZIONE.....	8
CAPITOLO 2: ELEMENTI FONDAMENTALI DI UNA SUPPLY CHAIN	10
2.1 Definizione e concetti base di supply chain	10
2.2 I vari attori della supply chain	10
2.3 Obiettivi della supply chain	11
2.4 Le vulnerabilità della supply chain.....	12
2.5 Dal rischio alla crisi: la necessità di un cambio di paradigma	14
2.6 Anticipazione delle crisi sistemiche: casi emblematici	14
CAPITOLO 3: SHOCK SISTEMICI CONTEMPORANEI E VULNERABILITA DELLE SUPPLY CHAIN GLOBALI	16
3.1 La Pandemia Covid-19: uno shock senza precedenti.....	16
3.1.1 Impatti immediati e diffusione globale delle interruzioni	16
3.1.2 Settori maggiormente colpiti.....	17
3.1.3 Dipendenza geografica e limiti nel modello Lean.....	19
3.1.4 Lezioni apprese e prospettive future.....	20
3.2 Il conflitto Russia-Ucraina e l’Impatto geopolitico sulle supply chain globali ...	20
3.2.1 Interruzioni nei flussi energetici e agricoli	21
3.2.2 Aumento dei costi di produzione e inflazione nelle filiere Europee	21
3.2.3 Difficoltà logistiche su rotte terrestri e marittime	22
3.2.4 Dipendenza da fornitori critici e urgenza di Reshoring e Nearshoring	22
3.3 La Crisi dei semiconduttori.....	23
3.3.1 Settori maggiormente colpiti.....	23
3.3.2 Conseguenze operative ed economiche.....	24
3.3.3 Cause principali della crisi	24
3.3.4 Implicazioni strategiche e risposte governative	25
3.4 Altri shock sistemicamente rilevanti.....	26
3.4.1 Crisi del canale di Suez e del canale di Panama	26
3.4.2 Tensioni commerciali USA-Cina	29

3.5 Considerazioni trasversali e lezioni strategiche	30
3.5.1 Pattern comuni degli shock sistemici.....	30
3.5.2 Verso supply chain più resilienti	30
3.5.3 Raccomandazioni strategiche.....	31
CAPITOLO 4: APPROCCI MULTIDISCIPLINARI ED EVOLUZIONE DELLA RESILIENZA DELLA SUPPLY CHAIN	33
4.1 Evoluzione concettuale e fondamenti multidisciplinari della resilienza	33
4.2 Architettura concettuale: i driver fondamentali della resilienza	34
4.2.1 Agilità: la dinamica della responsività strategica	34
4.2.2 Visibilità: trasparenza informativa e intelligence operativa	35
4.2.3 Flessibilità: adattabilità strutturale e operativa	36
4.2.4 Collaborazione: ecosistemi di valore inter-organizzativi.....	36
4.2.5 Condivisione delle informazioni: integrazione dell'intelligence strategica .	37
4.2.6 Sostenibilità nella supply chain	38
4.2.7 Struttura della supply chain	39
4.3 Frontiere innovative nella progettazione di supply chain resilienti	40
4.3.1 Modelli quantitativi avanzati e ottimizzazione robusta	41
4.3.2 Approcci ibridi per la gestione dell'incertezza.....	41
4.3.3 Ottimizzazione risk-averse e gestione del rischio finanziario	42
4.3.4 Approcci Game-Theoretic e decisioni multicriterio	43
CAPITOLO 5: CAPACITÀ E STRATEGIE PER UNA SUPPLY CHAIN RESILIENTE	45
5.1 Le tre capacità fondamentali per una supply chain resiliente	45
5.1.1 Capacità di assorbimento nella supply chain.....	45
5.1.2 Capacità adattiva: reazione e adattamento alle interruzioni	46
5.1.3 Capacità di ripristino: ritorno alla normalità	46
5.2 Relazione tra capacità e interruzioni.....	48
5.3 Gerarchia della resilienza nella supply chain	48
5.4 Strategie di resilienza nella supply chain.....	49
5.4.1 Strategie di resilienza proattive	49
5.4.2 Strategie di resilienza reattive	52

CAPITOLO 6: METODI DI MISURAZIONE DELLA RESILIENZA DELLA SUPPLY CHAIN	54
6.1 Approcci quantitativi alla misurazione della resilienza	54
6.1.1 Indicatori di performance chiave (KPI).....	54
6.1.2 Metriche finanziarie	55
6.1.3 Modelli matematici e statistici	55
6.2 Approcci qualitativi alla misurazione della resilienza.....	56
6.2.1 Framework di assesment	56
6.2.2 Maturity models	57
6.2.3 Analisi scenario-based	57
6.3 Approcci integrati e multidimensionali	58
6.3.1 Network analysis	58
6.3.2 Digital twins e tecnologie emergenti	58
6.3.3 Framework multidimensionale: le “4R” della resilienza	59
6.4 Supply Chain Resilience Index (SCRI).....	59
6.4.1 Metodologia di calcolo e determinazione dei pesi	59
6.4.2 Validazione e implementazione dinamica.....	60
6.4.3 Valore strategico e applicazioni manageriali	61
6.5 Sfide e limitazioni nella misurazione della resilienza	61
6.6 Tendenze future e sviluppi emergenti	62
CAPITOLO 7: MODELLI DI PROGETTAZIONE PER UNA SUPPLY CHAIN RESILIENTE	63
7.1 Modello di programmazione frazionaria robusta adattiva bi-obiettivo	63
7.2 Modello resiliente con incertezza nella fornitura	64
7.3 Approccio ibrido stocastico Fuzzy-Robusto	65
7.4 Programmazione ibrida robusta-stocastica	67
7.5 Ottimizzazione avversa al rischio	68
II. Confronto tra i vari modelli di progettazione della SCR	69
CONCLUSIONE.....	73
Bibliografia	74

INDICE FIGURE

Figura 1: supply chain.....	11
Figura 2: canale di Suez	27
Figura 3: canale di Panama	28
Figura 4: le tre capacità fondamentali di resilienza della supply chain	47
Figura 5: gerarchia SCR	49

INDICE TABELLE

Tabella 1: i vari approcci alla progettazione della SCR.	44
Tabella 2: confronto approfondito tra modelli di progettazione della SCR	70

ABSTRACT

Negli ultimi anni, le supply chain sono state sottoposte a stress senza precedenti a causa di shock sistemici come la pandemia di Covid-19, il conflitto Russia-Ucraina e la crisi dei semiconduttori, che hanno evidenziato gravi vulnerabilità strutturali nei modelli tradizionali di gestione, spesso eccessivamente orientati all'efficienza e privi di adeguati meccanismi di resilienza. Questa tesi adotta un approccio multidisciplinare per analizzare le criticità delle supply chain contemporanee ed esplorare strategie innovative che hanno aiutato a migliorare la capacità di risposta alle crisi. Partendo dall'analisi degli shock recenti, che hanno evidenziato problemi come la concentrazione geografica dei fornitori e l'eccessiva dipendenza dal modello just-in-time e la scarsa visibilità lungo la filiera. Il lavoro identifica tre capacità fondamentali della resilienza: assorbimento, adattamento e ripristino. Il contributo principale risiede nello sviluppo di modelli quantitativi avanzati: programmazione frazionaria robusta bi-obiettivo per bilanciare costi e resilienza, approcci ibridi stocastico-fuzzy per gestire l'incertezza, ottimizzazione avversa al rischio con metriche CVaR. Viene inoltre proposto un framework integrato di misurazione basato sul Supply Chain Resilience Index (SCRI), che combina indicatori quantitativi e qualitativi per valutare la robustezza delle reti logistiche. Il messaggio che emerge è chiaro: oggi, la resilienza non è più un'opzione di riserva, ma un elemento da progettare fin dall'inizio. Le organizzazioni che sapranno anticipare i rischi e integrare la resilienza nei propri modelli decisionali saranno anche quelli più capaci di cogliere opportunità e innovare anche nei momenti più complessi.

CAPITOLO 1- INTRODUZIONE

A partire dalla fine del 2019, la pandemia di Covid-19 ha avuto un impatto sconvolgente sulle supply chain globali, interrompendo quasi ogni attività logistica e produttiva. In pochi mesi, quasi il 97% delle operazioni è stato rallentato o bloccato, costringendo molte imprese a ridimensionare o a chiudere definitivamente (Nikookar, Gligor, et al., 2024).

Successivamente, lo scoppio del conflitto tra Russia e Ucraina ha ulteriormente aggravato le fragilità già emerse durante la pandemia, mettendo in evidenza quanto le supply chain moderne siano vulnerabili a eventi anche geopolitici improvvisi. A queste crisi si è aggiunta la crisi dei semiconduttori, causata da una combinazione di fattori, tra cui la carenza di materie prime, l'aumento della domanda da parte dei settori dell'elettronica e degli smartphone e gli incidenti climatici: la crisi ha avuto un impatto significativo sulla produzione di automobili, elettronica di consumo e altri beni, causando ritardi nelle consegne e aumenti di prezzi (Moktadir & Ren, 2024).

Nel marzo del 2021, l'incidente del canale di Suez ha bloccato il passaggio di una delle principali rotte marittime del mondo per quasi una settimana (Mary-Ann Russon, 2021). Questo evento ha causato ulteriori ritardi nelle consegne e aumenti dei costi di spedizione, amplificando l'impatto della crisi dei semiconduttori. Questi eventi, pur essendo a bassa probabilità ma ad alto impatto, hanno spinto le aziende a ripensare e ristrutturare le loro supply chain per renderle più resilienti.

Un altro caso emblematico e molto recente è stato il malfunzionamento dei sistemi Microsoft il 19 luglio 2024. Un aggiornamento difettoso di un software di terze parti ha causato malfunzionamento su numerosi dispositivi Windows, disattivando sistemi critici in molte aziende e paralizzando operazioni fondamentali (Marco Logistique, 2024). Le conseguenze si sono fatte sentire immediatamente:

- Interruzioni delle operazioni di magazzino e distribuzione: l'incapacità di utilizzare i sistemi informatici ha impedito la gestione delle scorte e la movimentazione delle merci.

- Ritardi nelle consegne: i clienti hanno subito ritardi nella ricezione degli ordini, con conseguenti perdite di vendite
- Aumento dei costi: le aziende hanno dovuto affrontare costi aggiuntivi per riparare i sistemi e implementare soluzioni alternative
- Danno alla reputazione: la fiducia dei clienti nella capacità di consegnare prodotti in modo tempestivo e affidabile è stata compromessa.

Alla luce di queste dinamiche, la resilienza della supply chain è una priorità strategica per le aziende. Essa implica la capacità di resistere, adattarsi e riprendersi rapidamente da interruzioni esterne, mantenendo prestazioni operative accettabili. Negli ultimi anni, l'interesse verso questo tema è cresciuto rapidamente, con studi che offrono linee di guida e modelli per affrontare eventi dirompenti senza perdere il vantaggio competitivo. Oggi più che mai, lo sviluppo di supply chain resilienti è diventato un requisito essenziale per affrontare un futuro sempre più incerto.

Questo lavoro di tesi si propone di esplorare in modo approfondito il percorso “verso supply chain resilienti”. Attraverso un approccio multidisciplinare, combina nozioni teoriche, esempi di crisi significative e l'indicazione di modelli innovativi e strategie per adattarsi. L'obiettivo è offrire una panoramica completa sulle vulnerabilità attuali, sugli shock globali di oggi e sulle risposte che aziende e organizzazioni possono introdurre per rendere le proprie supply chain più forti, flessibili e capaci di affrontare imprevisti. Il primo capitolo si concentra sulle basi concettuali, spiegando cos'è una supply chain e le sue intrinseche vulnerabilità, introducendo la transizione dal rischio alla crisi. Il secondo capitolo analizzerà alcuni tra gli shock più recenti, come la pandemia Covid-19 e il conflitto tra Russia e Ucraina, evidenziando i loro effetti e le principali lezioni da trarre. I capitoli successivi approfondiranno le strategie, i metodi di misurazione e i modelli di resilienza, offrendo strumenti e approcci per la progettazione di supply chain resilienti.

CAPITOLO 2: ELEMENTI FONDAMENTALI DI UNA SUPPLY CHAIN

2.1 Definizione e concetti base di supply chain

La supply chain o catena di approvvigionamento, dato un prodotto o servizio, può essere definita come il sistema integrato costituito da persone, tecnologie, attività, processi, informazioni e risorse necessarie per trasferirlo dal fornitore delle materie prime fino al cliente finale. Essa comprende tutte le fasi del ciclo di vita del prodotto: dalla materia prima, alla consegna al consumatore e talvolta fino allo smaltimento.

Secondo Chopra (2019), La supply chain è una “rete di soggetti e attività che lavorano insieme per convertire le materie prime in prodotti finiti e consegnarli ai clienti nel modo più efficiente possibile”.

Le supply chain nascono nello scopo di massimizzare il valore per il cliente e l'efficienza operativa, minimizzando costi, tempi di consegna e scorte. Tuttavia, in un contesto globale sempre più incerto e soggetto a crisi, la definizione stessa di supply chain si è ampliata per includere nuove dimensioni come la sostenibilità, la digitalizzazione e soprattutto la resilienza.

2.2 I vari attori della supply chain

Le principali componenti di una supply chain in generale sono:

- Fornitori: forniscono materie prime e componenti.
- Produttori: trasformano le materie prime in prodotti finiti o semilavorati che diventano componenti per altri prodotti finiti.
- Distributori: gestiscono la logistica e il trasporto dei prodotti.
- Rivenditori: vendono prodotti ai clienti finali.
- Consumatori: acquistano e utilizzano il prodotto.

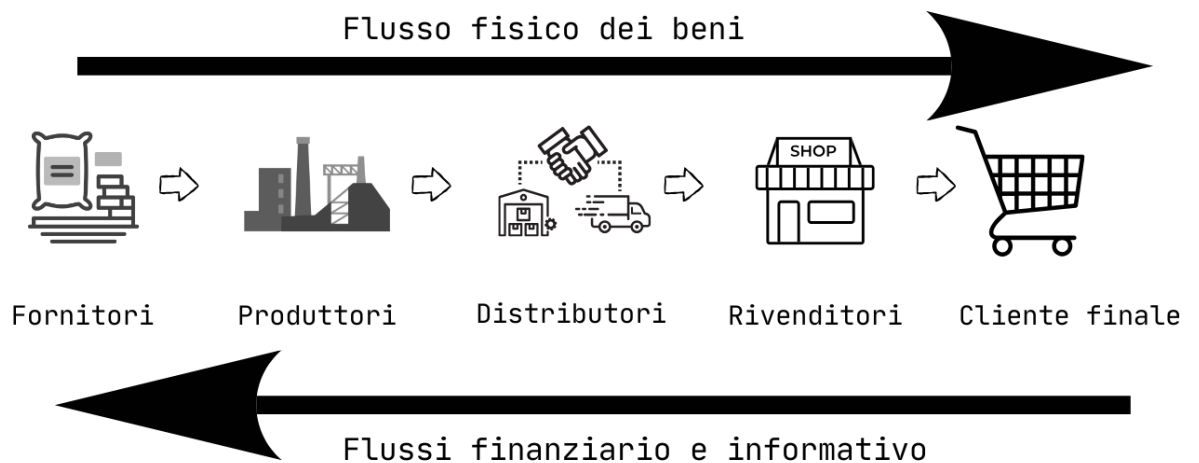


Figura 1: supply chain

All'interno di una supply chain esistono tre flussi principali:

- Il flusso fisico dei beni o materiali, che rappresenta il movimento delle materie prime, dei componenti o dei prodotti finiti. Questo flusso parte dai fornitori di materie prime e si sviluppa lungo tutta la supply chain fino ad arrivare al cliente finale, il quale riceve prodotti o servizi per soddisfare le proprie esigenze.
- Il flusso informativo o il flusso finanziario, che sono diametralmente opposti al flusso fisico.

Il flusso informativo è costituito da dati relativi a ordini, giacenze, tracciabilità e previsioni della domanda. Attraverso questo flusso, il cliente comunica a monte della supply chain i propri desiderata, e le varie aziende coinvolte condividono queste informazioni per soddisfarlo al meglio. Il flusso finanziario invece è costituito da pagamenti, costi e flussi di cassa che si muovono lungo l'intera filiera. L'efficacia nella gestione di questi tre flussi influisce direttamente sulle performance aziendali.

2.3 Obiettivi della supply chain

Gli obiettivi fondamentali della gestione della supply chain sono:

- ❖ Ridurre i costi: ottimizzando i costi operativi lungo tutta la supply chain dalla produzione alla distribuzione, per migliorare i margini e mitigare gli effetti di inflazione e instabilità globale.
- ❖ Efficienza e produttività: coordinare e integrare le attività di produzione, acquisto e logistica per migliorare l'efficienza complessiva della catena e garantire la puntualità delle consegne.
- ❖ Soddisfazione del cliente: garantire un elevato livello di servizio, assicurando la disponibilità dei prodotti e tempi di consegna ridotti, elemento chiave per la competitività aziendale.
- ❖ Flessibilità e capacità di risposta: adattarsi rapidamente ai cambiamenti della domanda e alle condizioni di mercato, grazie a processi snelli e ben pianificati.
- ❖ Gestione del rischio: minimizzare i rischi o ritardi attraverso strategie di diversificazione dei fornitori e solidi rapporti di collaborazione.
- ❖ Sostenibilità: integrare pratiche ambientali e sociali responsabili, rispondendo alle crescenti aspettative di clienti e stakeholder su questi temi.

2.4 Le vulnerabilità della supply chain

Nell'odierno panorama economico globale, caratterizzato da una crescente interconnessione e complessità, le catene di approvvigionamento si trovano ad affrontare una serie di vulnerabilità che possono minacciare la loro stabilità e il loro successo. Queste vulnerabilità possono assumere diverse forme, da eventi imprevedibili come disastri naturali o attacchi informatici a sfide più strutturali come la carenza di risorse critiche o le fluttuazioni dei prezzi di materie prime.

Comprendere le vulnerabilità della supply chain è fondamentale per le aziende che desiderano sviluppare una maggiore resilienza e garantire operativa di fronte a interruzioni. Pettit et al. (2010) le definiscono come “fattori fondamentali suscettibili di portare le aziende a perturbazioni”. Le principali tipologie di vulnerabilità sono:

- ❖ Connettività: la crescente interconnessione tra i vari attori della supply chain, sebbene possa apportare benefici in termini di efficienza e collaborazione, aumenta anche il rischio di propagazione degli effetti negativi in caso di eventi avversi. Un attacco informatico a un fornitore, ad esempio può avere conseguenze

a catena che coinvolgono l'intera rete, interrompendo la produzione e la distribuzione in più punti. Un caso emblematico è l'attacco ransomware a Maersk nel 2017, che ha causato il blocco delle operazioni globali del gigante del trasporto marittimo per diversi giorni (Di Jill Leovy, 2017).

- ❖ Minacce deliberate: come gli attacchi informatici, il sabotaggio e i furti, rappresentano un rischio significativo per la sicurezza e la stabilità della supply chain. L'attacco hacker al colonial pipeline nel 2021 ha evidenziato la vulnerabilità delle infrastrutture critiche agli attacchi informatici, causando l'interruzione della fornitura di carburante negli Stati Uniti orientali per diversi giorni (Luca Mella, 2021). La protezione delle informazioni e la sicurezza fisica delle strutture sono elementi cruciali per mitigare queste minacce.
- ❖ Limite delle risorse: la carenza di risorse critiche, come materie prime, componenti o manodopera, può derivare da disastri naturali, cambiamenti nelle dinamiche del mercato o difficoltà logistiche. La pandemia di Covid-19, ad esempio, ha causato carenze significative di semiconduttori e altri componenti elettronici, creando problemi per le industrie automobilistiche e tecnologiche. Le aziende devono sviluppare strategie di approvvigionamento diversificate e collaborare strettamente con i fornitori per gestire questi rischi.
- ❖ Interruzioni di fornitura/cliente: le interruzioni della supply chain possono essere causate di fallimento aziendali, disastri naturali, eventi geopolitici o problemi di trasporto. Il blocco del Canale di Suez nel 2021, quando la nave "Ever Given" è rimasta incagliata, ha causato ritardi significati nelle consegne globali e ha evidenziato l'importanza di avere piani di contingenza per gestire tali eventi (Mary-Ann Russon, 2021).
- ❖ Turbolenza: si riferisce a cambiamenti rapidi e imprevedibili nel mercato o nell'ambiente operativo, come fluttuazioni dei prezzi delle materie prime o modifiche normative. Le aziende devono adottare strategie flessibili e adattarsi rapidamente ai cambiamenti per affrontare la turbolenza e mantenere il loro vantaggio competitivo.
- ❖ Pressioni esterne: includono normative governative, richieste dei consumatori per pratiche più sostenibili e fluttuazioni economiche globali. Le aziende devono monitorare costantemente l'evoluzione normativa, le tendenze di mercato e le aspettative dei consumatori per rimanere competitive e conformi.

2.5 Dal rischio alla crisi: la necessità di un cambio di paradigma

Le supply chain globali negli ultimi anni hanno registrato una trasformazione sostanziale, sostituendo una natura di mera sicurezza da rischio ad un'esposizione sistemica a perturbazioni complesse e interconnesse. Eventi precedentemente categorizzati come “black swan” – pandemie, guerre geopolitiche, catastrofi causate dal clima – sono diventati all'ordine del giorno e hanno sconvolto l'intera domanda, l'offerta e le infrastrutture logistiche. Questa dinamica ha reso invece obsoleti modelli più piani e basati sull'efficienza e sul just-in-time, spingendo verso un equilibrio tra ottimizzazione di costi e resilienza operativa.

2.6 Anticipazione delle crisi sistemiche: casi emblematici

Pandemia Covid-19 (2020-2022)

La crisi pandemica ha messo alla prova la fragilità delle supply chain globalizzate, colpendo contemporaneamente trasporti, produzione e domanda finale. Un rapporto di UNCTAD, (2021) afferma che il 94% delle aziende Fortune 1000 ha subito perdite, con perdite globali stimate in 4 trilioni di dollari. Gli effetti dello shock sono stati amplificati dalla dipendenza da singoli fornitori e dalla mancanza di buffer strategici.

Crisi dei semiconduttori (2021-2023)

La ripresa post-pandemica e le tensioni geopolitiche tra gli Stati Uniti e la Cina hanno causato una carenza di chip nei settori high-tech e automobilistico. McKinsey & Company, (2022) stima che l'impatto sul PIL globale superi i 500 miliardi di dollari, sottolineando i rischi di una supply chain troppo concentrata in Asia (Taiwan e Corea del Sud coprono il 63% della produzione mondiale).

Conflitto Russia-Ucraina (2022-in corso)

L'invasione russa ha causato una crisi globale dell'energia e dell'alimentazione, con aumenti del prezzo del grano (+60% nel 2022, FAO, (2023)) e sanzioni sul gas. La World

Bank, (2023) afferma che l'insicurezza alimentare ha portato a 47 milioni di persone in povertà estrema, sottolineando il legame tra supply chain e stabilità socioeconomica.

Il blocco del canale di Suez (2021)

L'incidente della nave Ever Given ha interrotto il 12% del commercio marittimo mondiale (UNCTAD, 2021), mostrando la vulnerabilità dei “choke point” logistici. Le spese hanno accelerato l'adozione di strumenti di monitoraggio in tempo reale (IoT e blockchain), superando i 9,6 miliardi di dollari al giorno.

Di conseguenza, le aziende stanno implementando un nuovo paradigma basato sulla resilienza. Il 93% dei leader della supply chain sta investendo in strategie per rendere le proprie catene più resilienti, secondo McKinsey & Company, (2022). Queste tattiche includono:

- Diversità di fornitori e fonti di approvvigionamento.
- La produzione viene localizzata o regionalizzata.
- utilizzo di tecnologie digitali per la tracciabilità e la visibilità.
- aumentare le scorte di sicurezza e pensare a nuovi scenari.

La resilienza non sostituisce l'efficienza, ma la completa: trasforma la gestione del rischio in un vantaggio competitivo per le organizzazioni, consentendo loro di continuare a funzionare anche durante una crisi.

In sostanza, la resilienza per la supply chain è passata da essere semplicemente un modo per far funzionare le cose a diventare una leva strategica fondamentale per rimanere competitivi. Non basta più cercare solo di essere efficienti: in un mondo più connesso e imprevedibile, bisogna saper affrontare crisi improvvise e adattarsi rapidamente ai cambiamenti. Ora si pensa alla resilienza come il nuovo modo di progettare, gestire e far crescere le supply chain a livello globale.

CAPITOLO 3: SHOCK SISTEMICI CONTEMPORANEI E VULNERABILITÀ DELLE SUPPLY CHAIN GLOBALI

Nel corso degli ultimi anni, le supply chain globali hanno subito una serie di shock sistemici senza precedenti che hanno rilevato la fragilità intrinseca di supply chain altamente complesse e interconnesse. Questi eventi, spesso imprevedibili e dirompenti, hanno messo a nudo i limiti del modello just-in-time e della ricerca ossessiva dell'efficienza operativa a discapito della resilienza strategica (Christopher & Holweg, 2017).

L'interconnessione crescente dell'economia globale ha trasformato shock locali in fenomeni sistemici capaci di paralizzare intere filiere produttive. La convergenza temporale di questi eventi ha creato quello che Yossi Sheffi, (2015) definisce un "perfect storm", costringendo aziende e governi a ripensare radicalmente i paradigmi tradizionali di gestione delle catene di approvvigionamento.

3.1 La Pandemia Covid-19: uno shock senza precedenti

L'inizio della pandemia da Covid-19, scoppiata alla fine del 2019, ha rappresentato uno degli shock più significativi e dirompenti nella storia recente delle supply chain a livello mondiale. In pochissimo tempo, l'intero sistema globale di approvvigionamento e distribuzione ha subito una serie di interruzioni senza precedenti, che hanno messo a dura prova la resilienza delle aziende e dei mercati.

3.1.1 Impatti immediati e diffusione globale delle interruzioni

Secondo uno studio recente di Omotolani Eniola Akinbolajo, (2024), il 97% delle aziende a livello globale ha segnalato interruzioni o rallentamenti operativi a causa della pandemia, un dato che evidenzia la portata universale e trasversale dello shock. Le misure di contenimento adottate dai governi, quali lockdown generalizzati, chiusure di

stabilimenti produttivi e restrizioni alla mobilità, hanno causato un blocco quasi totale delle attività in molti settori chiave.

Le supply chain internazionali, strutturate per massimizzare l'efficienza tramite la globalizzazione e la specializzazione produttiva, sono state spezzate da una combinazione di fattori critici (Almeida & Tavares, 2024):

- Chiusure portuali: che hanno rallentato o bloccato il flusso delle merci, con alcuni porti chiave come Shanghai e Los Angeles che hanno registrato riduzioni operative del 60-80%.
- Carenza di manodopera: dovuta a quarantene e malattie, con settori labour-intensive particolarmente colpiti.
- Interruzioni nei trasporti internazionali, con una riduzione del 25% del traffico aereo cargo e significativi ritardi nel trasporto marittimo.

Questi elementi hanno generato un effetto domino che ha interessato ogni fase della supply chain, dalla produzione all'assemblaggio, fino alla distribuzione finale, creando quello che gli esperti hanno definito il "bullwhip effect" più severo mai registrato (Mahesh Rajasekharan, 2020).

3.1.2 Settori maggiormente colpiti

Alcuni settori si sono trovati particolarmente esposti agli effetti della crisi, evidenziando diverse tipologie di vulnerabilità:

1. Industria automobilistica

Il settore automobilistico ha subito uno dei collassi più drammatici durante la pandemia, evidenziando la fragilità di supply chain altamente ottimizzate:

- ❖ Riduzione della produzione globale: la produzione mondiale di veicoli è diminuita del 16% nel 2020, con perdite economiche significative dovute alle interruzioni della supply chain e alla carenza di semiconduttori (Chowdhury et al., 2021).
- ❖ Vulnerabilità del modello just-in-time: l'eccessivo affidamento su scorte minime, tipico dei sistemi Lean ha rivelato una fragilità intrinseca, rendendo le supply chain incapaci di assorbire shock improvvisi o interruzioni prolungate.

- ❖ Crisi dei componenti critici: la carenza di semiconduttori ha causato la chiusura temporanea di numerosi stabilimenti automobilistici, evidenziando la dipendenza critica da fornitori geograficamente concentrati (Sharma et al., 2020).

2. Industria tessile e dell'abbigliamento

L'industria tessile ha rappresentato uno dei settori più vulnerabili a causa della sua dipendenza da catene globali complesse e manodopera intensiva (Anner, 2020):

- ❖ Contrazione severa della produzione: il settore ha registrato una riduzione del 20-30% della produzione globale nel 2020, con impatti particolarmente severi sui paesi produttori in via di sviluppo.
- ❖ Cancellazione massiva degli ordini: le cancellazioni di ordini su larga scala hanno lasciato milioni di lavoratori senza reddito, evidenziando la fragilità delle relazioni contrattuali nelle catene globali del valore.
- ❖ interruzioni logistiche: le restrizioni ai trasporti internazionali e la chiusura dei porti hanno causato significativi ritardi nelle consegne e accumuli di inventario invenduto lungo tutta la supply chain.

3. Settore elettronico e tecnologico

Il comparto elettronico ha evidenziato le criticità di catene di approvvigionamento altamente concentrate geograficamente:

- ❖ Shortage critico di componenti: la carenza di semiconduttori e altri componenti elettronici ha causato aumenti di prezzo significativi e ritardi nella produzione, con tempi di consegna estesi fino a 20-26 settimane (Sharma et al., 2020).
- ❖ Concentrazione geografica dei fornitori: la dipendenza da fornitori asiatici per componenti critici ha creato colli di bottiglia sistemici durante le chiusure imposte dalla pandemia.
- ❖ Paradosso della domanda: l'aumento della domanda per dispositivi tecnologici legati al lavoro remoto ha aggravato la carenza di componenti, creando pressioni aggiuntive su catene già sotto stress.

4. *Settore farmaceutico e sanitario*

Il settore farmaceutico ha rivelato vulnerabilità critiche nella sicurezza degli approvvigionamenti sanitari (Gereffi, 2020):

- ❖ Dipendenza geografica critica: la concentrazione della produzione di principi attivi farmaceutici in Asia, particolarmente in Cina e India, ha messo a rischio la sicurezza sanitaria globale durante le prime fasi della pandemia.
- ❖ Interruzioni nella supply chain del freddo: i prodotti farmaceutici che richiedono temperature controllate hanno subito significative interruzioni logistiche, compromettendo la disponibilità di farmaci essenziali.
- ❖ Shortage di dispositivi medici: la carenza di dispositivi di protezione individuale e ventilatori ha evidenziato la mancanza di capacità produttiva ridondante per far fronte a picchi di domanda improvvisi anche dovuti alla pandemia.

3.1.3 Dipendenza geografica e limiti nel modello Lean

Uno degli aspetti più rilevanti emersi durante la pandemia è stato quanto le forniture siano concentrate in poche aree del mondo, in particolare in Cina e nel Sud-Est asiatico. Questa dipendenza ha reso le aziende vulnerabili a rischi sistemici: se in queste zone qualcosa va storto, l'intera supply chain globale ne risente rapidamente. La cosiddetta "Asia Factory", cioè la concentrazione di produzione in Asia ha mostrato i suoi limiti, specialmente quando intere regioni sono state colpite contemporaneamente dalle restrizioni legate al Covid-19. La Cina, che produce circa il 28% della produzione mondiale, ha visto la sua produzione industriale crollare del 13,5% nei primi mesi del 2020 (Han, 2022). Questa crisi ha messo in discussione il modello Lean, che si basa su scorte minime e processi just-in-time, ritenuto fino ad ora il modo più efficiente di gestire le supply chain. Tuttavia, il Covid-19 ha dimostrato che un'eccessiva ottimizzazione, senza strategie di resilienza adeguate, può rendere le supply chain fragili e soggette a shock improvvisi.

3.1.4 Lezioni apprese e prospettive future

La pandemia da Covid-19 ha rappresentato un punto di svolta nella gestione della supply chain, spingendo le aziende a ripensare le strategie di approvvigionamento e produzione. Secondo (Omotolani Eniola Akinbolajo, 2024). Tra le principali lezioni apprese vi è la necessità di bilanciare efficienza e resilienza, adottando modelli più flessibili che includano:

- Diversificazione dei fornitori geografica e tipologica.
- Aumento delle scorte strategiche per componenti critici.
- Investimenti in tecnologie digitali per migliorare la visibilità e la capacità di risposta.
- Sviluppo di SRM (Supplier Relationship Management) più sofisticati.

Inoltre, la crisi ha accelerato la consapevolezza sull'importanza della sostenibilità e della responsabilità sociale nella gestione delle filiere, elementi che saranno sempre più centrali nel futuro delle supply chain globali.

3.2 Il conflitto Russia-Ucraina e l'Impatto geopolitico sulle supply chain globali

Lo scoppio del conflitto tra Russia e Ucraina nel febbraio 2022 ha rappresentato un ulteriore shock geopolitico di vasta portata, con conseguenze profonde e durature sulle supply chain a livello globale, in particolare in Europa. Questo evento ha messo in evidenza la vulnerabilità delle filiere produttive e logistiche rispetto a tensioni politiche e militari in aree strategiche, accelerando la necessità di ripensare le strategie di gestione e approvvigionamento (Srai et al., 2023).

3.2.1 Interruzioni nei flussi energetici e agricoli

Uno degli effetti immediati e più rilevanti del conflitto è stato il blocco o il rallentamento dei flussi di materie prime fondamentali per molte industrie. Russia e Ucraina sono infatti tra i principali fornitori mondiali di risorse energetiche e agricole.

Energia: la Russia è uno dei maggiori esportatori di gas naturale e petrolio verso l'Europa, fornendo circa il 40% del gas naturale europeo prima del conflitto. Le sanzioni internazionali, le contromisure russe e le difficoltà logistiche hanno causato interruzioni e riduzioni significative nelle forniture energetiche, con impatti diretti sui costi di produzione industriale e sulla stabilità economica europea. Il prezzo del gas naturale è aumentato del 400% nei picchi della crisi (Malek Fouda, 2025).

Prodotti agricoli: Ucraina e Russia insieme controllano circa il 35% delle esportazioni globali di grano, il 20% di quelle di mais e oltre il 70% del mercato di olio di girasole secondo CSI, (2022). Il conflitto ha interrotto le esportazioni di questi prodotti, generando scarsità e aumento dei prezzi a livello globale, con ripercussioni sull'industria alimentare e sull'agricoltura di molti paesi, specialmente in Africa e Medio Oriente.

Materie prime critiche: la Russia è un fornitore chiave di metalli strategici come palladio, nichel e titanio, essenziali per l'industria automotive, aerospaziale e tecnologica.

3.2.2 Aumento dei costi di produzione e inflazione nelle filiere Europee

Le interruzioni nelle forniture di energia e materie prime hanno fatto salire i costi di produzione in modo generale. Questo ha portato a un aumento dei prezzi che si sta diffondendo in tutta l'Europa, creando una pressione inflazionistica. Le aziende se si sono trovate a dover affrontare costi più alti per materie prime, energia e trasporto, con conseguenti aumenti nei prezzi finali e difficoltà nel rimanere competitive sui mercati esteri. I livelli di inflazione nell'Eurozona non si vedevano da decenni, con il settore energetico che ha avuto il ruolo principale in questa crescita dei prezzi. Settori più dipendenti dall'energia, come quello dell'alluminio, dell'acciaio sono stati quelli colpiti

più duramente: in alcuni casi, le aziende hanno dovuto ridurre o interrompere temporaneamente la produzione.

3.2.3 Difficoltà logistiche su rotte terrestri e marittime

Il conflitto ha inoltre creato significative difficoltà logistiche, sia sulle rotte terrestri che marittime (Aervaro, 2022):

- Rotte terrestri: le zone di conflitto e le restrizioni imposte hanno reso molte vie di trasporto tradizionali inaccessibili o pericolose, costringendo le aziende a riorganizzare le rotte di approvvigionamento e a ricorrere a soluzioni alternative, spesso più costose e meno efficienti. Il corridoio Trans-Siberiano, cruciale per il commercio Asia-Europa, è diventato praticamente inutilizzabile.
- Rotte marittime: il Mar Nero, area strategica per il commercio di cereali e materie prime, è diventato teatro di tensioni militari, limitando la navigazione e causando congestioni portuali. I premi assicurativi per le navi che transitano nell'area sono aumentati del 500%.

3.2.4 Dipendenza da fornitori critici e urgenza di Reshoring e Nearshoring

Il conflitto ha messo in luce la dipendenza delle supply chain europee da fornitori situati in aree geopoliticamente instabili. Questa vulnerabilità ha rafforzato l'urgenza di adottare strategie di:

- ✓ Reshoring: rilocalizzazione delle produzioni in patria o in aree più sicure, per ridurre la dipendenza da fornitori esteri e aumentare il controllo sulla filiera. L'Unione Europea ha lanciato il “REPowerEU Plan” per ridurre la dipendenza energetica dalla Russia (Consilium, 2024).
- ✓ Nearshoring: spostamento delle attività produttive in paesi vicini o con condizioni geopolitiche più stabili, per migliorare la flessibilità e la rapidità di risposta alle crisi.

- ✓ Friend-shoring: concentrazione degli scambi commerciali con paesi alleati e geopoliticamente affini, riducendo l'esposizione a regimi autoritari.

3.3 La Crisi dei semiconduttori

Dal 2020 in poi, il mondo ha vissuto una grande crisi nella disponibilità di microchip e semiconduttori, quei componenti così fondamentali per tantissimi settori. Questa mancanza ha colpito in modo particolare industrie chiave come quelle dell'auto, l'elettronica di consumo e la domotica, mettendo in evidenza quanto siano fragili le supply chain globali (Mohammad et al., 2022).

3.3.1 Settori maggiormente colpiti

Automotive: il settore automobilistico è stato uno dei più colpiti dalla crisi, con ritardi nella produzione di veicoli dovuti alla mancanza di semiconduttori essenziali per il funzionamento di sistemi elettronici sempre più sofisticati. Un'auto moderna può contenere fino a 3.000 chip diversi. La produzione globale di veicoli è diminuita di circa del 16% nel 2021 a causa della carenza di chip (Ramani et al., 2022).

Elettronica di consumo e domotica: la domanda crescente di dispositivi smart, smartphone, laptop e apparecchiature per la casa intelligente ha subito rallentamenti a causa della scarsità di chip, con conseguenti ritardi nelle consegne e aumento dei prezzi.

Settore industriale: macchinari industriali, apparecchiature mediche e sistemi di automazione hanno registrato tempi di consegna estesi da settimane a oltre un anno per alcuni componenti specializzati.

3.3.2 Conseguenze operative ed economiche

L'assenza di buffer stock ovvero di scorte di sicurezza, ha amplificato gli effetti della crisi, causando:

- Ritardi di 6-12 mesi nelle catene produttive.
- Blocchi temporanei di impianti per settimane.
- Perdite economiche stimate in oltre 500 miliardi di dollari globalmente.
- Aumento dei prezzi dei semiconduttori del 20-30%.

La natura just-in-time delle supply chain ha reso difficile assorbire questo shock improvviso, dimostrando ancora una volta i limiti di un'eccessiva ottimizzazione dell'efficienza a scapito della resilienza.

3.3.3 Cause principali della crisi

La crisi globale dei semiconduttori è stata causata da una serie di fattori. Uno dei principali è stato il Boom della domanda Post-Covid: la pandemia ha accelerato la digitalizzazione e il lavoro da remoto, generando un aumento improvviso e massiccio della domanda di laptop, server, dispositivi smart e altre tecnologie che richiedono semiconduttori, superando di gran lunga le capacità produttive esistenti. La domanda di PC è cresciuta del 26% nel 2020. Questa crescita improvvisa ha creato problemi di approvvigionamento. L'asia, in particolare Taiwan, Corea del Sud e Cina, è il cuore della produzione mondiale di semiconduttori (oltre l'80% della capacità globale). Tuttavia, le restrizioni legate al Covid-19, problemi di logistica e di salute hanno rallentato la produzione e le consegne, creando interruzioni nella filiera. Inoltre, eventi imprevedibili e disastri naturali hanno peggiorato la situazione. (Ci sono stati incendi negli stabilimenti come quello della Renesas in Giappone a marzo 2021, tempeste invernali in Texas che hanno colpito gli impianti di Samsung e NXP a febbraio 2021, terremoti in Giappone che hanno interrotto la produzione di Shin-Etsu Chemical e lockdown a Shanghai che hanno colpito la produzione di aziende come SMIC). Infine, l'industria dei semiconduttori da anni operava con limiti di capacità molto stretti, senza prevedere l'esplosione della

domanda legata alla rivoluzione digitale. Questo ha aggravato le difficoltà attuali nel soddisfare le richieste di mercato.

3.3.4 Implicazioni strategiche e risposte governative

La crisi dei semiconduttori ha evidenziato la necessità per le aziende e i governi di ripensare le strategie di approvvigionamento, generando iniziative significative (Mohammad et al., 2022):

Strategie aziendali

- Diversificazione dei fornitori per ridurre la dipendenza da poche aree geografiche soprattutto per componenti critici per evitare punti di vulnerabilità.
- Incremento delle scorte di sicurezza per componenti critici.
- Bilanciamento tra produzione locale e offshore: la completa autosufficienza è considerata troppo costosa e poco praticabile. Si suggerisce un mix di produzione locale e internazionale.
- Contratti di lungo termine con i produttori di chip.
- Investimenti nella progettazione di supply chain resiliente in grosso modo.

Iniziative governative

- CHIPS Act USA (2022): 52 miliardi di dollari attraverso “l’innovation and competition act” per riportare la produzione di semiconduttori sul suolo americano e ridurre la dipendenza dall’Asia.
- European Chips Act (2023): 43 miliardi di euro per raggiungere il 20% della produzione globale entro il 2030 accelerando così lo sviluppo dei semiconduttori.
- Investimenti asiatici: Taiwan, Corea del Sud e Giappone hanno annunciato piani per oltre 200 miliardi di dollari in nuove fabbriche.

Complessivamente, le iniziative governative stanno cercando un riallineamento globale tra efficienza e sicurezza, con investimenti senza precedenti per evitare future crisi.

3.4 Altri shock sistemici rilevanti

3.4.1 Crisi del canale di Suez e del canale di Panama

Secondo Logisticamente.it, (2024), nel contesto di un'economia globalizzata, le grandi arterie del commercio marittimo rivestono un ruolo centrale nel garantire l'efficienza e la continuità delle catene di approvvigionamento internazionali. Tra queste, due infrastrutture in particolare: il canale di Suez e il canale di Panama rappresentano oggi nodi critici la cui fragilità strutturale è stata messa in luce da recente crisi di diversa natura. Il canale di Suez, passaggio strategico che collega l'Asia all'Europa, è attraversato da circa il 30% del traffico containerizzati globale. La sua rilevanza economica e geopolitica lo rende estremamente sensibile a eventi destabilizzanti. Negli ultimi mesi, il conflitto in Medio Oriente ha avuto effetti diretti su questa rotta, inducendo molte compagnie di navigazione ad abbandonare temporaneamente il passaggio attraverso Suez in favore di una rotta alternativa più lunga, circumnavigando l'Africa via Capo di Buona Speranza. Questa deviazione ha comportato un aumento dei tempi di percorrenza di circa quindici giorni, con un impatto diretto sull'incremento dei costi logistici e sulla pianificazione delle consegne a livello globale.



Figura 2: canale di Suez. Fonte : (Carolina Andrade, 2021) (Suez Canal - Kids | Britannica Kids | Homework Help, 2025.)

Parallelamente, un'altra sfida emerge dal canale di Panama, un'opera ingegneristica che facilita il passaggio di circa 6% del commercio marittimo mondiale. La siccità ha impattato significativamente le sue operazioni, costringendo le autorità a limitare il numero di navi transitate giornalmente. Ciò ha causato ritardi significativi, congestione nei porti e una progressiva erosione dei margini economici delle aziende coinvolte.



Figura 3: canale di Panama. Fonte : (Carte Politique De Canal De Panama Illustration de Vecteur - Illustration Du Carte, Politiquement : 41342017, 2025) (Carolina Andrade, 2021)

Questi eventi, seppur geograficamente distanti, mostrano come le catene di approvvigionamento globali siano fortemente esposte a rischi sistemici di varia natura: geopolitici, climatici, infrastrutturali. Le conseguenze non si limitano alle aree direttamente interessate, ma si propagano lungo l'intera rete logistica internazionale. In Europa, ad esempio, molti porti devono gestire flussi commerciali sempre più irregolari e imprevedibili. Il presidente dell'Autorità di sistema portuale del Mare Adriatico orientale, Zeno D'Agostino, ha recentemente evidenziato come il porto di Trieste stia affrontando una fase di rallentamento critico, con ricadute sulle intere supply chain logistiche continentali.

La situazione richiama alla memoria la crisi del canale di Suez del 2021, quando l'incagliamento della nave portacontainer "Ever Given" bloccò il traffico per diversi giorni, causando ingenti perdite economiche a livello globale. Questi episodi dimostrano con chiarezza che resilienza e adattabilità non sono più opzionali, ma elementi indispensabili, per garantire la sostenibilità delle catene di fornitura.

In tale contesto, si rende necessaria una riflessione strategica su scala regionale e internazionale. Eventi come il Festival Euromediterraneo possono rappresentare un'opportunità preziosa per discutere soluzioni innovative: nuove rotte commerciali, potenziamento dei porti secondari, investimenti infrastrutturali mirati, nonché lo sviluppo di strumenti assicurativi specifici per ricoprire i rischi sistemici legati alla logistica.

3.4.2 Tensioni commerciali USA-Cina

Le guerre commerciali e le restrizioni tecnologiche hanno forzato la riconfigurazione di molte supply chain, particolarmente nel settore tecnologico, con l'imposizione di dazi e il divieto di commercio con specifiche aziende cinesi (Geopolitica, 2025).

3.5 Considerazioni trasversali e lezioni strategiche

3.5.1 Pattern comuni degli shock sistemici

L'analisi dei diversi shock rivela pattern comuni che caratterizzano le vulnerabilità delle supply chain contemporanee:

1. Concentrazione geografica: l'eccessiva dipendenza da specifiche regioni o paesi per componenti critici amplifica l'impatto di crisi locali.
2. Interconnessione sistemica: l'alta integrazione delle catene globali trasforma interruzioni locali in crisi sistemiche.
3. Ottimizzazione vs resilienza: la ricerca dell'efficienza massima ha spesso sacrificato la capacità di resistere agli shock.
4. Mancanza di visibilità: molte aziende non avevano visibilità completa sui loro fornitori di secondo e terzo livello.

3.5.2 Verso supply chain più resilienti

Gli shock analizzati hanno catalizzato una trasformazione paradigmatica nella gestione delle supply chain, con l'emergere di nuovi principi guida:

- ✓ Resilienza by Design: integrazione della gestione del rischio fin dalla fase di progettazione delle catene di approvvigionamento, non come elemento aggiuntivo ma come parte integrante della strategia.
- ✓ Digitalizzazione avanzata: implementazione di tecnologie come AI, IoT e blockchain per migliorare la visibilità, la previsione e la risposta rapida alle interruzioni.
- ✓ Sostenibilità integrata: riconoscimento che la sostenibilità ambientale e sociale non è solo un imperativo etico ma anche un fattore di resilienza operativa.
- ✓ Collaboration Ecosystem: sviluppo di ecosistemi collaborativi che includono fornitori, clienti, governi e anche concorrenti per condividere informazioni e risorse in caso di crisi.

3.5.3 Raccomandazioni strategiche

Per navigare efficacemente in un ambiente caratterizzato da shock sistemici ricorrenti, le organizzazioni dovrebbero considerare (Hosseini et al., 2019):

1. Mapping multidimensionale: sviluppare mappe complete delle dipendenze che includano non solo fornitori diretti ma anche infrastrutture critiche, rotte logistiche e interdipendenze geopolitiche.
2. Scenario planning dinamico: implementare processi di pianificazione per scenari che vengano aggiornati regolarmente e includano eventi a bassa probabilità ma alto impatto.
3. Portfolio Approach: gestire le supply chain come un portfolio diversificato, bilanciando rischio e rendimento attraverso diversificazione geografica, tecnologica e di fornitori.
4. Capability Building: investire nello sviluppo di capacità interne di gestione della crisi, includendo gruppi di risposta rapida e competenze di supply chain risk management.
5. Stakeholder Engagement: sviluppare relazioni più profonde con stakeholder chiave, inclusi governi, comunità locali e organizzazioni internazionali.

Gli shock sistemici contemporanei hanno rappresentato un campanello d'allarme per l'economia globale, rivelando che la ricerca dell'efficienza a tutti i costi può generare vulnerabilità sistemiche inaccettabili. La pandemia Covid-19, il conflitto Russia-Ucraina e la crisi dei semiconduttori, insieme ad altri eventi disruptivi, hanno dimostrato che la resilienza non è un lusso ma una necessità strategica per la sopravvivenza e la prosperità a lungo termine. Guardando avanti, le supply chain cambieranno sicuramente, trovando un nuovo equilibrio tra efficienza e resilienza, dove la capacità di adattarsi rapidamente agli shock diventerà un vantaggio competitivo decisivo. Le organizzazioni che sapranno anticipare, assorbire e adattarsi ai cambiamenti emergeranno più forti, mentre quelle che continueranno a privilegiare l'ottimizzazione a breve termine rischieranno di essere spazzate via dalla prossima crisi. La costruzione di supply chain resilienti richiede un approccio olistico che integri tecnologia, strategia, cultura organizzativa e collaborazione

sistemica. Solo attraverso questa trasformazione profonda sarà possibile costruire un'economia globale più stabile, sostenibile e prospera per tutti gli stakeholder coinvolti.

CAPITOLO 4: APPROCCI MULTIDISCIPLINARI ED EVOLUZIONE DELLA RESILIENZA DELLA SUPPLY CHAIN

4.1 Evoluzione concettuale e fondamenti multidisciplinari della resilienza

La resilienza nella gestione della supply chain ha attraversato un percorso evolutivo complesso, emergendo come uno dei paradigmi più rilevanti nel panorama contemporaneo della gestione operativa. Le radici concettuali di questa disciplina affondano in una molteplicità di domini scientifici, dall'ingegneria alla psicologia organizzativa, dall'ecologia alla teoria dei sistemi complessi.

Il termine “Supply Chain Resilience” (SCR) è stato formalmente introdotto nella letteratura accademica attraverso il lavoro seminale di Christopher & Peck, (2004) che hanno definito la resilienza come la “capacità del sistema della supply chain di tornare al suo stato originale o di passare a uno stato nuovo e più stabile dopo una perturbazione”. Questa prima concettualizzazione, pur essendo pionieristica, presentava ancora un approccio prevalentemente ingegneristico, enfatizzando principalmente gli aspetti di recupero operativi e ripristino funzionale. Tuttavia, la complessità intrinseca dei sistemi di supply chain moderni ha reso necessario un approccio più olistico e multidisciplinare. Gli studi ambientali hanno contribuito significativamente a questa evoluzione concettuale: Kerkhoff & Enquist, (2007) hanno proposto una definizione alternativa che enfatizza “la capacità del sistema di mantenere la sua funzione quando si trova di fronte a una nuova perturbazione”. Spostando l'attenzione dal mero di recupero al mantenimento funzionale continuo.

L'evento catalizzatore più significativo nell'evoluzione di questo paradigma è stata indubbiamente la pandemia di Covid-19, che ha esposto la vulnerabilità sistemiche delle supply chain globali e ha accelerato lo sviluppo di nuovi framework teorici. In questo contesto, è emerso il concetto rivoluzionario di “antifragilità” della supply chain, sviluppato da Nikookar, Stevenson, et al. (2024). Questo approccio va oltre la resilienza

tradizionale, identificando la capacità delle organizzazioni non solo di resistere alle perturbazioni, ma di utilizzarle come opportunità di crescita e miglioramento strutturale.

Parallelamente, l'integrazione delle tecnologie dell'Industria 4.0 ha aperto nuove frontiere per il potenziamento della resilienza. La ricerca di Dubey et al., (2023) ha esplorato sistematicamente l'utilizzo dell'analisi dei big data per migliorare la capacità di risposta delle supply chain, facendo riferimento alla teoria delle dinamiche. Inoltre, studi recenti come quello di El Baz et al., (2023) hanno iniziato a esplorare le sinergie tra resilienza e sostenibilità, dimostrando come pratiche di salute e sicurezza possano contribuire simultaneamente al raggiungimento di obiettivi di sostenibilità sociale e al rafforzamento della resilienza operativa.

Questo percorso evolutivo riflette un crescente riconoscimento della necessità di sviluppare supply chain che non siano semplicemente robuste, ma che possiedano le capacità di adattamento, apprendimento e prosperità in un contesto globale caratterizzato da complessità crescente e imprevedibilità sistemica.

4.2 Architettura concettuale: i driver fondamentali della resilienza

La resilienza della supply chain si articola attraverso una complessa architettura di driver concettuali che ne costituiscono i pilastri operativi fondamentali. Questi elementi, pur essendo talvolta utilizzati in modo intercambiabile nella letteratura, richiedono una specificazione chiara e una tassonomia coerente per costruire framework quantificabili della Supply Chain Resilience (SCR).

4.2.1 Agilità: la dinamica della responsività strategica

L'agilità rappresenta uno dei driver più critici della resilienza, configurandosi come la capacità delle organizzazioni di rispondere prontamente ed efficacemente ai cambiamenti improvvisi nelle condizioni operative. Wieland & Wallenburg, (2013) definiscono l'agilità come la velocità di risposta alle fluttuazioni della domanda e dell'offerta, mentre Christopher & Lee (2004) hanno dimostrato empiricamente come le reti caratterizzate da maggiore agilità possano navigare con maggiore efficacia attraverso le turbolenze del mercato globale. La concettualizzazione più avanzata dell'agilità è stata proposta da Jain

et al., (2008), che ampliano la definizione tradizionale identificando l'agilità come la capacità di convertire proattivamente i cambiamenti di mercato in opportunità di business concrete. In questa prospettiva, l'agilità trascende la semplice reazione difensiva alle perturbazioni, configurandosi invece come una competenza strategica che consente alle supply chain di riconfigurare rapidamente strutture e operazioni per adattarsi ai requisiti dinamici del cliente, generando simultaneamente valore aggiunto e migliorando la posizione competitiva.

L'implementazione pratica dell'agilità richiede investimenti significativi in tecnologie dell'informazione, formazione del personale e riprogettazione dei processi. Le organizzazioni più agili sono caratterizzate da strutture decisionali decentralizzate, capacità di sensing avanzate e processi di risposta rapida che permettono di capitalizzare sulle opportunità emergenti prima dei competitor.

4.2.2 Visibilità: trasparenza informativa e intelligence operativa

La visibilità costituisce un driver strategico fondamentale per la resilienza, definita da Francis, (2008) come la capacità sistematica di identificare, localizzare e monitorare in tempo reale tutte le entità che transitano attraverso la supply chain. Christopher & Peck, (2004) arricchiscono questa definizione specificando che la visibilità implica una comprensione trasparente e continua degli inventari, delle condizioni di domanda e offerta, dei programmi di produzione e delle strategie di approvvigionamento.

L'importanza strategica della visibilità è stata dimostrata in modo particolarmente eloquente attraverso il caso studio di Cisco durante il terremoto e tsunami giapponesi del 2011, analizzato da Sáenz & Revilla, (2014). Questo evento ha evidenziato come una rapida identificazione e gestione delle risorse critiche possa non solo prevenire perdite economiche significative, ma anche facilitare un recupero operativo accelerato. Cisco è riuscita a mappare la propria supply chain fino al quarto livello di fornitori in sole 72 ore, permettendo una risposta coordinata ed efficace che ha minimizzato l'impatto dell'interruzione.

La visibilità si configura quindi come una strategia proattiva di intelligence operativa che migliora significativamente la capacità di anticipazione e risposta della supply chain. Le organizzazioni con maggiore visibilità sono in grado di identificare segnali deboli di

potenziali perturbazioni, implementare misure preventive e coordinare risposte efficaci attraverso l'intera rete di fornitura.

4.2.3 Flessibilità: adattabilità strutturale e operativa

La flessibilità rappresenta la capacità fondamentale delle organizzazioni di adattarsi dinamicamente ai cambiamenti nell'ambiente operativo e nelle relazioni con gli stakeholder, minimizzando il dispendio di tempo e risorse (Ozgur Erol, 2010). M Millar, (2015) sottolinea come la flessibilità permetta alle aziende di rispondere efficacemente ai cambiamenti di mercato che spesso sfuggono al controllo diretto della supply chain, trasformando potenziali minacce in opportunità competitive.

Rice e Caniato, (2003) raccomandano un approccio ibrido alla flessibilità che combini diversi livelli di adattabilità per ottimizzare la resilienza complessiva del sistema. Questo approccio multidimensionale include la flessibilità del sourcing (diversificazione dei fornitori), la flessibilità produttiva (capacità di switching tra prodotti), la flessibilità logistica (opzioni di trasporto alternative) e la flessibilità contrattuale (accordi adattabili).

Christopher & Holweg, (2011) hanno identificato pratiche specifiche che contribuiscono significativamente alla flessibilità della supply chain: il trasporto multimodale, l'approvvigionamento diversificato geograficamente, gli accordi di lavoro adattabili e i contratti flessibili con i fornitori. Queste pratiche rendono le supply chain più resilienti e capaci di adattarsi rapidamente a condizioni operative turbolente, mantenendo la continuità operativa anche in presenza di interruzioni significative.

4.2.4 Collaborazione: ecosistemi di valore inter-organizzativi

La collaborazione rappresenta un fattore determinante nella costruzione di supply chain resilienti, configurandosi come la capacità di creare ecosistemi di valore che trascendono i confini organizzativi tradizionali. Numerosi studi empirici e concettuali hanno dimostrato che la collaborazione strategica tra le organizzazioni della supply chain può significativamente migliorare la resilienza complessiva del sistema (Pettit et al., 2013).

Scholten & Schilder, (2015) definiscono la collaborazione come la capacità di due o più organizzazioni di lavorare insieme efficacemente, pianificando ed eseguendo operazioni

integrate orientate verso obiettivi comuni di lungo termine. Questa definizione enfatizza la natura strategica della collaborazione, che va oltre la semplice coordinazione operativa per includere la condivisione di visioni, risorse e competenze.

La ricerca empirica di Blackhurst et al., (2011) ha fornito evidenze quantitative dell'impatto della collaborazione sulla resilienza, dimostrando che la collaborazione strategica tra fornitori e acquirenti può ridurre significativamente la probabilità di interruzioni operative e prevenire l'effetto di propagazione negativa delle perturbazioni attraverso la rete di fornitura. Questo effetto di attenuazione del rischio è particolarmente importante nelle supply chain globalizzate, dove le interdipendenze complesse possono amplificare l'impatto delle interruzioni locali.

4.2.5 Condivisione delle informazioni: integrazione dell'intelligence strategica

La condivisione delle informazioni costituisce l'elemento abilitante fondamentale per tutti gli altri driver della resilienza. Soni et al., (2014) hanno evidenziato che la condivisione tempestiva, accurata e rilevante delle informazioni può contribuire significativamente alla mitigazione dei rischi durante le interruzioni operative, facilitando il coordinamento delle risposte e l'ottimizzazione delle risorse disponibili.

Faisal, (2010) propone un framework dinamico per la condivisione delle informazioni che copre tutte le fasi del ciclo di vita della resilienza: prevenzione, preparazione, risposta e recupero. Durante la fase preventiva, la condivisione delle informazioni permette l'identificazione proattiva dei rischi e la pianificazione di contingenza. Nella fase di risposta, facilita il coordinamento delle azioni e l'allocazione ottimale delle risorse. Durante il recupero, supporta l'apprendimento organizzativo e il miglioramento continuo dei processi.

La qualità e la tempestività delle informazioni condivise contribuiscono direttamente alla riduzione dell'effetto "bullwhip" o effetto frustra e al miglioramento della resilienza complessiva del sistema. Li et al., (2017) hanno studiato specificamente come la condivisione delle informazioni tra diversi livelli gerarchici della supply chain possa mitigare l'incertezza operativa e aumentare la capacità di resilienza, dimostrando che

L'integrazione informativa verticale e orizzontale è essenziale per la costruzione di supply chain veramente resilienti.

4.2.6 Sostenibilità nella supply chain

La sostenibilità sta emergendo come il driver concettuale più potente nella ridefinizione delle supply chain resilienti, superando la tradizionale visione che la considerava un vincolo etico o normativo per trasformarla in un vero e proprio imperativo strategico. Questa evoluzione concettuale riflette una comprensione più matura del fatto che la resilienza a lungo termine non può prescindere dalla sostenibilità delle risorse, delle comunità e degli ecosistemi che costituiscono il substrato operativo delle catene di approvvigionamento globali (Warmbier et al., 2022). La connessione profonda tra sostenibilità e resilienza si manifesta attraverso multiple dimensioni interconnesse. Dal punto di vista ambientale, le supply chain che integrano principi di economia circolare e gestione responsabile delle risorse dimostrano una maggiore capacità di adattamento ai cambiamenti climatici e alla scarsità di materie prime. Quando un'azienda investe in fornitori che utilizzano energie rinnovabili o processi produttivi a basso impatto ambientale, non sta semplicemente riducendo la propria impronta ecologica, ma sta costruendo una rete di approvvigionamento intrinsecamente più stabile e meno esposta ai rischi legati alla volatilità dei prezzi energetici e alle future regolamentazioni ambientali (Kumar, 2016).

La dimensione sociale della sostenibilità rivela connessioni altrettanto significative con la resilienza operativa. Le supply chain che investono nel benessere delle comunità locali, in condizioni di lavoro dignitose e nello sviluppo delle competenze dei propri partner commerciali creano ecosistemi più stabili e collaborativi. Durante la pandemia Covid-19, molte aziende hanno scoperto che i fornitori con migliori standard sociali e relazioni più solide con le comunità locali sono riusciti a mantenere continuità operativa anche in condizioni estreme, dimostrando come gli investimenti in sostenibilità sociale si traducano direttamente in resilienza operativa (Fahimnia & Jabbarzadeh, 2016).

La governance sostenibile, infine, rappresenta il collante che tiene insieme questi elementi, promuovendo trasparenza, accountability e collaborazione lungo tutta la catena del valore. Le organizzazioni che adottano pratiche di governance sostenibile sviluppano

naturalmente una maggiore visibilità sui propri fornitori di secondo e terzo livello, elemento cruciale per identificare e mitigare i rischi sistemici prima che si trasformino in crisi operative (Pagell, 2017).

In questa prospettiva, la sostenibilità non rappresenta più un trade-off con l'efficienza o la redditività, ma diventa il paradigma attraverso cui ripensare completamente l'architettura delle supply chain moderne. Le supply chain sostenibili sono intrinsecamente più resilienti perché sono progettate per rigenerarsi piuttosto che semplicemente resistere agli shock, creando valore condiviso per tutti gli stakeholder e costruendo le basi per una prosperità economica duratura nel tempo.

4.2.7 Struttura della supply chain

La comprensione della complessità strutturale rappresenta un prerequisito fondamentale per lo sviluppo di supply chain resilienti nel contesto economico contemporaneo. Le vulnerabilità principali delle supply chain moderne nascono da un processo evolutivo che ha caratterizzato gli ultimi decenni: la crescente disintegrazione verticale delle aziende e l'accelerazione dei processi di globalizzazione hanno dato vita a reti sempre più articolate e interdipendenti, dove ogni nodo del sistema può diventare un potenziale punto di fragilità.

Questa trasformazione strutturale ha creato un paradosso interessante. Da un lato, la specializzazione e la distribuzione geografica delle attività produttive hanno generato efficienza operativa e vantaggi competitivi significativi. Dall'altro, hanno introdotto una vulnerabilità sistemica che si manifesta quando le catene di fornitura caratterizzate da elevata complessità strutturale diventano significativamente più suscettibili alle interruzioni operative (C. S., & T. B. Tang, 2008). Il meccanismo alla base di questa fragilità è relativamente semplice da comprendere: la propagazione degli effetti negativi può amplificarsi attraverso le multiple interconnessioni del sistema, trasformando un problema locale in una crisi sistemica.

Questa dinamica è particolarmente evidente nelle supply chain globalizzate, dove le interdipendenze non sono solo di natura operativa ma anche geografiche e culturali. Un'interruzione in una fabbrica di componenti elettronici a Taiwan può paralizzare la produzione automobilistica in Germania, mentre una crisi geopolitica in Ucraina può

compromettere l'approvvigionamento alimentare in Africa. La complessità, quindi, non è semplicemente una questione di numeri del tipo quanti fornitori, quanti prodotti, quante rotte commerciali ma riguarda la natura qualitativa delle relazioni e delle dipendenze che legano questi elementi. Per affrontare questa sfida, diventa essenziale sviluppare una comprensione multidimensionale della complessità che vada oltre le metriche tradizionali. La complessità statica rappresentata dal numero di elementi e connessioni nel sistema - è solo la punta dell'iceberg. Altrettanto importante è la complessità dinamica, che riguarda la variabilità e l'incertezza dei flussi che attraversano la rete, e la complessità decisionale, che si riferisce al numero e alla sofisticazione delle decisioni richieste per mantenere il sistema operativo (Serdarasan, 2013). La gestione efficace di questa complessità multiforme richiede un approccio sistemico e strategico. Non si tratta semplicemente di semplificare le strutture esistenti (operazione spesso impossibile in un'economia globalizzata) ma di sviluppare una capacità di comprensione profonda delle interdipendenze strutturali che caratterizzano il proprio ecosistema di fornitura. Questa comprensione diventa la base per progettare meccanismi di risposta rapida ed efficace, capaci di interrompere la propagazione negativa delle perturbazioni prima che queste si trasformino in crisi sistemiche (Wieland & Wallenburg, 2013b)

L'obiettivo finale non è eliminare la complessità in quanto un'ambizione irrealistica nel contesto economico attuale anzi imparare a navigarla con consapevolezza e preparazione. Le organizzazioni più resilienti sono quelle che riescono a bilanciare i benefici dell'efficienza operativa con la necessità di mantenere margini di manovra strategici, sviluppando al contempo sistemi di monitoraggio e allerta precoce che permettano di identificare e rispondere rapidamente alle perturbazioni prima che queste si propaghino attraverso l'intera rete.

4.3 Frontiere innovative nella progettazione di supply chain resilienti

La progettazione di supply chain resilienti rappresenta una delle frontiere più avanzate nella ricerca operativa contemporanea, con particolare rilevanza per le filiere sostenibili e le fonti energetiche rinnovabili. Le metodologie più recenti integrano tecniche avanzate di ottimizzazione matematica, teoria dei giochi e intelligenza artificiale per sviluppare

soluzioni innovative che affrontano le sfide crescenti di un ambiente operativo sempre più complesso e incerto.

4.3.1 Modelli quantitativi avanzati e ottimizzazione robusta

La ricerca di Zhao & You, (2019) ha rappresentato un contributo innovativo nello sviluppo di misure quantitative della resilienza attraverso un modello di programmazione frazionaria bi-obiettivo. Questo approccio metodologico innovativo permette di valutare simultaneamente l'efficienza economica e la resilienza operativa, fornendo soluzioni che bilanciano efficacemente due obiettivi spesso conflittuali.

Il modello incorpora scenari probabilistici di interruzione che consentono di valutare l'impatto di diverse tipologie di perturbazioni sulla performance del sistema. La programmazione robusta adattiva permette al sistema di adattare dinamicamente le proprie decisioni in base alla realizzazione dell'incertezza, migliorando significativamente la capacità di risposta alle condizioni impreviste. Soren & Shastri, (2021) hanno successivamente esteso questo approccio al contesto specifico delle supply chain di biomassa lignocellulosica, affrontando il problema complesso dell'incertezza di approvvigionamento delle materie prime rinnovabili. Il loro modello resiliente ottimizza simultaneamente la localizzazione di depositi di preelaborazione e bioraffinerie, considerando la variabilità stagionale e geografica nella disponibilità delle risorse. Questo approccio risulta particolarmente critico per le supply chain di bioenergia, caratterizzate da alta variabilità nell'approvvigionamento e significative economie di scala nella produzione.

4.3.2 Approcci ibridi per la gestione dell'incertezza

Sharifi et al., (2020) hanno sviluppato un approccio ibrido stocastico fuzzy-robusto che rappresenta una delle metodologie più sofisticate per la progettazione di reti resilienti. Questo framework innovativo combina tre tecniche complementari di modellazione dell'incertezza:

- Programmazione stocastica per le incertezze probabilistiche
- Logica fuzzy per le incertezze imprecise

- Ottimizzazione robusta per le incertezze worst-case

L'integrazione di queste tre metodologie permette di catturare differenti tipologie di incertezza che caratterizzano le supply chain reali: incertezze parametriche (variazioni della domanda), incertezze strutturali (disponibilità dei fornitori) e incertezze epistemologiche (mancanza di dati storici). Questo approccio multi-paradigma fornisce soluzioni più robuste e realistiche rispetto ai metodi tradizionali basati su un singolo paradigma di modellazione dell'incertezza.

Mousavi Ahranjani et al., (2020) hanno applicato un approccio analogo alle reti di supply chain di bioetanolo lignocellulosico, sviluppando un modello di programmazione ibrida robusta-stocastica. Questo modello affronta specificamente le sfide delle supply chain di biocarburanti, caratterizzate da elevata volatilità nei prezzi delle materie prime, incertezza nella disponibilità delle risorse e variabilità nella domanda finale.

4.3.3 Ottimizzazione risk-averse e gestione del rischio finanziario

Khezerlou et al., (2021) hanno introdotto l'utilizzo dell'ottimizzazione risk-averse nella progettazione di reti di supply chain di biocarburanti, utilizzando le probabilità transitorie per modellare i rischi di interruzione di terminali multimodali e bioraffinerie. Questo approccio fornisce una protezione aggiuntiva contro le interruzioni impreviste attraverso la quantificazione probabilistica dettagliata dei rischi operativi.

Il modello sviluppato incorpora misure di rischio coerenti che permettono di valutare non solo il valore atteso delle performance, ma anche la variabilità e i rischi di coda delle distribuzioni di performance. Questo approccio risulta particolarmente critico per le supply chain di biocarburanti, dove gli investimenti infrastrutturali significativi richiedono una gestione sofisticata del rischio finanziario.

Yazdanparast et al., (2022) hanno esteso questo framework sviluppando un modello di ottimizzazione che incorpora i rischi di interruzione nelle fasi di fornitura e produzione, utilizzando la programmazione stocastica a due stadi risk-averse con il CVaR (Conditional Value at Risk) come misura principale del rischio. Il CVaR consente di controllare esplicitamente il rischio di perdite estreme, offrendo protezione alle prestazioni del sistema anche negli scenari più avversi.

4.3.4 Approcci Game-Theoretic e decisioni multicriterio

Rajabzadeh & Babazadeh, (2022) hanno introdotto l'utilizzo della teoria dei giochi nella progettazione di supply chain energetiche resilienti, analizzando una supply chain a due canali in cui si considerano interazioni tra forniture energetiche da fonti tradizionali e rinnovabili. Questo approccio permette di studiare le interazioni strategiche tra i diversi attori della supply chain, considerando come le interruzioni operative influenzino la determinazione dei prezzi energetici.

La teoria dei giochi fornisce un framework naturale per modellare le decisioni interdipendenti in presenza di incertezza e conflitti di interesse. Il modello considera esplicitamente come le interruzioni possano modificare gli equilibri competitivi e le strategie ottimali dei diversi attori, fornendo insights preziosi per la progettazione di meccanismi di coordinamento efficaci. Salehi et al., (2022) hanno proposto un approccio che integra la programmazione robusta delle possibilità con metodi decisionali multicriterio per stabilire priorità tra diverse strategie di resilienza. Questo approccio riconosce che la resilienza è un concetto multidimensionale che non può essere catturato attraverso una singola metrica, ma richiede la considerazione simultanea di multipli obiettivi spesso conflittuali. Giri et al., (2023) hanno sviluppato un approccio di programmazione flessibile robusto e fuzzy specificamente progettato per affrontare la carenza nella domanda di elettricità, introducendo nuove misure di resilienza che quantificano la capacità del sistema di mantenere i livelli di servizio desiderati anche in presenza di interruzioni significative.

La letteratura sulla progettazione di reti di supply chain complessivamente resilienti ha visto un crescente interesse negli ultimi anni, riflettendo la crescente importanza della resilienza nelle moderne catene di fornitura. Gli studi esaminati indicano che progettare supply chain resilienti richiede un approccio multifaceted, che integri tecniche avanzate di ottimizzazione, robustezza e gestione dei rischi per affrontare le incertezze e garantire continuità operativa e adattabilità alle crisi. Questo implica l'adozione di strategie di diversificazione dei fornitori, ridondanza, flessibilità operativa e tecnologie di monitoraggio avanzato.

Tabella 1: i vari approcci alla progettazione della SCR. Fonte: (Gital & Bilgen, 2024)

Riferimento	Approccio all'Incertezza	Tipo di rischio	Elemento di vulnerabilità nella supply chain	Strategia di resilienza
Zhao & You (2019)	Modello bi-obiettivo di programmazione frazionaria robusta adattiva	Interruzione strutturale	Infrastruttura della supply chain	Valutazione e mitigazione dei rischi mantenendo l'efficienza operativa
Soren & Shastri (2021)	Modello resiliente sotto incertezza di approvvigionamento	Variazioni nella disponibilità di risorse	Depositi di preelaborazione e bioraffinerie	Ottimizzazione della posizione per garantire continuità
Sharifi et al. (2020)	Approccio ibrido stocastico fuzzy-robusto	Multipli scenari di incertezza	Diversi punti della supply chain	Combinazione di robustezza e flessibilità
Mousavi Ahranjani et al. (2020)	Programmazione ibrida robusta-stocastica	Rischi operativi e di interruzione	Rete di supply chain di bioetanolo	Integrazione di tecniche stocastiche e probabilistiche
Soren & Shastri (2021)	Modello di ottimizzazione resiliente	Interruzione della fornitura	Supply chain della biomassa	Confronto tra modello base e resiliente per evidenziare i benefici
Khezerlou et al. (2021)	Ottimizzazione avversa al rischio e probabilità transitorie	Interruzioni di terminali multimodali e bioraffinerie	Terminali multimodali e bioraffinerie	Protezione contro interruzioni impreviste
Salehi et al. (2022)	Programmazione delle possibilità robuste	Incertezza della domanda e interruzione	Rete di supply chain della biomassa	Metodo decisionale multicriterio per dare priorità alle strategie di resilienza
Rajabzadeh & Babazadeh (2022)	Approccio basato sulla teoria dei giochi	Interruzioni nella fornitura di energia	Centrale ibrida biocarburante-combustibile fossile	Analisi dei prezzi energetici e strategie di gestione delle interruzioni
Yazdanparast et al. (2022)	Programmazione stocastica a due stadi avversa al rischio (CVaR)	Interruzioni nella fornitura e produzione	Fase di fornitura e produzione di biocarburanti	Incorporazione di misure avanzate di rischio
Giri et al. (2023)	Programmazione flessibile robusta e fuzzy	Carenza nella domanda di elettricità	Supply chain elettrica	Introduzione di nuove misure di resilienza per affrontare la carenza

CAPITOLO 5: CAPACITÀ E STRATEGIE PER UNA SUPPLY CHAIN RESILIENTE

5.1 Le tre capacità fondamentali per una supply chain resiliente

La resilienza di una supply chain è una dimensione critica delle prestazioni del sistema in condizioni di incertezza, che riflette la capacità della supply chain di assorbire, adattarsi e ripristinarsi dopo un'interruzione (Hosseini & Barker, 2016). Per comprendere meglio questo concetto, è utile esplorare le tre principali capacità di resilienza: la capacità di assorbimento, la capacità adattiva e la capacità di ripristino, ciascuna delle quali rappresenta attributi temporali prima, durante e dopo un'interruzione (Biringer, 2013). Queste capacità costituiscono le linee di difesa fondamentali che determinano la robustezza e la flessibilità di una supply chain di fronte a perturbazioni e imprevisti.

5.1.1 Capacità di assorbimento nella supply chain

La capacità di assorbimento è un elemento chiave della resilienza della supply chain, definita come la capacità di un sistema di resistere alle perturbazioni e minimizzare le conseguenze negative con livelli relativamente bassi di energia o sforzo (Biringer et al., 2013). Questa capacità si manifesta attraverso misure preventive come l'inventario di mitigazione del rischio e la diversificazione dei fornitori. Ad esempio, PepsiCo utilizza un impianto di imballaggio di backup e mantiene un inventario di riserva per far fronte alle interruzioni nella fornitura di acqua di cocco dell'Asia meridionale (HBS, 2017). La capacità di assorbimento rappresenta la prima linea di difesa contro le interruzioni, riducendo lo sforzo necessario per il recupero e permettendo alla supply chain di mantenere un livello accettabile di operatività anche in presenza di perturbazioni.

Gli elementi chiave:

- ❖ Diversificazione dei fornitori: diversificare i fornitori per ridurre la dipendenza da un singolo fornitore.

- ❖ Strategia di approvvigionamento multipla: utilizzare più fonti di approvvigionamento per lo stesso materiale o prodotto per garantire la continuità in caso di fallimento di un fornitore.
- ❖ Posizioni dell'inventario: mantenere scorte di sicurezza in diverse posizioni per affrontare eventuali interruzioni nella supply chain

5.1.2 Capacità adattiva: reazione e adattamento alle interruzioni

Le capacità adattiva è la seconda linea di difesa della resilienza della supply chain, definita come il grado in cui il sistema può adattarsi e superare l'interruzione implementando pratiche operative non standard (Biringer et al., 2013). Questa capacità si attiva quando le capacità di assorbimento non è sufficiente a contenere l'interruzione. Elementi chiave della capacità adattiva includono la flessibilità operativa e la riorganizzazione delle risorse. Ad esempio, la rapida evacuazione del porto e il riposizionamento dei container rappresentano capacità adattive per aumentare la resilienza dei porti (Hosseini & Barker, 2016). Inoltre, l'individuazione e il reindirizzamento di una connessione di backup tra il cliente e il centro di distribuzione possono facilitare un recupero più rapido in caso di interruzione (Turnquist & Vugrin, 2013).

Elementi chiave:

- ❖ Rerouting (percorsi alternativi): modificare i percorsi di trasporto per evitare zone interessate da disagi o blocchi operativi.
- ❖ Fornitore di backup: avere fornitori alternativi pronti a fornire materiali in caso di fallimento del fornitore principale.
- ❖ Comunicazione: mantenere una comunicazione efficace e tempestiva con tutti i partner della supply chain per coordinare le risposte alle perturbazioni.

5.1.3 Capacità di ripristino: ritorno alla normalità

La capacità di ripristino è l'ultima linea di difesa nella gerarchia della resilienza della supply chain, definita come la capacità di un sistema di essere ripristinato rapidamente ed efficientemente dopo un'interruzione (Biringer et al., 2013). Questa capacità entra in

gioco quando le capacità di assorbimento e adattive non sono sufficienti a mantenere un livello accettabile di prestazioni. La capacità di ripristino comprende strategie come il ripristino del budget e delle risorse. Nei porti, ad esempio, questi fattori sono essenziali per il recupero post-interruzione (Hosseini & Barker, 2016). Una supply chain che possiede una robusta capacità di ripristino può tornare rapidamente alle normalità, minimizzando le perdite operative.

Elementi chiave:

- ❖ Ripristino delle strutture: riparare o sostituire infrastrutture danneggiate per riprendere le operazioni.
- ❖ Ripristino del personale: assicurare che il personale chiave sia disponibile e in grado di riprendere il lavoro.
- ❖ Ripristino della tecnologia: riattivare sistemi tecnologici critici e ripristinare dati e operazioni IT.

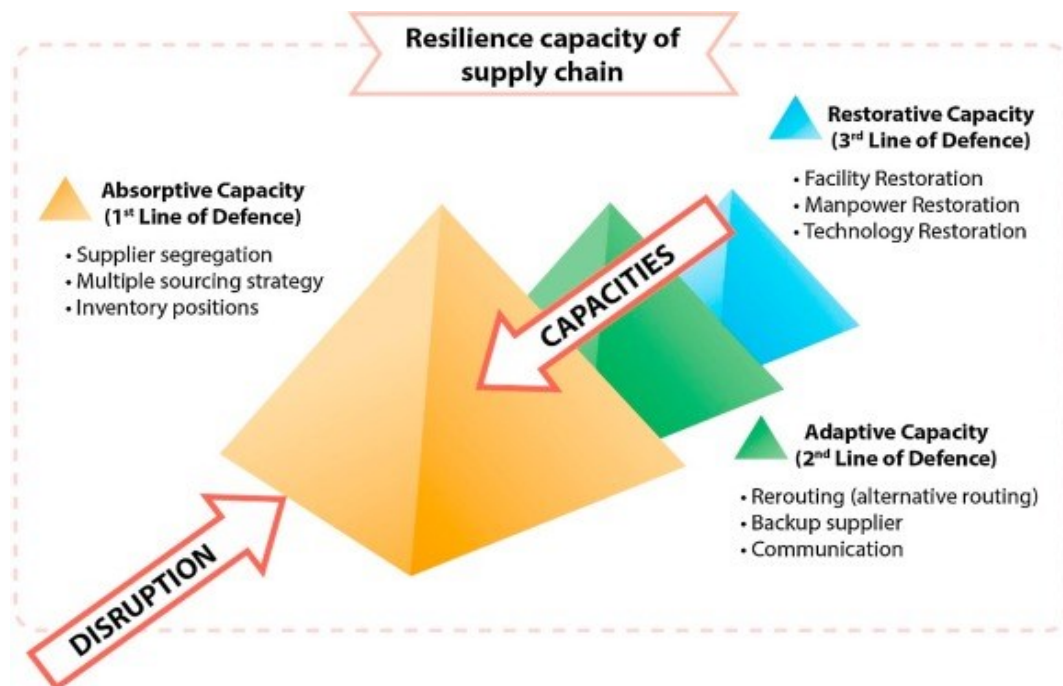


Figura 4: le tre capacità fondamentali di resilienza della supply chain. Fonte: (Hosseini et al., 2019).

5.2 Relazione tra capacità e interruzioni

La figura 4 sopra mostra come un'interruzione nella supply chain possa essere affrontata attraverso queste tre capacità. Ogni linea di difesa offre un livello aggiuntivo di protezione e recupero, aumentando complessivamente la resilienza della supply chain. La capacità di assorbimento cerca di prevenire l'impatto delle interruzioni, la capacità adattativa permette di reagire e adattarsi rapidamente, mentre la capacità ristorativa assicura un recupero rapido e completo.

Questo approccio stratificato garantisce che la supply chain possa non solo sopravvivere alle perturbazioni, ma anche riprendersi in modo efficace, mantenendo la continuità operativa e minimizzando i danni.

5.3 Gerarchia della resilienza nella supply chain

La resilienza della supply chain può essere visualizzata attraverso una struttura gerarchica composta da quattro livelli come mostrato in figura. Il livello inferiore include le caratteristiche che migliorano la resilienza, come l'inventario in eccesso e la presenza di fornitori di riserva. Queste caratteristiche costituiscono la base per le tre capacità di resilienza: assorbimento, adattiva e di ripristino. La vulnerabilità e la recuperabilità di una supply chain sono funzioni della capacità di resilienza. Supply chain con alta capacità di resilienza sono meno vulnerabili. Al contrario quella con bassa capacità di resilienza sono più vulnerabili e necessitano di maggiori sforzi per il recupero. La resilienza complessiva di una supply chain è quindi una funzione della sua vulnerabilità e recuperabilità, determinando la sua capacità di operare efficacemente nonostante le perturbazioni (Dolgui et al., 2018).



Figura 5: gerarchia SCR. Fonte: (Hosseini et al., 2019).

5.4 Strategie di resilienza nella supply chain

Una strategia di resilienza rappresenta un ecosistema integrato di piani, misure e azioni finalizzate a rafforzare la capacità adattiva di un'organizzazione o sistema nel fronteggiare cambiamenti imprevisi e shock esterni. Preservando la continuità operativa e minimizzando l'impatto di perdite economiche e operative. Questo approccio sistemico si articola attraverso quattro fasi interconnesse: l'identificazione proattiva e la valutazione quantitativa dei rischi, la preparazione strategica preventiva, la gestione della risposta immediata durante l'interruzione e l'implementazione di piani di recupero strutturato per il ripristino ottimale della normalità operativa.

La dicotomia strategica tra approcci proattivi e reattivi costituisce l'architettura portante di una gestione evoluta della resilienza nella supply chain, consentendo alle organizzazioni di ottimizzare l'allocazione delle risorse tra investimenti preventivi e capacità di risposta dinamica, creando un equilibrio sinergico tra prevenzione e reazione

5.4.1 Strategie di resilienza proattive

Gli approcci proattivi rappresentano l'essenza della gestione anticipatoria del rischio, implementando interventi strategici preventivi che fortificano la supply chain contro potenziali interruzioni prima della loro manifestazione. Questi investimenti strategici, pur richiedendo allocazioni di capitale iniziali significative, generano un valore protettivo

duraturo contro un ampio spettro di scenari disruptivi, trasformando la vulnerabilità in vantaggio competitivo sostenibile.

Multi-sourcing e diversificazione delle fonti

Il multi-sourcing emerge come paradigma strategico consolidato per immunizzare la supply chain dalle perturbazioni dei flussi di approvvigionamento, eliminando sistematicamente la dipendenza critica da singole fonti di fornitura attraverso la diversificazione intelligente del portafoglio fornitori. Questa metodologia trova validazione empirica trasversale in molteplici contesti industriali: Hasani & Khosrojerdi, (2016) hanno documentato l'efficacia superiore del multi-sourcing nel neutralizzare incertezze e interruzioni nella supply chain dei dispositivi medici ad alta criticità, mentre Fahimnia & Jabbarzadeh, (2016) hanno convalidato l'implementazione strategica di questo approccio per costruire resilienza strutturale nel settore tessile caratterizzato da alta volatilità. Paradossalmente, nonostante la sua penetrazione capillare nella letteratura scientifica generale sulla supply chain, il multi-sourcing rimane sorprendentemente sotto sfruttato negli studi specialistici sulla supply chain della biomassa, configurandosi come frontiera di sviluppo strategico ad alto potenziale di innovazione.

Ottimizzazione strategica delle localizzazioni

Il rafforzamento della posizione delle strutture implica l'identificazione delle localizzazioni ottimali considerando preventivamente i potenziali eventi disruptivi e i loro impatti geografici. Soren & Shastri, (2021) hanno evidenziato l'importanza cruciale di integrare l'analisi del rischio di interruzioni nel processo decisionale per la selezione delle posizioni delle strutture nella supply chain della biomassa. Questa prospettiva è stata ulteriormente sviluppata da Mousavi Ahranjani et al., (2020), che hanno dimostrato come il loro modello resiliente generi localizzazioni più fortificate per le strutture, incorporando specificamente scenari di siccità e interruzioni della biomassa nelle valutazioni strategiche.

Gestione della complessità di rete

La misurazione e gestione della complessità del flusso e dei nodi valuta le interazioni tra i diversi componenti della supply chain, identificando punti di vulnerabilità sistemica. Strategie mirate alla riduzione della complessità contribuiscono alla progettazione di reti meno intricate e intrinsecamente più resilienti. Sharifi et al., (2020) hanno incorporato queste metriche nel loro modello per ridurre significativamente la complessità della supply chain, dimostrando come una architettura semplificata possa migliorare la capacità di risposta alle interruzioni.

Ridondanza strategica e capacità di backup

La strategia di ridondanza prevede il mantenimento di capacità di produzione supplementari o strutture aggiuntive per incrementare la resilienza complessiva della supply chain. Zhao & You, (2019) hanno implementato questa strategia per compensare efficacemente la perdita di capacità produttiva durante eventi disruptivi, dimostrando come investimenti in ridondanza possano garantire continuità operativa anche in scenari critici.

Ottimizzazione del raggio di copertura

La strategia del raggio di copertura mira a minimizzare le distanze di trasporto tra strutture produttive e aree di domanda, riducendo il rischio di domande insoddisfatte durante interruzioni logistiche. Sharifi et al., (2020) hanno integrato questa strategia nella loro ricerca, evidenziando come la prossimità geografica possa fungere da buffer naturale contro le interruzioni dei trasporti.

Gestione strategica delle scorte

Il preposizionamento dell'inventario consiste nel mantenere scorte strategiche in eccesso per garantire la continuità del flusso di prodotti e materie prime in caso di interruzioni. Questa strategia è stata supportata da evidenze empiriche di Mousavi Ahranjani et al., (2020), secondo cui l'allocazione anticipata e mirata delle scorte può rafforzare in modo

significativo la resilienza della supply chain, agendo come un ammortizzatore efficace contro le fluttuazioni della domanda e dell'offerta.

5.4.2 Strategie di resilienza reattive

Le strategie reattive rappresentano l'insieme di approcci di emergenza implementati per salvaguardare e ripristinare la supply chain quando le interruzioni si sono già verificate. Queste strategie sono essenziali per garantire una risposta rapida ed efficace, minimizzando i danni e accelerando il ritorno alla normalità operativa.

Mobilitazione di capacità aggiuntiva

La strategia di capacità aggiuntiva gestisce dinamicamente le capacità perse delle strutture durante le interruzioni, incrementando rapidamente la produzione o mobilitando manodopera supplementare. Salehi et al., (2022) hanno utilizzato questa strategia per affrontare efficacemente le interruzioni nel settore delle bioraffinerie, dimostrando come la flessibilità operativa possa compensare perdite di capacità in scenari critici.

Pianificazione strutturata del ripristino

La pianificazione del ripristino sviluppa protocolli sistematici per minimizzare i ritardi causati dalle interruzioni, riportando la supply chain ai suoi livelli normali di performance nel minor tempo possibile. Zhao & You, (2019) hanno condotto analisi approfondite delle performance della supply chain incorporando sia ritardi temporali che strategie di pianificazione del ripristino, fornendo framework operativi per la gestione ottimale della fase post-interruzione.

Attivazione di fornitori di backup

La strategia del fornitore di backup stabilisce relazioni contrattuali preventive per garantire forniture alternative di materie prime quando i fornitori principali sono compromessi da interruzioni. Rajabzadeh & Babazadeh, (2022) hanno analizzato una supply chain energetica a due canali, considerando un fornitore di combustibili fossili

come backup strategico per soddisfare la domanda in caso di carenza di biocarburanti, illustrando l'importanza della diversificazione delle fonti energetiche.

Rafforzamento post-disastro della connettività

Il rafforzamento della connettività implementa miglioramenti mirati ai collegamenti nella rete della supply chain dopo eventi disastrosi, ripristinando e potenziando i flussi informativi e materiali. Khezerlou et al., (2021) hanno considerato il rafforzamento dei collegamenti per migliorare la connettività post-disastro nel loro progetto di rete resiliente, evidenziando come investimenti mirati nell'infrastruttura di comunicazione possano accelerare significativamente i tempi di ripristino.

Contratti di backup e ridondanza operativa

La stipula di contratti con strutture di backup fornisce ai clienti opzioni per soddisfare la domanda attraverso strutture secondarie quando quelle principali sono compromesse. Questa strategia crea una rete di sicurezza operativa che garantisce continuità del servizio anche in presenza di interruzioni localizzate significative.

Le strategie di resilienza costituiscono l'architettura portante per preservare la continuità dei processi operativi della supply chain, catalizzando la generazione di benefici economici immediati e vantaggi strategici multidimensionali che si estendono attraverso orizzonti temporali estesi. Una progettazione di rete evoluta e intelligente rappresenta il prerequisito imprescindibile per l'implementazione efficace di tali strategie, garantendo che la supply chain sviluppi capacità di adattamento dinamico e risposta ottimizzata a qualsiasi tipologia di perturbazione, trasformando la volatilità in vantaggio competitivo. L'orchestrazione sinergica di strategie proattive e reattive in un ecosistema di resilienza coeso e strategicamente allineato consente alle organizzazioni di navigare attraverso le turbolenze dell'economia globale moderna, edificando supply chain caratterizzate da robustezza strutturale, agilità operativa e sostenibilità strategica a lungo termine. Questa filosofia duale non si limita a garantire la sopravvivenza durante le crisi, ma genera le competenze per prosperare in ambienti caratterizzati da crescente volatilità, incertezza, complessità e ambiguità, trasformando ogni sfida in catalizzatore di evoluzione e crescita sostenibile.

CAPITOLO 6: METODI DI MISURAZIONE DELLA RESILIENZA DELLA SUPPLY CHAIN

La misurazione della resilienza della supply chain rappresenta una sfida complessa e multidisciplinare che richiede l'integrazione di approcci quantitativi e qualitativi per fornire una valutazione comprensiva della capacità di un sistema logistico di resistere, adattarsi e riprendersi da interruzioni impreviste. La crescente complessità delle catene di approvvigionamento globali, unita all'aumento della frequenza e dell'intensità delle interruzioni, ha reso la valutazione della resilienza un elemento strategico fondamentale per la continuità operativa e la competitività aziendale.

L'obiettivo di questo capitolo è fornire una panoramica sistematica dei principali metodi e framework utilizzati per misurare la resilienza della supply chain, analizzandone i punti di forza, le limitazioni e i contesti applicativi più appropriati. L'analisi si articola in diverse sezioni che esaminano gli approcci quantitativi, qualitativi e integrati, con particolare attenzione alle metriche emergenti e agli strumenti tecnologici avanzati.

6.1 Approcci quantitativi alla misurazione della resilienza

6.1.1 Indicatori di performance chiave (KPI)

Gli indicatori di performance rappresentano il primo livello di misurazione della resilienza, fornendo metriche concrete e misurabili che consentono il monitoraggio continuo delle prestazioni della supply chain (Jüttner & Maklan, 2011). Tra i KPI più significativi per la valutazione della resilienza si distinguono:

- Il time to recovery (TTR): costituisce una metrica fondamentale che misura il tempo necessario per ripristinare le operazioni normali dopo un'interruzione (Ambulkar, 2015). Questa metrica è particolarmente rilevante in quanto quantifica direttamente la capacità di recupero del sistema, uno dei pilastri della resilienza secondo il framework delle 4R (Christopher & Peck, 2004). Il TTR può essere misurato a diversi livelli della supply chain, dal singolo fornitore all'intera rete logistica, permettendo un'analisi granulare delle vulnerabilità.

- Il mean time between failures (MTBF): rappresenta l'intervallo medio tra guasti o interruzioni significative. Un MTBF elevato indica una maggiore stabilità operativa e una minore propensione alle interruzioni, contribuendo alla valutazione della robustezza del sistema. Tuttavia, è importante considerare che un MTBF elevato non garantisce necessariamente una buona capacità di recupero quando le interruzioni si verificano.
- La supply chain velocity: misura la velocità di flusso dei materiali attraverso l'intera supply chain. Una velocità ottimale indica un sistema efficiente e responsive, mentre variazioni significative possono segnalare vulnerabilità o inefficienze che potrebbero compromettere la resilienza (Chopra & Sodhi, n.d.).

6.1.2 Metriche finanziarie

Le metriche finanziarie forniscono una prospettiva economica sulla resilienza, traducendo le prestazioni operative in termini monetari e facilitando le decisioni strategiche relative agli investimenti in resilienza.

Il cost of disruption quantifica l'impatto economico totale delle interruzioni, includendo costi diretti (come perdite di produzione e vendite) e costi indiretti (come danni reputazionali e perdita di clienti). Secondo Hendricks & Singhal, (2005) questa metrica è essenziale per valutare il ritorno sugli investimenti in iniziative di resilienza e per giustificare le spese sostenute per migliorare la robustezza del sistema.

Il revenue at risk identifica la porzione di ricavi potenzialmente esposta a rischi di interruzione, fornendo una stima quantitativa dell'esposizione finanziaria dell'organizzazione. Questa metrica è particolarmente utile per la definizione di priorità negli investimenti di resilienza e per la valutazione dell'adeguatezza delle coperture assicurative.

6.1.3 Modelli matematici e statistici

L'applicazione di modelli matematici avanzati consente una misurazione più sofisticata della resilienza, incorporando elementi di incertezza e complessità tipici delle supply chain moderne.

La simulazione monte carlo rappresenta uno strumento potente per la valutazione probabilistica della resilienza, permettendo di modellare scenari complessi con multiple variabili stocastiche (Paul R. Kleindorfer & Germaine H. Saad, 2005). Attraverso migliaia di iterazioni, questa tecnica consente di quantificare la distribuzione probabilistica dei possibili outcome in caso di interruzioni, fornendo una base statistica solida per le decisioni strategiche.

I modelli di ottimizzazione stocastica integrano l'incertezza direttamente nel processo di ottimizzazione, consentendo di identificare configurazioni della supply chain che massimizzano la resilienza sotto diverse condizioni operative (Snyder et al., 2006). Questi modelli sono particolarmente utili per la progettazione di reti logistiche resilienti e per la definizione di strategie di sourcing diversificate.

6.2 Approcci qualitativi alla misurazione della resilienza

6.2.1 Framework di assesment

Gli approcci qualitativi sono un complemento alle metriche quantitative, aiutandoci a capire meglio i fattori organizzativi, relazionali e strategici che influiscono sulla resilienza della supply chain.

Il supply chain risk assesment rappresenta un processo sistematico di identificazione, analisi e valutazione dei rischi lungo tutta la supply chain (Manuj & Mentzer, 2008). Questo approccio utilizza metodologie strutturate come la risk breakdown structure (RBS) e tecniche di scoring qualitativo per classificare i rischi secondo criteri di probabilità e impatto. La valutazione qualitativa è particolarmente efficace nell'identificare rischi emergenti o difficilmente quantificabili, come quelli geopolitici o reputazionali.

Le supplier scorecards costituiscono uno strumento di valutazione che integra criteri quantitativi e qualitativi per valutare le performance dei fornitori in termini di resilienza (Peck, 2005). Questi strumenti considerano fattori come la stabilità finanziaria, la diversificazione geografica, le certificazioni di qualità e la capacità di business continuity, fornendo una valutazione olistica della contribuzione di ciascun fornitore alla resilienza complessiva della supply chain.

6.2.2 Maturity models

I business continuity maturity models forniscono un framework strutturato per valutare il livello di maturità dei processi di resilienza all'interno dell'organizzazione (Zsidisin et al., 2005). Questi modelli, spesso basati su scale a cinque livelli (da “iniziale” a “ottimizzato”), consentono di identificare aree di miglioramento e di definire roadmap per l'evoluzione delle capacità di resilienza.

Il supply chain resilience maturity model estende il concetto di maturità all'intera rete di fornitura, valutando elementi come la visibilità end-to-end, la collaborazione inter-organizzativa, la standardizzazione dei processi e la capacità di apprendimento organizzativo (Pettit et al., 2010). Questo approccio è particolarmente utile per identificare gap di maturità tra diversi partner della supply chain e per guidare iniziative di sviluppo collaborativo.

6.2.3 Analisi scenario-based

L'analisi basata su scenari rappresenta un approccio qualitativo fondamentale per la valutazione della resilienza, permettendo di esplorare sistematicamente come la supply chain potrebbe rispondere a diverse tipologie di interruzioni.

Lo stress testing simula scenari di crisi estrema per testare i limiti del sistema e identificare punti di rottura critici (C. S. Tang, 2006). Questa metodologia, mutuata dal settore finanziario, consente di valutare la capacità di tenuta della supply chain sotto condizioni di stress severo, fornendo insights preziosi per il miglioramento della robustezza sistemica.

La “what-if analysis” esplora gli effetti di cambiamenti specifici nelle condizioni operative o nella configurazione della supply chain (Craighead et al., 2007). Questo approccio è particolarmente utile per valutare l'impatto di decisioni strategiche (come la diversificazione dei fornitori o la rilocalizzazione di impianti) sulla resilienza complessiva del sistema.

6.3 Approcci integrati e multidimensionali

6.3.1 Network analysis

L'applicazione della teoria dei grafi e dell'analisi di rete fornisce strumenti sofisticati per la comprensione della struttura topologica della supply chain e della sua influenza sulla resilienza.

La “centrality analysis” identifica i nodi (fornitori, impianti, centri di distribuzione) più critici all'interno della rete, utilizzando metriche come “betweenness centrality”, “closeness centrality” e “eigenvector centrality” (Kim et al., 2015). Nodi con elevata centralità rappresentano potenziali single points of failure che potrebbero compromettere significativamente le prestazioni dell'intera rete in caso di interruzione.

La robustness analysis valuta la capacità della rete di mantenere le sue proprietà funzionali dopo la rimozione di nodi o collegamenti (Roh et al., 2009). Metriche come la “connectivity robustness” e l'efficiency robustness quantificano la degradazione delle prestazioni di rete sotto diverse configurazioni di failure, fornendo indicazioni preziose per la progettazione di architetture resilienti.

6.3.2 Digital twins e tecnologie emergenti

I “digital twins” rappresentano una frontiera tecnologica avanzata per la misurazione e il miglioramento della resilienza della supply chain (Dmitry Ivanov & Alexandre Dolgui, 2019). Questi modelli digitali in tempo reale della supply chain fisica consentono simulazioni continue e testing di scenari senza interruzioni operative.

L'integrazione di Intelligenza Artificiale e Machine Learning nei sistemi di misurazione della resilienza sta aprendo nuove possibilità per la predizione proattiva delle interruzioni e l'ottimizzazione dinamica delle strategie di risposta (Baryannis George & Validi Sahar, 2019). Algoritmi di deep learning possono identificare pattern complessi nei dati operativi che precedono le interruzioni, mentre sistemi di reinforcement learning possono ottimizzare continuamente le strategie di gestione del rischio.

6.3.3 Framework multidimensionale: le “4R” della resilienza

Il framework delle “4R” (Robustness, Redundancy, Resourcefulness, Rapidity) fornisce una struttura concettuale comprensiva per la misurazione multidimensionale della resilienza (Bruneau et al., 2003).

- ❖ Robustness si riferisce alla capacità del sistema di mantenere le operazioni durante condizioni di stress. La misurazione della robustezza include metriche come la capacità di assorbimento degli shock, la stabilità delle performance sotto variazioni della domanda e la resistenza a interruzioni localizzate.
- ❖ Redundancy valuta la presenza di alternative e backup nel sistema. Metriche rilevanti includono il grado di diversificazione dei fornitori, la ridondanza delle rotte logistiche e la disponibilità di capacità produttiva di riserva.
- ❖ Resourcefulness misura la capacità di adattamento e improvvisazione del sistema. Questa dimensione include la flessibilità operativa, la capacità di riconfigurazione rapida e l'agilità decisionale dell'organizzazione.
- ❖ Recovery quantifica la velocità di risposta e recupero del sistema. Metriche chiave includono il tempo di detection delle interruzioni, la velocità di attivazione dei piani di contingenza e l'efficacia dei processi di recupero.

6.4 Supply Chain Resilience Index (SCRI)

L'SCRI rappresenta un'evoluzione metodologica fondamentale nella valutazione della resilienza logistica, superando i limiti delle metriche singole attraverso un approccio integrato che sintetizza la complessità sistematica delle supply chain in un unico indicatore quantitativo. Il framework SCRI adotta una struttura gerarchica multilivello che organizza indicatori elementari in sub-dimensioni tematiche, successivamente consolidate nelle quattro dimensioni principali della resilienza (robustezza, ridondanza, reattività, recupero).

6.4.1 Metodologia di calcolo e determinazione dei pesi

Il calcolo dell'SCRI segue la formula:

$$SCRI = \sum_{i=1}^n (w_i * D_i)$$

6.4.1

Dove:

- w_i rappresenta il peso della dimensione i-esima
- D_i rappresenta il punteggio normalizzato della dimensione specifica.

Ogni dimensione viene calcolata attraverso l'aggregazione ponderata dei suoi indicatori costitutivi, previa normalizzazione che converte valori con diverse unità di misura in scale comparabili (Rajesh & Ravi, 2015). La determinazione dei pesi avviene attraverso metodologie complementari: l'Analytic Hierarchy Process (AHP) utilizza confronti a coppie tra esperti per derivare pesi basati su giudizi strutturati, mentre approcci di machine learning (regressione multipla, algoritmi genetici, reti neurali) ottimizzano automaticamente i pesi attraverso l'analisi di dati storici di performance durante eventi disruptivi, massimando la correlazione tra SCRI ex-ante e resilienza effettiva ex-post (Agarwal et al., 2022).

6.4.2 Validazione e implementazione dinamica

La validazione dell'SCRI richiede un framework multidimensionale che verifica validità di costrutto (coerenza con il framework teorico), validità di criterio (confronto con benchmark esterni) e validità predittiva (capacità di anticipare performance future). Il "backtesting" sistematico ossia la verifica retrospettiva utilizza finestre temporali scorrevoli per testare la stabilità dell'indice, mentre lo stress testing simula scenari estremi per verificare la robustezza in condizioni di crisi severa.

L'implementazione moderna richiede sistemi di aggiornamento real-time attraverso architetture di stream processing che permettono il ricalcolo dinamico dell'indice, integrati con algoritmi di adaptive learning che aggiornano incrementalmente i pesi basandosi su nuove evidenze empiriche, mantenendo l'ottimo senza richiedere ricalibrizioni complete.

6.4.3 Valore strategico e applicazioni manageriali

L'SCRI fornisce una base quantitativa robusta per decisioni strategiche complesse, facilitando l'ottimizzazione del portfolio fornitori attraverso la massimizzazione della resilienza mantenendo efficienza operativa, guidando l'allocazione ottimale degli investimenti tra diverse iniziative di resilienza, supportando analisi sofisticate del trade-off rischio-rendimento. Come strumento di performance management, l'indice abilita competitive benchmarking con best practice di settore, introduce criteri di resilienza nella valutazione dei fornitori, e supporta processi di miglioramento continuo attraverso il monitoraggio sistematico dell'evoluzione della resilienza nel tempo. L'SCRI rappresenta dunque uno strumento strategico fondamentale per la gestione della complessità nelle supply chain contemporanee, fornendo una sintesi quantitativa che bilancia efficienza, resilienza e anche sostenibilità a lungo termine

6.5 Sfide e limitazioni nella misurazione della resilienza

La misurazione della resilienza della supply chain presenta diverse sfide metodologiche e pratiche che devono essere considerate nell'implementazione dei sistemi di valutazione.

La complessità sistemica delle supply chain moderne rende difficile catturare tutte le interdipendenze e gli effetti non lineari che caratterizzano questi sistemi. Le metriche tradizionali spesso falliscono nel rappresentare adeguatamente i fenomeni emergenti e le cascate di “failure” che possono propagarsi attraverso la rete.

La disponibilità e qualità dei dati rappresenta un vincolo significativo, particolarmente per le metriche che richiedono informazioni dettagliate sui partner upstream e downstream. La standardizzazione dei dati e lo sviluppo di protocolli di sharing informativo sono essenziali per l'efficacia dei sistemi di misurazione.

Il trade-off tra efficienza e resilienza complica la definizione di benchmark ottimali, in quanto miglioramenti nella resilienza spesso comportano costi aggiuntivi e possibili riduzioni dell'efficienza operativa. La misurazione deve quindi considerare questo equilibrio dinamico e fornire strumenti per l'ottimizzazione multi-obiettivo.

6.6 Tendenze future e sviluppi emergenti

L'evoluzione delle tecnologie digitali e dei metodi analitici sta aprendo nuove frontiere nella misurazione della resilienza della supply chain.

L'integrazione di Internet of Things (IoT) e sensori intelligenti lungo la supply chain sta generando volumi crescenti di dati in tempo reale che possono alimentare sistemi di misurazione più granulari e responsivi. Questi dati consentono il monitoraggio continuo delle condizioni operative e l'identificazione precoce di anomalie che potrebbero evolvere in interruzioni significative.

Lo sviluppo di piattaforme collaborative per la condivisione di informazioni sulla resilienza tra partner della supply chain sta facilitando l'implementazione di sistemi di misurazione end-to-end che superano i confini organizzazioni tradizionali.

L'applicazione di tecnologie blockchain per la tracciabilità e l'autenticazione delle informazioni sta migliorando l'affidabilità dei dati utilizzati per la misurazione della resilienza, particolarmente in contesti multi-tier complessi.

La misurazione della resilienza della supply chain richiede un approccio multidimensionale che integri metodologie quantitative e qualitative, considerando sia le performance operative che i fattori organizzativi e strategici che influenzano la capacità di risposta alle interruzioni.

L'efficacia dei sistemi di misurazione dipende dalla loro capacità di offrire indicazioni concrete e utilizzabili che orientino il miglioramento continuo della resilienza, mantenendo un equilibrio tra rigore metodologico e fattibilità operativa. La selezione degli approcci più adeguati deve tener conto delle caratteristiche specifiche del contesto operativo, della disponibilità di risorse e dati, nonché degli obiettivi strategici dell'organizzazione.

L'evoluzione futura di questo ambito richiederà una maggiore attenzione all'integrazione delle tecnologie e alla definizione di metodologie comuni, favorendo una più ampia diffusione di pratiche avanzate di misurazione e sostenendo la transizione verso catene di fornitura sempre più resilienti e capaci di adattarsi ai cambiamenti.

CAPITOLO 7: MODELLI DI PROGETTAZIONE PER UNA SUPPLY CHAIN RESILIENTE

La progettazione della supply chain resiliente è cruciale per garantire che le aziende possano affrontare e superare interruzioni impreviste mantenendo la continuità operativa. Con l'aumento della complessità e interconnessioni nelle supply chain globali, sviluppare una supply chain resiliente è diventato un obiettivo strategico per molte organizzazioni. Questo capitolo esplora vari approcci di progettazione della supply chain resiliente, discutendo come funzionano e, dove possibile, fornendo formule per una comprensione approfondita.

7.1 Modello di programmazione frazionaria robusta adattiva bi-obiettivo

Un approccio avanzato per progettare supply chain resilienti è l'uso di modelli di programmazione frazionaria robusta bi-obiettivo. Questo metodo considera il rischio di interruzione delle strutture e bilancia due obiettivi: minimizzare i costi e massimizzare la resilienza (Zhao & You, 2019).

Formula matematica:

Consideriamo un modello bi-obiettivo con le seguenti variabili:

- x_i : variabile decisionale binaria che indica se il nodo è selezionato.
- y_{ij} : variabile decisionale binaria che indica se l'arco (i, j) è selezionato.
- c_{ij} : costo associato all'arco (i, j) .
- R_{ij} : resilienza associato all'arco (i, j) .

Funzioni obiettivi

1. Minimizzare i costi totali:

$$\min z_1 = \sum_{i,j} c_{ij} y_{ij}$$

(5.1. 1)

2. Massimizzare la resilienza complessiva:

$$\max z_2 = \sum_{i,j} r_{ij} y_{ij}$$

(5. 1.2)

Il carattere robusto del modello si manifesta attraverso l'introduzione di vincoli aggiuntivi che rappresentano matematicamente le incertezze e le potenziali interruzioni, trasformando il modello da deterministico a resiliente alle variazioni ambientali e operative.

7.2 Modello resiliente con incertezza nella fornitura

L'evoluzione della ricerca nella progettazione di supply chain resilienti ha portato

Soren & Shastri (2021) a sviluppare un approccio specificamente dedicato alla supply chain della biomassa lignocellulosica, un settore caratterizzato da particolare volatilità nell'approvvigionamento delle materie prime. Il loro modello resiliente affronta sistematicamente l'incertezza nella fornitura attraverso la considerazione esplicita di scenari di interruzione, ottimizzando simultaneamente la localizzazione strategica dei depositi di preelaborazione e delle bioraffinerie.

Formulazione matematica

Definiamo le seguenti variabili e parametri:

- d_k : domanda nel nodo k
- s_i : fornitura nel nodo i
- p_j : capacità del deposito j
- t_{ij} : costo di trasporto tra i e j
- δ : parametro di resilienza che rappresenta il livello di ridondanza

L'obiettivo è minimizzare i costi di trasporto sotto vincoli capacità e domanda:

$$\min \sum_{i,j} t_{ij} x_{ij} \quad (5.2.1)$$

soggetto a:

1. il flusso verso ogni deposito non deve eccedere la capacità del deposito

$$\sum_i x_{ij} \leq P_j \quad \forall j \quad (5.2.2)$$

2. la fornitura da ogni nodo sia almeno pari alla disponibilità

$$\sum_j x_{ij} \geq s_i \quad \forall i \quad (5.2.3)$$

3. il vincolo di resilienza: limita il flusso tra ogni coppia di nodi in funzione del parametro di robustezza

$$x_{ij} \leq \delta * s_i \quad \forall i, j \quad (5.2.4)$$

7.3 Approccio ibrido stocastico Fuzzy-Robusto

La complessità delle moderne supply chain richiede strumenti matematici sempre più sofisticati per catturare la natura poliedrica delle incertezze. In risposta a questa esigenza, Sharifi et al., (2020) hanno sviluppato un approccio rivoluzionario che combina sinergicamente tre paradigmi matematici distinti: la programmazione stocastica, la logica fuzzy e l'ottimizzazione robusta. Questa metodologia ibrida rappresenta un salto qualitativo nella progettazione di supply chain resilienti, poiché affronta simultaneamente le incertezze nella domanda e nell'offerta, integrando le preferenze decisionali attraverso la formalizzazione matematica di variabili fuzzy.

Formulazione matematica

Definiamo le seguenti variabili e parametri:

- $\tilde{d}_k$: domanda fuzzy nel nodo k
- $\tilde{s}_i$: fornitura fuzzy nel nodo i
- $P_{(x)}$: funzione di probabilità associata alla domanda e all'offerta.

L'obiettivo è minimizzare il costo totale sotto incerte fuzzy:

$$\min \sum_{i,j} t_{ij} x_{ij} + \sum_k \cos t(\tilde{d}_k, \tilde{s}_i) \quad (5.3.1)$$

A. il sistema di vincoli mantiene la coerenza operativa attraverso limitazioni di capacità

$$\sum_i x_{ij} \leq P_j \quad \forall j \quad (5.3.2)$$

B. vincoli di fornitura fuzzy

$$\sum_j x_{ij} \geq \tilde{s}_i \quad \forall i \quad (5.3.3)$$

C. l'elemento distintivo è rappresentato dal vincolo probabilistico che garantisce un livello minimo di soddisfazione della domanda

$$p\left(\sum_k \tilde{d}_k \leq \sum_i \tilde{s}_i\right) \geq \alpha \quad (5.3.4)$$

dove α è il livello di confidenza desiderato, permettendo al decisore di bilanciare rischio e performance.

7.4 Programmazione ibrida robusta-stocastica

L'avanguardia della ricerca in supply chain resilienti è rappresentata dal lavoro pionieristico di Mousavi Ahranjani et al., (2020) hanno sviluppato un approccio di programmazione ibrida robusta-stocastica specificamente progettato per una rete di supply chain di bioetanolo lignocellulosico. Questo modello affronta sistematicamente sia rischi operativi quotidiani che i rischi di interruzione catastrofici, rappresentando un paradigma avanzato nella gestione integrata delle incertezze.

Formulazione Matematica

Le variabili e i parametri includono:

- D_i : domanda stocastica nel nodo i ;
- S_j : offerta stocastica nel nodo j ;
- λ : coefficiente di robustezza.

L'obiettivo è massimizzare la resilienza minimizzando i costi:

$$\min \sum_{i,j} t_{ij} x_{ij} + \lambda \cdot \cos(D_i, S_j) \quad (5.4. 1)$$

I. I vincoli operativi mantengono la fattibilità del sistema:

$$\sum_i x_{ij} \leq P_j \quad \forall j \quad (5.4. 2)$$

$$\sum_j x_{ij} \geq S_j \quad \forall i \quad (5.4. 3)$$

II. L'elemento stocastico è incorporato attraverso il vincolo probabilistico che assicura l'equilibrio tra domanda e offerta con alta probabilità:

$$\sum_k D_k \leq \sum_i S_i \text{ with high probability} \quad (5.4. 4)$$

7.5 Ottimizzazione avversa al rischio

L'approccio più recente e sofisticato nella progettazione di supply chain resilienti è stato sviluppato da (Khezerlou et al., 2021) che hanno implementato metodologie di ottimizzazione avversa al rischio per progettare reti di filiera di biocarburanti intrinsecamente resilienti. Questo approccio rappresenta un cambio di paradigma, poiché considera esplicitamente i rischi di interruzione in tutti i componenti critici del sistema: terminali multimodali, bioraffinerie e collegamenti di trasposto.

Formulazione matematica

Definiamo le seguenti variabili e parametri:

- ρ : misura del rischio (ad esempio, conditional Value-at-Risk, CVaR);
- x_i : variabile decisionale per il nodo i ;
- L : livello di servizio desiderato.

L'obiettivo è minimizzare i costi e il rischio associato:

$$\min \sum_{i,j} C_{ij} x_{ij} + \rho \cdot Risk(x) \quad (5.5. 1)$$

Il vincolo fondamentale assicura che la probabilità di interruzioni rimanga entro limiti accettabili:

$$P(Disruption \leq L) \geq \beta \quad (5.5. 2)$$

Dove β è il livello di confidenza desiderato, permettendo una gestione quantitativa del rischio di sistema.

La progettazione della supply chain resiliente richiede un approccio multidisciplinare che integri diverse tecniche e modelli matematici per affrontare le incertezze e i rischi. Ogni metodo presenta vantaggi specifici e limiti, che devono essere considerati nel contesto delle esigenze e delle capacità dell'azienda. Utilizzare una combinazione di questi approcci può fornire una visione completa e strategie efficaci per migliorare la resilienza della supply chain.

II. Confronto tra i vari modelli di progettazione della SCR

Nel contesto della progettazione di supply chain resilienti, sono stati sviluppati numerosi modelli con l'obiettivo di affrontare le incertezze, ridurre i rischi e garantire la continuità operativa. Ciascun approccio presenta specificità metodologiche che ne influenzano l'efficacia in funzione del contesto applicativo. La seguente analisi fornisce un approfondimento comparativo tra i principali modelli di progettazione della SCR, considerando i vantaggi, gli svantaggi e i contesti di applicabilità.

Approccio	Caratteristiche principali	Vantaggi	Svantaggi	Contesto di applicabilità
Modello di programmazione frazionaria robusta adattiva bi-obiettivo	Combina la minimizzazione dei costi con la massimizzazione della resilienza, adattando le decisioni alle condizioni del sistema. Impiega tecniche di ottimizzazione frazionaria e robusta.	Equilibrio tra efficienza e resilienza, adattabilità dinamica, consente valutazioni multi-obiettivo	Elevata complessità matematica richiede una grande quantità di dati accurati, implementazione computazionalmente intensiva	Supply chain caratterizzate da obiettivi strategici multipli e ambienti in continua evoluzione
Modello resiliente con incertezza nella fornitura	Si concentra sulla gestione dell'incertezza lato fornitore, ottimizzando la localizzazione e la capacità dei depositi. Spesso integrato con tecniche di programmazione mista intera.	Specificamente mirato alla resilienza della fornitura, migliora la robustezza della rete logistica, supporta la pianificazione strategica delle strutture	Richiede modelli avanzati e risorse computazionali notevoli, potenzialmente rigido in ambienti molto dinamici	Contesti con elevate incertezze nella disponibilità delle materie prime o nelle forniture
Approccio ibrido stocastico fuzzy-robusto	Integra elementi di modellazione stocastica, fuzzy logic e robustezza. Permette la gestione di incertezze di natura probabilistica e non probabilistica.	Estremamente flessibile e adattabile, tiene conto delle preferenze decisionali, adatto a contesti multilivello di incertezza	Richiede conoscenze avanzate interdisciplinari, difficile da modellare e implementare, elevata difficoltà nella calibrazione dei parametri	Supply chain complesse con fonti di incertezza eterogenee e necessità decisionali soggettive
Programmazione ibrida robusta-stocastica	Combina metodologie stocastiche (basate su distribuzioni di probabilità) e probabilistiche (gestione dell'imprecisione con teoria fuzzy) con ottimizzazione robusta.	Ottima gestione di vari tipi di incertezza, approccio sistemico e robusto, maggiore copertura dei rischi operativi	Complessità nella formulazione dei modelli, elevata necessità di dati e risorse computazionali, difficile da applicare in ambienti con dati scarsi	Ambienti logistici ad alta volatilità, dove coesistono dati incerti, vaghi o incompleti
Ottimizzazione avversa al rischio	Utilizza misure di rischio avanzate (es. CVaR - Conditional Value at Risk) per ottimizzare le decisioni nei peggiori scenari. Molto utilizzata in contesti finanziari, trova ora applicazione anche nella logistica.	Elevata robustezza rispetto agli scenari estremi, adatta a supply chain soggette a gravi interruzioni, focalizzata su resilienza strategica	Modelli complessi e costosi in termini computazionali, richiede tecniche avanzate di ottimizzazione e analisi di rischio	Supply chain operanti in ambienti turbolenti e vulnerabili a eventi disastrosi o a shock improvvisi

Tabella 2: confronto approfondito tra modelli di progettazione della SCR

La tabella sopra evidenzia come la scelta dell'approccio più adatto per la progettazione della supply chain resiliente dipenda fortemente dal contesto operativo, dal livello di incertezza affrontato e dagli obiettivi strategici aziendali.

- Il modello di programmazione frazionaria robusta adattiva bi-obiettivo si rivela particolarmente utile in scenari dove è necessario in modo efficiente costi e resilienza. Tuttavia, l'elevata sofisticazione del modello ne limita l'uso a contesti in cui sono disponibili dati affidabili e competenze analitiche avanzate.
- Il modello resiliente con incertezza di fornitura è invece più mirato e trova la sua forza nella gestione specifica delle incertezze legate alle forniture. È un modello meno generalista, ma efficace quando la vulnerabilità principale della supply chain risiede nella fase di approvvigionamento.
- L'approccio ibrido stocastico fuzzy-robusto rappresenta una delle soluzioni più complete e flessibili, in quanto consente di modellare scenari incerti sia in termini quantitativi che qualitativi. Tuttavia, l'implementazione richiede una sinergia tra competenze matematiche, informatiche e decisionali, non sempre facilmente reperibili nelle aziende.
- La programmazione ibrida robusta-stocastica coniuga metodologie che permettono una visione a 360° dell'incertezza, fornendo soluzioni robuste anche in condizioni di dati non completamente affidabili. La sua applicazione richiede, tuttavia, strumenti di simulazione avanzati e una significativa capacità di elaborazione.
- L'ottimizzazione avversa al rischio infine è uno strumento potente per ambienti ad alto rischio, dove il peggiore scenario possibile può avere conseguenze critiche. Sebbene offra garanzie elevate in termini di resilienza, è consigliata solo per supply chain che operano in settori strategici o ad alto impatto (es. energia, farmaceutico...) a causa dei costi di modellazione e di calcolo.

Un'efficace progettazione della supply chain resiliente non può prescindere da una valutazione attenta contestualizzata dei modelli disponibili. Ogni approccio presenta vantaggi e criticità, e la loro adozione deve avvenire tenendo conto del tipo di incertezza (probabilistica, strutturale), delle risorse analitiche e computazionali a disposizione, della complessità operativa della rete logistica, della tolleranza al rischio dell'organizzazione.

Integrare modelli avanzati di ottimizzazione con una visione strategica orientata alla resilienza rappresenta una leva fondamentale per costruire supply chain sostenibili, adattive e capaci di affrontare le sfide del mondo di oggi.

CONCLUSIONE

Negli ultimi anni, eventi globali inaspettati, come la pandemia dovuta al COVID-19, le tensioni geopolitiche e la crisi dei semiconduttori, hanno messo in luce tutte le fragilità delle supply chain moderne. Quello che fino a poco tempo fa sembrava un modello di gestione vincente, fondato sull'efficienza estrema, sul just-in-time e sulla globalizzazione senza confini, si è rivelato spesso inadeguato di fronte all'instabilità crescente del mondo reale. Questa consapevolezza ha rappresentato il punto di partenza di questa tesi.

Nel corso del lavoro, si è cercato di comprendere in profondità cosa significhi oggi costruire una supply chain realmente resiliente. Sono state analizzate non solo le cause strutturali delle vulnerabilità attuali, ma anche i modelli decisionali, le strategie e gli strumenti che possono supportare le imprese nel diventare più pronte, adattabili e robuste di fronte alle crisi. È emerso chiaramente che non esiste una soluzione unica o un modello universale: approcci diversi dalla programmazione robusta bi-obiettivo ai modelli fuzzy-stocastici, fino alle tecniche avverse al rischio offrono prospettive complementari, da adottare in base al contesto specifico.

Una delle sfide più complesse rimane quella di trovare un equilibrio efficace tra efficienza ed elasticità, tra contenimento dei costi e continuità operativa, tra rigidità strutturale e capacità di adattamento. Un ulteriore aspetto approfondito è stato quello della misurazione della resilienza. Parlare di resilienza non basta: è necessario saperla valutare in modo oggettivo. In tal senso, il Supply Chain Resilience Index (SCRI) proposto in questa tesi rappresenta un tentativo concreto di offrire alle imprese uno strumento integrato, in grado di combinare indicatori qualitativi e quantitativi per supportare decisioni strategiche.

Questa tesi non ambisce a fornire risposte definitive, ma vuole rappresentare un contributo verso una nuova consapevolezza: la resilienza non è un lusso né un'alternativa temporanea, bensì una competenza chiave da progettare, sviluppare e valorizzare. In un contesto globale sempre più instabile, le aziende capaci di anticipare il cambiamento, invece di subirlo, saranno anche quelle più pronte a innovare, crescere e generare valore, anche nei momenti di maggiore incertezza.

Bibliografia

- Aervaro. (2022, May 11). *Guerra Russia-Ucraina: I principali effetti sui servizi logistici*. <https://www.aervaro.com/guerra-russia-ucraina-i-principali-effetti-sui-servizi-logistici-degli-operatori-europei/>.
- Agarwal, N., Seth, N., & Agarwal, A. (2022). Evaluation of supply chain resilience index: a graph theory-based approach. *Benchmarking*, 29(3), 735–766. <https://doi.org/10.1108/BIJ-09-2020-0507>
- Almeida, L., & Tavares, F. (2024). Impact COVID-19 Pandemic in Supply Chain. In *Reference Module in Social Sciences*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-443-13701-3.00022-0>
- Ambulkar, S., B. J., & G. S. (2015). Firm's resilience to supply chain disruptions: Scale development and empirical examination. *Journal of Operations Management*, 33, 111–122.
- Anner, M. S. (2020). *Abandoned? The Impact of Covid-19 on Workers and Businesses at the Bottom of Global Garment Supply Chains*. <https://www.researchgate.net/publication/340460592>
- Baryannis George, & Validi Sahar. (2019). Supply chain risk management and artificial intelligence: state of the art and future research directions. *International Journal of Production Research*, 57, 2179–2202.
- Biringer, Vurgrin, & Warren. (2013). *Sicurezza e resilienza dei sistemi infrastrutturali critici* (CRC Press Taylor & Francis, Ed.; 1a ed).
- Blackhurst, J., Dunn, K. S., & Craighead, C. W. (2011). An empirically derived framework of global supply resiliency. *Journal of Business Logistics*, 32(4), 374–391. <https://doi.org/10.1111/j.0000-0000.2011.01032.x>
- Bruneau, M., Chang, S. E., Eguchi, R. T., Lee, G. C., O'Rourke, T. D., Reinhorn, A. M., Shinozuka, M., Tierney, K., Wallace, W. A., & Von Winterfeldt, D. (2003). A Framework to Quantitatively Assess and Enhance the Seismic Resilience of Communities. In *Earthquake Spectra* (Vol. 19, Issue 4, pp. 733–752). Earthquake Engineering Research Institute. <https://doi.org/10.1193/1.1623497>
- Carolina Andrade. (2021, December 7). *¿Qué es el Canal de Suez y por qué es tan importante?* - Info Latina. <https://www.infolatina.com.mx/que-es-el-canal-de-suez-y-por-que-es-tan-importante/>
- Chopra, S., & Sodhi, M. S. (n.d.). *Reducing the Risk of Supply Chain Disruptions*.
- Chopra, Sunil. (2019). *Supply chain management: strategy, planning, and operation*. Pearson Education.
- Chowdhury, P., Paul, S. K., Kaiser, S., & Moktadir, M. A. (2021). COVID-19 Pandemic Related Supply Chain Studies: A systematic review. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 148. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2021.102271>
- Christopher, M., & Holweg, M. (2011). "Supply Chain 2.0": Managing supply chains in the era of turbulence. *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*, 41(1), 63–82. <https://doi.org/10.1108/09600031111101439>
- Christopher, M., & Holweg, M. (2017). Supply chain 2.0 revisited: a framework for managing volatility-induced risk in the supply chain. *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*, 47(1), 2–17. <https://doi.org/10.1108/IJPDLM-09-2016-0245>
- Christopher, M., & Lee, H. (2004). Mitigating supply chain risk through improved confidence. *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*, 34(5), 388–396. <https://doi.org/10.1108/09600030410545436>
- Christopher, M., & Peck, H. (2004a). BUILDING THE RESILIENT SUPPLY CHAIN. In *International Journal of Logistics Management* (Vol. 15, Issue 2).
- Consilium. (2024, January 15). *L'impatto dell'invasione russa dell'Ucraina sui mercati: la risposta dell'UE*. <https://www.consilium.europa.eu/it/policies/eu-response-russia-military-aggression-against-ukraine-archive/impact-of-russia-s-invasion-of-ukraine-on-the-markets-eu-response/>.
- Craighead, C. W., Blackhurst, J., Rungtusanatham, M. J., & Handfield, R. B. (2007). The severity of supply chain disruptions: Design characteristics and mitigation capabilities. *Decision Sciences*, 38(1), 131–156. <https://doi.org/10.1111/j.1540-5915.2007.00151.x>
- CSI. (2022, June 4). *Guerra in Ucraina: La crisi alimentare e la risposta dell'UE*. <https://Studi-Internazionali.Org/Guerra-in-Ucraina-La-Crisi-Alimentare-2/>.

- Di Jill Leovy. (2017, August 17). *L'attacco informatico è costato a Maersk fino a 300 milioni di dollari e ha interrotto le operazioni per 2 settimane*. Los Angeles Times.
- Dmitry Ivanov, & Alexandre Dolgui. (2019). The impact of digital technology and Industry 4.0 on the ripple effect and supply chain risk analytics. *International Journal of Production Research*, 57(3).
- Dolgui, A., Ivanov, D., & Sokolov, B. (2018). Leading scholars in Production Research. *International Journal of Production Research*, 56(2), 414–430. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1387680>
- Dubey, R., Bryde, D. J., Dwivedi, Y. K., Graham, G., Foropon, C., & Papadopoulos, T. (2023). Dynamic digital capabilities and supply chain resilience: The role of government effectiveness. *International Journal of Production Economics*, 258. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2023.108790>
- El Baz, J., Ruel, S., & Jebli, F. (2023). Harnessing supply chain resilience and social performance through safety and health practices in the COVID-19 era: An investigation of normative pressures and adoption timing's role. *International Journal of Production Economics*, 264. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2023.108989>
- Encyclopædia Britannica, Inc. (2025, April 16). *Suez Canal - Kids | Britannica Kids | Homework Help*. <https://kids.britannica.com/kids/article/Suez-Canal/353819>
- Fahimnia, B., & Jabbarzadeh, A. (2016). Marrying supply chain sustainability and resilience: A match made in heaven. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 91, 306–324. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2016.02.007>
- Faisal, M. N. (2010). Sustainable supply chains: A study of interaction among the enablers. *Business Process Management Journal*, 16(3), 508–529. <https://doi.org/10.1108/14637151011049476>
- FAO. (2023). *the State of Food Security and Nutrition in the World (SOFI) 2023*. <https://www.fao.org/home/en/>.
- Francis, V. (2008). Supply chain visibility: Lost in translation? *Supply Chain Management*, 13(3), 180–184. <https://doi.org/10.1108/13598540810871226>
- Geopolitica. (2025, February 21). *La frattura Usa-Cina rivoluziona le supply chain globali*. <https://www.agendadigitale.eu/mercati-digitali/nuovo-ordine-commerciale/come-la-frattura-usa-cina-ridisegna-le-relazioni-globali/>.
- Gereffi, G. (2020). *What Does the COVID-19 Pandemic Teach Us about Global Value Chains? The Case of Medical Supplies*.
- Giri, B. K., Roy, S. K., & Deveci, M. (2023). Fuzzy robust flexible programming with Me measure for electric sustainable supply chain. *Applied Soft Computing*, 145. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2023.110614>
- Gital, Y., & Bilgen, B. (2024). Resilient strategies for managing supply and facility disruptions in a biomass supply chain. *Applied Energy*, 372. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.123808>
- Han, Y. (2022). The impact of the COVID-19 pandemic on China's economic structure: An input–output approach. *Structural Change and Economic Dynamics*, 63, 181–195. <https://doi.org/10.1016/j.strueco.2022.09.014>
- Hasani, A., & Khosrojerdi, A. (2016). Robust global supply chain network design under disruption and uncertainty considering resilience strategies: A parallel memetic algorithm for a real-life case study. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 87, 20–52. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2015.12.009>
- HBS. (2017). *I tifoni nel sud-est asiatico ti impediranno di rimanere idratato quest'estate?* <https://rctom.hbs.org/submission/Will-Typhoons-in-Southeast-Asia-Stop-You-from-Staying-Hydrated-This-Summer/>.
- Hendricks, K. B., & Singhal, V. R. (2005). *An Empirical Analysis of the Effect of Supply Chain Disruptions on Long-Run Stock Price Performance and Equity Risk of the Firm*.
- Hosseini, S., & Barker, K. (2016a). Modeling infrastructure resilience using Bayesian networks: A case study of inland waterway ports. *Computers and Industrial Engineering*, 93, 252–266. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2016.01.007>
- Hosseini, S., Ivanov, D., & Dolgui, A. (2019). Review of quantitative methods for supply chain resilience analysis. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 125, 285–307. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2019.03.001>
- Jain, V., Benyoucef, L., & Deshmukh, S. G. (2008). A novel approach for evaluating agility in supply chains using Fuzzy Association Rules Mining. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 21(3), 367–385. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2007.07.004>
- Jüttner, U., & Maklan, S. (2011). Supply chain resilience in the global financial crisis: An empirical study. *Supply Chain Management*, 16(4), 246–259. <https://doi.org/10.1108/13598541111139062>

- Kerkhoff, A. J., & Enquist, B. J. (2007). The implications of scaling approaches for understanding resilience and reorganization in ecosystems. In *BioScience* (Vol. 57, Issue 6, pp. 489–499). <https://doi.org/10.1641/B570606>
- Khezerlou, H. S., Vahdani, B., & Yazdani, M. (2021). Designing a resilient and reliable biomass-to-biofuel supply chain under risk pooling and congestion effects and fleet management. *Journal of Cleaner Production*, 281. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125101>
- Kim, Y., Chen, Y. S., & Linderman, K. (2015). Supply network disruption and resilience: A network structural perspective. *Journal of Operations Management*, 33–34, 43–59. <https://doi.org/10.1016/j.jom.2014.10.006>
- Kumar, G., & R. Z. (2016). Buyer supplier relationship and supply chain sustainability: Empirical study of Indian firms. *Journal of Cleaner Production*, 155, 217–228.
- Li, H., Pedrielli, G., Lee, L. H., & Chew, E. P. (2017). Enhancement of supply chain resilience through inter-echelon information sharing. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 29(2), 260–285. <https://doi.org/10.1007/s10696-016-9249-3>
- Logisticamente.it. (2024, January 29). *Crisi logistica globale: impatto dei canali di Suez e Panama sul Trasporto Marittimo*. <https://www.logisticamente.it/articoli/47386/Crisi-Logistica-Globale-Impatto-Dei-Canali-Di-Suez-e-Panama-Sul-Trasporto-Marittimo/>.
- Luca Mella. (2021, June 20). *Attacco a Colonial Pipeline, il prima e dopo che stanno cambiando lo scenario del cyber crime*. La RIFLESSIONE.
- M Millar. (2015). *Ecosistemi della supply chain globale: Strategie per un vantaggio competitivo in un mondo complesso e connesso* (Kogan Page Publishers, Ed.).
- Mahesh Rajasekharan. (2020, June). *The COVID-19 Supply Chain Impact – Avoiding the Bullwhip Effect | Supply & Demand Chain Executive*. <https://www.sdcexec.com/sourcing-procurement/article/21134023/cleo-the-covid19-supply-chain-impact-avoiding-the-bullwhip-effect>
- Malek Fouda. (2025). La Russia interromperà la fornitura di gas all'Europa attraverso l'Ucraina. *Euro News*.
- Manuj, & Mentzer. (2008). Global Supply Chain Risk Management. *Journal of Business Logistics*, 29, 133–155.
- Marco Logistique. (2024, July 22). *Microsoft en Panne: Impact Majeur sur les Transports et la Logistique Globale*. NTMG.
- Mary-Ann Russon. (2021, March 29). *Le coût du blocage du canal de Suez*. Journaliste Économique, BBC News.
- McKinsey & Company. (2022). *Supply Chain Resilience: How to Prepare for the Next Crisis*. McKinsey Global Institute. <https://www.mckinsey.com/featured-insights/2022-year-in-review/2022-the-year-in-charts>
- Mohammad, W., Elomri, A., & Kerbache, L. (2022). The Global Semiconductor Chip Shortage: Causes, Implications, and Potential Remedies. *IFAC-PapersOnLine*, 55(10), 476–483. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.09.439>
- Moktadir, M. A., & Ren, J. (2024). Global semiconductor supply chain resilience challenges and mitigation strategies: A novel integrated decomposed fuzzy set Delphi, WINGS and QFD model. *International Journal of Production Economics*, 273. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2024.109280>
- Mousavi Ahranjani, P., Ghaderi, S. F., Azadeh, A., & Babazadeh, R. (2020). Robust design of a sustainable and resilient bioethanol supply chain under operational and disruption risks. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 22(1), 119–151. <https://doi.org/10.1007/s10098-019-01773-2>
- Nikookar, E., Gligor, D., & Russo, I. (2024). Supply chain resilience: When the recipe is more important than the ingredients for managing supply chain disruptions. *International Journal of Production Economics*, 272. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2024.109236>
- Nikookar, E., Stevenson, M., & Varsei, M. (2024). Building an antifragile supply chain: A capability blueprint for resilience and post-disruption growth. *Journal of Supply Chain Management*, 60(1), 13–31. <https://doi.org/10.1111/jscm.12313>
- Omotolani Eniola Akinbolajo. (2024). Resilience in supply chain management: lessons learned from disruptions like the COVID-19 pandemic. *International Journal of Science and Research Archive*, 12(1), 643–647. <https://doi.org/10.30574/ijrsra.2024.12.1.0827>
- Ozgun Erol, B. J. (2010). *Un quadro per l'indagine sulla resilienza aziendale estesa*. 111–136.
- Pagell, M., & W. Z. (2017). Building a more complete theory of sustainable supply chain management using case studies of ten exemplars. *Journal of Supply Chain Management*, 43(1), 37–56.

- Paul R. Kleindorfer, & Germaine H. Saad. (2005). Managing disruption risks in supply chain. *Production and Operations Management*, 53–68.
- Peck. (2005). Drivers of supply chain vulnerability: an integrated framework. *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*, 35(4), 210–232.
- Peter Hermes. (2025, April 16). *Carte Politique De Canal De Panama Illustration de Vecteur - Illustration du carte, politiquement: 41342017*. <https://fr.dreamstime.com/illustration-stock-carte-politique-canal-panama-image41342017>
- Pettit, T. J., Croxton, K. L., & Fiksel, J. (2013). Ensuring supply chain resilience: Development and implementation of an assessment tool. *Journal of Business Logistics*, 34(1), 46–76. <https://doi.org/10.1111/jbl.12009>
- Pettit, T. J., Fiksel, J., & Croxton, K. L. (2010). ENSURING SUPPLY CHAIN RESILIENCE: DEVELOPMENT OF A CONCEPTUAL FRAMEWORK. *Journal of Business Logistics*, 31(1), 1–21. <https://doi.org/10.1002/j.2158-1592.2010.tb00125.x>
- Rajabzadeh, H., & Babazadeh, R. (2022). A game-theoretic approach for power pricing in a resilient supply chain considering a dual channel biorefining structure and the hybrid power plant. *Renewable Energy*, 198, 1082–1094. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.08.118>
- Rajesh, R., & Ravi, V. (2015). Modeling enablers of supply chain risk mitigation in electronic supply chains: A Grey-DEMATEL approach. *Computers and Industrial Engineering*, 87, 126–139. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2015.04.028>
- Ramani, V., Ghosh, D., & Sodhi, M. M. S. (2022). Understanding systemic disruption from the Covid-19-induced semiconductor shortage for the auto industry. *Omega (United Kingdom)*, 113. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2022.102720>
- Rice e Caniato. (2003). *COSTRUIRE UNA RETE DI APPROVVIGIONAMENTO SICURA E RESILIENTE* (Vol. 7, pp. 22–30).
- Roh, J. J., Hong, P., & Yang, M. (2009). *An International Study on Supply Chain Restructuring: A Coordination Theory Approach*.
- Sáenz, M. J., & Revilla, E. (2014). *Creating More Resilient Supply Chains*. <http://mitsmr.com/1q8IR3B>
- Salehi, S., Zare Mehrjerdi, Y., Sadegheih, A., & Hosseini-Nasab, H. (2022). Designing a resilient and sustainable biomass supply chain network through the optimization approach under uncertainty and the disruption. *Journal of Cleaner Production*, 359. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131741>
- Scholten, K., & Schilder, S. (2015). The role of collaboration in supply chain resilience. *Supply Chain Management*, 20(4), 471–484. <https://doi.org/10.1108/SCM-11-2014-0386>
- Serdarasan, S. (2013). A review of supply chain complexity drivers. *Computers & Industrial Engineering*, 66(3), 533–540.
- Sharifi, M., Hosseini-Motlagh, S. M., Samani, M. R. G., & Kalhor, T. (2020). Novel resilient-sustainable strategies for second-generation biofuel network design considering Neem and Eruca Sativa under hybrid stochastic fuzzy robust approach. *Computers and Chemical Engineering*, 143. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2020.107073>
- Sharma, A., Adhikary, A., & Borah, S. B. (2020). Covid-19's impact on supply chain decisions: Strategic insights from NASDAQ 100 firms using Twitter data. *Journal of Business Research*, 117, 443–449. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2020.05.035>
- Snyder, L. V., Scaparra, M. P., Daskin, M. S., & Church, R. L. (2006). Planning for Disruptions in Supply Chain Networks. In *Models, Methods, and Applications for Innovative Decision Making* (pp. 234–257). INFORMS. <https://doi.org/10.1287/educ.1063.0025>
- Soni, U., Jain, V., & Kumar, S. (2014). Measuring supply chain resilience using a deterministic modeling approach. *Computers and Industrial Engineering*, 74(1), 11–25. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2014.04.019>
- Soren, A., & Shastri, Y. (2021). Resiliency considerations in designing commercial scale systems for lignocellulosic ethanol production. *Computers and Chemical Engineering*, 147. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2021.107239>
- Srai, J. S., Graham, G., Van Hoek, R., Joglekar, N., & Lorentz, H. (2023). Impact pathways: unhooking supply chains from conflict zones—reconfiguration and fragmentation lessons from Ukraine–Russia war. *International Journal of Operations and Production Management*, 43(13), 289–301. <https://doi.org/10.1108/IJOPM-08-2022-0529>

- Tang, C. S. (2006). Robust strategies for mitigating supply chain disruptions. *International Journal of Logistics Research and Applications*, 9(1), 33–45. <https://doi.org/10.1080/13675560500405584>
- Tang, C. S., & T. B. (2008). The power of flexibility for mitigating supply chain risks. *International Journal of Production Economics*, 116(1), 12–27.
- Turnquist, M., & Vugrin, E. (2013). Design for resilience in infrastructure distribution networks. *Environmentalist*, 33(1), 104–120. <https://doi.org/10.1007/s10669-012-9428-z>
- UNCTAD. (2021). *Review of Maritime Transport 2021*. <https://unctad.org/Rmt2021>.
- Warmbier, P., Kinra, A., & Ivanov, D. (2022). Supply Chain Sustainability and Resilience - Relationship and Congruent Capability Analysis based on Paradox Theory. *IFAC-PapersOnLine*, 55(10), 311–316. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.09.625>
- Wieland, A., & Wallenburg, C. M. (2013a). The influence of relational competencies on supply chain resilience: A relational view. *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*, 43(4), 300–320. <https://doi.org/10.1108/IJPDLM-08-2012-0243>
- World Bank. (2023). *Poverty and Shared Prosperity Report 2023: Crisis-Resilient Supply Chains*. <https://www.worldbank.org/en/topic/poverty>.
- Yazdanparast, R., Jolai, F., Pishvaei, M. S., & Keramati, A. (2022). A resilient drop-in biofuel supply chain integrated with existing petroleum infrastructure: Toward more sustainable transport fuel solutions. *Renewable Energy*, 184, 799–819. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.11.081>
- Yossi Sheffi. (2015). *The Power of Resilience: How the Best Companies Manage the Unexpected*. Mt Press.
- Zhao, S., & You, F. (2019). Resilient supply chain design and operations with decision-dependent uncertainty using a data-driven robust optimization approach. *AIChE Journal*, 65(3), 1006–1021. <https://doi.org/10.1002/aic.16513>
- Zsidisin, G. A., Melnyk, S. A., & Ragatz, G. L. (2005). An institutional theory perspective of business continuity planning for purchasing and supply management. *International Journal of Production Research*, 43(16), 3401–3420. <https://doi.org/10.1080/00207540500095613>