

Valutazione dei benefici economici ed ambientali del COLDTAINER

Documento	Report 2019_20231031_Final(ITA).docx
Versione	2
Data	31/10/23
Autori	UNIBS - DIMI: Zanoni S., Marchi B.
Circolazione	Euroengel Srl





Indice

INTRODUZIONE	4
OBIETTIVI DELLA RICERCA	7
UNITÀ REFRIGERATA PORTATILE	8
DESCRIZIONE E CARATTERISTICHE DELLE UNITÀ REFRIGERATE PORTATILI	8
TRASPORTO E STOCCAGGIO DI UNITÀ REFRIGERATE PORTATILI	8
METODOLOGIA	10
FORMULAZIONE DEI MODELLI	10
<i>Analisi economica</i>	10
<i>Analisi ambientale</i>	11
DEFINIZIONE DEL PROBLEMA	12
RISULTATI	16
IPOTESI E LIMITAZIONI	16
ANALISI ECONOMICA	17
ANALISI AMBIENTALE	19
ANALISI DELLE TEMPERATURE	21
CONCLUSIONI	25
NOMENCLATURA	26
RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	27



Lista delle figure

FIGURA 1. SISTEMI DI TRASPORTO NEI DIVERSI SCENARI	14
FIGURA 2. SENSORI DI TEMPERATURA ALL'INTERNO DEL COLDTAINER	16
FIGURA 3. FLUSSO DI CASSA CUMULATIVO ATTUALIZZATO PER I DIVERSI SCENARI	18
FIGURA 4. ANALISI DI SENSITIVITÀ SUL TCO VARIANDO: (A) LA DOMANDA ANNUALE DELLE MERCI, (B) IL VALORE DEL PRODOTTO CONSEGNATO E (C) LA QUANTITÀ SPEDITA IN OGNI VIAGGIO.	19
FIGURA 5. EMISSIONI ANNUALI DI CO ₂ PER I DIVERSI SCENARI.....	20
FIGURA 6. ANALISI DI SENSITIVITÀ SULLE EMISSIONI ANNUALI DI CO ₂ VARIANDO: (A) LA DOMANDA ANNUALE DELLE MERCI E (B) LA QUANTITÀ SPEDITA IN OGNI VIAGGIO.....	21
FIGURA 7. MISURE DEI SENSORI DELLE TEMPERATURE ALL'INTERNO DEL COLDTAINER E DEL PRODOTTO REFRIGERATO (SCENARIO COLDTAINER)	21
FIGURA 8. MISURE DEI SENSORI DELLE TEMPERATURE ALL'INTERNO DEL VEICOLO REFRIGERATO E DEL PRODOTTO REFRIGERATO (SISTEMA DI REFRIGERAZIONE TRADIZIONALE)	22
FIGURA 9. TEMPERATURE INTERNE E AMBIENTALI RELATIVE AL TEST PER IL PRODOTTO CONGELATO	22
FIGURA 10. MISURE DEI SENSORI DELLE TEMPERATURE ALL'INTERNO DEL COLDTAINER E DEL PRODOTTO CONGELATO (SCENARIO COLDTAINER)	23
FIGURA 11. MISURE DEI SENSORI DELLE TEMPERATURE ALL'INTERNO DEL VEICOLO REFRIGERATO E DEL PRODOTTO CONGELATO (SISTEMA DI REFRIGERAZIONE TRADIZIONALE)	23



Introduzione

La sostenibilità ha assunto in tempi recenti una drammatica rilevanza generale in ragione dei palesi effetti del Global Warming. La sostenibilità è tema prioritario nelle nuove strategie europee come la Road Map 2050, la Next Generation EU, e a livello nazionale il recente Piano Nazionale Integrato per l’Energia e il Clima per gli anni 2021 – 2030 (PNIEC) e il Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR).

Dal 2022 la sostenibilità ha assunto una nuova rilevanza tecnica, economica e sociale di fronte alle sfide introdotte sul settore energetico dagli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile (SDG), dalla pandemia di COVID-19 e dalla guerra, ovvero la difficoltà nell’approvvigionamento di gas metano e il notevole aumento dei costi dei vettori energetici [1, 2].

I sistemi di refrigerazione ricoprono un ruolo chiave nel trasporto a temperatura controllata di prodotti deperibili, come alimenti freschi e congelati e prodotti farmaceutici. Il trasporto refrigerato è fondamentale non solo per quanto riguarda il mantenimento dell'integrità termica dei prodotti, ma anche in termini di impatto ambientale legato a consumi energetici, gas serra e particolato atmosferico. Il trasporto a temperatura controllata genera più emissioni del trasporto a temperatura ambiente a causa dei requisiti supplementari di carburante per il raffreddamento e delle perdite di refrigerante.

Un recente report dell'International Energy Association del 2023 [3, 4], ha evidenziato che il settore dei trasporti rappresenta circa il 26% dei consumi energetici totali, consumi aumentati di circa il 4% nel 2022, continuando a risalire verso i livelli pre-Covid. Inoltre, nel 2022 la domanda di elettricità da parte del trasporto stradale è stata superiore di quasi il 60% rispetto al 2019. Anche le relative emissioni di CO₂ derivanti dai trasporti hanno continuato a crescere nel 2022, tornando quasi ai livelli del 2019: nel 2022 le emissioni globali di CO₂ del settore dei trasporti sono cresciute di oltre 250 Mt CO₂ fino a quasi 8 Gt CO₂, il 3% in più rispetto al 2021: un livello del 71% superiore a quanto visto nel 1990. L'aumento assoluto più elevato è stato nel trasporto su strada. Nel complesso, la quota delle emissioni del trasporto su strada è di circa il 73%. Gli attuali sistemi di trasporto sono lungi dall'essere efficienti e questo problema è più grave nei sistemi di trasporto a temperatura controllata per i quali è necessaria energia aggiuntiva per regolare la temperatura e garantire qualità, sicurezza del prodotto e shelf life [5,6]. Le emissioni di gas a effetto serra dei tradizionali sistemi di refrigerazione a compressione di vapore del motore diesel possono raggiungere circa il 40% delle emissioni totali del



veicolo [7]. Anche se l'efficienza delle apparecchiature refrigerate è in costante progresso, la domanda di refrigerazione dovrebbe aumentare nei prossimi anni a causa di una domanda crescente delle merci e di requisiti più elevati imposti da standard di qualità, igiene e sicurezza. Ad esempio, entro il 2050, è previsto un aumento del 60% della domanda alimentare [8]. Allo stesso tempo, il recente cambiamento climatico aumenta la probabilità di temperature più estreme ed eventi meteorologici imprevedibili, che influiscono sul processo di produzione dei prodotti deperibili e richiedono una maggiore refrigerazione.

La legislazione dell'UE e del Regno Unito copre i requisiti di controllo della temperatura durante la conservazione e il trasporto di alimenti deperibili. Tali regolamenti sono stati rivisti all'inizio del 2006, e il regolamento della Commissione Europea n. 852/2004 sull'igiene dei prodotti alimentari impone ai produttori di disporre di strutture adeguate alla manipolazione e stoccaggio in grado di mantenere gli alimenti a temperature adeguate e consentire il monitoraggio e la registrazione di tali temperature. Il trasporto di prodotti alimentari deperibili, e le attrezzature utilizzate per il trasporto di questi prodotti, è regolato da un accordo stipulato dall'Inland Transport Committee del Comitato economico delle Nazioni Unite per l'Europa negli anni 1970-1971. L'accordo è noto come Accordo sul trasporto di prodotti alimentari deperibili ('Agreement on Transportation of Perishable food stuff', ATP), che mira a facilitare il traffico internazionale stabilendo standard comuni riconosciuti a livello internazionale per i veicoli di trasporto a temperatura controllata come veicoli stradali, vagoni ferroviari e container marittimi. Il certificato ATP assicura che il corpo isolato e l'unità di refrigerazione siano stati testati da terzi e che i due siano stati opportunamente abbinati. Un veicolo certificato ATP potrebbe essere munito di un unico certificato che copre sia la carrozzeria isolata sia l'unità di refrigerazione. Tuttavia, il trasporto refrigerato non è soggetto a requisiti di efficienza energetica. In effetti, le attrezzature utilizzate per il trasporto internazionale di merci refrigerate sarebbero particolarmente complesse da regolare a causa della mancanza di chiarezza della proprietà e del loro funzionamento oltre i confini dell'UE [9].

I sistemi di azionamento più comuni per i sistemi frigoriferi a compressione per il trasporto refrigerato sono l'alternatore del veicolo (comunemente usato in piccoli furgoni di consegna), la trasmissione a cinghia diretta, l'alternatore ausiliario e l'unità diesel ausiliaria (utilizzati nella maggioranza dei veicoli di medie e grandi dimensioni). I requisiti potenza e le performance dei sistemi di refrigerazione per il trasporto sono normalmente valutati a pieno carico. In realtà, tuttavia, questi sistemi operano su una vasta gamma di carichi. Per adattarsi al carico variabile, il sistema di



refrigerazione viene acceso e spento, oppure la sua capacità viene modulata per mantenere la temperatura impostata con una conseguente riduzione di efficienza. Ciò è particolarmente rilevante per le consegne multi-drop in quanto sono caratterizzate da multiple aperture delle porte che provocano una maggiore variabilità della temperatura interna a causa dell'infiltrazione dell'aria esterna. Inoltre, le prestazioni dei materiali isolanti si deteriorano nel tempo a causa delle caratteristiche intrinseche della schiuma. Dati recenti mostrano una perdita tipica del valore di isolamento tra il 3% e il 5% all'anno che può portare a un considerevole aumento della conducibilità termica dopo alcuni anni con conseguente aumento del consumo di energia e delle emissioni di CO₂ [7]. Ridurre l'impatto ambientale complessivo dei sistemi di trasporto su strada refrigerati, che contribuisce fortemente al riscaldamento globale e ai cambiamenti climatici, e sviluppare progetti sostenibili sono indispensabili per l'industria della catena del freddo. La decarbonizzazione dei veicoli per il trasporto su strada è associata ad alcune sfide particolari, una delle quali è la perdita di refrigerante. La perdita di gas refrigeranti da questi sistemi impatta sull'ambiente in due modi [10]: un effetto diretto dovuto al potenziale di riscaldamento globale delle perdite di gas, e un effetto indiretto dovuto alla ridotta efficienza del sistema di refrigerazione (a causa della perdita di carica) che porta ad un aumento del consumo di energia. Il tasso di perdita annuale può essere in media dell'11% e, in alcuni casi, fino al 30% [11]. La perdita di refrigerante può anche avere un impatto finanziario significativo per l'utente a seconda della velocità con cui la perdita viene trovata e riparata.

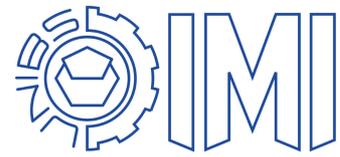
Le unità refrigerate portatili ("Portable Refrigerated Unit", PRU) rappresentano una nuova soluzione che può essere utilizzata dalle aziende logistiche per offrire ai propri clienti un servizio di trasporto refrigerato per piccoli e medi volumi di merci deperibili a bordo dei loro veicoli standard, senza la necessità di investimenti in veicoli e infrastrutture speciali. L'uso di questa particolare soluzione può portare a rilevanti vantaggi economici e ambientali rispetto al trasporto refrigerato tradizionale che di solito è azionato a cinghia dal motore del veicolo con il diesel come fonte di carburante.



Obiettivi della ricerca

L'obiettivo di questo studio consiste nel confronto economico e ambientale di due sistemi logistici per il servizio di trasporto refrigerato per piccoli e medi volumi. In particolare, il confronto prevede: (1) un trasporto refrigerato tradizionale, che consiste in un veicolo a diesel dotato di un sistema di refrigerazione azionato a cinghia dal motore del veicolo, e (2) una nuova soluzione caratterizzata dall'uso di unità refrigerate portatili.

Di seguito vengono presentati gli elementi pertinenti relativi al sistema di refrigerazione tradizionale e alla soluzione nuova. Viene poi definita la metodologia e i modelli utilizzati per il confronto economico e ambientale, specificando i parametri di configurazione e le prestazioni. Infine, i risultati del confronto sono presentati per gli scenari considerati.



Unità refrigerata portatile

Descrizione e caratteristiche delle unità refrigerate portatili

Le unità refrigerate portatili (PRU) sono realizzate in polietilene per uso alimentare con una tecnologia di stampaggio rotazionale, che consente di ottenere corpi cavi unici e resistenti agli urti. Tali contenitori possono essere facilmente disinfettati in conformità con il regolamento (CE) N. 852/2004 del Parlamento Europeo (HACCP). L'isolamento termico è realizzato in poliuretano espanso, con spessori che vanno dai 65 ai 130 mm. Inoltre, i modelli più grandi sono testati secondo le normative ATP e hanno un coefficiente di dispersione termica "K" inferiore a 0,40 Wm²/K.

Le unità di refrigerazione utilizzano compressori ermetici Secop (12-24Vcc), sviluppati a basso assorbimento appositamente per l'uso su veicoli e possono funzionare perfettamente anche in presenza di vibrazioni. Il gas refrigerante è R134a, non infiammabile e compatibile con le normative ambientali, per soluzioni a + 4 ° C mentre R404a per soluzioni a - 20 ° C.

Trasporto e stoccaggio di unità refrigerate portatili

L'uso di contenitori refrigerati attivi semplifica le diverse fasi della catena del freddo con un'evidente riduzione dei costi diretti e indiretti, un significativo miglioramento dei tempi di consegna e anche una riduzione del rischio di contaminazione degli alimenti e rotture nella catena stessa. Ciò comporta vantaggi ambientali in termini di riduzione del consumo di energia e delle emissioni di CO₂. In particolare, questa tecnologia semplifica il trasporto e lo stoccaggio di merci refrigerate.

Dal punto di vista dello stoccaggio, i contenitori possono essere collocati in magazzini tradizionali non refrigerati e utilizzati come spazio refrigerato locale semplicemente collegandoli all'alimentazione. Ciò consente di non creare specifici magazzini refrigerati evitando gli elevati investimenti. Dal punto di vista del trasporto, questi contenitori possono essere caricati direttamente con un carrello elevatore su un camion non refrigerato (alimentato da batterie 12V/24V del veicolo) per la consegna diretta alla destinazione finale. Questo sistema quindi elimina la necessità di veicoli refrigerati specializzati.

Le PRU consentono anche la consegna e lo stoccaggio congiunti di merci refrigerate e non refrigerate, poiché consentono di impostare temperature diverse per ogni unità evitando il deterioramento dei prodotti. In particolare, nella filiera alimentare, in cui la temperatura, l'umidità relativa, le condizioni igieniche e talvolta anche la composizione dell'aria devono essere rigorosamente controllate e monitorate per accelerare o rallentare il processo di invecchiamento del prodotto (atmosfera



controllate). Le PRU consentono inoltre di evitare la suddivisione del magazzino in celle più piccole per la conservazione di merci con caratteristiche simili.

Metodologia

Al fine di confrontare il trasporto refrigerato tradizionale e la soluzione basata sull'uso di unità refrigerate portatili, sono stati proposti due modelli: uno per la valutazione economica, l'altro per la valutazione dell'impatto ambientale. In particolare, per la valutazione economica viene utilizzato il *Total Cost of Ownership* (TCO) che permette di calcolare il costo totale di proprietà o costo totale di possesso costituito da tutti i costi del ciclo di utilizzo, dall'acquisto, all'installazione, alla gestione, e alla manutenzione. Mentre, per la valutazione ambientale si è ricorsi al calcolo del *carbon footprint* che quantifica le emissioni di CO₂ legato al ciclo di vita. La prima sottosezione propone la formulazione dei modelli utilizzati per le valutazioni ambientali ed economiche. Quindi, la seconda sottosezione definisce il problema e la metodologia applicata per il caso studio.

Formulazione dei modelli

Analisi economica

I principali parametri relativi alle attività di trasporto impiegate per l'analisi economica sono i seguenti:

- Piano di consegna (e.g., distanza percorsa, limite di tempo, velocità media, ecc.)
- Caratteristiche dei veicoli di trasporto
 - Tara
 - Coefficiente di consumo di carburante per entrambe le funzioni motrici e di refrigerazione
 - Capacità di carico (peso)
 - Carica di refrigerante e relativa perdita
- Costo unitario del carburante e del refrigerante
- Caratteristiche delle unità (e.g., volume e tara)
- Capacità di carico come numero di unità.

I due scenari (ovvero le soluzioni di trasporto refrigerato tradizionale e PRU Coldtainer) vengono confrontati sulla base del TCO, che definisce il costo complessivo di proprietà e utilizzo del veicolo specifico per il trasporto refrigerato (1). In particolare, dal momento dell'acquisto, attraverso il suo funzionamento e manutenzione fino al momento in cui lascia il possesso del proprietario. I costi pertinenti esaminati sono il costo di acquisto dato dal costo dell'investimento nel veicolo e nel sistema

di refrigerazione, I_0 , i costi di esercizio annuali relativi ai consumi di carburante e refrigerante e la perdita di qualità, O_i , e il costo annuale per gli interventi di manutenzione sul sistema di refrigerazione, M_i . Al fine di rendere comparabili i risultati nello stesso periodo di tempo, N , viene introdotto anche il valore residuo del veicolo e del sistema di refrigerazione, RV_N . È stato ipotizzato un deprezzamento lineare delle attrezzature.

$$TCO = I_0 + \frac{\sum_{i=1}^N (O_i + M_i + RV_N)}{(1 + \rho)^i} \quad (1)$$

$$I_0(\text{€}) = \begin{cases} p_c^{trailer} + p_c^{trad} & Trad \\ p_c^{trailer} + p_c^{PRU} n^{PRU} & PRU \end{cases} \quad (2)$$

$$O_i \left(\frac{\text{€}}{\text{year}} \right) = \begin{cases} \left(\frac{D^T}{f_c} e + C^{trad} LR^{trad} V rc + p(1 - e^{-k \cdot T^T}) W^F n^{SKU} \right) n_{trip} & Trad \\ \left(\frac{D^T}{f_c} e + C^{PRU} LR^{PRU} n^{PRU} rc \right) n_{trip} & PRU \end{cases} \quad (3)$$

$$M_i = mc \cdot n^M \quad (4)$$

$$RV_N = \begin{cases} \frac{p_c^{trailer}}{N_{trailer}} (N_{trailer} - N) + \frac{p_c^{trad}}{N_{trad}} (N_{trad} - N) & Trad \\ \frac{p_c^{trailer}}{N_{trailer}} (N_{trailer} - N) + \frac{p_c^{PRU}}{N_{PRU}} (N_{PRU} - N) & PRU \end{cases} \quad (5)$$

dove $n_{trip} = \text{ruondup} \left\{ \frac{D}{W^F \cdot n^{SKU}} \right\}$ per la soluzione refrigerata tradizionale, mentre $n_{trip} = \text{ruondup} \left\{ \frac{D}{W^F \cdot n^{PRU}} \right\}$ per il trasporto delle PRU.

Analisi ambientale

L'analisi ambientale proposta si concentra sulla valutazione del carbon footprint delle due soluzioni. Le emissioni sono principalmente generate direttamente dalle perdite dovute al consumo di refrigerante - (6) and (8), e indirettamente dal consumo di carburante - (7) and (9).

$$E_{ref} (kg_{CO_2eq}/trip) = C^{trad} \cdot LR^{trad,x} \cdot V \cdot en_{CO_2}^{ref} \quad (6)$$

Soluzione
tradizionale

$$E_{fuel} (kg_{CO_2eq}/trip) = \frac{D^T}{f_{C^{trad,x}}} \cdot en_{CO_2}^{diesel} \quad (7)$$

$$E_{ref} (kg_{CO_2eq}/trip) = C^{PRU} \cdot LR^{PRU,x} \cdot n^{PRU} \cdot en_{CO_2}^{ref} \quad (8)$$

PRU

$$E_{fuel} (kg_{CO_2eq}/trip) = \frac{D^T}{f_{C^{PRU,x}}} \cdot en_{CO_2}^{diesel} \quad (9)$$

dove x definisce la tipologia di prodotto considerate e, di conseguenza, le necessità di refrigerazione (i.e., prodotto fresco refrigerato o prodotto congelato). Le emissioni totali annue sono ottenute dalla somma dei due contributi moltiplicata per il numero di viaggi necessari per soddisfare la domanda annuale, n_{trip} .

Definizione del problema

Il caso di studio condotto si concentra sulla distribuzione di prodotti alimentari, in cui le spedizioni refrigerate vengono utilizzate per rifornire negozi, comunità e consegne a domicilio. In questo tipo di spedizioni, la capacità di carico dei veicoli di trasporto è generalmente molto più elevata del necessario, pertanto è difficile aumentare le prestazioni economiche e ambientali. In particolare, nei piani di consegna multi-drop, ci sono molti punti diversi di spedizioni con quantità di merci limitate da consegnare, il che significa diverse e frequenti aperture delle porte.

Due sistemi di refrigerazione (vale a dire, uno tradizionale e uno basato su unità refrigerata portatile - COLDTAINER), due tipologie di prodotti alimentari (i.e., uno refrigerato e uno congelato) e due piani di consegna (i.e., consegna con lunga distanza e consegna multi-drop) sono studiati a fini di valutazione. Nella Tabella 1 è presentato il protocollo di instradamento per l'esecuzione dei test.

Tabella 1. Protocollo di instradamento per le prove effettuate

	Lunga distanza	Multi-drop
Distanza (km)	100	50
Durata (h)	2.5	2.5



<i>Velocità</i>	media 50 km/h	media 25km/h
	max 80 km/h	max 50 km/h
<i># aperture</i>	2	10
<i>Attività di scarico</i>	1 scarico completo alla fine del trasporto	1 min per ogni apertura
<i>Condizioni iniziali</i>	Veicolo vuoto e spento per 12 ore. Prodotti alla temperatura di trasporto	

Il veicolo utilizzato per le prove è un Doblò - FIAT, che può trasportare uno SKU o PRU per viaggio. Ulteriori informazioni sui veicoli utilizzati per le prove sono fornite in Tabella 2. Per entrambi i sistemi di refrigerazione, il refrigerante R134a viene utilizzato per il prodotto refrigerato (ovvero, + 4 ° C), mentre il refrigerante R404a per il prodotto congelato (ovvero, - 20 ° C). In Figura 1, sono rappresentate le soluzioni refrigerate alternative.

Tabella 2. Informazioni sui veicoli utilizzati nei test

<i>Sistema di refrigerazione</i>	-	Tradizionale + 4°C	Tradizionale -20°C
<i>Combustibile</i>	Diesel	Diesel	Diesel
<i>Cilindrata [cm³]</i>	1248.00	1598.00	1598.00
<i>No. Identificazione</i>	199A3000	198A3000	198A3000
<i>Classe ambientale</i>	2003/76/CE-B	195/2013	195/2013

FIAT Doblò

COLDTAINER

Sistema tradizionale

Refrigerato



Congelato



Figura 1. Sistemi di trasporto nei diversi scenari

Nella soluzione PRU, è stata caricata la versione F0720 di Coldtainer: modello NDN per il trasporto di prodotti refrigerati, mentre modello FDN per il trasporto di prodotti congelati. Le caratteristiche principali delle soluzioni alternative sono illustrate nella Tabella 3.

Tabella 3. Caratteristiche delle soluzioni di trasporto

	Refrigerato (+ 4 °C)	Congelato (- 20 °C)
<i>Volume del vano di carico (m3)</i>	3.4	3.4
<i>Peso lordo (ton)</i>	1.27	1.27
<i>Peso lordo con Coldtainer (ton)</i>	1.414	1.42
<i>Peso lordo con sistema di refrigerazione tradizionale (ton)</i>	1.71	1.840
<i>Carico utile – sistema tradizionale (kg)</i>	390	435
<i>Carico utile – sistema Coldtainer (kg)</i>	531	525
<i>Prezzo sistema di refrigerazione tradizionale (€)</i>	11,000	12,000



<i>Prezzo Coldtainer per PRU (€)</i>	4,000	4,900
<i>Prezzo del veicolo (€)</i>	19,000	19,000
<i>Perdite annuali di refrigerante nel sistema tradizionale</i>	10%	12%
<i>Perdite annuali di refrigerante nel Coldtainer</i>	-	-
<i>Carica unitaria di refrigerante per PRU (kg/PRU)</i>	0.135	0.304
<i>Carica unitaria di refrigerante per sistema tradizionale (kg/m³)</i>	0.324	0.421

Si tenga in considerazione che nel caso Coldtainer non si hanno perdite di refrigerante in quanto vengono utilizzati degli impianti ermetici con tubi di metallo saldati senza raccordi.

Un trasporto a lunga distanza e un trasporto multi-drop sono stati considerati nel confronto tra le alternative di refrigerazione. Fondamentalmente, nel trasporto a lunga distanza, il veicolo viene caricato con prodotti alimentari e consegnato a un singolo cliente, quindi sono previste meno di due aperture di porta durante il viaggio. Al contrario, in veicoli refrigerati multi-drop a breve distanza i prodotti vengono consegnati in punti diversi (ad esempio, diversi clienti). Pertanto, questi trasporti sono caratterizzati da aperture multiple delle porte, tempi brevi per il recupero della temperatura del prodotto e capacità di raffreddamento generalmente condivisa tra due o più scomparti in un singolo veicolo (ad esempio scomparti congelatore e refrigeratore all'interno dello stesso camion).

Il consumo di carburante è una funzione di molti fattori, come la velocità, la quantità di arresti e riavvii, il tipo di sistema di refrigerazione e la temperatura impostata all'interno del veicolo. Pertanto, la quantità media di km percorsi per litro di carburante è stata misurata sul campo e sono definiti nella Tabella 4.

Tabella 4. Misure di consumo medio di carburante per percorsi a lunga distanza (LD) e multi-drop (M-D)

Consumo medio di carburante (km/l)	Doblò Refrigerato		Doblò Congelato	
	LD	M-D	LD	M-D
<i>Scenario tradizionale</i>	12.9	8.5	12.59	8.49
<i>Scenario Coldtainer</i>	19.23	12.38	18.87	12.2

La PRU Coldtainer deve affrontare un invecchiamento inferiore, con conseguente maggiore durata. Allo stesso tempo, richiede meno manutenzione, con un costo annuale quasi trascurabile ipotizzato al 5% del prezzo di acquisto. Nel sistema refrigerato tradizionale, è necessario un intervento annuale di manutenzione per mantenere delle prestazioni accettabili. In questi casi di studio, abbiamo ipotizzato un costo di manutenzione annuale per il sistema di refrigerazione tradizionale pari a circa il 10% del suo prezzo di acquisto. Inoltre, la soluzione tradizionale limita la durata del sistema di refrigerazione e del veicolo a 12 anni a causa della validità dell'ATP. Mentre nel caso di utilizzo del Coldtainer, il veicolo può essere utilizzato anche negli anni a seguire.

Durante lo svolgimento dei test, la temperatura all'interno del volume refrigerato è stata monitorata attraverso l'uso di sensori al fine di osservarne la variabilità. La Figura 2 mostra i sensori installati per misurare la temperatura in diversi punti all'interno del Coldtainer.



Figura 2. Sensori di temperatura all'interno del Coldtainer

Risultati

Ipotesi e limitazioni

Di seguito, i parametri utilizzati per confrontare i costi e le emissioni complessivi della soluzione tradizionale con la soluzione Coldtainer sono assunti come segue:

- Costo unitario del carburante: 1.911 €/l
- Costo unitario refrigerante R134a: 27 \$/kg
- Costo unitario refrigerante R404a: 45 \$/kg
- Domanda annuale per i prodotti refrigerati: 100 ton/anno

- Quantità di prodotto trasportato per viaggio: 250 kg
- Tasso di sconto: 4%/anno
- Valore del prodotto: 4 €/kg
- Durata delle analisi: 6 anni

Al fine di eseguire le analisi, sono state apportate alcune semplificazioni che rappresentano alcune limitazioni del presente studio. Ad esempio, i piani di consegna sono stati percorsi contemporaneamente per affrontare le stesse condizioni esterne (e.g., traffico, temperature ambiente). Tuttavia, per fare ciò, sono stati utilizzati due veicoli con cilindrata, invecchiamento, carico utile e conducente diversi che possono influire sui consumi effettivi. Inoltre, non esiste una misura diretta del consumo di carburante. Quindi, viene definito solo attraverso una stima accurata valutando la quantità di carburante caricata per riempire il serbatoio prima e dopo il piano di consegna.

Analisi economica

In Tabella 5 e Figura 3, è dimostrato che l'uso del Coldtainer, rispetto alla soluzione tradizionale, consente un risparmio sui costi nei sei anni dell'analisi di circa il 41% in ciascun piano di consegna (ovvero, consegna a lunga distanza e multi-drop) e per entrambe categorie di prodotti (ovvero refrigerato e congelato): i.e., circa 20 k€ per consegna multi-drop e 23 k€ per consegna a lunga distanza. In particolare, questo rilevante risparmio è dovuto principalmente alle minori spese iniziali necessarie per l'installazione del sistema refrigerato, alla riduzione del consumo di carburante e refrigerante, alla manutenzione trascurabile richiesta e alla migliore conservazione della qualità del prodotto. Inoltre, il veicolo ha un valore residuo più elevato poiché non è dotato di un sistema di refrigerazione irreversibile e quindi ha una durata maggiore (circa il 70% contro il 50% del veicolo dotato del tradizionale sistema di refrigerazione).

Tabella 5. Risultati economici per diverso piano di consegna, categoria di prodotti e sistema di refrigerazione

Flusso di cassa cumulativo attualizzato	Refrigerato		Congelato	
	M-D	LD	M-D	LD
Soluzione Tradizionale	-€ 47,964	-€ 55,455	-€ 49,145	-€ 57,374
Soluzione Coldtainer	-€ 28,140	-€ 32,794	-€ 29,159	-€ 33,972
	-41.3%	-40.9%	-40.7%	-40.9%

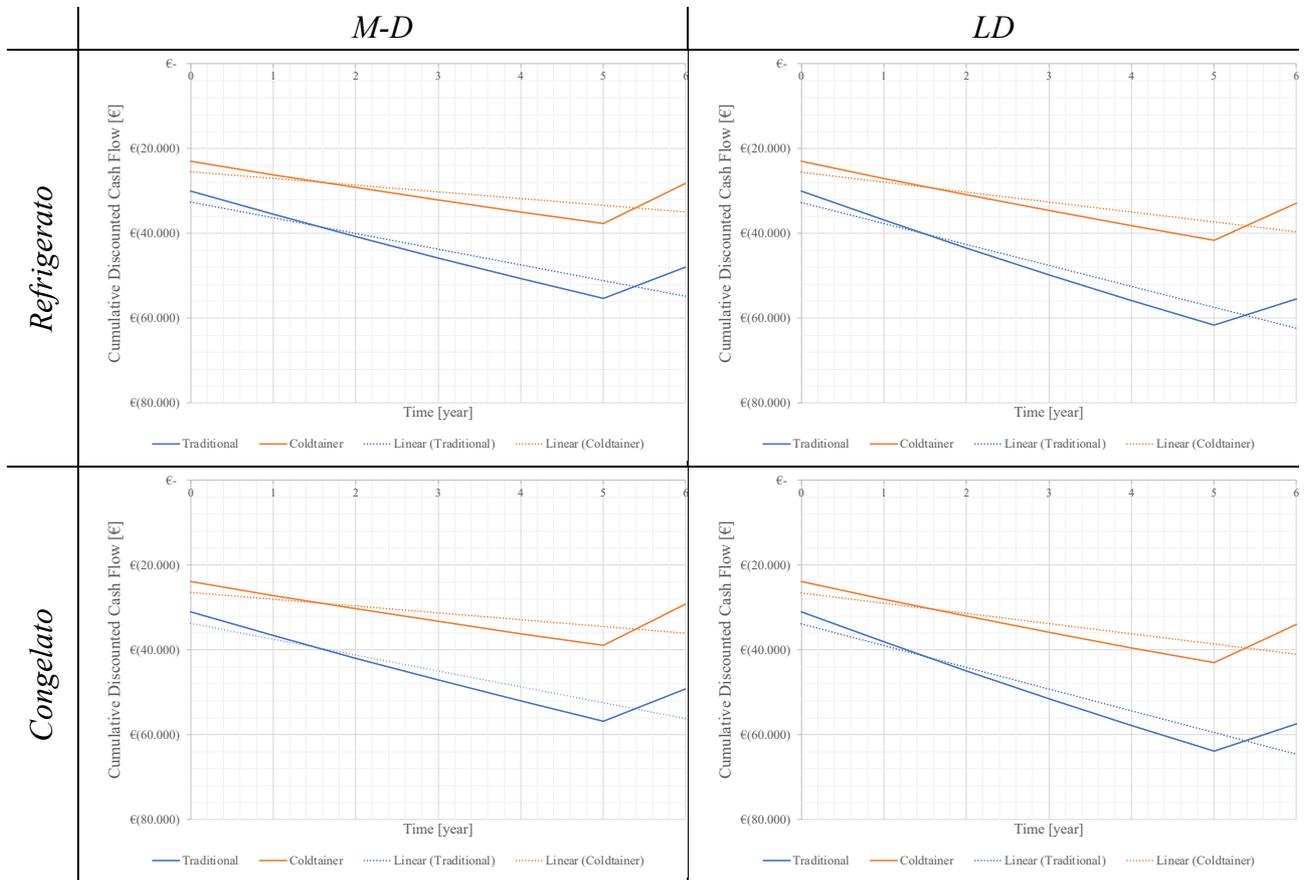
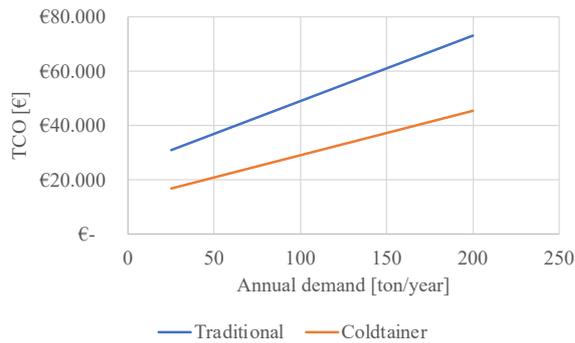
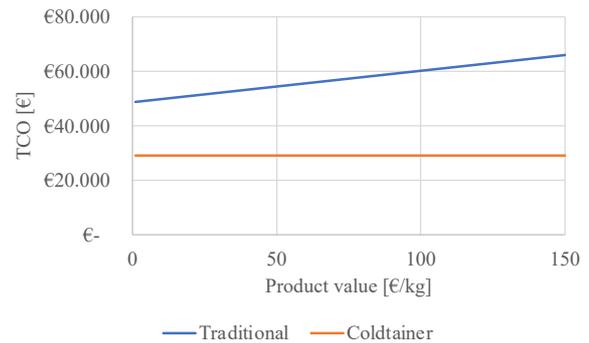


Figura 3. Flusso di cassa cumulativo attualizzato per i diversi scenari

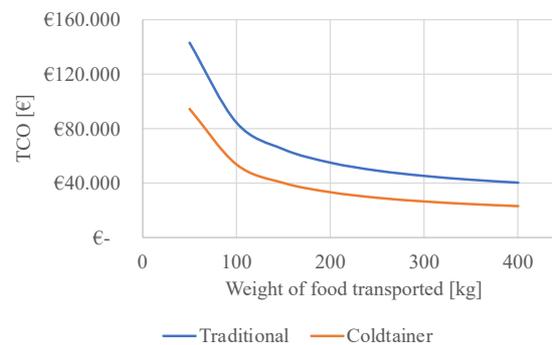
Poiché i risultati dipendono strettamente dai parametri utilizzati, sono state eseguite alcune analisi di sensitività per lo scenario con prodotto congelato e un piano di consegna multi-drop. In particolare, la Figura 4a mostra l'andamento del TCO per diversa domanda annuale delle merci, la Figura 4b per diversi valori del prodotto consegnato, mentre la Figura 4c per diverse quantità di merce trasportata in ogni viaggio. Come si può osservare, una domanda annuale inferiore, un valore del prodotto più elevato e quantità più elevate trasportate ad ogni viaggio determinano una maggiore convenienza della soluzione Coldtainer rispetto al trasporto refrigerato tradizionale.



(a)



(b)



(c)

Figura 4. Analisi di sensitività sul TCO variando: (a) la domanda annuale delle merci, (b) il valore del prodotto consegnato e (c) la quantità spedita in ogni viaggio.

Analisi ambientale

Considerando le emissioni di CO₂, la soluzione Coldtainer consente di ottenere un risparmio compreso tra il 33 e il 38% a seconda della categoria del prodotto e della pianificazione delle consegne, corrispondenti a circa 2,1 e 3,5 tonnellate/anno. Come evidenziato in Tabella 6 e Figura 5, la soluzione Coldtainer limita notevolmente le perdite di refrigerante, che sono caratterizzate da un fattore di emissione molto elevato. Le minori emissioni della soluzione Coldtainer (praticamente nulle) sono anche dovute al minor peso lordo del veicolo, il che significa un minore consumo di carburante. Si può anche osservare che la consegna del prodotto congelato è responsabile di emissioni più elevate legate alle perdite di refrigerante a causa del fattore di emissione più elevato dell'R404a rispetto all'R134a.

Tabella 6. Emissioni annuali di CO₂ per diversi piani di consegna, categoria di prodotti e sistema di refrigerazione

Emissioni CO ₂ annuali	Refrigerato		Congelato	
	M-D	LD	M-D	LD
Soluzione tradizionale	6338.34	8302.85	6861.33	9019.13
Soluzione Coldtainer	4243.84	5464.25	4306.46	5568.50
	-33%	-34%	-37%	-38%

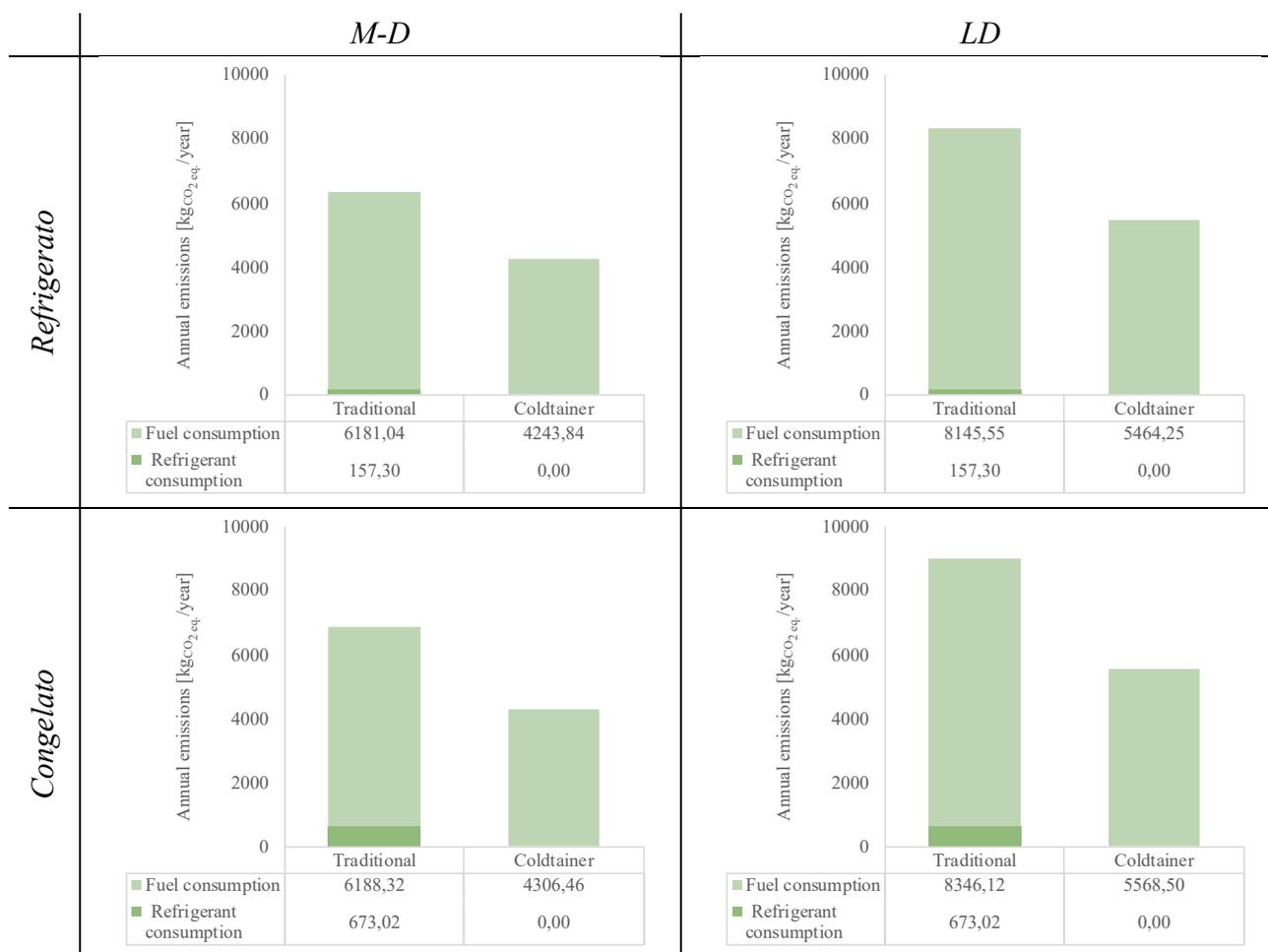


Figura 5. Emissioni annuali di CO₂ per i diversi scenari

Dalle analisi di sensitività è possibile osservare che una domanda annuale più bassa e quantità maggiori trasportate ad ogni viaggio determinano una maggiore convenienza della soluzione Coldtainer rispetto al trasporto refrigerato tradizionale da un punto di vista ambientale (Figura 6).

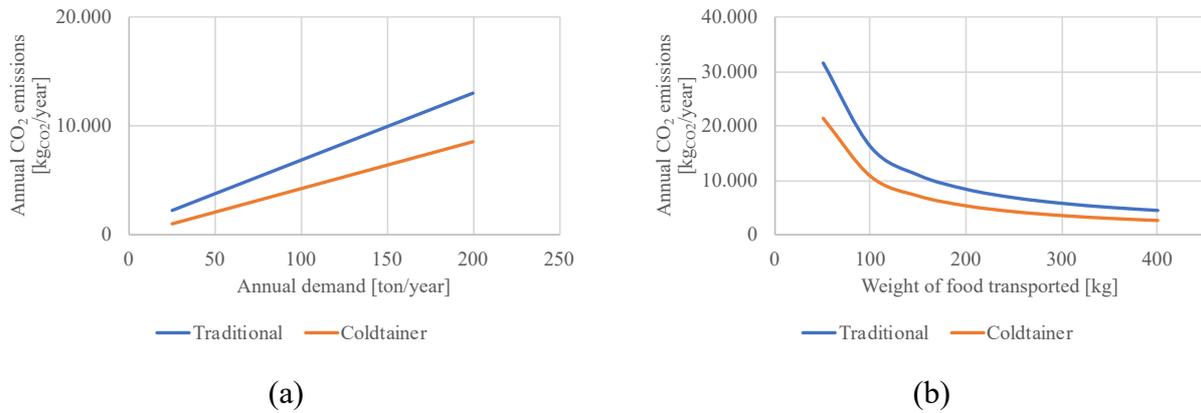


Figura 6. Analisi di sensitività sulle emissioni annuali di CO₂ variando: (a) la domanda annuale delle merci e (b) la quantità spedita in ogni viaggio.

Analisi delle temperature

Il test del prodotto refrigerato è stato eseguito il 12 luglio 2019, con la seguente schedulazione temporale:

- 9.30 am - 1pm: consegna a lunga distanza,
- 1pm - 2pm: pausa pranzo, e
- 2pm - 18pm: consegna multi-drop.

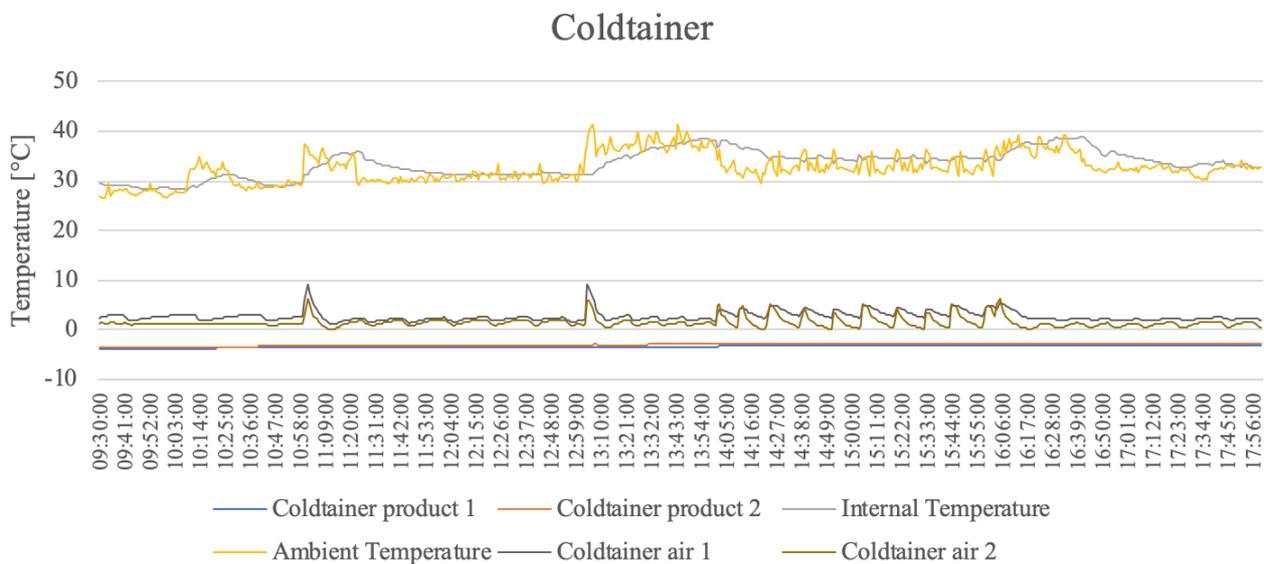


Figura 7. Misure dei sensori delle temperature all'interno del Coldtainer e del prodotto refrigerato (scenario Coldtainer)

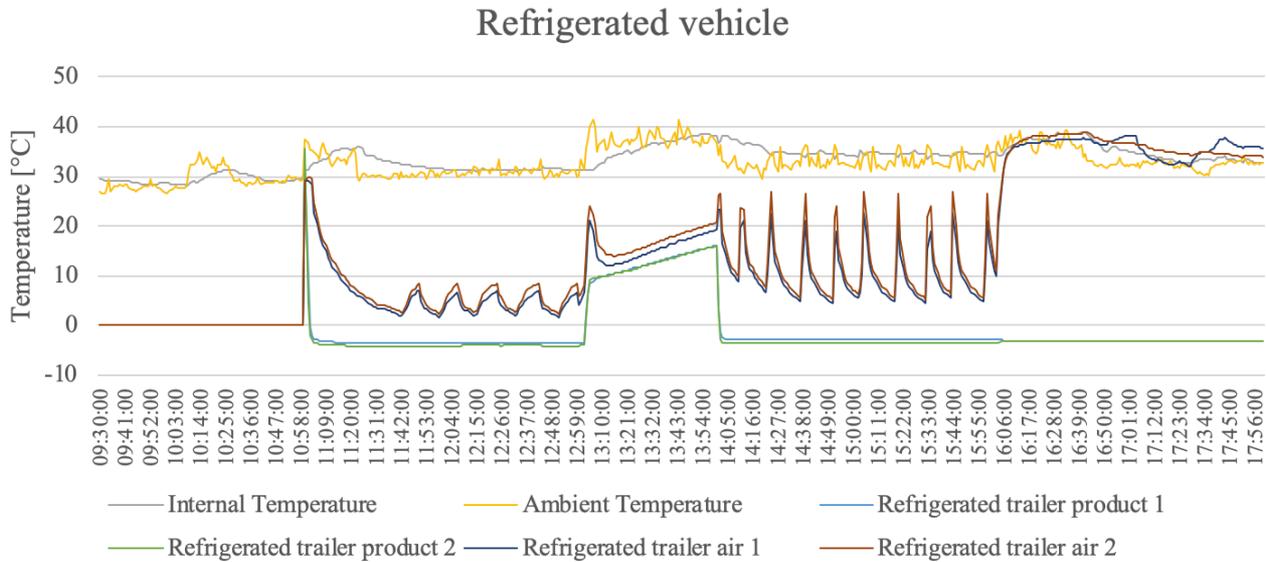


Figura 8. Misure dei sensori delle temperature all'interno del veicolo refrigerato e del prodotto refrigerato (sistema di refrigerazione tradizionale)

Il test del prodotto congelato è stato eseguito il 5 Settembre 2019, con la seguente schedulazione temporale:

- 10.10 am - 12.10pm: consegna a lunga distanza,
- 12.10pm - 2.10pm: pausa pranzo, e
- 2.10pm - 5.10 pm: consegna multi-drop.

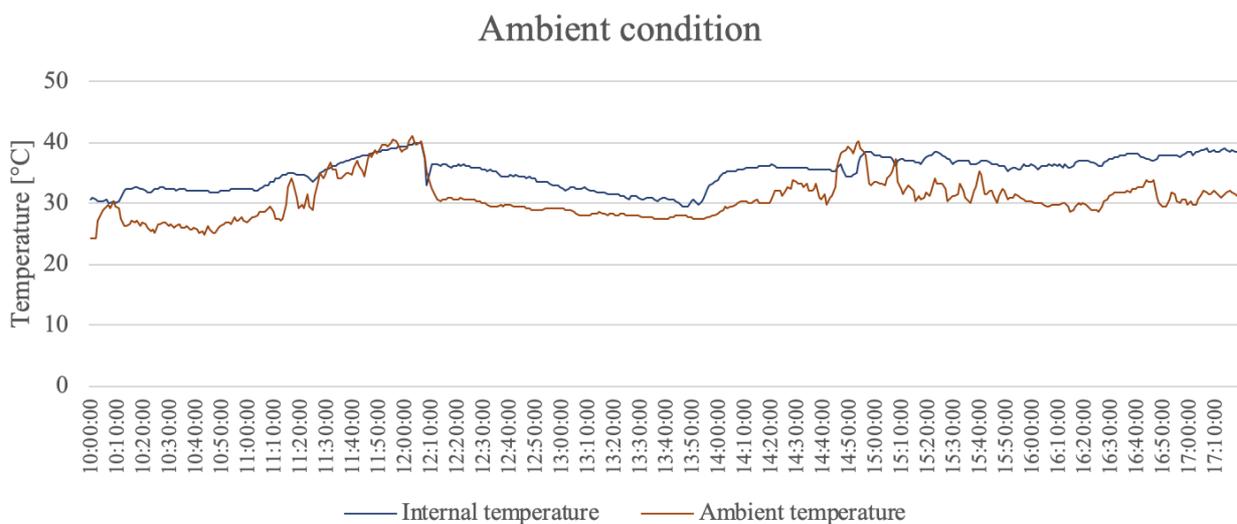


Figura 9. Temperature interne e ambientali relative al test per il prodotto congelato

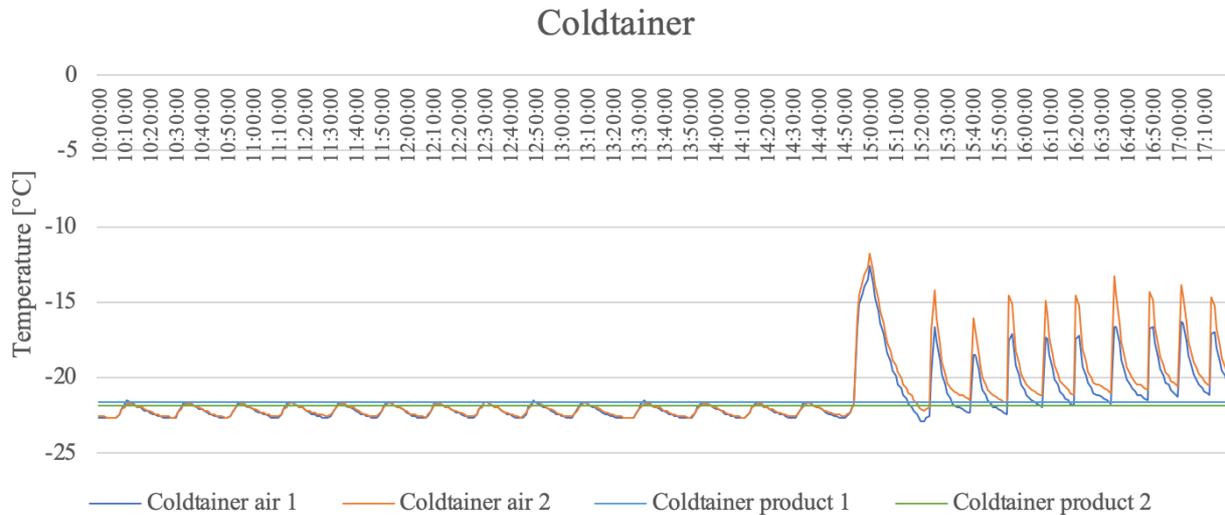


Figura 10. Misure dei sensori delle temperature all'interno del Coldtainer e del prodotto congelato (scenario Coldtainer)

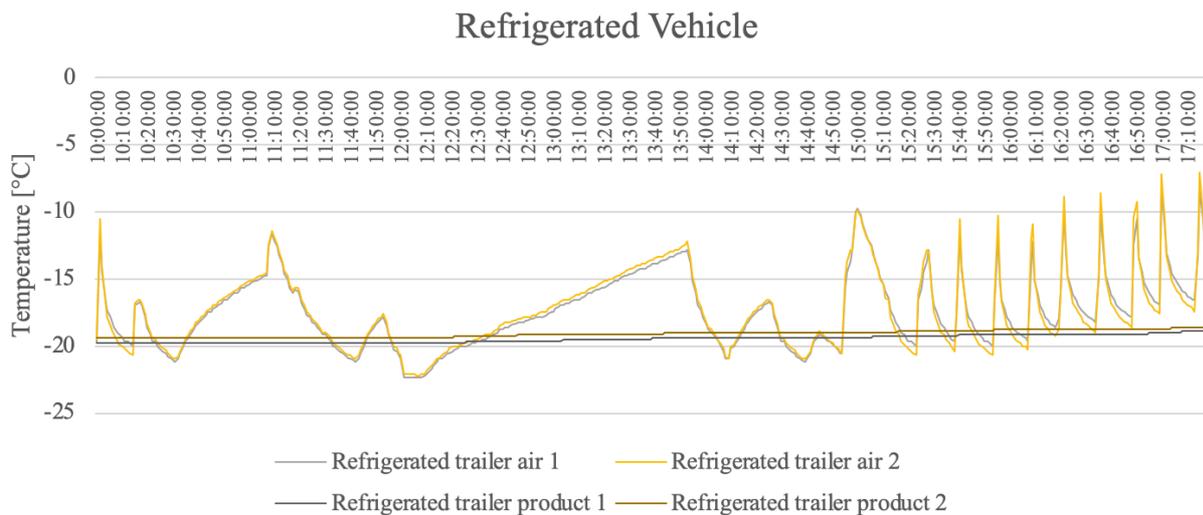


Figura 11. Misure dei sensori delle temperature all'interno del veicolo refrigerato e del prodotto congelato (Sistema di refrigerazione tradizionale)

La diversa conservazione delle temperature è evidente per entrambe le categorie di prodotti (i.e., refrigerate e congelate). In particolare, la temperatura dell'aria è soggetta a un'enorme variabilità nel caso del sistema di refrigerazione tradizionale (ovvero da 0 a 30 ° C nello scenario del prodotto refrigerato, Figura 8, e da -22 a -7 ° C nello scenario del prodotto congelato, Figura 11). Al contrario, la soluzione Coldtainer mantiene temperature più stabili (da 0 a 10 ° C nello scenario del prodotto refrigerato, Figura 7, e da -22 a -15 ° C nello scenario del prodotto congelato, Figura 10).



La temperatura del prodotto è soggetta a minori variazioni rispetto alla temperatura dell'aria, e non viene influenzata del tutto qualora venga utilizzato il Coldtainer. È interessante osservare anche l'aumento della temperatura del prodotto durante la pausa pranzo. Infatti, se il motore del veicolo è spento, il sistema di refrigerazione tradizionale non funziona mentre la PRU Coldtainer continua a refrigerare i prodotti. Questo comportamento particolare garantisce una migliore qualità e conservazione del prodotto nello scenario Coldtainer.



Conclusioni

In conclusione, considerando gli scenari definiti, le soluzioni logistiche che utilizzano il Coldtainer per il trasporto refrigerato comportano una riduzione di circa il 41% del costo totale di proprietà e allo stesso tempo una riduzione di circa il 38% delle emissioni annuali di CO₂. Questi risparmi rilevanti si verificano sia per entrambi i piani di consegna (i.e., lunga distanza e multi-drop) che per entrambe le categorie di prodotti (i.e., refrigerati e congelati). Infatti, la soluzione Coldtainer porta ai seguenti vantaggi:

- Riduzione degli investimenti iniziali
- Costi operativi ridotti
- Costi di manutenzione trascurabili
- Maggiore valore residuo del veicolo poiché non sono necessari interventi irreversibili
- Peso lordo inferiore, il che significa maggiore carico utile, minori consumi e minori emissioni di CO₂
- Riduzione delle perdite di refrigerante
- Migliore conservazione della qualità del prodotto
- Nessuna perdita della garanzia nel caso dell'allestimento tradizionale
- Nessun fermo macchina per le manutenzioni

Nomenclatura

C	carico di refrigerante unitario [kg/m ³ o kg/PRU]
D	domanda annuale del prodotto [kg/anno]
D^T	distanza di riferimento percorsa del veicolo refrigerato [km/biaggio]
$en_{CO_2}^{diesel}$	fattore di emissione del carburante diesel [kgCO ₂ eq/Lt]
$en_{CO_2}^{ref}$	fattore di emissione del refrigerante [kgCO ₂ eq/kg]
e	costo unitario del carburante [€/lt]
fc	consumo unitario di carburante [km/lt]
k	coefficiente di riduzione della qualità [h ⁻¹]
LR	perdite di refrigerante [%/viaggio]
mc	costo per singolo intervento di manutenzione [€/intervento]
N	periodo considerato per le analisi [anni]
$N_{trailer}$	vita utile del veicolo [anni]
N_{trad}	vita utile del sistema di refrigerazione tradizionale [anni]
N_{PRU}	vita utile del PRU [anni]
n^M	numero di interventi manutentivi per il sistema di refrigerazione [anno ⁻¹]
n^{PRU}	numero di PRU trasportate per viaggio
n^{SKU}	numero di SKU trasportate per viaggio
n_{trip}	numero di viaggi all'anno per soddisfare la domanda [viaggi/anno]
p	valore del prodotto [€/kg]
$pc^{trailer}$	costo di acquisto del veicolo [€]
pc^{trad}	costo di acquisto/installazione del sistema di refrigerazione tradizionale [€]
pc^{PRU}	costo di acquisto per ogni PRU [€]
ρ	tasso di sconto [%/anno]
rc	costo unitario del refrigerante [€/kg]
T^T	tempo di riferimento dell'attività di trasporto per viaggio [h/viaggio]
V	volume interno del veicolo [m ³]
W^F	quantità di prodotto trasportato per SKU o PRU [kg]



Riferimenti bibliografici

- [1] Elavarasan R.M., Pugazhendhi R., Jamal T., Dyduch J., Arif M.T., Kumar N.M., Shafiullah G.M., Chopra S.S., Nadarajah M. (2021) Envisioning the UN Sustainable Development Goals (SDGs) through the lens of energy sustainability (SDG 7) in the post-COVID-19 world. *Applied Energy*, 292, 116665.
- [2] Massetti E., Exadaktylos T. (2022) From Crisis to Crisis: The EU in between the Covid, Energy and Inflation Crises (and War). *Journal of Common Market Studies*, 60, 5-11.
- [3] International Energy Agency, *World Energy Outlook 2023*, Oecd/Iea. (2023).
- [4] International Energy Agency, <https://www.iea.org/energy-system/transport>, last access: 30.10.2023
- [5] O. Adekomaya, T. Jamiru, R. Sadiku, Z. Huan, Sustaining the shelf life of fresh food in cold chain – A burden on the environment, *Alexandria Eng. J.* 55 (2016) 1359–1365. doi:10.1016/j.aej.2016.03.024.
- [6] M. Ketzenberg, J. Bloemhof, G. Gaukler, Managing Perishables with Time and Temperature History, *Prod. Oper. Manag.* 24 (2015) 54–70. doi:10.1111/poms.12209.
- [7] S.A. Tassou, G. De-Lille, Y.T. Ge, Food transport refrigeration – Approaches to reduce energy consumption and environmental impacts of road transport, *Appl. Therm. Eng.* 29 (2009) 1467–1477. doi:10.1016/j.applthermaleng.2008.06.027.
- [8] EU Food & Drink Industry, *Data & Trends*, 2018.
- [9] European Commission, *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions on an EU Strategy for Heating and Cooling*, (2016).
- [10] I.P. Koronaki, D. Cowan, G. Maidment, K. Beerman, M. Schreurs, K. Kaar, I. Chaer, G. Gontarz, R.I. Christodoulaki, X. Cazauran, Refrigerant emissions and leakage prevention across Europe e Results from the RealSkillsEurope project, *Energy*. 45 (2012) 71–80. doi:10.1016/j.energy.2012.05.040.



-
- [11] C. Francis, G. Maidment, G. Davies, M. Frigorigène, É. De F-gaz, An investigation of refrigerant leakage in commercial refrigeration Une étude des fuites de frigorigène en froid commercial, *Int. J. Refrig.* 74 (2017) 12–21. doi:10.1016/j.ijrefrig.2016.10.009.
- [12] C. Francis, G. Davies, G. Maidment, J. Evans, E. Hammond, A. Gigiél, Sustainable Refrigerated Road Transport – Investigating the Scale of Carbon Emissions from Direct-Drive Last Mile Refrigerated Vehicles, 2019.