



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Gestionale

**UN MODELLO MATEMATICO CON VINCOLI DI ECO-SOSTENIBILITÀ NEL CONTESTO
DELLA REVERSE LOGISTICS**

**A MATHEMATICAL MODEL WITH ENVIRONMENTAL CONSTRAINTS IN THE
CONTEXT OF REVERSE LOGISTICS**

Relatrice:

Prof.ssa **Ornella Pisacane**

Tesi di Laurea di:

Marco Taormina

A.A. 2023 / 2024

Sommario

Abstract	5
Capitolo 1.....	6
1.1 Introduzione.....	6
1.2 Motivazioni.....	8
1.3 Obiettivi.....	10
1.4 Struttura della tesi.....	11
Capitolo 2.....	12
2.1 Introduzione.....	12
2.2 Stato dell'arte.....	12
2.3 Conclusione.....	16
Capitolo 3.....	17
3.1 Introduzione.....	17
3.2 Modello di Demirel e Gökçen.....	17
3.2.1 Insiemi.....	18
3.2.2 Parametri.....	18
3.2.3 Variabili decisionali.....	19
3.2.4 Funzione obiettivo.....	20
3.2.5 Vincoli.....	21
3.3 Politiche ambientali.....	22
3.3.1 Limite alle emissioni.....	23
3.3.1.1 Parametri ambientali.....	24
3.3.1.2 Vincolo sul limite di emissioni.....	24
3.3.2 Cap-and-trade.....	25
3.3.2.1 parametri aggiuntivi.....	25
3.3.2.2 variabili aggiuntive.....	26

3.3.2.1 Funzione obiettivo	26
3.3.2.2 Vincoli	26
Capitolo 4: Sperimentazione ed Analisi di Sensitività	28
4.1 Introduzione	28
4.2 Descrizione delle istanze	28
4.2.1 Istanza proposta da Demirel e Gökçen (2008)	28
4.2.2 Dati aggiuntivi per i modelli con politiche ambientali	31
4.3 Risultati computazionali	32
4.4 Analisi di sensitività	34
4.4.1 Politica limite alle emissioni	35
4.4.2 Politica cap-and-trade	37
4.4.3 Confronto politiche	39
Capitolo 5: Conclusioni	40
Riferimenti Bibliografici	42
Sitografia.....	43

Indice tabelle

Tabella 1: informazioni dei prodotti.....	28
Tabella 2: costi di produzione (€/unità)	29
Tabella 3: costi di smontaggio (€/unità).....	29
Tabella 6: costi di apertura (€) dei centri di smontaggio p, raccolta n e distribuzione p.....	29
Tabella 7: capacità (n° unità) dei centri di produzione k, smontaggio p, raccolta n e distribuzione l, per ogni prodotto.	29
Tabella 8: distanze (in Km) produttore-centro di distribuzione (b_{ki}), produttore-centro di smontaggio (b_{kp})	30
Tabella 9: distanze (in Km) cliente-centro di distribuzione (b_{lm}), cliente-centro di smontaggio (b_{mp}), cliente-centro di raccolta (b_{mn}).....	30
Tabella 10: distanze (in Km) centri di raccolta-centri di smontaggio (b_{np}).....	30
Tabella 11: emissioni (in tonnellate) di CO ₂ per la produzione.....	31
Tabella 12: emissioni (in tonnellate) di CO ₂ per smaltimento e trasporto prodotti/componenti	31
Tabella 13: parametri emissioni cap-and-trade	31
Tabella 16: differenti politiche e rispettivi risultati	32
Tabella 17: confronto quantità prodotte dai produttori nei tre modelli	34
Tabella 18: variazione costi totali ed emissioni totali al variare del limite di emissioni per la politica “limite alle emissioni”	35
Tabella 19: variazione costi totali ed emissioni totali al variare del limite di emissioni per la politica “cap-and-trade”	37

Indice figure

Figura 1: struttura di una catena di logistica inversa integrata.....	6
Figura 2: relazione limite emissioni-costi, politica "limite alle emissioni"	36
Figura 3: relazione limiti emissioni-emissioni totali, politica "limite alle emissioni"	36
Figura 4: relazione limite emissioni-costi, politica "cap and trade"	38
Figura 5: relazione limite emissioni-emissioni totali, politica "cap-and-trade"	38
Figura 6: confronto costi tra le due politiche	39
Figura 7: confronto emissioni totali tra le due politiche	39

Abstract

La presente tesi sviluppa e analizza modelli di programmazione lineare intera mista per la gestione di una rete logistica inversa integrata, ampliando il lavoro di Demirel e Gökçen (2008) per includere considerazioni ambientali. L'obiettivo dei modelli è stabilire le quantità ottimali da produrre e trasportare di prodotti nuovi e rigenerati, nonché determinare l'ubicazione dei centri di distribuzione, raccolta e smontaggio. In particolare, sono stati formulati due modelli di programmazione lineare intera mista che incorporano due diverse politiche ambientali: il limite alle emissioni e il cap-and-trade.

La prima politica stabilisce un tetto massimo per le emissioni di CO₂, spingendo le aziende a implementare soluzioni onerose per rispettare i vincoli di sostenibilità imposti. Al contrario, la politica del cap-and-trade fornisce una maggiore flessibilità, consentendo alle aziende di scambiare crediti di carbonio, facilitando così la gestione delle emissioni in un contesto di mercato.

Tutti i modelli sono stati implementati usando il linguaggio di modellazione matematica AMPL e risolti usando il risolutore commerciale Cplex.

Attraverso l'analisi di sensitività, è stato fatto un confronto tra le due politiche, evidenziando il trade-off tra sostenibilità ambientale e costi operativi.

Infine, sono state suggerite estensioni future, come l'integrazione con l'Analisi del Ciclo di Vita (LCA) per una valutazione più ampia degli impatti ambientali, oltre a scenari più complessi caratterizzati da incertezza su parametri chiave, quali domanda, tasso di ritorno e costo dei crediti di carbonio.

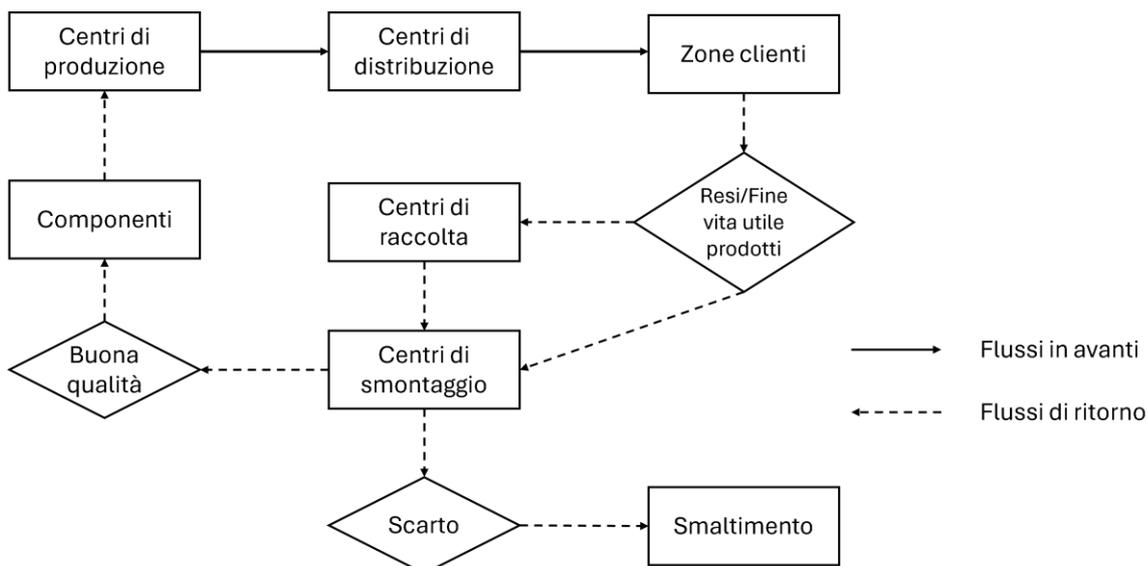
Capitolo 1

1.1 Introduzione

Negli ultimi decenni, la crescente preoccupazione per il cambiamento climatico e l'impatto ambientale delle attività produttive ha portato le aziende a rivedere radicalmente le loro strategie di gestione della supply chain. La sostenibilità ambientale è diventata una priorità in molte industrie, spinta da regolamentazioni governative sempre più severe e da una maggiore consapevolezza da parte dei consumatori. Tuttavia, la sfida principale per le aziende consiste nel bilanciare la necessità di ridurre le emissioni di gas serra con il mantenimento di un'elevata efficienza operativa e competitività economica. In questo contesto, la logistica inversa integrata è emersa come un approccio strategico per gestire in modo efficace il ciclo di vita dei prodotti, migliorando sia l'efficienza operativa che la sostenibilità ambientale.

La logistica inversa integrata rappresenta un sistema complesso in cui le aziende gestiscono non solo il flusso di materiali dalla produzione al cliente (logistica diretta), ma anche il ritorno dei prodotti dal cliente al produttore per il riciclo, il riuso o lo smaltimento. Questa doppia gestione consente di ottimizzare l'uso delle risorse, ridurre gli sprechi e limitare l'impatto ambientale. In questa tesi verrà utilizzata una catena di logistica inversa integrata, come mostrato nella figura 1.

Figura 1: struttura di una catena di logistica inversa integrata



La rete di logistica inversa integrata mostrata in Figura 1 include tutte le fasi principali del ciclo di vita del prodotto: produzione, distribuzione, cliente, raccolta, centri di smontaggio e smaltimento. I nuovi prodotti vengono spediti dai centri di produzione ai centri di distribuzione e poi alle zone clienti, come parte del flusso in avanti. Questo flusso rappresenta il movimento dei prodotti lungo la catena di fornitura tradizionale, dalla produzione al cliente finale.

Quando i prodotti raggiungono la fine della loro vita utile, cioè non rispettano più le caratteristiche fisiche e di sicurezza per il consumatore, oppure vengono restituiti a causa di difetti o imperfezioni (resi), inizia il flusso di ritorno. I prodotti a fine vita o difettosi vengono raccolti e inviati ai centri di smontaggio tramite i centri di raccolta oppure, se è più redditizio, vengono inviati direttamente ai centri di smontaggio dalle zone clienti. In questi centri, i prodotti usati di buona qualità vengono smontati, e le parti ottenute sono inviate ai centri di produzione. Il resto è destinato allo smaltimento. Tutte queste attività hanno un impatto significativo sulle emissioni di carbonio nella catena.

L'obiettivo principale della tesi è analizzare come l'integrazione dei vincoli ambientali possa influenzare le decisioni operative nella logistica inversa, permettendo alle aziende di ridurre le emissioni di CO₂ e, al contempo, mantenere un controllo efficace sui costi operativi.

Partendo dal modello di logistica inversa integrata di Demirel et al. (2008), la tesi si concentrerà quindi sull'integrazione e analisi delle politiche regolatorie ambientali, come il cap-and-trade e i limiti obbligatori alle emissioni, e sul loro impatto sulla gestione della catena. Attraverso la formulazione di modelli matematici, in particolare di Programmazione Lineare Intera Mista (PLIM), e la conseguente risoluzione, verranno ottimizzate le decisioni operative e strategiche, come la localizzazione dei centri di distribuzione, raccolta e smaltimento, il recupero dei prodotti usati e le quantità ottimali di produzione e trasporto dei prodotti. Questi modelli consentono di bilanciare i due obiettivi principali, la riduzione dei costi e delle emissioni, e di generare soluzioni ottime che tengano, nel contempo, in conto delle diverse priorità aziendali.

1.2 Motivazioni

Le motivazioni che stanno alla base di questo lavoro risiedono nell'urgenza di rispondere a due sfide interconnesse: da un lato, la necessità di ridurre significativamente le emissioni di gas serra per contrastare il cambiamento climatico, e dall'altro, il bisogno delle aziende di mantenere la loro competitività economica in un mercato globalizzato. Tra i principali accordi internazionali due hanno avuto un impatto significativo: il Protocollo di Kyoto del 1997 e l'Accordo di Parigi del 2015.

Il Protocollo di Kyoto è stato il primo accordo internazionale che ha imposto ai paesi industrializzati di ridurre le loro emissioni di GES del 5% rispetto ai valori del 1990, nel periodo compreso tra il 2008 e il 2012. Il protocollo ha introdotto meccanismi come il cap-and-trade, che consente ai paesi di scambiare "permessi di emissioni", e altri progetti di compensazione del carbonio, che permettono, in particolare ai paesi industrializzati, di ottenere crediti di emissione per progetti di riduzione delle emissioni realizzati in altri paesi.

L'Accordo di Parigi ha ampliato questi obiettivi a livello globale. L'obiettivo principale dell'accordo è mantenere l'aumento medio della temperatura globale al di sotto dei 2° C rispetto ai livelli pre-industriali, riducendo le emissioni di GES del 40% rispetto ai valori del 1990, entro il 2030.

Le aziende di tutto il mondo, in risposta a tali meccanismi e legislazioni, hanno intrapreso iniziative per ridurre le loro impronte di carbonio, che si concentrano principalmente in investimenti in tecnologie green. Tuttavia, sebbene tali sforzi siano preziosi, non bisogna ignorare un'altra fonte di emissioni potenzialmente più significativa, che dipende dalle scelte aziendali e dalle politiche operative, nel contesto di una catena di fornitura complessa. Ad esempio, determinare la frequenza della produzione e delle consegne potrebbe essere importante tanto quanto l'efficienza energetica dei veicoli utilizzati per queste consegne. Allo stesso modo, diverse decisioni che un'azienda prende riguardo alla posizione degli impianti, alla selezione dei fornitori e dei mezzi di trasporto, ecc., possono influenzare significativamente la sua impronta di carbonio. È quindi necessario affrontare il problema della riduzione delle emissioni di carbonio dalla prospettiva della supply chain e della logistica inversa, poiché se non gestito correttamente

potrebbe vanificare gli sforzi di sostenibilità fatti attraverso investimenti in tecnologie green. In questo contesto, l'integrazione di vincoli ambientali nei modelli matematici di logistica inversa rappresenta una sfida fondamentale, poiché ha un impatto significativo su diversi livelli:

- 1) **Impatto ambientale:** l'obiettivo primario di qualsiasi iniziativa di sostenibilità è la riduzione delle emissioni di gas serra, in particolare la CO₂, che contribuisce al cambiamento climatico. Gli strumenti proposti, come i modelli PLIM e le politiche di cap-and-trade o di limiti alle emissioni, consentono di gestire al meglio questo impatto, generando strategie che permettono una riduzione significativa dell'impronta carbonica aziendale.
- 2) **Impatto economico:** le aziende spesso temono che l'introduzione di vincoli ambientali possa aumentare significativamente i costi operativi, ma attraverso l'uso di modelli matematici, è possibile trovare un equilibrio ottimale tra riduzione delle emissioni e minimizzazione dei costi, migliorando così la competitività aziendale. Questo aspetto è cruciale in un contesto economico dove le aziende devono rispettare le normative senza compromettere la redditività.
- 3) **Impatto operativo:** implementare soluzioni di logistica inversa richiede un adattamento dei processi operativi, che può portare benefici a lungo termine. Un esempio concreto riguarda la maggiore efficienza nell'uso delle risorse e la riduzione degli sprechi. Ottimizzando la logistica inversa, le aziende possono migliorare la gestione del ciclo di vita dei prodotti, riducendo le spese legate alla produzione e allo smaltimento. L'efficienza operativa viene potenziata anche dalla riduzione dei percorsi inutili, dalla migliore selezione dei fornitori e da un uso più razionale dei trasporti.
- 4) **Impatto normativo e reputazionale:** le normative ambientali stanno diventando sempre più severe a livello globale, e le aziende che non rispettano tali regolamenti rischiano sanzioni significative. Implementare una logistica inversa sostenibile permette non solo di conformarsi alle normative vigenti, ma anche di prepararsi a futuri sviluppi normativi. Inoltre, migliorare la sostenibilità ambientale ha un impatto positivo sulla reputazione aziendale, accrescendo la fiducia dei consumatori e migliorando l'immagine del marchio, fattore determinante per rimanere competitivi in un mercato sempre più sensibile ai temi ecologici.

- 5) **Impatto sociale:** sebbene non sempre evidente, la sostenibilità ambientale ha anche implicazioni sociali. Ridurre l'impronta ecologica delle aziende contribuisce a migliorare la qualità dell'aria, ridurre i rifiuti e preservare le risorse naturali, migliorando così le condizioni di vita delle comunità circostanti. Le aziende che adottano strategie di logistica sostenibile dimostrano di avere una responsabilità sociale e ambientale, aumentando il proprio valore agli occhi degli stakeholder e promuovendo un modello di business più etico e responsabile.

1.3 Obiettivi

L'obiettivo principale di questa tesi è analizzare come l'integrazione di vincoli ambientali nei modelli di logistica inversa integrata possa influenzare le decisioni operative e strategiche delle aziende. In particolare, gli obiettivi specifici del lavoro sono:

- 1) Formulare, implementare e risolvere due modelli PLIM per analizzare le politiche regolatorie di cap-and-trade e limiti obbligatori alle emissioni, con l'intento di determinare come queste politiche impattino sulle operazioni di logistica inversa.
- 2) Esplorare le decisioni operative chiave, come la localizzazione dei centri di smontaggio, raccolta e distribuzione, le quantità ottimali di produzione e trasporto di prodotti nuovi e rigenerati, al fine di ottimizzare le risorse e ridurre le emissioni di CO₂.
- 3) Analizzare e confrontare i risultati ottenuti dai modelli, identificando i trade-off tra riduzione dei costi e delle emissioni, e fornire raccomandazioni pratiche per le aziende.
- 4) Utilizzare l'analisi di sensitività come strumento di supporto alle decisioni, al fine di valutare come variazioni nei parametri chiave possano influenzare i risultati del modello, offrendo soluzioni che si adattino alle esigenze e scenari di un'azienda.
- 5) Aggiungere valore alla letteratura sulla logistica inversa e sulla sostenibilità, proponendo un approccio integrato che contempli sia le politiche ambientali sia le pratiche operative delle aziende.

1.4 Struttura della tesi

Il resto della tesi è organizzato come segue:

- Capitolo 2: si presenta una disamina della letteratura esistente riguardo ai modelli di logistica inversa e green supply chain, con particolare attenzione agli approcci che integrano sostenibilità e operatività.
- Capitolo 3: si parte dalla descrizione di un modello PLIM già proposto in letteratura e quindi, si passa alla descrizione di due modelli PLIM, sviluppati per analizzare le politiche di cap-and-trade e di limiti alle emissioni e quindi, includere aspetti legati alla sostenibilità. Si discutono anche ipotesi, variabili e strutture dei modelli, nonché la loro applicazione nel contesto della logistica inversa integrata.
- Capitolo 4: si illustrano i risultati ottenuti dai due modelli proposti, confrontandoli anche con il modello preso dalla letteratura. Si conduce un'analisi di sensitività per valutare l'impatto delle variazioni dei parametri chiave sulle soluzioni ottime. I risultati sono confrontati evidenziando le differenze tra le due politiche e le implicazioni per le aziende.
- Capitolo 5: conclude la tesi con una discussione sui risultati raggiunti, le implicazioni pratiche per le aziende e le possibili direzioni per ricerche future.

Capitolo 2

2.1 Introduzione

Questo capitolo ha lo scopo di fornire una panoramica dettagliata della letteratura esistente relativa ai modelli di logistica inversa e green supply chain, esplorando le diverse strategie e approcci adottati nel contesto delle moderne catene di fornitura. Verranno esaminati i principali modelli matematici sviluppati per la gestione di catene di logistica inversa e logistica inversa integrata, e green supply chain, con un'attenzione particolare ai lavori che hanno incorporato elementi di sostenibilità, come la riduzione delle emissioni di carbonio o l'ottimizzazione delle risorse. In particolare, sarà dato risalto al modello di Demirel e Gökçen, che è il punto di partenza di questo studio, per comprenderne le basi teoriche e applicative, evidenziando i punti di forza e le limitazioni dal punto di vista di sostenibilità ambientale.

2.2 Stato dell'arte

Il punto di partenza di questa tesi è lo studio condotto da Demirel e Gökçen (2008), i quali hanno sviluppato un modello matematico di PLIM multifase (produzione, distribuzione, raccolta e smontaggio) e multiprodotto per la gestione dei flussi in avanti e indietro all'interno di una catena logistica inversa integrata. L'obiettivo preposto è quello di minimizzare il costo totale del sistema, che comprende i costi di produzione, apertura dei centri, trasporto, raccolta, acquisto, smontaggio e smaltimento, determinando le quantità ottimali di produzione e trasporto di prodotti nuovi e ricondizionati, nonché la localizzazione dei centri di smontaggio, raccolta e distribuzione. Nell'ambito della loro ricerca, Demirel e Gökçen (2008) hanno considerato più prodotti, ognuno dei quali condivide gli stessi componenti, ma presentano tassi diversi di ritorno e di rigenerazione. Il tasso di ritorno si riferisce alla percentuale di domanda dei prodotti che vengono raccolti dalle zone clienti, mentre il tasso di recupero indica la percentuale dei prodotti usati da cui è possibile recuperare componenti da spedire ai centri di produzione. Questo approccio consente il loro riutilizzo nella produzione di nuovi prodotti, riducendo così il ricorso a fornitori esterni. I risultati della loro ricerca, che affronta tre diversi scenari di

ritorno della domanda, hanno dimostrato che, con l'introduzione di incentivi adeguati al recupero dei prodotti usati, è possibile aumentare i profitti e dare un'impronta ecologica all'azienda. Tuttavia, va notato che, l'aspetto ambientale non è stato direttamente considerato nella loro analisi.

A tal proposito, per approfondire la conoscenza della logistica inversa e comprendere come integrare i vincoli ambientali in un modello di logistica inversa integrata, sono stati esaminati altri studi e articoli.

Yu et al. (2012) hanno sviluppato un modello matematico di logistica inversa multiprodotto e multi-echelon nel contesto del recupero dei prodotti elettrici ed elettronici giunti al termine del loro ciclo di vita. A differenza del modello proposto da Demirel e Gökçen (2008), che integra sia la logistica diretta che inversa, questo studio si concentra solo sulla rete di logistica inversa. L'obiettivo principale del modello è minimizzare i costi totali del sistema, considerando sia i costi operativi che i ricavi derivanti dalla vendita dei prodotti restituiti. Inoltre, il modello determina i luoghi ottimali per le strutture della rete e i flussi di materiali all'interno della catena.

Nel modello di Yu et al. (2012) i componenti e i materiali ottenuti dallo smontaggio dei prodotti vengono classificati in quattro categorie principali: smaltimento, riciclabile, riparabile e riutilizzabile. A seconda della categoria di appartenenza, questi componenti sono destinati a uno dei due mercati di rivendita, generando ricavi che contribuiscono a ridurre il costo totale, oppure vengono destinati allo smaltimento. Inoltre, i costi di trasporto variano in base alla fase del processo e alle lavorazioni subite, che possono ridurre il volume dei materiali. L'articolo sottolinea l'importanza dei costi di trasporto all'interno del processo di riciclaggio, mettendo in evidenza come la loro riduzione possa rappresentare una strategia efficace per minimizzare il costo complessivo del sistema.

Alumur et al. (2012) hanno proposto un modello di PLIM per la progettazione di una rete di logistica inversa multi-periodo, applicato al caso studio del riciclo di lavatrici e asciugatrici in Germania. Questo studio arricchisce la letteratura sulla logistica inversa, offrendo una maggiore comprensione di come un produttore originale possa adattarsi alle variazioni dei flussi dei resi e alle tendenze del mercato secondario, dove vengono rivenduti i prodotti rigenerati, con l'obiettivo di massimizzare i profitti.

Infatti, l'obiettivo del modello è massimizzare il profitto, considerando i ricavi derivanti dai centri di riciclaggio, dagli impianti di rigenerazione esterni e dai mercati secondari, sottraendo i costi fissi associati all'apertura dei vari centri. Esso include diverse caratteristiche pratiche, tra cui una pianificazione multi-periodo, capacità modulari, espansione delle capacità, distinta base inversa, rendimenti minimi degli impianti e costi operativi variabili. Le decisioni chiave riguardano la localizzazione dei centri di ispezione e degli impianti di rigenerazione, la capacità dei nuovi impianti, l'espansione della capacità degli impianti esistenti, l'instradamento dei flussi attraverso la rete, la quantità di inventario da mantenere e la quantità di componenti da acquistare dai fornitori per gli impianti di rigenerazione. I risultati mostrano che un modello multi-periodo può generare maggiori profitti rispetto a uno statico e suggeriscono che i centri di ispezione e gli impianti di rigenerazione possono essere collocati insieme per risparmiare sui costi di trasporto.

Yu, Solvang e Chen (2014) hanno proposto un modello PLIM multi-obiettivo, per la progettazione di una green supply chain (GrSCND), come strumento di supporto decisionale per le aziende situate nelle regioni artiche, con un focus sul trade-off ottimale tra minimizzazione dei costi, dei rischi e delle emissioni di gas serra (GHG). Questo modello cerca di bilanciare questi obiettivi conflittuali attraverso una somma pesata.

Analogamente Zorbakhshnia et al. (2019) hanno presentato un modello di PLIM multi-obiettivo per la progettazione di una rete logistica green che integra sia la logistica diretta che quella inversa. A differenza dello studio di Yu, Solvan e Chen (2014) che è stato focalizzato su un contesto territoriale specifico, ovvero le regioni artiche, il modello di Zorbakhshnia et al. (2019) è applicato all'industria degli elettrodomestici. Questo modello si concentra su tre obiettivi principali: minimizzare i costi operativi, ridurre le emissioni di CO₂ e ottimizzare il numero di macchine impiegate nella produzione. La minimizzazione delle emissioni di CO₂ è realizzata tramite una specifica funzione obiettivo, che associa le emissioni di CO₂ a ogni trasporto di componenti e prodotti tra i diversi centri della rete logistica. Utilizzando il metodo dell'epsilon vincolo, il modello genera soluzioni Pareto ottimali che bilanciano efficacemente i costi e l'impatto ambientale.

Infine, sono stati esaminati modelli singolo obiettivo focalizzati principalmente sulla riduzione delle emissioni di carbonio. Questi modelli utilizzano politiche adeguate

come alternativa all'investimento in tecnologie costose per la riduzione delle emissioni, offrendo ulteriori spunti per integrare la sostenibilità ambientale nei modelli di logistica inversa.

Benjaafar et al. (2013) hanno presentato diversi metodi per integrare gli aspetti ambientali in modelli di dimensionamento dei lotti, analizzando l'impatto di diverse politiche regolamentari sulle emissioni di carbonio. Lo studio ha considerato quattro contesti regolamentari distinti, nei quali le aziende sono soggette a limiti obbligatori sulle emissioni, tassate sulle quantità di emissioni emesse, penalizzate o premiate a seconda che emettano più o meno del limite consentito, ed infine dove possono acquistare o vendere il diritto di emettere in un mercato di scambio delle emissioni. Questo studio si distingue per aver considerato non solo le emissioni legate al trasporto, ma anche quelle derivanti dalla produzione e dallo stoccaggio, adottando così un approccio più completo rispetto ai modelli di Yu, Solvang e Chen (2014) e Zarbakhshnia et al. (2019). Le intuizioni evidenziano come gli aggiustamenti operativi possano ridurre significativamente le emissioni senza aumentare eccessivamente i costi, aumentando così la sostenibilità della catena.

Choudhary et al. (2014) hanno sviluppato un'evoluzione del modello di Benjaafar et al. (2013) che considera l'aspetto integrato della logistica diretta e inversa nella catena di approvvigionamento. Hanno ripreso le stesse politiche regolamentari legate ai limiti di emissioni, alle tasse, e al cap-and-trade, utilizzando un algoritmo basato sulla struttura dati a foresta per determinare la configurazione ottimale della rete. I risultati hanno dimostrato che, sebbene la prima politica (limiti obbligatori alle emissioni) porti a una riduzione maggiore delle emissioni, essa comporta un aumento del costo totale del sistema a causa dell'uso di percorsi, veicoli, e strutture con costi operativi superiori ma con minori emissioni. Al contrario, le altre due politiche, riducono i costi operativi, ma comportano un aumento delle emissioni. Pertanto, la scelta della politica da seguire dipende dalle priorità aziendali: minimizzare i costi totali o ridurre le emissioni di carbonio.

2.3 Conclusione

La letteratura esaminata in questo capitolo ha messo in luce l'evoluzione dei modelli di logistica inversa e green supply chain, evidenziando come l'integrazione di vincoli ambientali sia diventata sempre più centrale. Partendo dal modello di Demirel e Gökçen (2008), focalizzato sulla minimizzazione dei costi in catene logistiche integrate, agli studi più recenti che incorporano elementi di sostenibilità, emerge chiaramente la necessità di bilanciare gli aspetti economici con quelli ambientali.

Gli studi analizzati mostrano come la scelta di politiche regolamentari e le strategie operative adottate possano influenzare significativamente sia i costi che le emissioni di carbonio. Il modello di Benjaafar et al. (2013) e la sua evoluzione proposta da Choudhary et al. (2014) dimostrano in particolare come sia possibile, attraverso un'attenta pianificazione operativa, raggiungere una sostenibilità maggiore senza sacrificare eccessivamente la redditività.

Nel complesso, questi studi forniscono una base solida per sviluppare modelli di logistica inversa e supply chain green che siano non solo economicamente efficienti, ma anche ambientalmente sostenibili.

Capitolo 3

3.1 Introduzione

In questo capitolo, verrà presentato, dapprima, il modello matematico preso a riferimento e quindi, i due modelli matematici opportunamente definiti in questo lavoro di tesi per analizzare l'impatto delle politiche ambientali sulla logistica inversa integrata. In particolare, il modello matematico preso a riferimento è quello proposto da Demirel e Gökçen (2008), in cui si considera una rete logistica inversa integrata per la gestione integrata dei flussi in avanti e di ritorno dei prodotti.

Partendo da questo, sono state definite e quindi formulate due politiche ambientali, come implementate da Benjaafar et al. (2013) e successivamente da Choudhary et al. (2014): il limite alle emissioni e il sistema cap-and-trade. L'obiettivo è quello di studiare come queste influenzino le decisioni operative e strategiche all'interno della catena logistica inversa integrata. In particolare, la politica di limite alle emissioni impone un tetto massimo alle emissioni di CO₂ prodotte lungo la catena di fornitura, mentre il sistema cap-and-trade consente alle aziende di scambiare permessi di emissione, influenzando i costi operativi in funzione delle emissioni generate.

I modelli considerati saranno discussi separatamente, al fine di facilitare il confronto tra i loro effetti economici e ambientali nei capitoli successivi.

3.2 Modello di Demirel e Gökçen

Il modello proposto da Demirel e Gökçen (2008) considera il contesto della logistica inversa integrata, con simultaneamente i flussi diretti e inversi, come illustrato nella Figura 1. Esso si propone di determinare le quantità ottimali di produzione e trasporto di prodotti nuovi e rigenerati, nonché la localizzazione dei centri di smontaggio, raccolta e distribuzione.

Nel modello, si considerano i costi di smontaggio per una certa frazione di prodotti raccolti, che sono appropriati per il recupero, e i costi di smaltimento per quelli che non possono essere recuperati. Inoltre, vengono inclusi i costi di raccolta dei prodotti a fine vita dai clienti. L'obiettivo principale è minimizzare il costo totale del sistema, comprendente i costi di produzione, apertura dei centri, trasporto, raccolta, acquisto dei componenti, smontaggio e smaltimento.

Per ottimizzare i costi totali, l'azienda deve decidere il numero di prodotti da smontare e le quantità di componenti da acquistare dai fornitori, gestendo efficacemente le operazioni di trasporto e raccolta.

Di seguito, sarà presentata la formulazione del modello di Demirel e Gökçen, che illustra le decisioni discusse in precedenza.

3.2.1 Insiemi

i	prodotti
k	produttori
l	centri di distribuzione
n	centri di raccolta
m	zone clienti
p	centri di smontaggio

3.2.2 Parametri

f_p	costi di apertura centro di smontaggio p
f_l	costi di apertura centro di distribuzione l
f_n	costi di apertura centro di raccolta n
t_i	trasporto di una unità di prodotto i per Km
a_i	quantità di parti/componenti ottenute da una unità di prodotto i
DC_i	costi di smaltimento di una unità di prodotto i (uguale per tutti i centri di smontaggio)
CC_i	costi di raccolta di una unità di prodotto i (uguale per tutti i centri di raccolta)
CAP_k	capacità di stoccaggio di parti/componenti nel produttore k
TD_i	domanda totale del prodotto i
s_i	frazione della domanda di prodotto i restituita dalle zone clienti

b_i	frazione del prodotto i restituito che soddisfa le specifiche di qualità per la rigenerazione
D_{im}	domanda della zona cliente m per il prodotto i
c_{ik}	costo di produzione per unità del prodotto i nel produttore k
d_{ip}	costo di smontaggio per unità del prodotto i nel centro di smontaggio p
CAP_{ik}	capacità di produzione del prodotto i nel produttore k
CAP_{ip}	capacità di smontaggio del prodotto i nel centro di smontaggio p
CAP_{in}	capacità di raccolta del prodotto i nel centro di raccolta n
CAP_{il}	capacità di distribuzione del prodotto i nel centro di distribuzione l
b_{kl}	distanza tra il produttore k e il centro di distribuzione l
b_{lm}	distanza tra il centro di distribuzione l e la zona cliente m
b_{np}	distanza tra il centro di raccolta n e il centro di smontaggio p
b_{pk}	distanza tra il centro di smontaggio p e il produttore k
b_{mp}	distanza tra la zona cliente m e il centro di smontaggio p
b_{mn}	distanza tra la zona cliente m e il centro di raccolta n
TC	costo di trasporto per una unità di parti/componenti per Km
PC	costo di acquisto per unità di parti/componenti

3.2.3 Variabili decisionali

x_{ikl}	quantità del prodotto i spedito dal produttore k al centro di distribuzione l
x_{ilm}	quantità del prodotto i spedito dal centro di distribuzione l alla zona cliente m
x_{imn}	quantità del prodotto i spedito dalla zona cliente m al centro di raccolta n

x_{inp}	quantità del prodotto i spedito dal centro di raccolta n al centro di smontaggio p
x_{imp}	quantità del prodotto i spedito dalla zona cliente m al centro di smontaggio p
x_{pk}	quantità di componenti spediti dal centro di smontaggio p al produttore k
q_{ik}	numero di unità del prodotto prodotte i nel produttore k
Q_k	numero di unità di parti/componenti acquistate da un fornitore esterno dal produttore k
y_p	indicatore di apertura del centro di smontaggio k
y_l	indicatore di apertura del centro di distribuzione l
y_n	indicatore di apertura del centro di raccolta n

3.2.4 Funzione obiettivo

Utilizzando gli insiemi, i parametri e le variabili definiti precedentemente, la funzione obiettivo è stata formulata come segue:

Min :

$$\begin{aligned}
& \sum_p f_p \cdot y_p + \sum_l f_l \cdot y_l + \sum_n f_n \cdot y_n + \\
& \sum_i \sum_k c_{ik} \cdot q_{ik} + \\
& \sum_i \sum_k \sum_l t_i \cdot x_{ikl} \cdot b_{kl} + \sum_i \sum_l \sum_m t_i \cdot x_{ilm} \cdot b_{lm} + \sum_i \sum_m \sum_n t_i \cdot x_{imn} \cdot b_{mn} + \\
& \sum_i \sum_n \sum_p t_i \cdot x_{inp} \cdot b_{np} + \sum_i \sum_m \sum_p t_i \cdot x_{imp} \cdot b_{mp} + \sum_p \sum_k TC \cdot x_{pk} \cdot b_{pk} + \\
& \sum_i \sum_p b_i \cdot s_i \cdot d_{ip} \cdot TD_i + \sum_i (1 - b_i) \cdot s_i \cdot DC_i \cdot TD_i + \sum_i s_i \cdot CC_i \cdot TD_i + \\
& PC \cdot \sum_k Q_k
\end{aligned} \tag{1}$$

Nella funzione obiettivo (1), il primo termine minimizza i costi di apertura dei centri di smontaggio, distribuzione e raccolta. Il secondo termine minimizza i costi di produzione, mentre il terzo e il quarto riducono i costi di trasporto dei prodotti e dei componenti. Il quinto termine minimizza i costi di smontaggio, smaltimento e raccolta, infine, l'ultimo termine minimizza i costi di acquisto dei componenti da fornitori esterni.

3.2.5 Vincoli

$$q_{ik} \leq CAP_{ik} \quad \forall i, k \quad (2)$$

$$q_{ik} = \sum_l x_{ikl} \quad \forall i, k \quad (3)$$

$$\sum_l x_{ilm} = D_{im} \quad \forall i, m \quad (4)$$

$$\sum_n x_{imn} + \sum_p x_{imp} = s_i \cdot \sum_l x_{ilm} \quad \forall i, m \quad (5)$$

$$\sum_k x_{pk} = \sum_i \sum_m x_{imp} \cdot b_i \cdot a_i + \sum_i \sum_n x_{inp} \cdot b_i \cdot a_i \quad \forall p \quad (6)$$

$$\sum_k x_{ikl} = \sum_m x_{ilm} \quad \forall i, l \quad (7)$$

$$\sum_m x_{imn} = \sum_p x_{inp} \quad \forall i, n \quad (8)$$

$$\sum_n x_{inp} + \sum_m x_{imp} \leq CAP_{ip} \cdot y_p \quad \forall i, p \quad (9)$$

$$Q_k + \sum_p x_{pk} \leq CAP_k \quad \forall k \quad (10)$$

$$\sum_k x_{ikl} \leq CAP_{il} \cdot y_l \quad \forall i, l \quad (11)$$

$$\sum_m x_{imn} \leq CAP_{in} \cdot y_n \quad \forall i, n \quad (12)$$

$$\sum_i q_{ik} \cdot a_i = Q_k + \sum_p x_{pk} \quad \forall k \quad (13)$$

$$TD_i = \sum_m D_{im} \quad \forall i \quad (14)$$

$$x_{ikl}, x_{ilm}, x_{imn}, x_{inp}, x_{imp}, x_{pk}, q_{ik}, Q_k \leq 0 \text{ e intere} \quad (15)$$

$$y_p, y_l, y_n \in \{0,1\} \quad (16)$$

Il vincolo (2) stabilisce che la quantità di produzione di ogni prodotto non deve superare la capacità produttiva di quel produttore. Il vincolo (3) richiede che i flussi in uscita totali da ciascun produttore siano pari alla quantità di prodotti fabbricati. Il vincolo (4) assicura che la domanda di ogni prodotto sia soddisfatta completamente. Il vincolo (5) è il vincolo di flusso che bilancia le quantità di prodotti restituiti. I vincoli (6), (7) e (8) sono le equazioni di bilancio per i centri di smontaggio, distribuzione e raccolta: le quantità che entrano in queste strutture devono essere uguali alla quantità di prodotti o componenti che lasciano le strutture. Il vincolo (9) è il vincolo che garantisce che la quantità di prodotti usati inviata al centro di smontaggio, sia dai centri di raccolta che direttamente dalle zone clienti, non superi la capacità, nel caso in cui la struttura di smontaggio sia aperta. In questo senso, ciascun vincolo (9) rappresenta il legame logico tra le variabili x e le variabili y . Il vincolo (10) limita la capacità di stoccaggio dei produttori per parti/componenti. I vincoli (11) e (12) limitano la capacità dei centri di distribuzione e raccolta. Il vincolo (13) specifica le quantità necessarie di parti/componenti per la produzione. Il vincolo (14) stabilisce che la domanda totale di ogni prodotto sia uguale alla somma delle domande di tutte le zone clienti per quel prodotto. Il vincolo (15) impone la non negatività delle variabili decisionali x mentre il vincolo (16) impone la condizione di binarietà sulle variabili y .

3.3 Politiche ambientali

In questa sezione, verranno implementate le politiche ambientali nel modello di Demirel e Gökçen (2008). In particolare, ci si baserà sul contributo di Benjaafar et al. (2013) in cui si è introdotto queste politiche, applicandole in un modello di dimensionamento dei lotti nel contesto di una supply chain, e sul contributo di Choudhary et al. (2014) in cui si è considerato invece l'aspetto integrato della logistica. A differenza del modello di Choudhary et al. (2014), che presenta una rete di logistica inversa integrata con centri ibridi di produzione/rigenerazione e distribuzione/raccolta, il modello di Demirel considera invece questi centri come entità separate. Inoltre, sono presenti alcune differenze nella formulazione della politica del cap-and-trade, che verrà presentata in seguito.

Per implementare queste politiche, sono stati introdotti vari parametri relativamente alle emissioni di CO₂, espresse in tonnellate, legate alle attività di produzione, trasporto e smaltimento. In particolare, indichiamo con cc_{ik} le emissioni di CO₂ derivanti dalla produzione di una unità di prodotto i presso il produttore k ; con tc_i e TCC le emissioni da trasporto rispettivamente di un'unità di prodotto i e di un'unità di parte/componente per chilometro; DCC_i indica le emissioni dovute allo smaltimento di una unità di prodotto i .

Utilizzando la tecnica della Life Cycle Assessment (LCA), è possibile aumentare la precisione e il numero di parametri di emissioni associati alle diverse attività lungo la catena di logistica inversa integrata. La LCA è un'analisi completa che, a differenza della "Carbon Footprint", che si concentra esclusivamente sulle emissioni di gas serra, valuta una vasta gamma di impatti ambientali associati a prodotti o processi, come il consumo di risorse naturali, la produzione di rifiuti e altri fattori.

Sebbene la LCA offra una prospettiva dettagliata e precisa per l'analisi delle emissioni, la sua applicazione pratica può risultare complessa e richiedere l'accesso a dati specifici e affidabili, che non sempre sono disponibili. Pertanto, in questa tesi ci si limita a considerare solo i parametri sopra menzionati, che rappresentano una base utile per l'analisi delle politiche ambientali.

3.3.1 Limite alle emissioni

La politica di limite alle emissioni consiste nell'imporre un tetto massimo alle emissioni di CO₂ legate a tutte le attività svolte all'interno della catena di logistica inversa integrata. In questo contesto, oltre ai parametri già menzionati, è stato introdotto il parametro CE, che rappresenta il limite massimo, in tonnellate, di emissioni consentito. È stato inoltre imposto un vincolo che garantisce che le emissioni totali lungo la catena di logistica inversa integrata non superino questo limite.

3.3.1.1 Parametri ambientali

cc_{ik}	Tonnellate di CO ₂ emesse per la produzione di una unità di prodotto i presso il produttore k
tc_i	Tonnellate di CO ₂ emesse per il trasporto di una unità di prodotto i
TCC	Tonnellate di CO ₂ emesse per il trasporto di una unità di parte/componente
DCC_i	Tonnellate di CO ₂ emesse per lo smaltimento di una unità di prodotto i (uguale per tutti i centri di smontaggio)
CE	Limite massimo di emissione di tonnellate di CO ₂

3.3.1.2 Vincolo sul limite di emissioni

$$\begin{aligned}
 & \sum_i \sum_k cc_{ik} \cdot q_{ik} + \\
 & \sum_i \sum_k \sum_l tc_i \cdot x_{ikl} \cdot b_{kl} + \sum_i \sum_l \sum_m tc_i \cdot x_{ilm} \cdot b_{lm} + \sum_i \sum_m \sum_n tc_i \cdot x_{imn} \cdot b_{mn} + \\
 & \sum_i \sum_n \sum_p tc_i \cdot x_{inp} \cdot b_{np} + \sum_i \sum_m \sum_p tc_i \cdot x_{imp} \cdot b_{mp} + \\
 & \sum_p \sum_k TCC \cdot x_{pk} \cdot b_{pk} + \\
 & \sum_i (1 - b_i) \cdot s_i \cdot DCC_i \cdot TD_i \leq CE \tag{17}
 \end{aligned}$$

Il primo termine si riferisce alle emissioni derivanti dalla produzione; il secondo, terzo e quarto termine si riferiscono alle emissioni legate al trasporto di prodotti e componenti; infine, l'ultimo termine riguarda le emissioni da smaltimento.

3.3.2 Cap-and-trade

La politica del cap-and-trade rappresenta un approccio di mercato per controllare le emissioni di CO₂, che assegna a ogni azienda un tetto massimo di emissioni, in modo simile alla politica del limite alle emissioni descritta in precedenza. Tuttavia, questa politica introduce anche un meccanismo di mercato che permette alle aziende di acquistare o vendere crediti di carbonio, in base al loro fabbisogno. Se un'azienda emette meno CO₂ rispetto al proprio limite, può vendere i crediti di carbonio in eccesso, mentre le aziende che superano il proprio tetto possono acquistarli da altre aziende.

Nel modello di Demirel e Gökçen (2008), questa politica è stata integrata mantenendo i parametri introdotti per la politica di limite alle emissioni e aggiungendo variabili che tengono conto sia dell'acquisto che della vendita di crediti di carbonio. In particolare, e^+ indica la quantità di crediti acquistati e e^- la quantità di crediti venduti.

Una differenza rilevante rispetto al modello di Choudhary et al. (2014) è che, nel nostro caso, sono stati considerati prezzi differenti per l'acquisto e la vendita di crediti di carbonio. Infatti, sono stati introdotti due parametri CCA e CCV, che indica rispettivamente il prezzo di acquisto e di vendita dei crediti di carbonio. Questo riflette una maggiore complessità del mercato, in cui il prezzo dei crediti varia a seconda che si tratti di acquisto o vendita, e non è uniforme. Inoltre, è stato introdotto un limite massimo sia per l'acquisto che per la vendita di crediti di carbonio, per evitare che le aziende dipendano eccessivamente da questo meccanismo per raggiungere i loro obiettivi di emissioni. Questo approccio mira a incentivare le aziende a ridurre le proprie emissioni alla fonte piuttosto che affidarsi troppo all'acquisto di crediti sul mercato.

3.3.2.1 parametri aggiuntivi

CCA Prezzo di acquisto dei crediti di carbonio

CCV Prezzo di vendita dei crediti di carbonio

3.3.2.2 variabili aggiuntive

e^+ Quantità di crediti di carbonio acquistati (tonnellate)

e^- Quantità di crediti di carbonio venduti (tonnellate)

Il modello da (1) a (16) viene modificato come segue:

3.3.2.1 Funzione obiettivo

Min:

$$\begin{aligned}
 & \sum_p f_p \cdot y_p + \sum_l f_l \cdot y_l + \sum_n f_n \cdot y_n + \\
 & \sum_i \sum_k c_{ik} \cdot q_{ik} + \\
 & \sum_i \sum_k \sum_l t_i \cdot x_{ikl} \cdot b_{kl} + \sum_i \sum_l \sum_m t_i \cdot x_{ilm} \cdot b_{lm} + \sum_i \sum_m \sum_n t_i \cdot x_{imn} \cdot b_{mn} + \\
 & \sum_i \sum_n \sum_p t_i \cdot x_{inp} \cdot b_{np} + \sum_i \sum_m \sum_p t_i \cdot x_{imp} \cdot b_{mp} + \\
 & \sum_p \sum_k TC \cdot x_{pk} \cdot b_{pk} + \\
 & \sum_i \sum_p b_i \cdot s_i \cdot d_{ip} \cdot TD_i + \sum_i (1 - b_i) \cdot s_i \cdot DC_i \cdot TD_i + \sum_i s_i \cdot CC_i \cdot TD_i + \\
 & PC \cdot \sum_k Q_k + \\
 & CCA \cdot e^+ - CCV \cdot e^- \tag{18}
 \end{aligned}$$

La nuova funzione obiettivo (18) tiene conto, oltre ai termini già presenti nel modello base, anche dei costi associati all'acquisto di crediti di carbonio e dei ricavi derivanti dalla vendita degli stessi.

3.3.2.2 Vincoli

$$\begin{aligned}
 & \sum_i \sum_k cc_{ik} \cdot q_{ik} + \\
 & \sum_i \sum_k \sum_l tc_i \cdot x_{ikl} \cdot b_{kl} + \sum_i \sum_l \sum_m tc_i \cdot x_{ilm} \cdot b_{lm} + \sum_i \sum_m \sum_n tc_i \cdot x_{imn} \cdot b_{mn} + \\
 & \sum_i \sum_n \sum_p tc_i \cdot x_{inp} \cdot b_{np} + \sum_i \sum_m \sum_p tc_i \cdot x_{imp} \cdot b_{mp} + \\
 & \sum_p \sum_k TCC \cdot x_{pk} \cdot b_{pk} + \\
 & \sum_i (1 - b_i) \cdot s_i \cdot DCC_i \cdot TD_i + e^- \leq CE + e^+ \tag{19}
 \end{aligned}$$

$$e^+, e^- \geq 0 \quad (20)$$

insieme agli altri vincoli elencati nelle equazioni (2)-(16).

In particolare, il vincolo (19) garantisce che le emissioni totali della catena logistica inversa integrata rispettino il limite massimo prefissato, prendendo in considerazione eventuali compensazioni attraverso il meccanismo di cap-and-trade. Infine, i vincoli (20) stabiliscono la natura delle due variabili e^+, e^- .

Capitolo 4: Sperimentazione ed Analisi di Sensitività

4.1 Introduzione

Lo scopo di questo capitolo è dapprima quello di validare i modelli matematici descritti nel Capitolo 3, utilizzando un caso di studio che coinvolge due prodotti, tre produttori (k_1, k_2, k_3), due potenziali centri di smontaggio (p_1, p_2), due potenziali centri di raccolta (n_1, n_2), 2 potenziali centri di distribuzione (l_1, l_2) e tre zone clienti (m_1, m_2, m_3). Inizialmente, verrà validato il modello di Demirel e Gökçen (2008), seguito dall'analisi delle due politiche ambientali, al fine di mettere in evidenza le differenze nelle soluzioni ottimali, confrontando un modello con e uno privo di vincoli ambientali.

Successivamente, verrà effettuata un'analisi di sensitività su entrambe le politiche ambientali (limite alle emissioni e cap-and-trade), variando il parametro CE, che rappresenta il limite massimo di emissioni consentito. L'analisi servirà a valutare l'impatto di tale variazione sulle soluzioni ottimali e sui costi legati alla gestione delle emissioni.

Infine, si confronteranno le due politiche in termini di costi totali, impatto ambientale e gestione delle emissioni, per mettere in luce le differenze e i potenziali vantaggi di ciascuna approccio.

I dati utilizzati per la sperimentazione saranno riportati nelle tabelle successive, e la risoluzione del modello è stata effettuata tramite il risolutore AMPL.

4.2 Descrizione delle istanze

4.2.1 Istanza proposta da Demirel e Gökçen (2008)

Nel modello senza vincoli ambientali, sono stati utilizzati i parametri di base forniti da Demirel e Gökçen (2008), relativamente ai prodotti. Invece, per quanto riguarda i costi di trasporto dei componenti, le capacità dei centri e le distanze tra i vari nodi della rete, queste sono state inserite autonomamente.

Di seguito sono riportati i dati utilizzati per il modello di Demirel e Gökçen (2008).

Tabella 1: informazioni dei prodotti

Prodotto	Costo di trasporto (€/unità/Km)	Costo di raccolta (€/unità)	Costo di smaltimento (€/unità)	Parti ottenibili	Tasso di ritorno	Tasso di rigenerazione	Domanda totale (n° unità)
Prod 1	0.02	0.5	2	3	0.20	0.20	3200
Prod 2	0.01	1	1	3	0.10	0.40	3700

Tabella 2: costi di produzione (€/unità)

Produttori	Prodotti	
	Prod 1	Prod 2
k1	180	120
k2	140	110
k3	150	100

Tabella 3: costi di smontaggio (€/unità)

Centri di smontaggio	Prodotti	
	Prod 1	Prod 2
p1	8	2
p2	5	3

Tabella 4: domanda (n° unità) delle zone clienti per ogni prodotto

Zone clienti	Prodotti	
	Prod 1	Prod 2
m1	750	1000
m2	1000	1500
m3	1450	1200

Tabella 5: costi relativi a parti/componenti

Costo di trasporto (€/unità/Km)	0.006
Costo di acquisto (€/unità)	40

Tabella 4: costi di apertura (€) dei centri di smontaggio p, raccolta n e distribuzione p

Centri	Costi di apertura
p1	20000
p2	25000
n1	6000
n2	8000
l1	10000
l2	7500

Tabella 5: capacità (n° unità) dei centri di produzione k, smontaggio p, raccolta n e distribuzione l, per ogni prodotto.

Centri	Prodotti	
	Prod 1	Prod 2
k1	2750	1800
k2	1000	2100
k3	1700	1500
p1	2000	2300
p2	2300	2000
n1	3000	2000
n2	2000	2000
l1	2100	2000
l2	2000	2000

Tabella 6: distanze (in Km) produttore-centro di distribuzione (b_{ki}), produttore-centro di smontaggio (b_{kp})

Produttori	Centri di distribuzione		Centri di smontaggio	
	l1	l2	p1	p2
k1	300	500	300	200
k2	400	600	500	400
k3	300	800	250	320

Tabella 7: distanze (in Km) cliente-centro di distribuzione (b_{im}), cliente-centro di smontaggio (b_{mp}), cliente-centro di raccolta (b_{mn})

Zone clienti	Centri di distribuzione		Centri di smontaggio		Centri di raccolta	
	l1	l2	p1	p2	n1	n2
m1	200	500	730	800	240	400
m2	300	600	690	900	290	550
m3	400	400	1000	670	250	390

Tabella 8: distanze (in Km) centri di raccolta-centri di smontaggio (b_{np})

Centri di raccolta	Centri di smontaggio	
	p1	p2
n1	500	300
n2	300	200

Tutti i parametri sono stati definiti per riflettere soluzioni plausibili, sebbene non corrispondano a dati reali. Le capacità dei centri produttivi, di smontaggio, raccolta e distribuzione, insieme alle distanze tra i nodi, sono state selezionate con l'intento di rappresentare scenari credibili, ma non si basano su misurazioni effettive.

Inoltre, i parametri utilizzati nel modello senza vincoli ambientali verranno riutilizzati anche nei modelli con politiche ambientali. A questi, si aggiungeranno ulteriori parametri specifici a seconda della politica che si sta analizzando, permettendo così di valutare in modo completo gli impatti delle politiche sul sistema complessivo.

4.2.2 Dati aggiuntivi per i modelli con politiche ambientali

Tabella 9: emissioni (in tonnellate) di CO₂ per la produzione

Produttori	Prodotti	
	Prod 1	Prod 2
k1	0.0024	0.0024
k2	0.0025	0.0026
k3	0.0024	0.0027

Tabella 10: emissioni (in tonnellate) di CO₂ per smaltimento e trasporto prodotti/componenti

	Prodotti		Parti/componenti
	Prod 1	Prod 2	
Emissioni trasporto	0.00048	0.00040	0.00016
Emissioni smaltimento	0.00029	0.00028	

Tabella 11: parametri emissioni cap-and-trade

Limite emissioni (ton)	2445
Prezzo acquisto carbonio (€/ton)	90
Prezzo vendita carbonio (€/ton)	70
Limite acquisto crediti carbonio (ton)	50
Limite vendita crediti di carbonio (ton)	70

Per stimare le emissioni di CO₂ associate alla produzione dei prodotti considerati nel modello (Tabella 11), è stato utilizzato come valore di riferimento un dato medio di emissioni per la produzione di plastica, pari a 1,2 kg di CO₂ per ogni chilogrammo di plastica prodotto. Ipotizzando che i prodotti abbiano un peso medio di 2 kg, le emissioni per unità di prodotto sono state calcolate come segue:

$$1.2\text{kg CO}_2/\text{kg plastica} \times 2\text{kg} = 2.4\text{kg CO}_2 \text{ per prodotto}$$

Successivamente, questo valore è stato convertito in tonnellate di CO₂, ottenendo 0,0024 tonnellate di CO₂ per prodotto. Tale valore è stato utilizzato come riferimento per le emissioni di base nella produzione. Tuttavia, poiché il modello comprende diversi prodotti e produttori, i valori specifici delle emissioni per ciascun prodotto e produttore variano leggermente rispetto a questo riferimento, per riflettere diverse caratteristiche di produzione e materiali impiegati.

Per quanto riguarda le emissioni legate al processo di smaltimento dei prodotti (Tabella 12), si è ipotizzato un valore leggermente superiore a quello della produzione. Questa scelta si basa sul fatto che i processi di smaltimento, come l'incenerimento o altre forme di trattamento dei rifiuti, possano generare una quantità di CO₂ comparabile o superiore rispetto a quella emessa durante la fase produttiva.

Per il calcolo delle emissioni di CO₂ associate al trasporto all'interno del modello, sono stati utilizzati i dati forniti dall'ISPRA (<https://fetransp.isprambiente.it/#/>). In particolare, ISPRA indica che un camion pesante emette in media 0,0009635 tonnellate di CO₂ per chilometro percorso.

Poiché il modello richiede le emissioni per unità di prodotto per chilometro e considerando un peso medio di 2 kg per unità di prodotto, queste sono state calcolate dividendo il valore fornito da ISPRA per il peso del prodotto, ottenendo un valore di 0,00048175 tonnellate di CO₂ per unità di prodotto per km. Per quanto riguarda le emissioni legate al trasporto dei componenti, poiché ogni prodotto è costituito da tre parti/componenti, si è ipotizzato un fattore di emissione pari a un terzo di quello dei prodotti.

4.3 Risultati computazionali

I risultati ottenuti dall'implementazione dei tre modelli – il modello base di Demirel e Gökçen (2008), il modello con limite alle emissioni e il modello cap-and-trade – sul caso di studio descritto mostrano differenze significative in termini di costi complessivi, emissioni di CO₂ e configurazione della rete logistica. Questi aspetti vengono riassunti nella Tabella 14.

Tabella 12: differenti politiche e rispettivi risultati

Modelli	Costi (€)	Emissioni CO ₂ (tonnellate)	Apertura centri			
				yp	yl	yn
Demirel e Gökçen (2008)	1.805.277	2679.27				
			1	1	1	0
			2	0	1	0
Limite alle emissioni	1.862.284	2444.98		yp	yl	yn
			1	0	1	1
			2	1	1	0
Cap-and-trade	1.830.207	2495		yp	yl	yn
			1	0	1	1
			2	1	1	0

Nel modello base di Demirel e Gökçen, il focus principale è sull'ottimizzazione dei costi senza alcun vincolo ambientale. In questo caso, si osserva il costo più basso tra i tre modelli, pari a 1.805.277, a fronte delle emissioni più elevate (2679,27 tonnellate di CO₂). L'assenza di vincoli permette di massimizzare l'efficienza economica, ma a discapito dell'impatto ambientale. Per quanto riguarda la rete logistica, l'apertura dei centri è minima: viene aperto un solo centro di smontaggio ed entrambi quelli di distribuzione, che restano sempre aperti in tutti i modelli per far fronte alle limitazioni di capacità. Non viene attivato alcun centro di raccolta. Questo suggerisce che, in assenza di vincoli, il modello ottimizza la rete logistica inversa puntando alla riduzione dei costi operativi.

Nel modello con limite alle emissioni, l'introduzione di un vincolo ambientale produce un impatto significativo sui risultati complessivi. In questo scenario, il costo totale aumenta a 1.862.284, principalmente a causa delle limitazioni imposte sulle emissioni. Tuttavia, l'effetto positivo di tale vincolo è evidente nella riduzione delle emissioni, che scendono a 2444,98 tonnellate di CO₂. Questo compromesso tra costi e sostenibilità ambientale è ulteriormente riflesso nella struttura della rete logistica: il modello richiede l'apertura di tutti i centri di smontaggio e distribuzione e di un centro di raccolta, dimostrando che la strategia per ridurre le emissioni comporta una logistica più complessa e distribuita, probabilmente volta a minimizzare le distanze di trasporto.

Infine, il modello cap-and-trade offre una soluzione intermedia tra il modello base e quello con vincoli rigidi sulle emissioni. Con un costo totale di 1.830.207, leggermente superiore al modello base ma inferiore rispetto al modello con limite alle emissioni, questo approccio mostra una maggiore flessibilità. Le emissioni si attestano a 2495 tonnellate di CO₂, una riduzione significativa rispetto al modello senza vincoli, ma leggermente superiore rispetto al modello con limite alle emissioni. Questo incremento è dovuto all'acquisto di 50 crediti di emissioni aggiuntivi, che consente di superare il limite fissato nel modello con vincoli. L'apertura dei centri segue una configurazione uguale a quella del modello con limite alle emissioni, suggerendo che il cap-and-trade incoraggi una rete logistica più ampia rispetto al modello base, pur lasciando una maggiore libertà di ottimizzazione rispetto al vincolo rigido sulle emissioni. Infatti, la differenza dei costi tra le due politiche è dovuta a una diversa distribuzione della produzione tra i vari produttori, come si può vedere dalla tabella 15. Nella politica cap-and-trade, la possibilità di

acquistare crediti di emissioni bilancia i costi di produzione, consentendo ai produttori di adattare la loro strategia produttiva in base ai crediti disponibili. Questo approccio offre una maggiore flessibilità rispetto al modello con limite alle emissioni, dove i produttori devono operare all'interno di un vincolo rigido.

Tabella 13: confronto quantità prodotte dai produttori nei tre modelli

	Demirel e Gökçen (2008)		Limite alle emissioni		Cap-and-trade	
	Prod 1	Prod 2	Prod 1	Prod 2	Prod 1	Prod 2
Produttore1	500	100	1432	1800	500	1671
Produttore2	1000	2100	68	400	1000	529
Produttore3	1700	1500	1700	1500	1700	1500

Con queste osservazioni, si rende evidente la necessità di approfondire ulteriormente l'impatto delle diverse politiche attraverso un'analisi di sensitività. La sezione successiva si concentrerà sull'esplorazione della variazione dei risultati ottenuti in base ai parametri chiave delle politiche, in particolare il limite delle emissioni. Sarà fondamentale comprendere come le diverse configurazioni influenzino le emissioni totali e i costi associati, fornendo così un quadro più completo delle implicazioni delle politiche ambientali sui sistemi produttivi e logistici.

4.4 Analisi di sensitività

Nell'ambito dell'analisi di sensitività, è fondamentale considerare come le variazioni nei parametri chiave influenzino i risultati dei modelli. Per garantire che il modello non fosse eccessivamente restrittivo e permettere l'osservazione di una gamma più ampia di variazioni, sono state impostate le capacità di tutti i centri a 3000 unità. Questa scelta consente di esplorare in modo più dettagliato gli effetti delle politiche sul sistema logistico, facilitando un confronto diretto tra le diverse politiche ambientali. In particolare, l'analisi si concentrerà sulla variazione del parametro sul limite delle emissioni CE, valutando come tale modifica possa influenzare costi ed emissioni. Attraverso questa analisi, si intende ottenere una visione più completa delle dinamiche operative in gioco e dell'efficacia delle politiche implementate.

4.4.1 Politica limite alle emissioni

Tabella 14: variazione costi totali ed emissioni totali al variare del limite di emissioni per la politica "limite alle emissioni"

Limite CO ₂ (ton)	Costi	Emissioni totali (ton)
2500	1.798.177	2452.87
2450	1.798.825	2449.98
2400	1.803.815	2400
2350	1.804.468	2331.75
2300	1.811.578	2300
2250	1.830.370	2249.99
2216	1.857.236	2215.99

L'analisi di sensitività per la politica con limite alle emissioni dimostra una chiara relazione tra la severità dei limiti di CO₂ e l'aumento dei costi complessivi del sistema. Come si evince dalla Tabella 16, al ridursi del limite da 2500 a 2216 tonnellate di CO₂, i costi totali passano da 1.798.177 € a 1.857.236 €, con un incremento percentuale del 3,28%. Questo aumento nei costi riflette il maggior impegno richiesto per contenere le emissioni, obbligando l'azienda a adottare soluzioni più costose per operare entro limiti ambientali più stringenti. Parallelamente, le emissioni totali subiscono una significativa riduzione, scendendo da 2.452,87 a 2.215,99 tonnellate, con una diminuzione percentuale del 9,66%. Questo compromesso tra costi ed emissioni evidenzia che l'implementazione di limiti stringenti può portare a risultati ambientali rilevanti, ma a un prezzo economico più alto.

Figura 2: relazione limite emissioni-costi, politica "limite alle emissioni"

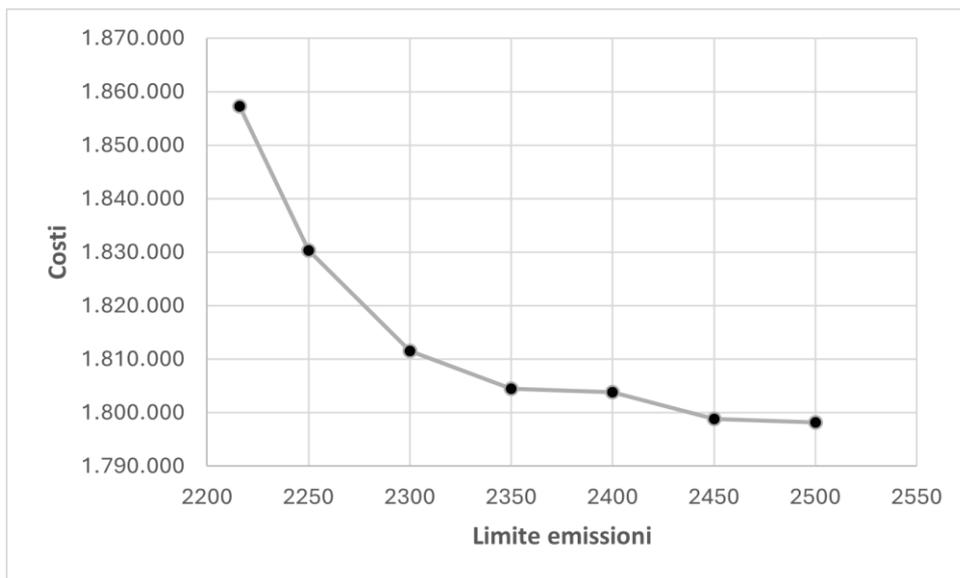
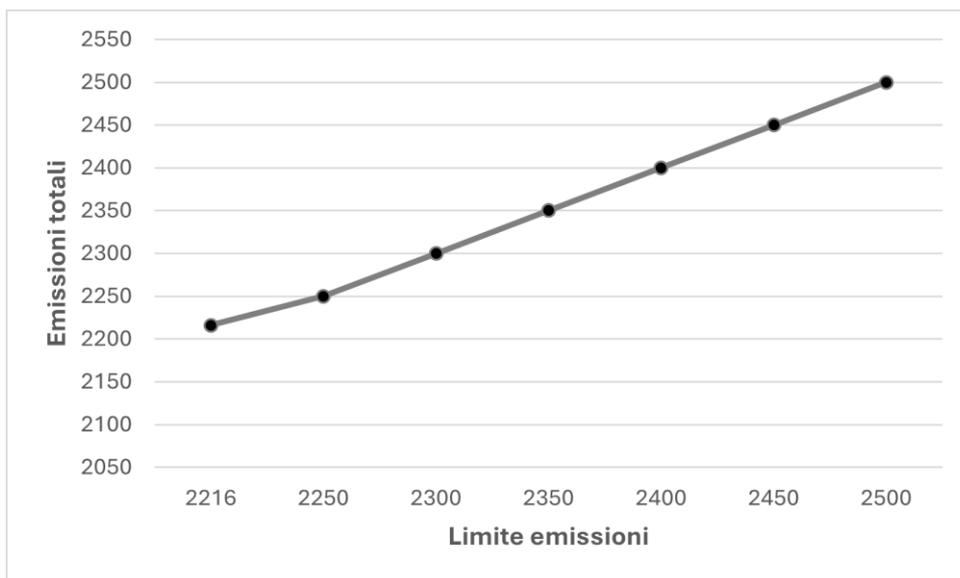


Figura 3: relazione limiti emissioni-emissioni totali, politica "limite alle emissioni"



I grafici allegati (Figura 2 e 3), che mostrano la relazione tra i limiti di CO₂ da un lato ed i costi e le emissioni totali dall'altro, confermano queste dinamiche. Il primo grafico in Figura 2, che illustra la relazione limite-costi, evidenzia una tendenza crescente nei costi al diminuire dei limiti di emissioni. D'altro canto, il secondo grafico, in Figura 3, mostra una chiara diminuzione delle emissioni totali in corrispondenza di limiti di CO₂ più severi, indicando l'efficacia della politica ambientale implementata.

4.4.2 Politica cap-and-trade

Tabella 15: variazione costi totali ed emissioni totali al variare del limite di emissioni per la politica “cap-and-trade”

Limite CO ₂ (ton)	Costi	e ⁺ (ton)	e ⁻ (ton)	Emissioni totali (ton)
2500	1.794.887	0	47	2453
2450	1.798.447	3	0	2453
2400	1.799.708	0	68	2331.75
2350	1.803.208	0	18	2331.75
2300	1.807.348	32	0	2331.75
2250	1.816.078	50	0	2300
2216	1.823.692	50	0	2266

Nel caso della politica cap-and-trade, l'analisi di sensitività presenta una dinamica più flessibile, con un aumento dei costi più contenuto rispetto alla politica del limite alle emissioni. Allo stesso modo, la riduzione delle emissioni risulta meno drastica. Come indicato nella Tabella 17, al variare del limite da 2500 a 2216 tonnellate, i costi totali aumentano solo dell'1,61%, passando da 1.794.887 € a 1.823.692 €. Tuttavia, la riduzione delle emissioni è meno incisiva rispetto alla politica con limite rigido, passando da 2.453 tonnellate a 2.266 tonnellate, con una diminuzione del 7,63%. Questo riflette la flessibilità intrinseca del cap-and-trade, che consente alle aziende di acquistare crediti di carbonio, bilanciando l'obbligo di ridurre le emissioni con la possibilità di contenere i costi complessivi. La capacità di acquistare o vendere crediti permette quindi di limitare l'impatto economico delle politiche ambientali, ma a costo di una riduzione delle emissioni meno significativa.

Figura 4: relazione limite emissioni-costi, politica "cap and trade"

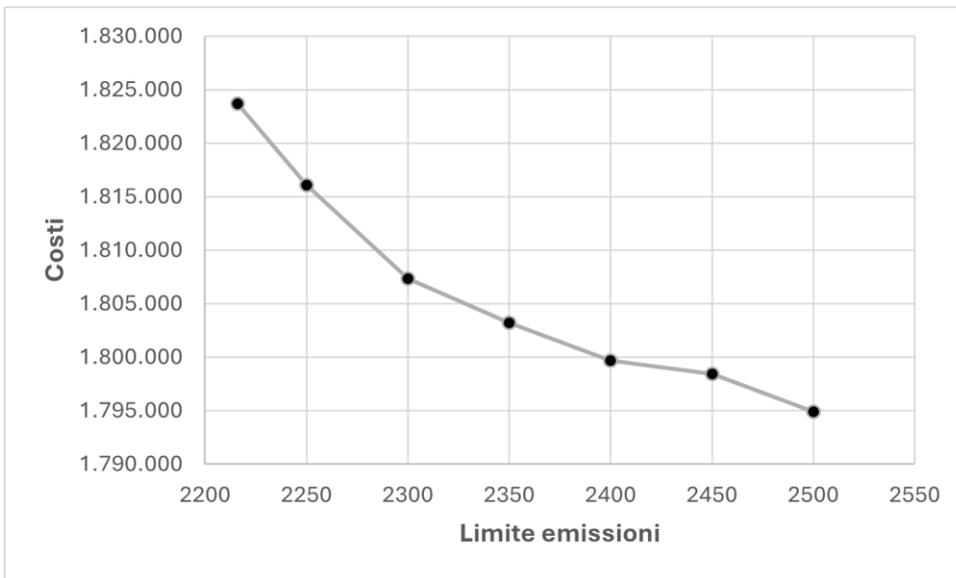
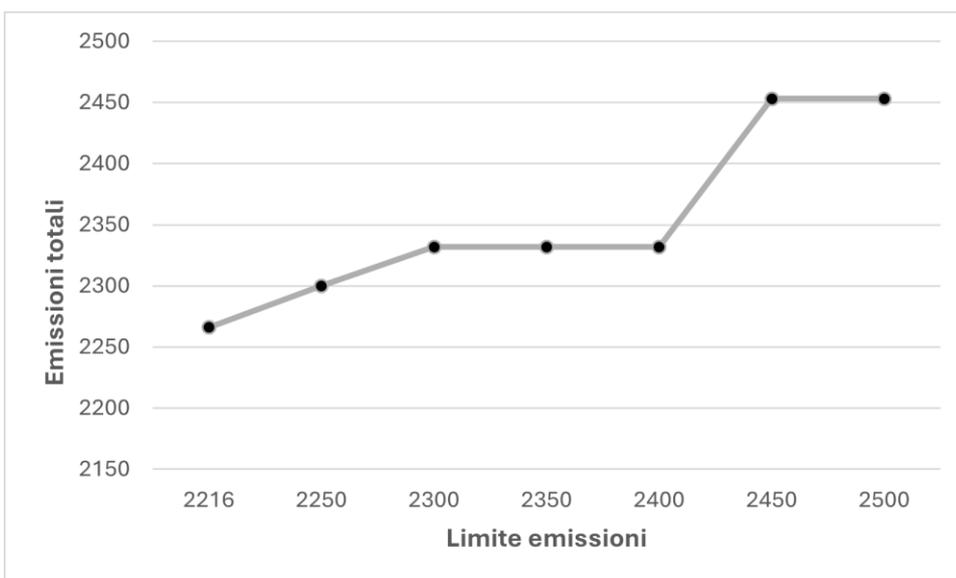


Figura 5: relazione limite emissioni-emissioni totali, politica "cap-and-trade"



I grafici di questa analisi (Figura 4 e Figura 5) illustrano in modo chiaro le relazioni tra i limiti di CO₂ e i costi e le emissioni totali. Il primo grafico (Figura 4) mostra come i costi crescano in maniera più contenuta rispetto alla politica con limite rigido, evidenziando l'effetto della maggiore flessibilità introdotta dal cap-and-trade. Il secondo grafico (Figura 5), invece, evidenzia la tendenza delle emissioni a rimanere leggermente superiori rispetto ai limiti imposti, a causa dell'acquisto di crediti, dimostrando la peculiarità di questa politica nel lasciare spazio a una maggiore libertà d'azione per i decisori.

4.4.3 Confronto politiche

Figura 6: confronto costi tra le due politiche

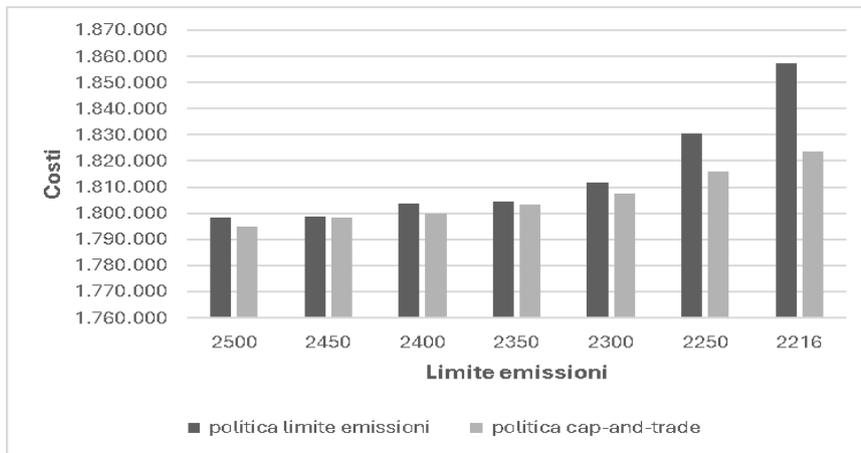
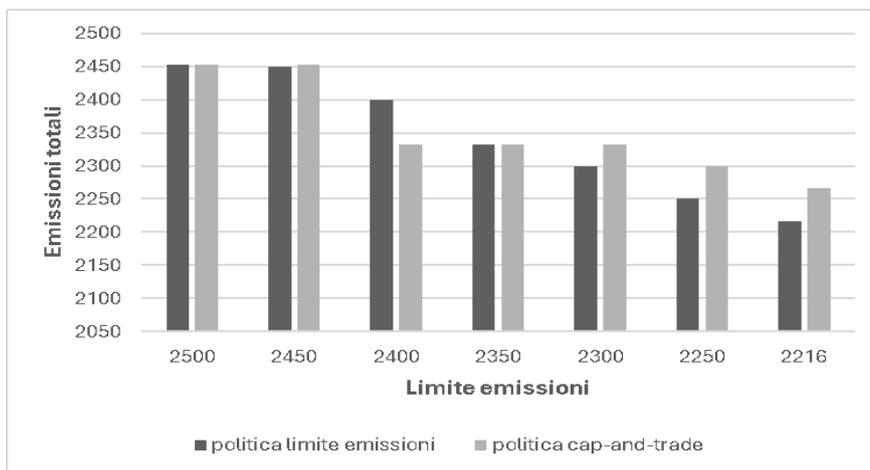


Figura 7: confronto emissioni totali tra le due politiche



Confrontando le due politiche, emerge un chiaro trade-off tra la riduzione delle emissioni e i costi complessivi del sistema, come evidenziato nelle Figure 6 e 7. La politica con limite alle emissioni permette una riduzione maggiore delle emissioni (-9,66%) rispetto al cap-and-trade (-7,63%), ma comporta un aumento più significativo dei costi (3,28% contro 1,61%). Questo significa che, sebbene il limite alle emissioni garantisca un impatto ambientale più rilevante, lo fa a un costo economico più elevato. D'altro canto, il cap-and-trade offre un'opzione più flessibile e meno costosa, grazie alla possibilità di acquistare crediti di emissione, ma con una riduzione delle emissioni meno marcata. Pertanto, la scelta tra le due politiche dipenderà dagli obiettivi dell'azienda: se l'accento è sulla riduzione delle emissioni a scapito dei costi, il limite alle emissioni è la scelta ideale; se invece la priorità è il controllo dei costi con una riduzione ambientale moderata, il cap-and-trade è più vantaggioso.

Capitolo 5: Conclusioni

Obiettivo del lavoro di tesi è stato quello di esaminare il contesto della logistica inversa. In particolare, si è preso in considerazione il problema di decidere le quantità da produrre e da trasportare relativamente a nuovi prodotti e a quelli rigenerati ed anche di stabilire l'ubicazione dei centri di smontaggio, raccolta e distribuzione.

A questo scopo, è stato preso a riferimento il lavoro di Demirel e Gökçen (2008), dal quale si è deciso di partire per aggiungere aspetti più legati all'eco-sostenibilità della catena logistica inversa integrata. In particolare, sono state considerate due politiche ambientali: quella che impone un limite alle emissioni e il cap-and-trade. Partendo dal modello base di Demirel e Gökçen (2008), senza vincoli ambientali, sono stati, quindi, formulati due modelli di programmazione lineare intera mista: uno con un vincolo sulle emissioni e l'altro che tenga esplicitamente in conto la politica del cap-and-trade.

Tutti e tre i modelli sono stati implementati usando il linguaggio di modellazione matematica AMPL e risolti usando il risolutore commerciale Cplex. È stata quindi definita un'istanza, partendo dalle informazioni fornite nell'articolo preso a riferimento. L'analisi dei risultati è stata fatta considerando sia gli aspetti di sostenibilità che i costi operativi ed ha evidenziato come l'adozione di vincoli ambientali incida significativamente sulla progettazione della rete e sui costi aziendali.

I risultati hanno confermato gli obiettivi iniziali, mostrando come la politica del limite alle emissioni porti a una maggiore riduzione delle emissioni di CO₂ rispetto al cap-and-trade, ma a fronte di costi operativi più elevati. Al contrario, il cap-and-trade ha permesso di contenere i costi grazie alla possibilità di acquistare e vendere crediti di carbonio, sebbene con una riduzione delle emissioni meno incisiva. Questo bilanciamento tra costi e riduzione delle emissioni dimostra come la scelta della politica dipenda dalle priorità strategiche dell'azienda.

Il lavoro svolto fornisce un contributo utile in ambito industriale, offrendo uno strumento di supporto alle decisioni per le aziende che desiderano bilanciare la sostenibilità ambientale con l'efficienza economica.

Per rendere ancora più realistici i modelli proposti, potrebbe essere utile integrare metodi come l'Analisi del Ciclo di Vita (LCA), che consentirebbe di valutare gli impatti ambientali in maniera più olistica, includendo anche altre fasi del ciclo di vita dei prodotti. Inoltre, si potrebbero considerare scenari più complessi e realistici, in cui si ha incertezza sulla domanda, sui tassi di ritorno e sui costi dei crediti di carbonio.

Riferimenti Bibliografici

- [1] Alumur, S. A., Nickel, S., Saldanha-da-Gama, F., & Verter, V. (2012). Multi-period reverse logistics network design. *European Journal of Operational Research*, 220, 67-78.
- [2] Benjaafar, S., Li, Y., & Daskin, M. (2013). Carbon footprint and the management of supply chains: Insights from simple models. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 10(1), 99-116.
- [3] Choudhary, A., Sarkar, S., Settur, S., & Tiwari, M.K. (2015). A carbon market sensitive optimization model for integrated forward–reverse logistics. *International Journal of Production Economics*, 164, 433-444.
- [4] Demirel, N.Ö., & Gökçen, H. (2008). A mixed integer programming model for remanufacturing in reverse logistics environment. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 39, 1197–1206.
- [5] Luu, Q. D., Doan, T. T. L., Chou, S.-Y., & Yu, V. F. (2012). Optimizing reverse logistic costs for recycling end-of-life electrical and electronic products. *Expert Systems with Applications*, 39, 6380-6387.
- [6] Yu, H., Solvang, W. D., & Chen, C. (2014). A green supply chain network design model for enhancing competitiveness and sustainability of companies in high north arctic regions. *The International Journal of Energy and Environment*, 5(4), 403-418.
- [7] Zarbakhshnia, N., Soleimani, H., Goh, M., & Razavi, S. S. (2019). A novel multi-objective model for green forward and reverse logistics network design. *Journal of Cleaner Production*, 208, 1304-1316.

Sitografia

- [1] <https://ampl.com/>.
- [2] <https://www.isprambiente.gov.it/it/servizi/registro-italiano-emission-trading/aspetti-general/protocollo-di-kyoto>.
- [3] <https://www.isprambiente.gov.it/it/servizi/registro-italiano-emission-trading/aspetti-general/Accordo-Parigi-e-EU-ETS>.
- [4] <https://fetransp.isprambiente.it/#/>.
- [5] <https://www.reteclima.it/lca-life-cycle-assessment-analisi-del-ciclo-di-vita/>.
- [6] <https://www.gov.uk/government/publications/greenhouse-gas-reporting-conversion-factors-2023>.