

POLITECNICO DI TORINO

Master of science program in Energy and Nuclear Engineering



Tesi di Laurea Magistrale

**Analisi dell'implementazione del fotovoltaico nel
trasporto refrigerato**

Relatore

Prof. Umberto Lucia

Candidato

Simone Martino

Correlatori

Prof. Marco Masoero

Ing. Giulia Grisolia

Anno Accademico 2021/22

Sommario

Sommario	2
Lista delle figure.....	3
Lista delle tabelle.....	6
1. Abstract	7
2. Introduzione.....	8
3. VIPV.....	10
4. Trasporto refrigerato.....	31
4.1 Gli standard per il trasporto refrigerato.....	34
4.2 Emissioni.....	37
4.3 Veicoli.....	39
4.4 Sistema di refrigerazione VCR	41
4.5 Sistemi di refrigerazione alternativi.....	44
5. Analisi dei precedenti studi relativi all'integrazione del fotovoltaico nel trasporto refrigerato.....	53
6. Analisi dell'impatto ambientale di un sistema di refrigerazione a compressione di vapore	69
6.1 Modellazione del carico termico.....	71
6.2 Risultati	80
7. Stato dell'arte e prospettive future relative alla tecnologia PV utilizzati nei VIPV.....	89
8. LCA.....	93
9. Ringraziamenti	96
10. Referenze.....	97

Lista delle figure

Figura 1: a-Prototipo Lightyear One; b-prototipo Sonmotors; c-prototipo camper Dethleffs; d-prototipo Renault; e-veicolo refrigerato TSSC S-series; f-prototipo Solar Impulse _____	10
Figura 2: Radiazione rilevata in condizioni di cielo nuvoloso e terso in due differenti tragitti	14
Figura 3: Foto dello stesso luogo in inverno (sinistra) ed in estate (destra). Si può notare come l'assenza di fogliame in inverno può avere un notevole effetto nelle strade con molti alberi _____	15
Figura 4: (A)- irradianza misurata sul tetto dell'autoveicolo in condizioni di cielo aperto e nuvoloso. (B)-irradianza relativa, in rapporto a quella media per le differenti condizioni di strada _____	16
Figura 5: Rapporto tra radiazione catturata dai lati della vettura e dal tetto per le differenti tipologie di strada in estate, autunno ed inverno _____	17
Figura 6: Illustrazione della regione anulare per il modello di distribuzione degli oggetti ombreggianti _____	19
Figura 7: Curva di distribuzione degli oggetti ombreggianti utilizzata nel modello _____	19
Figura 8: Assi principali su cui sono disposti i piranometri al fine di convalidare il modello _____	20
Figura 9: Comparazione tra i valori di radiazione solare misurati empiricamente ed i valori stimati attraverso il modello sia per quanto concerne il tetto (a) che le superfici laterali (b) su base mensile _____	20
Figura 10: Comparazione tra i valori di radiazione solare misurati empiricamente ed i valori stimati attraverso il modello sia per quanto concerne il tetto (a) che le superfici laterali (b) su base giornaliera _____	21
Figura 11: Step condotti al fine di ottenere una mappa dell'irradiazione solare per i siti di parcheggio e le strade della città di Lisbona _____	23
Figura 12: Mappa dell'irradiazione solare annua per le strade e i parcheggi della città di Lisbona. Nello zoom a destra si può notare come le strade principali, di maggiori dimensioni, presentano valori nettamente maggiori _____	24
Figura 13: Risparmio di Diesel nell'arco di 10 anni per metro quadro di superficie fotovoltaica installata a seconda della tecnologia, utilizzo e zona _____	26
Figura 14: Esempi dei veicoli presi in analisi: (A) Reanalut Master E-Tech; (B) Framo E-165; (C) Tesla Semi; (D) ZF eTrailer _____	27
Figura 15: schema che mette in risalto le differenti perdite _____	29
Figura 16: Meccanismi per diminuire le perdite per infiltrazioni durante il carico e scarico della merce. (a) tenda a strisce in PVC, (b) meccanismo basato su flussi di aria _____	32
Figura 17: Numero di studi scientifici relativi al trasporto refrigerato pubblicati negli ultimi 60 anni _____	33
Figura 18: categorizzazione veicoli refrigerati (a)<3,5 t, (b) 7,5 t, (c)12 t, (d) articolato (arti) _____	39
Figura 19: Diagramma schematico di un sistema refrigerante a compressione di vapore alimentato da motore diesel _____	42
Figura 20: Esempio di piastre e tubi eutettici _____	44
Figura 21: Configurazione prototipo alimentato attraverso fuel cell _____	45

Figura 22: Esempio di solare fotovoltaico montato su camion per il trasporto refrigerato	46
Figura 23: Sistemi di refrigerazione basati sull'utilizzo di fluidi criogenici. (a) sistema indiretto, (b) sistema diretto	48
Figura 24: Schema funzionamento ciclo Rankine	49
Figura 25: Schema impianto frigorifero ad assorbimento	50
Figura 26: Esempio di veicolo refrigerato totalmente elettrico con relativo plug di ricarica	52
Figura 27: Modello semplificato con volume di controllo utilizzato nello studio	53
Figura 28: Schema del modello a nodi utilizzato nello studio	55
Figura 29: Energia necessaria alla refrigerazione (temperatura interna di -20°C) (refrigerationE), energia prodotta da PV (PVgenE), energia direttamente utilizzata per refrigerazione (PVrefrE), energia utilizzata per caricare il pacco batterie durante la marcia (PVbessE) e durante il fermo (PVrestE), energia fornita dalle batterie (bessE) ed energia fornita dalla rete per caricare le batterie (bessEcharge) per ogni viaggio in ogni mese dell'anno	56
Figura 30: Payback time in funzione dei diversi componenti	58
Figura 31: Payback time in funzione della variazione del costo di elettricità (c_{el}) e diesel (c_{fuel})	58
Figura 32: Performance per ogni singolo viaggio in diverse località	59
Figura 33: Energia necessaria alla refrigerazione (temperatura interna di 0°C) (refrigerationE), energia prodotta da PV (PVgenE), energia direttamente utilizzata per refrigerazione (PVrefrE), energia utilizzata per caricare il pacco batterie durante la marcia (PVbessE) e durante il fermo (PVrestE), energia fornita dalle batterie (bessE) ed energia fornita dalla rete per caricare le batterie (bessEcharge) per ogni viaggio in ogni mese dell'anno	60
Figura 34: Schema del modello a nodi adattato per trasporti a lungo raggio	61
Figura 35: Tragitto simulato nello studio	62
Figura 36: Temperatura esterna e radiazione solare globale per un tipico giorno di luglio lungo l'intero tratto di viaggio	62
Figura 37: Energia necessaria alla refrigerazione (E_{refr}), energia prodotta da PV (E_{PV}), energia direttamente utilizzata per refrigerazione (E_{PVtru}), energia utilizzata per caricare il pacco batterie durante la marcia (E_{PVbess}) e durante il fermo (E_{PVrest}) ed energia fornita dalle batterie (E_{bess}) per manetene una temperatura interna di 0°C per ogni viaggio in ogni mese dell'anno	63
Figura 38: Energia necessaria alla refrigerazione (E_{refr}), energia prodotta da PV (E_{PV}), energia direttamente utilizzata per refrigerazione (E_{PVtru}), energia utilizzata per caricare il pacco batterie durante la marcia (E_{PVbess}) e durante il fermo (E_{PVrest}), energia fornita dalle batterie (E_{bess}) ed energia fornita dalla rete (E_{charge}) per manetene una temperatura interna di -20°C per ogni viaggio in ogni mese dell'anno.	66
Figura 39: Performance per ogni singolo viaggio per differenti tragitti	67
Figura 40: Screenshot del modello sviluppato dalla Brunel University preso come riferimento per la realizzazione del tool excel.	70

Figura 41: Rappresentazione dei carichi termici a cui deve far fronte l'impianto di refrigerazione.	71
Figura 42: Tabella riepilogativa dei calori specifici pre e post refrigerazione per alcuni prodotti alimentari.	75
Figura 43: Alcuni modelli empirici per il calcolo delle perdite per infiltrazioni durante l'apertura portelloni	77
Figura 44: Carico termico su base oraria per merci congelate a 2°C (chilled) e congelate a -20°C (frozen) per 3 differenti tipologie di veicolo	81
Figura 45: Percentuale di impatto di ogni differente causa di carico termico, rispetto al totale, per l'analisi di veicolo rigido da 7,5 t presentata prima, refrigerato a 2°C	82
Figura 46: Percentuale di impatto di ogni differente causa di carico termico, rispetto al totale, per l'analisi di veicolo rigido da 7,5 t presentata prima, refrigerato a 2°C considerando una riduzione del 50% del periodo di apertura portelloni.	83
Figura 47: Consumi medi orari di combustibile per le tre differenti categorie di veicolo ed una temperatura interna al vano refrigerato di 2°C	83
Figura 48: Consumi medi orari di combustibile per le tre differenti categorie di veicolo ed una temperatura interna al vano refrigerato di -20°C	84
Figura 49: Consumi medi orari di combustibile per le tre differenti categorie di veicolo ed una temperatura interna al vano refrigerato di 2°C nel caso di una riduzione del 50% del tempo di apertura portelloni	85
Figura 50: Consumi medi orari di combustibile per le tre differenti categorie di veicolo ed una temperatura interna al vano refrigerato di 2°C nel caso di una riduzione del 50% del tempo di apertura portelloni	85
Figura 51: Emissioni medie orarie di CO ₂ e per le tre differenti categorie di veicolo ed una temperatura interna al vano refrigerato di 2°C	86
Figura 52: Emissioni medie orarie di CO ₂ e per le tre differenti categorie di veicolo ed una temperatura interna al vano refrigerato di -20°C	87
Figura 53: Emissioni medie orarie di CO ₂ e per le tre differenti categorie di veicolo ed una temperatura interna al vano refrigerato di 2°C nel caso di una riduzione del 50% del tempo di apertura portelloni	88
Figura 54: Emissioni medie orarie di CO ₂ e per le tre differenti categorie di veicolo ed una temperatura interna al vano refrigerato di -20°C nel caso di una riduzione del 50% del tempo di apertura portelloni.	88
Figura 55: grafico che mostra come le celle solari più convenzionali presentano una minore efficienza a fronte di un costo minore mentre le celle solari per usi spaziali devono garantire alte efficienze	89
Figura 56: Esempio pannello solare flessibile con celle solari monocristalline Solbian.	92

Lista delle tabelle

Tabella 1: Lista di prototipi e modelli di differenti veicoli dotati di VIPV	11
Tabella 1: Continua	12
Tabella 2: Costi ed efficienze delle differenti tecnologie di pannelli fotovoltaici prese in esame	25
Tabella 3: Energia elettrica, in MWh prodotta in un arco di 10 anni	26
Tabella 4: Veicoli presi in analisi all'interno dello studio con relative caratteristiche dimensionali, di consumo, di potenza fotovoltaica installata e scenari di utilizzo	27
Tabella 5: Driving-to-standby ratio per i differenti veicoli nelle varie fasce di orario	28
Tabella 6: Valori di copertura solare in km ed in percentuale sull'utilizzo annuo ottenuti per le diverse località e per le diverse categorie di veicolo e di utilizzo	30
Tabella 7: Consumi di carburanti per alcuni veicoli con motore ausiliario	37
Tabella 8: Caratteristiche per ciascun veicolo testato	38
Tabella 9: Dimensioni interne di diversi veicoli	40
Tabella 10: Costi del sistema in configurazione base	57
Tabella 11: Performance del sistema in configurazione base	57
Tabella 12: Performance del sistema in configurazione base	64
Tabella 13: Costi del sistema in configurazione base	64
Tabella 14: Costi del sistema in configurazione base considerando anche il viaggio di ritorno refrigerato	65
Tabella 15: Riassunto degli studi effettuati sull'integrazione del fotovoltaico nel trasporto refrigerato.	68
Tabella 16: Esempi di alcuni valori relativi al calore prodotto dalla respirazione, a differenti temperature, per alcuni elementi.	73
Tabella 17: Caratteristiche 3 differenti veicoli presi in analisi.	80
Tabella 18: Efficienze di differenti tecnologie fotovoltaiche	90

1. Abstract

L'intento del seguente lavoro è quello di descrivere lo stato dell'arte dell'implementazione del fotovoltaico nei veicoli (VIPV) analizzando gli studi ed i prototipi effettuati finora, i limiti riscontrati e i punti di cui si ha la necessità di realizzare analisi più approfondite.

Successivamente viene descritto il settore del trasporto refrigerato, le leggi che lo governano, e i sistemi di refrigerazione maggiormente utilizzati al giorno d'oggi. Sono quindi presentate le soluzioni alternative per l'alimentazione del sistema di refrigerazione, descrivendo pro e contro di ciascuna di esse e vi è un approfondimento sulla possibilità di implementare l'utilizzo del fotovoltaico al fine di alimentare il motore elettrico di un sistema a compressione di vapore. Sono approfonditamente analizzati gli studi effettuati fino ad ora su tale implementazione ed i risultati ottenuti in ciascuno studio.

Dopodiché viene descritto il modello seguito al fine di realizzare un semplice tool Excel che fornisca la possibilità di stimare, forniti in input i dati del veicolo, dei prodotti trasportati, delle temperature da mantenere e dell'utilizzo, il risparmio, in termini di emissioni di CO₂ equivalenti, garantito dall'implementazione di un sistema elettrico da abbinare al fotovoltaico rispetto all'utilizzo di un tradizionale sistema a diesel.

Sono quindi descritte differenti tipologie di celle fotovoltaiche presenti oggi e le differenti possibilità di incapsulamento, al fine di poter presentare le soluzioni più attuabili all'implementazione su veicoli. Infine, è analizzato un life cycle assessment con l'intento di verificare la fattibilità, in termini ambientali, di un'implementazione fotovoltaica eseguita, in Germania su piccoli camion atti al trasporto merci.

2. Introduzione

Un approccio intersettoriale è necessario per raggiungere i vari obiettivi dell'Accordo di Parigi del 2015 [1] per il quale dobbiamo limitare l'aumento della temperatura globale sotto i 2°C (possibilmente 1,5°C) entro il 2050, rispetto al periodo preindustriale. Questo può essere fatto con lo sviluppo di un sistema energetico basato sull'elettrificazione di tutti i settori, anche quelli che sono oggi molto poco elettrificati, come i trasporti; secondo la Commissione Europea quelli su strada sono responsabili di più dei $\frac{2}{3}$ dell'intero ammontare di emissioni dovute ai trasporti.

Negli anni sono stati sviluppati anche altri accordi, uno dei più recenti è il Green Deal che è un'iniziativa europea per combattere il cambiamento climatico e la degradazione ambientale [2]. I principali obiettivi del Green Deal [3] sono:

- Passaggio della percentuale di elettrificazione dal 23% effettivo al 30% nel 2030 e il 50% fino al 2050.
- Riduzione delle emissioni del 55% rispetto al 1990 entro il 2030
- Carbon neutrality entro il 2050

Avanzando verso un futuro necessariamente a basse emissioni di carbonio anche il fotovoltaico integrato nei veicoli (VIPV) sicuramente avrà un ruolo chiave in questa transizione. È infatti opportuno ricordare che seppur i veicoli elettrici potranno dare una grossa mano a perseguire la strada verso la decarbonizzazione è focale analizzare da dove proviene l'energia elettrica e l'impatto che ha la tecnologia atta a produrla. Se infatti quell'energia deriva da fonti rinnovabili, al netto delle emissioni spese per realizzare tale tecnologia, si può ritenere una fonte energetica pulita ma se quell'energia deriva da centrali a combustibili fossili tutto cambia radicalmente, seppur consentendo di mantenere rendimenti nettamente maggiori rispetto a motori a combustione interna.

L'International Energy Agency Photovoltaic Power Systems (PVPS) Programme ha dedicato la task 17 specificatamente allo studio di "PV & Transport", indicando la necessita di un interesse collaborativo globale in questo campo al fine di ridurre le emissioni di CO₂ e altri gas climalteranti. I primi sforzi hanno rivelato che è possibile avere alcuni veicoli elettrici indipendenti dalle stazioni di ricarica [4]. Successivamente, nel 2019, il PVPS dell'AIE ha identificato il VIPV come un'area emergente per la diffusione del fotovoltaico [5].

Il fotovoltaico integrato negli autoveicoli potrebbe non solo consentire una maggiore autonomia dei veicoli a trazione elettrica, con conseguente minori tempi di ricarica, ma anche andare a sopperire a tutti i carichi elettrici del veicolo stesso come, per esempio, il fabbisogno per la climatizzazione estiva.

Questo concetto ha un particolare interesse nell'ambito del trasporto refrigerato, in cui il fabbisogno energetico per mantenere le temperature necessarie all'interno dell'ambiente refrigerato è molto elevato.

Il seguente lavoro ha l'intento di analizzare l'attuale stato della tecnologia VIPV ed i risultati raggiunti attraverso i più recenti studi, per successivamente focalizzarsi sull'utilizzo di questa tecnologia proprio al fine di andare a minimizzare i consumi all'interno del trasporto refrigerato. A tale scopo sarà analizzato lo state dell'arte del settore, al fine di avere una contestualizzazione il più precisa possibile, successivamente sarà presentata un'analisi di tutti gli studi presenti in letteratura sulla possibilità di integrazione del fotovoltaico nel trasporto refrigerato. Dopodiché verrà presentato il modello seguito per la realizzazione di un tool excel in grado di stimare il risparmio,

in termini di combustibile e conseguentemente di emissioni di gas climalteranti ottenuto grazie all'utilizzo di un sistema di refrigerazione per il trasporto su strada che non sia alimentato da combustibili fossili ma elettrificato.

3. VIPV

Il concetto di fotovoltaico integrato nei veicoli (vehicle integrated photovoltaic, VIPV) non è un'idea nuova ma solo oggi ha iniziato ad assumere senso concreto, dato l'abbassamento dei costi dei moduli, il peso inferiore, il costo minore dell'elettronica necessaria al controllo e all'integrazione della tecnologia fotovoltaica con i moduli delle batterie, le migliori performance e una vita più lunga con minore manutenzione. Inoltre, la recente crescita dei veicoli elettrici ha portato nuova linfa a questo concetto con molte aziende che stanno investendo ingenti quantità di denaro in ricerca e sviluppo. Il fotovoltaico può essere applicato a svariati tipi di veicoli come auto privati, camper, van, camion, semirimorchi, treni, aerei, battelli e imbarcazioni. Alcuni esempi di queste soluzioni sono mostrati nell'immagine sottostante.



© Lightyear

(a)



© Sono Motors

(b)



© Dethleffs

(c)



© Renault Trucks

(d)



© TSSC

(e)



© @foundationPlanetSolar

(f)

Figura 1: a-Prototipo Lightyear One; b-prototipo Sonmotors; c-prototipo camper Dethleffs; d-prototipo Renault; e-veicolo refrigerato TSSC S-series; f-prototipo Solar Impulse

Nella seguente tabella sono riassunti i principali prototipi, modelli già immessi nel mercato e progetti di ricerca relativi a differenti tipologie di veicoli che integrino la tecnologia fotovoltaica al fine di sopperire a carichi ausiliari o come fonte di produzione energetica al fine di alimentare la propulsione del veicolo stesso.

Tipologia	Produttore	Modello/Progetto	Fase	Anno	Peso del veicolo (t)	Superficie PV (m ²)	Potenza PV (kWp)	Tecnologia/Efficienza	Utilizzo PV
Nave	Eco Ship	-	Sviluppo	2020	-	12000	750	-	Aux.
Nave	Planet Solar	Turanor	PoC	2010	89	616	93,5	Si	Propulsione+Aux.
Nave	Energy Observer	Energy Oserver	PoC	2017	28	130	21	Si	Propulsione+Aux.
Nave	SoelCat	Catamaran 12	PoC	2017	6	-	8,6	-	Propulsione+Aux.
Bus	Fast Concept Car	Starter	PoC	-	-	20,5	3,4	Si mono./21,8%	Aux.
Camper Van	Dethleffs	E-home	PoC	2017	5,6	31,5	3	Si. mono.	Propulsione+Aux.
Auto	Hyundai	Sonata Hybrid	in commercio	2020	-	1,3	0,204	Si mono./22,8%	Propulsione+Aux.
Auto	Skoda	Superb	in commercio	2000	-	-	-	-	Aux.
Auto	Gaia	Wiseman	in commercio	-	0,8	-	0,23	Si mono	-
Auto	Audi	A8, A6, A4	in commercio	1994	-	-	0,04	-	Aux.
Auto	Volkswagen	Touareg, Phateon, Passat	in commercio	1994	-	-	0,04	-	Aux.
Auto	Merceds	E Class, Maybach	in commercio	1994	-	-	0,04	-	Aux.
Auto	Nissan	Leaf-SL model	in commercio	2014	-	-	-	-	Aux.
Auto	Toyota	Toyota Prius IV	in commercio	2017	1,5	0,9	0,18	HIT	Propulsione
Auto	Karma	KarmaRevero	in commercio	2017	2,5	-	0,2	-	Propulsione
Auto	Karma	Fisker	in commercio	2011	-	-	0,12	Si mono	-
Auto	Hyundai/Kia	-	Sviluppo	2018	-	-	-	-	-
Auto	Tesla	CyberTruck	Sviluppo	2019	-	-	-	-	Propulsione
Auto	Fiat	Phylla	Sviluppo	2008	0,75	-	0,34	-	Propulsione
Auto	Toyota	Prius Prime	PoC	2019	-	-	0,86	celle a tripla giunzione/ 34,0%	Propulsione
Auto	Gazzelle Tech	Gazzelle	PoC	2020	0,68	4,0	-	moduli ASCA	Propulsione
Auto	SonoMotors	Sono Motors-Sion	PoC	2018	1,4	7,5	12	Si. Mono./24,0%	Propulsione
Auto	Hanergy	Solar R, O, L, A	PoC	2019	2	da 3,5 a 7,5	da 1 a 2	GaAS flessibile/ 29,0%	Propulsione
Auto	Ford	C-Max	PoC	2014	-	1,5	0,3	Si. mono.	Propulsione
Auto	Bochum Univ.	Solar racers	PoC	2004-2017	0,25-0,36	-	1,2	Si. mono.	Propulsione
Auto	UNSW	Sunswift solar racers	PoC	1994-2017	0,17-0,43	4,0-7,9	0,8-1,8	Si. Mono. 18-23%	Propulsione
Auto	Audi	e-tron quattro	PoC	2015	-	2,5	0,4	-	-
Auto	Venturi	Eclectic	PoC	2006	0,35	2,5	-	-	Propulsione
Auto	Lightyear	One	PoC	2019	2	4,0	-	-	Propulsione

Tabella 1: Lista di prototipi e modelli di differenti veicoli dotati di VIPV

Tipologia	Produttore	Modello/Progetto	Fase	Anno	Peso del veicolo (t)	Superficie PV (m ²)	Potenza PV (kWp)	Tecnologia/Efficienza	Utilizzo PV
Auto	Lightyear	One	PoC	2019	2	4,0	-	-	Propulsione
Auto	Volkswagen	Tiguan GTE	PoC	2015	-	2,1	0,11	-	-
Auto	ISRO	-	PoC	2017	-	-	-	-	Propulsione
Auto	Peugeot	BB1	PoC	2009	-	-	-	16,0%	Aux.
Drone	Atlantik Solar	-	PoC	2017	-	-	-	Si. mono. /23,0%	Propulsione
Drone	NASA	Helios	PoC	2001-2003	0,8	180,0	35,0	-	Propulsione+Aux
Drone	Airbus DS	Zephyr	PoC	2008	0,05	-	-	-	Propulsione+Aux
Aereo	Solar Stratos	Solar Stratos	PoC	2014	0,45	22,0	-	Si. mono. /22,0%	Propulsione+Aux
Aereo	Ocean Vital	Eraole	PoC	2015	0,75	-	5,5	Si. mono. /24,0%	Propulsione+Aux
Aereo	-	Solar Ship	PoC	2014	-	-	-	-	Propulsione
Aereo	Solar impulse	Solar Impulse	PoC	2004	2,3	270,0	-	Si. mono. / 22,6%	Propulsione+Aux.
Veicolo Spaziale	Stratobus	Stratobus	PoC	2018	-	-	-	Si. mono./24,0%	Propulsione+Aux.
Bus	Flixbus	-	PoC	2020	-	-	-	CIGS	-
Treno	India	-	PoC	2017	-	-	-	Si.	Aux.
Treno	SNFC	TER	PoC	2010	-	23,0	3,1	Si. Mono. / 21,0%	Aux.
Treno	Byron Bay	-	PoC	-	-	-	6,5	Si.	Propulsione
Camion	TSSC	TSSC	in commercio	-	-	6,4	1,2	Si.	Aux.
Camion	Volvo	SuperTrud Cab	PoC	2014	-	-	0,27	-	Aux.
Camion	Renault	Optifuel Lab 2	Sviluppo	2014	-	31,1	4,6	Si. Mono. / 22,0%	Aux.
Camion	Renault Volvo Truck	-	PoC	-	-	-	-	CIGS	Aux.
Camion	Navistar	Catalyst	PoC	2017	-	22,4	3,64	-	Aux.
Camion	Daimler Freightliner	SuperTruck	PoC	2015	-	-	-	-	Aux.
Camion	Mitsubishi and Nippon	i Cool Solar	PoC	2010	-	-	0,9	Organic./4,0%	Aux.

Tabella 1: Continua

Come si può notare dalla tabella soprastante la maggior parte dei progetti sono focalizzati relativamente al settore automotive, questo proprio per i motivi già citati, come il netto aumento dei veicoli elettrici, spinti dalla necessità di andare ad abbassare l'utilizzo di combustibili fossili. In Europa i due pionieri nel settore dell'integrazione del fotovoltaico nell'utilizzo automobilistico sono Sono Motors e Lightyear, entrambe stanno sviluppando veicoli dotati di tecnologia fotovoltaica al silicio cristallino. L'auto sviluppata da Sono Motors (Sion) sarà dotata di 1208 kWp di pannelli fotovoltaici, i quali consentiranno una stima di 5800 km all'anno utilizzando solo l'energia solare e fino a 34 km al giorno (stima basata sulla città di Monaco). L'automobile sviluppata da Lightyear (Lightyear One) è stata studiata al fine di essere il più leggera possibile, questa monta 5 m² di pannelli da 215 $\frac{Wp}{m^2}$, i quali possono garantire fino a 70 km giornalieri di autonomia sfruttando solo l'energia solare. Anche le due principali case automobilistiche giapponesi, Toyota Motor Corporation (Toyota) e Nissan Motor Corporation (Nissan), stanno sviluppando automobili dotate di tecnologia fotovoltaica integrata. Toyota ha sviluppato la Toyota Prius, che presenta 860 Wp mentre Nissan ha sviluppato la e-NV200 dotata di 1150 Wp.

L'integrazione del fotovoltaico su veicoli può consentire di abbassare i consumi dei dispositivi ausiliari, ridurre la frequenza ed i tempi di ricarica oltre che rendere meno impattante la ricarica sulla rete elettrica. È sempre infatti opportuno ricordare che la sostenibilità dei veicoli elettrici dipende in gran parte dalla provenienza dell'energia elettrica, con la possibilità attraverso questa soluzione di essere totalmente rinnovabile.

Tuttavia, gli studi presenti in letteratura sono ancora pochi e non vi sono modelli univoci per stimare l'effetto di soluzioni VIPV, questo non permette di avere idee chiare delle performance che questa integrazione può avere a seconda dei diversi tipi di veicoli e delle diverse zone del globo e vi è la necessità di studi più approfonditi sugli impatti che l'integrazione del fotovoltaico potrebbe avere in termini di riduzione delle emissioni climalteranti.

Un'analisi del 2022 [6] ha tentato di sopperire in parte a queste mancanze, con l'obiettivo di ottenere una sorta di fattibilità dell'integrazione del fotovoltaico (solo su tetto) su auto e van elettrici, per diverse condizioni di utilizzo ed in località diverse, in maniera da poter coprire profili climatici differenti; tuttavia non è stato tenuto conto dello shading, né in marcia né in parcheggio. Le località selezionate sono state: Phoenix, Manta, Glasgow, Pontevedra, Bratislava e Lhasa (con valori di irradianza solare media annua compresi tra $870 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}$ e $2140 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}$). I valori di irradianza sono stati ottenuti attraverso l'utilizzo di PVGIS. Per quanto riguarda il tragitto percorso si è scelto di utilizzare per tutte le località lo stesso percorso, senza tenere conto della reale struttura urbanistica delle diverse città. Nell'analisi si è tenuto conto dell'effetto della temperatura e del vento (si è considerata una velocità del vento pari a quella del veicolo quando questo in movimento e pari a quella ambiente quando il veicolo è in parcheggio) e si sono selezionati dei modelli di utilizzo tipici per auto e van. Durante i giorni lavorativi si è considerato un utilizzo casa-lavoro con parcheggio all'aperto, durante il fine settimana si è supposto un utilizzo finalizzato a piccoli viaggi o spostamenti vari, questo si traduce in un utilizzo medio del veicolo pari a 40 km giornalieri. Per quanto concerne i veicoli commerciali si è supposto un utilizzo di otto ore al giorno durante i giorni lavorativi, con frequenti soste per carico e scarico merci. per una media di 61 km giornalieri. Si è considerata un'area disponibile pari a 2 m^2 per le auto e $2,86 \text{ m}^2$ per i van, si è quindi condotto lo studio considerando 454 Wp per le auto e 649 Wp per i van, ipotizzando un'efficienza dei moduli fotovoltaici pari a 22,7%, infine è stato considerato un fattore di correzione pari a 0,9 per tenere conto della curvatura della carrozzeria nel caso delle auto mentre per quanto concerne i van questo coefficiente non è stato considerato. Come ci si può facilmente aspettare, nei climi con maggiore irradianza solare media i chilometri percorsi grazie all'integrazione del fotovoltaico sono maggiori, consentendo un minore payback time (tempo di ritorno dell'investimento), ma anche la temperatura media e la conformazione geologica del territorio giocano un ruolo importante. Ovviamente le performance varieranno in base alla stagione, con una copertura solare che può variare tra lo 0% delle latitudini maggiori in inverno e il 40% in estate per le zone con maggiore irradianza, consentendo di ottenere tra i 1800 km (Glasgow) ed i 5100 km (Phoenix) grazie alla produzione da fotovoltaico. Questo porta a coprire il 35% dei km annuali percorsi, per le regioni più favorevoli, solo grazie al fotovoltaico. Per quanto concerne l'installazione su van, pur essendo maggiore la producibilità, grazie ad una maggiore area sfruttabile, i consumi maggiori e soprattutto il maggior utilizzo giornaliero di questo tipo di veicoli (tipicamente a fine commerciali) portano ad una percentuale di copertura solare tra il 10% ed il 23%, a fronte però di circa il doppio dei km annui percorsi.

Per quanto concerne i costi di questi veicoli invece è ancora più difficile reperire dati. Secondo alcuni rumors il prezzo di lancio della Lightyear One dovrebbe essere di circa 150.000 \$ mentre quello della Sono Sion di circa 25.000 €. La Toyota Prius PHEV permette di essere equipaggiata con un modulo fotovoltaico da 180 Wp al costo di 3000 € mentre la Hyundai Ioniq 5 offre un pannello da 205 Wp per 1290 €. Sicuramente con l'aumentare del numero di veicoli elettrici in circolazione e con l'abbassamento del costo della tecnologia i prezzi si abbasseranno nei prossimi anni.

In letteratura sono presenti singoli studi relativi a verificare l'effetto del vento sulle performance dei VIPV [7], ad analizzare i tempi di ritorno degli investimenti [8], l'influenza della curvatura delle carrozzerie dei veicoli e la possibilità di installazione anche laterale e non solo sul tetto [9,10]. Tuttavia, ciò che ha un ruolo chiave è l'analisi dell'irradianza ricevuta in quanto l'impatto dell'ombreggiamento dovuto agli edifici può essere molto influente, particolarmente in zone densamente popolate e stimarlo risulta difficile. Questa difficoltà è ancora più accresciuta se si vuole stimare l'irradianza ricevuta durante la marcia e non soltanto quella durante il parcheggio all'aperto.

Diversi approcci sono stati adottati per cercare di risolvere questa problematica ma ulteriori studi sono necessari al fine di realizzare modelli univoci che riescano ad integrare tutte le voci citate.

Uno studio eseguito dall'università di Singapore ha provato a quantificare la variazione di irradianza, sul tetto di una macchina, in un clima tropicale, sia attraverso una simulazione 3D che attraverso dati empirici ottenuti con l'utilizzo di un piranometro. L'analisi è stata condotta sia in giornate soleggiate che in giornate nuvolose. I risultati ottenuti hanno evidenziato che l'ombreggiatura dovuta agli edifici ha un impatto maggiore se essi sono locati a est-ovest in una strada che procede verticalmente rispetto agli edifici locati a nord-sud in una strada che procede orizzontalmente ed inoltre le giornate nuvolose possono arrivare ad avere un impatto di riduzione fino al 20% rispetto ad una giornata soleggiata nello stesso periodo ma questo valore è fortemente influenzato dall'orientazione degli edifici ed anche dall'altitudine solare, quindi conseguentemente dal periodo dell'anno [11].

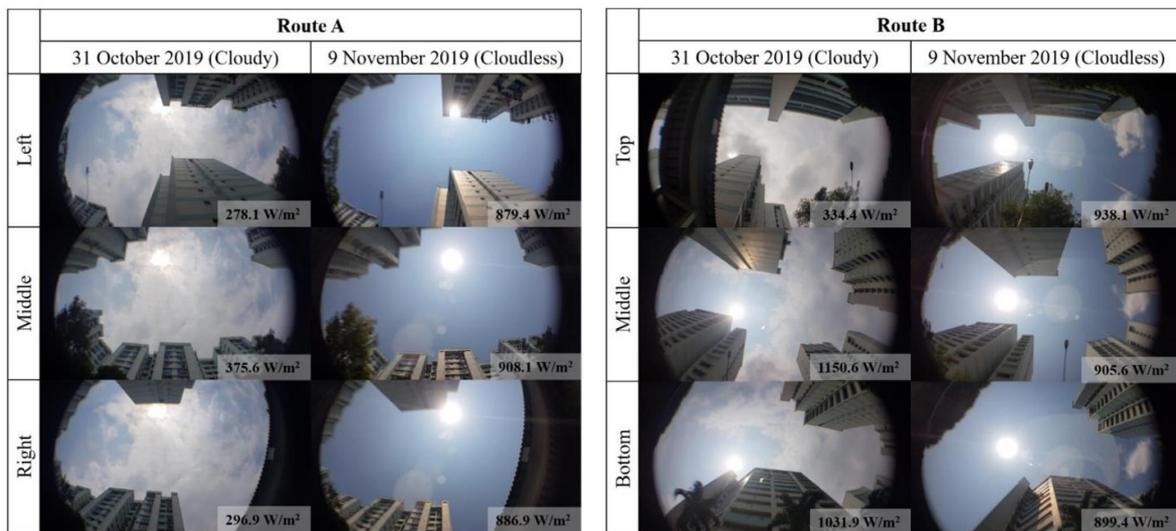


Figura 2: Radiazione rilevata in condizioni di cielo nuvoloso e terso in due differenti tragitti

In un test sperimentale del 2021[12] è stato riscontrato, attraverso un setup composto da 3 piranometri (uno sul tetto e due sui rispettivi lati di un'auto) e l'utilizzo di un sistema GPS, che le condizioni climatiche possono essere addirittura più cruciali della stagione. In questo test è stata analizzata la radiazione solare che colpiva l'auto lungo un tragitto di 21 km. Il tragitto comprendeva strade strette, con un limite di velocità pari a $30 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ ed un'elevata densità di edifici, ad una distanza dalla vettura minore rispetto all'altezza dell'edificio stesso, strade di medie dimensioni, a doppia corsia per senso di circolazione, con limite di $50 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ e con edifici distanti dalla vettura più dell'altezza dell'edificio stesso, ed infine strade larghe con limiti di $80 \frac{\text{km}}{\text{h}}$, in questo caso non erano presenti edifici nelle vicinanze che potessero ombreggiare il veicolo ma erano presenti sottopassaggi. Il tragitto è stato scelto in maniera tale da garantire che la distanza percorsa in direzione nord-sud (e viceversa) per ognuna delle tre categorie di strade fosse circa uguale a quella in direzione est-ovest. Sono stati condotti due test per ogni stagione: uno in condizioni di cielo terso ed uno in condizioni di cielo nuvoloso.



Figura 3: Foto dello stesso luogo in inverno (sinistra) ed in estate (destra).

Si può notare come l'assenza di fogliame in inverno può avere un notevole effetto nelle strade con molti alberi

A causa dell'irradianza minore l'influenza delle condizioni climatiche è meno significativa in autunno e quasi trascurabile in inverno, così come l'influenza della vegetazione. Inoltre, nei giorni invernali la presenza delle nuvole aumenta lo scattering aumentando la radiazione diffusa e questo va a compensare in parte la bassa radiazione diretta. A causa della maggiore densità degli edifici e della loro vicinanza all'autoveicolo la radiazione nelle strade più strette è minore, la presenza di nuvole in questo caso dovrebbe essere meno impattante ed infatti così si evince anche dalle misurazioni, fatta eccezione per l'autunno. Questo potrebbe essere spiegato dalla riflessione degli edifici, in particolare la probabilità che la radiazione riflessa dagli edifici colpisca l'auto dipende dall'altezza solare, dall'altezza e dall'albedo degli edifici e dalla distanza tra edifici e auto; in autunno l'altezza solare è di circa 45° mentre in inverno ed estate è rispettivamente molto minore e molto maggiore, non consentendo a questo effetto di essere presente in quest'ultime due stagioni. Per quanto concerne l'estate la differenza di radiazione tra cielo terso e nuvoloso è ovviamente molto impattante (la radiazione in condizioni di cielo limpido è circa sette volte quella con cielo nuvoloso).

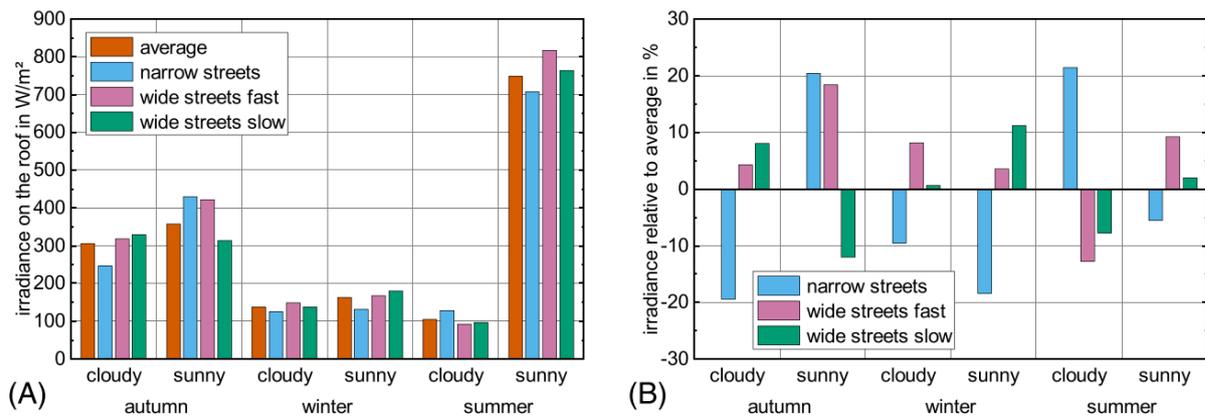


Figura 4: (A)- irradianza misurata sul tetto dell'autoveicolo in condizioni di cielo aperto e nuvoloso. (B)-irradianza relativa, in rapporto a quella media per le differenti condizioni di strada.

L'irradianza media sul tetto raggiunge valori pari a 2,38 volte quella media sui lati del veicolo. L'irradianza media sui lati è stata misurata pari al 43.1% di quella sul tetto, seppur con nette differenze in inverno (fino al 92%) ed in estate (26%). Nei giorni soleggiati invernali la radiazione sui lati aumenta grazie alla minore altitudine solare (tra i 16° ed i 22° per queste zone). Nei giorni estivi, al contrario, la percentuale di radiazione catturata dai lati è bassa anche a causa degli alti valori di altitudine solare. Nei giorni di nuvoloso il rapporto tra la radiazione catturata sui lati e quella catturata sul tetto aumenta grazie al maggiore scattering. È opportuno, tuttavia, notare che lo studio è stato condotto in Germania e questi valori sicuramente varierebbero notevolmente ad altitudini differenti. Per quanto concerne le differenti tipologie di strada, come ci si potrebbe attendere, l'influenza di edifici nelle immediate vicinanze dell'autovettura gioca un ruolo rilevante per quanto concerne la radiazione sui lati ma l'influenza della tipologia di strada è comunque bassa in confronto all'influenza delle condizioni climatiche e delle differenti stagioni.

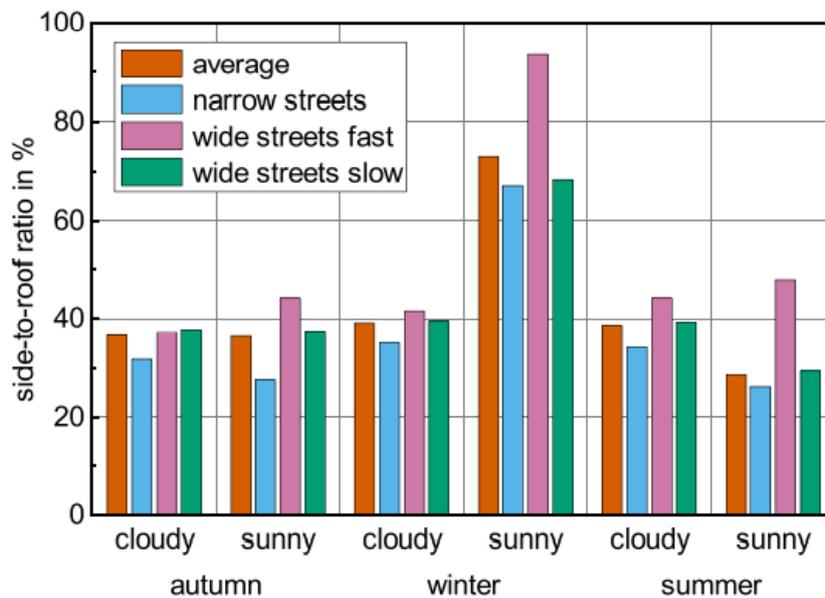


Figura 5: Rapporto tra radiazione catturata dai lati della vettura e dal tetto per le differenti tipologie di strada in estate, autunno e inverno

Inoltre, il test ha portato in luce le frequenze con cui cambia la radiazione, che in alcuni casi sono significativamente maggiori rispetto all'uso stazionario (basse frequenze, circa 1 Hz). In certe situazioni la radiazione può cambiare a frequenze superiori ai 100 Hz. La frequenza con cui varia la radiazione solare dipende fortemente dall'altitudine solare, dalle condizioni meteo e dalla tipologia di strada. Frequenze più alte sono raggiunte per giornate soleggiate ed in strade con alti limiti di velocità. Frequenze più alte sono raggiunte sui lati dell'autoveicolo rispetto al tetto. Questo implica un miglioramento delle frequenze di lavoro degli MPPT, che possono avere impatti importanti.

Un altro studio, del 2018, ha provato a stimare l'efficacia dell'integrazione del fotovoltaico su veicoli in condizioni reali, quindi stimando l'effetto dell'ombreggiamento, sia in parcheggio che in marcia, sull'irradianza, per zone a latitudini differenti [13]. Per condurre questa analisi è stato scelto di partire dai valori di irradianza ottenuti da PVGIS e, sotto alcune ipotesi, è stato ricavato un coefficiente che tenesse conto del tempo in cui le auto parcheggiate incorrono in ombreggiamento (44%) metà di questo tempo è stato considerato dopo l'alba e metà prima del tramonto. Questo valore è stato calcolato sulla base di un'analisi trigonometrica ipotizzando un'altezza media degli ostacoli pari a 7,5 m, un'altezza media del veicolo pari a 1,5 m, una larghezza della strada, e conseguentemente una distanza tra due edifici pari a 8 m e una larghezza del veicolo pari a 2 m. Un'altra forte semplificazione adottata è stata quella di considerare le strade sempre orientate in direzione nord-sud. Oltre a questo valore è stato tenuto conto di un altro coefficiente che tenesse conto delle ore in cui le auto sono parcheggiate al chiuso, questo ottenuto su base empirica attraverso l'analisi dei dati GPS di 52835 veicoli nella provincia di Modena e 40459 veicoli nella

provincia di Firenze. Per quanto concerne le auto in marcia è stato scelto di mediare l'irradianza totale rispetto al tempo che le auto trascorrono in città, considerando un ombreggiamento uguale a quello ottenuto per le condizioni di parcheggio, e quello che trascorrono fuori città, senza considerare ombreggiamento.

I risultati ottenuti mostrano che esiste un'elevata variabilità dell'irradianza annuale media tra gli Stati membri e la media ottenuta per l'intera Europa è $143 \frac{W}{m^2}$, considerando l'effetto degli ombreggiamenti, seppur con le forti assunzioni sopracitate, si è potuto quindi ottenere un valore medio di radiazione ottenibile all'interno dell'Europa, pari a $83,5 \frac{W}{m^2}$ uguale ad un utilizzo medio di circa il 58% di quella disponibile.

Nel 2020 Kenji Araki, Yasuyuki Ota e Masafumi Yamaguchi in uno studio eseguito da Toyota e dall'università di Miyazaki hanno provato a modellare la radiazione solare su veicoli in movimento attraverso un sistema basato sulla distribuzione casuale sia dei veicoli stessi che delle superfici ombreggianti. Inoltre, è stato tenuto conto anche della forma della carrozzeria, differente rispetto ad un pannello piano e quindi, in molti casi, causa di perdite maggiori dovuti a "cosine-loss" ed auto ombreggiamento [14].

Questo modello ha l'intento di tenere conto di:

- Ombreggiamento attorno al veicolo dovuto a edifici e vegetazione
- Superficie curva della carrozzeria dell'autoveicolo
- Variazione casuale dell'orientazione dell'autoveicolo durante la marcia

L'effetto dell'ombreggiamento è, come precedentemente descritto, di difficile stima perché dipendente da molti fattori differenti, in questo caso l'approccio è stato quello di fare affidamento su un modello di probabilità, basato su alcuni modelli statistici che distribuiscano casualmente l'altezza e la densità degli oggetti che provocano ombreggiatura in maniera indipendente dall'orientamento dell'autoveicolo. Prendendo in esame una regione anulare gli edifici o gli altri oggetti causanti ombreggiatura sono stati supposti distribuiti casualmente in questa regione, con un'altezza anch'essa casuale. La probabilità di ombreggiatura può essere approssimata con una relazione lineare, questo perché si presuppone che l'altezza dell'oggetto ombreggiante sia inversamente proporzionale alla distanza dalla vettura e che il numero di oggetti che causano ombreggiatura lungo l'arco della distanza data è proporzionale alla distanza dalla vettura in modo che il prodotto dei due fattori sia costante.

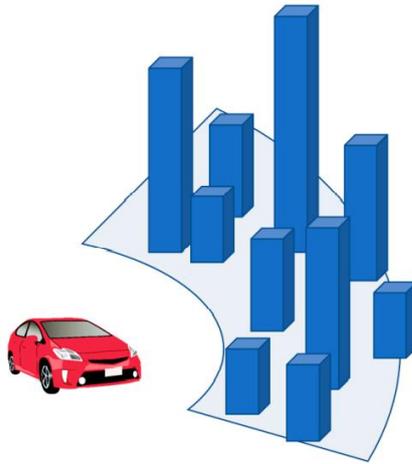


Figura 6: Illustrazione della regione anulare per il modello di distribuzione degli oggetti ombreggianti

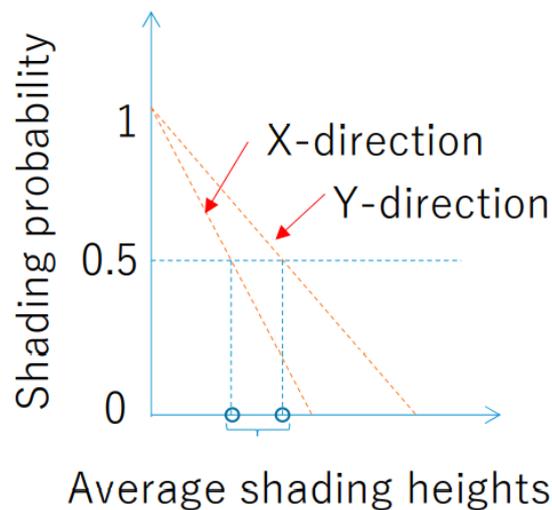


Figura 7: Curva di distribuzione degli oggetti ombreggianti utilizzata nel modello

Per modellare la radiazione solare catturata dall'autoveicolo è stato scelto di considerare un coefficiente di riflessione pari a 0,25 ed una riflessione Lambertiana. Successivamente è stata, inoltre, effettuata la misurazione dell'irraggiamento solare sul tetto di un'auto, nella città di Miyazaki, in Giappone, utilizzando cinque piranometri posizionati lungo i cinque assi della macchina per un periodo di un anno. Queste misurazioni sono state utilizzate per convalidare il modello

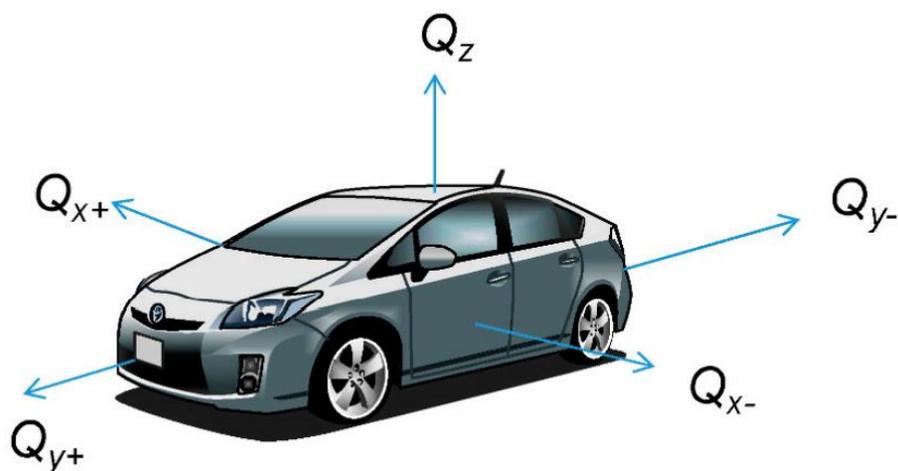


Figura 8: Assi principali su cui sono disposti i piranometri al fine di convalidare il modello

I valori di intensità di radiazione misurati dai piranometri sono successivamente stati confrontati con quelli stimati dal modello, sia per quanto concerne la radiazione sul tetto dell'auto che sulle superfici laterali. Le stime ottenuti dal modello sono risultati assolutamente coerenti con i valori empirici, come si può evincere dall'immagine sottostante.

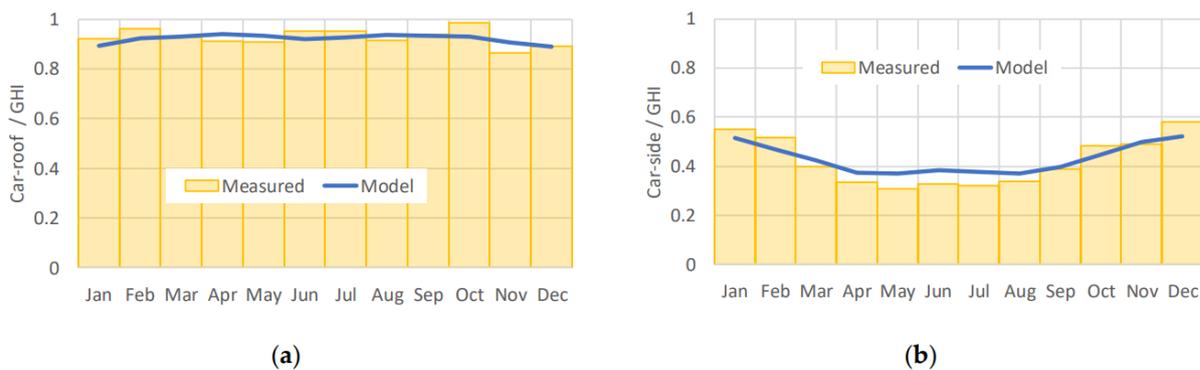


Figura 9: Comparazione tra i valori di radiazione solare misurati empiricamente ed i valori stimati attraverso il modello sia per quanto concerne il tetto (a) che le superfici laterali (b) su base mensile

La stessa comparazione è stata eseguita anche su base giornaliera. Siccome le singole giornate sono differenti rispetto a quelle presenti nei database vi sono differenze; tuttavia, la distribuzione dei valori di irradianza misurati empiricamente è circa la stessa di quella dei valori stimati dal modello.

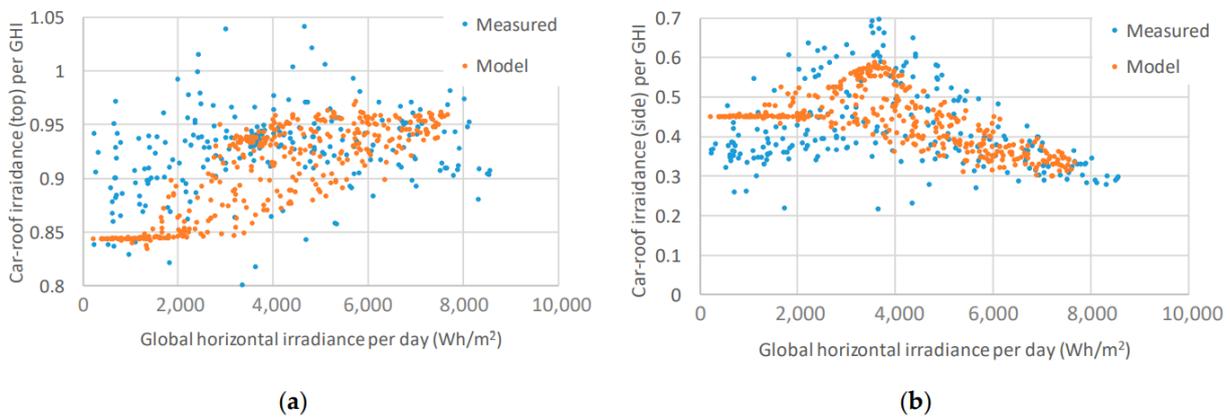


Figura 10: Comparazione tra i valori di radiazione solare misurati empiricamente ed i valori stimati attraverso il modello sia per quanto concerne il tetto (a) che le superfici laterali (b) su base giornaliera

Come già dimostrato anche dagli studi precedenti l'impatto delle ombreggiature e della curvatura aumenta al diminuire dell'altezza solare, quindi a latitudini maggiori. Si è potuto concludere che questo è ad oggi il modello che meglio è in grado di approssimare la radiazione agente su un veicolo in movimento tenendo conto dell'ombreggiamento dovuto da edifici e vegetazione ed eventualmente anche della forma superficie della vettura. Tuttavia, anch'esso necessita di futuri miglioramenti ed implementazione al fine di renderlo il più possibile utile per stimare gli effetti dell'installazione della tecnologia fotovoltaica su un autoveicolo. Alcune dei futuri miglioramenti già preventivati saranno:

- Possibilità di implementare angoli di ombreggiatura maggiori di 45°.
- Possibilità di stimare gli effetti delle ombreggiature parziali
- Possibilità di andare a modificare la densità degli edifici che causano ombreggiatura
- Possibilità di tenere conto delle specifiche reali curvature delle carrozzerie.

Inoltre, questo modello ha ancora il limite di essere basato su stime probabilistiche e non può essere applicato ad uno specifico tragitto.

Nel 2021 uno studio eseguito per la città di Lisbona (Portogallo) ha utilizzato un approccio basato sull'utilizzo di software GIS (geographical information systems) per calcolare il potenziale solare (utilizzando il tool per la radiazione solare di ArcGis) [15]. Anche in questo caso si è tentato di tenere conto degli ombreggiamenti durante la marcia e durante il parcheggio ma stimando questi valori in termini di perdita percentuale. La città di Lisbona presenta delle condizioni favorevoli in quanto presenta un irraggiamento medio annuo di $1,8 \frac{\text{MWh}}{\text{m}^2}$ e un'altezza solare compresa tra 74° in estate e 27° in inverno. Per condurre questo studio sono stati utilizzati due dataset GIS, entrambi scaricabili gratuitamente attraverso il sito della città di Lisbona: il primo includeva i siti di parcheggio e le strade mentre il

secondo includeva un modello digitale della superficie del territorio (Digital Surface Model, DSM) ottenuto attraverso tecnologia LIDAR (Light Detection And Ranging), quest'ultimo descriveva l'altimetria di tutta la città con un elevato grado di dettaglio. Grazie a questo secondo dataset è stato possibile stimare le ombreggiature ed il loro effetto ma è opportuno far notare che non è stata considerata l'altezza dell'autoveicolo. Questo porta ad una sottostima attorno al 5% nel caso di automobili ma più elevata nel caso di veicolo con dimensioni maggiori come per esempio furgoni, van e camion. Per considerare gli effetti della vegetazione è stato scelto di eliminare tutti i parcheggi che erano anche solo parzialmente ombreggiati dal totale dei parcheggi disponibili, utilizzati per calcolare la radiazione catturata dalle auto in sosta all'interno dello studio. Seguendo questa metodologia è stata creata una mappa solare, che contenesse i valori di irraggiamento mensile, per ciascun mese dell'anno e per l'intera città. Dopodiché le 12 mappe ottenute sono state sommate al fine di ottenere un'unica mappa con i valori di irraggiamento annuali. Quest'ultima mappa è stata sovrapposta alle due mappe dei siti di parcheggio (privata dei siti che presentavano vegetazione che potesse essere causa di ombreggiamento) e delle strade della città di Lisbona.

Nello schema dell'immagine sottostante si possono osservare gli step condotti.

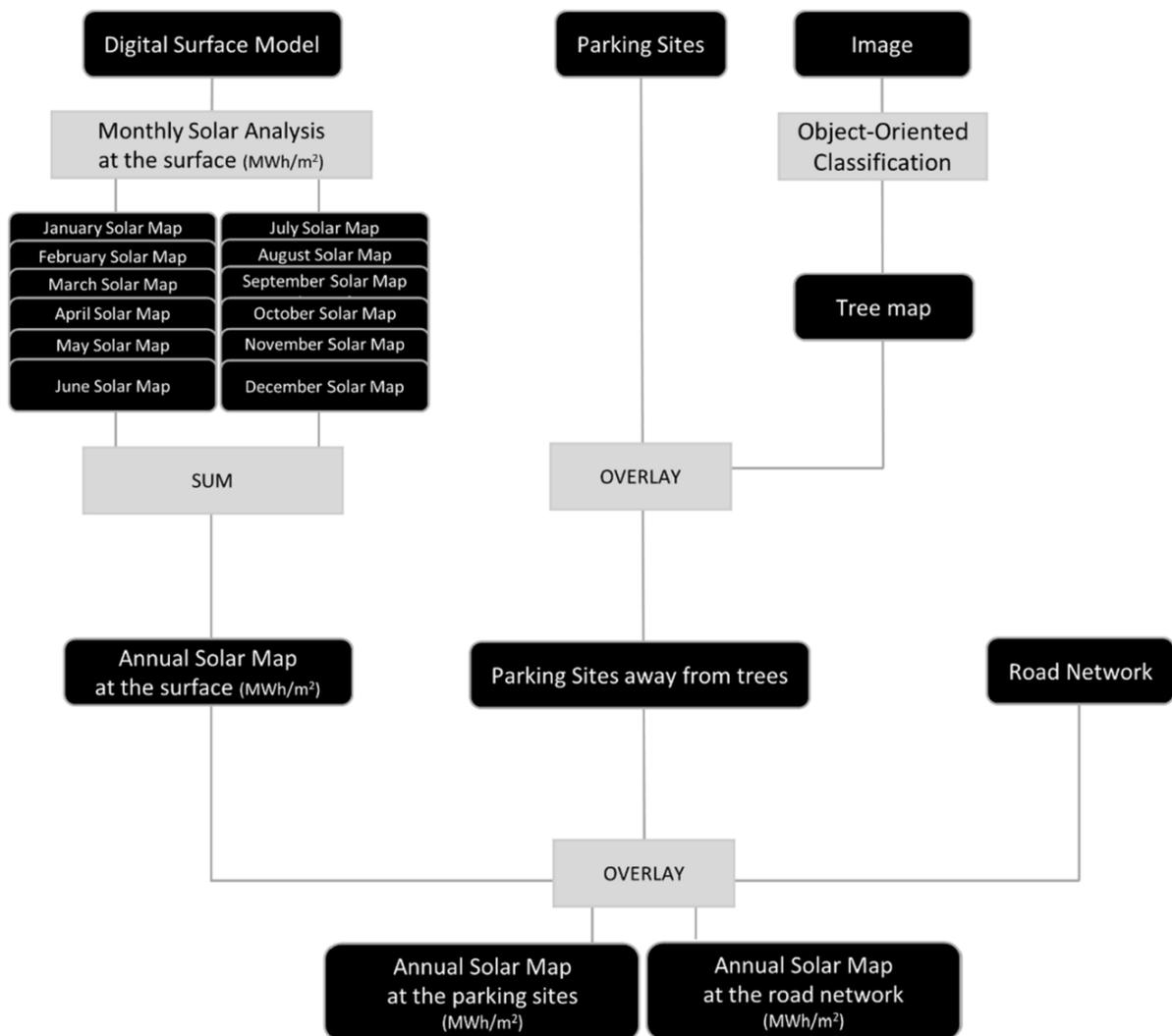


Figura 11: Step condotti al fine di ottenere una mappa dell'irradiazione solare per i siti di parcheggio e le strade della città di Lisbona

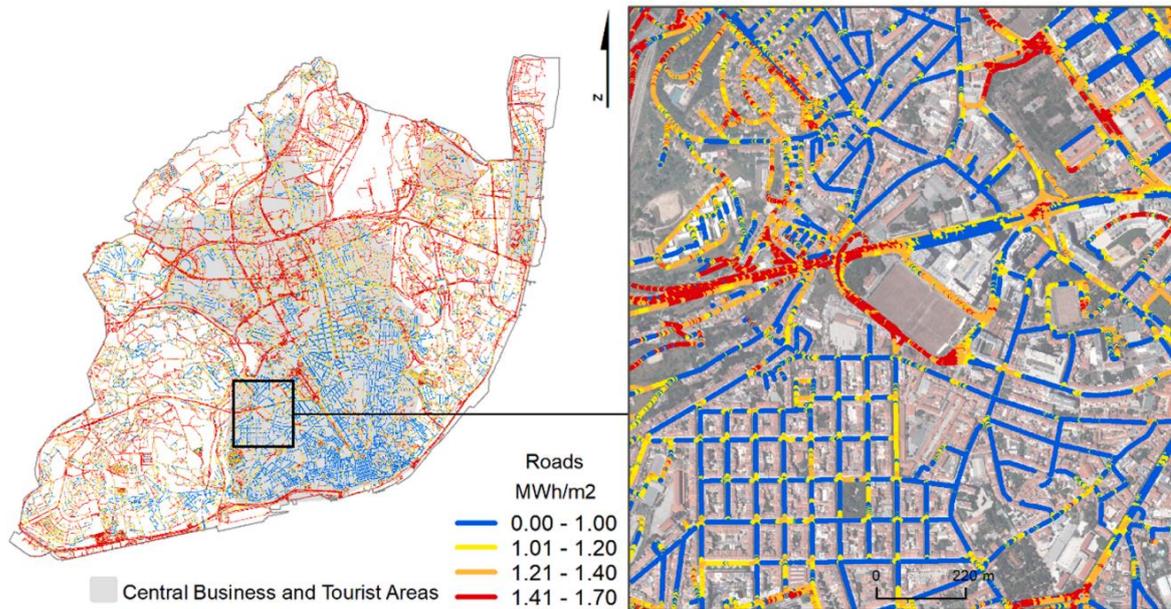


Figura 12: Mappa dell'irradiazione solare annua per le strade e i parcheggi della città di Lisbona. Nello zoom a destra si può notare come le stradi principali, di maggiori dimensioni, presentano valori nettamente maggiori.

I risultati mostrano che l'effetto di una conformazione morfologica maggiormente densa all'interno della città ovviamente diminuisce l'irraggiamento (livelli di ombreggiatura più elevati) per circa l'8% e il 12% dei luoghi, rispettivamente per l'estate e l'inverno. La diminuzione relativa del l'irraggiamento è molto più grave in inverno (circa il 60%, in media) che in estate (circa il 20% in estate). Questo porta ad una riduzione della risorsa del 24%-28%. Assumendo che, in media, un'auto elettrica consumi 13 kWh/100 km (valore medio per l'attuale stato dell'arte) e che abbia la possibilità di installare 1 kWp di potenza fotovoltaica è possibile fare alcune riflessioni su quanto l'integrazione del fotovoltaico possa influire sull'autonomia dell'autovettura, estendendone i chilometri percorribili con una singola ricarica e diminuendo l'impatto ambientale (al netto degli impatti di produzione dei pannelli fotovoltaici). All'interno di questo studio è stato considerato un contributo aggiuntivo, pari al 25%, di perdite per considerare la curvatura della carrozzeria dell'autoveicolo, l'ombreggiamento parziale, le perdite per mismatch e le perdite aggiuntive dovute alla trasformazione dell'energia elettrica. All'interno di questa analisi non è stato tenuto conto delle dimensioni delle batterie, il che potrebbe portare ad una sovrastima delle prestazioni soprattutto nel periodo estivo. Inoltre, è stato considerato che il 20% dei parcheggi annuali venga effettuato in parcheggi coperti. Sotto queste ipotesi, l'implementazione della tecnologia fotovoltaica nei veicoli porterebbe ad un guadagno medio tra i 10 km ed i 18 km giornalieri (tra i 20 km ed i 30 km giornalieri in estate ed i 2 km e i 5 km giornalieri in inverno in base alle differenti zone). La percorrenza media giornaliera nella città di Lisbona è di circa 30 km; l'implementazione del fotovoltaico potrebbe portare quindi a diminuire la necessità di energia dalla rete, nel caso di veicoli elettrici, per percentuali comprese tra il 30% ed il 60% in base all'utilizzo [15].

L'idea di sfruttare il concetto di VIPV per l'utilizzo in tir, camion e van, non solo nell'ottica di mobilità elettrica ma anche nell'ottica di sopperire agli ingenti carichi elettrici che richiedono, non è una novità.

Uno studio eseguito sull'integrazione del fotovoltaico su camion è stato condotto nel 2014 con l'intento di stimare l'energia prodotta, i costi di installazione, la riduzione di consumo di carburante incluso il risparmio in termini monetari, il payback time e la riduzione di CO2 durante l'intera vita del veicolo ottenibili su differenti tipologie di veicoli, con diversi utilizzi (intera settimana o solo giorni lavorativi, dal lunedì al venerdì) e in diverse città a latitudini differenti (Bolzano, Monaco e Mombasa) [16]. In questa analisi è stato deciso di simulare un sistema VIPV applicato a veicoli con motore a combustione interna con l'intento di andare a sopperire ad i carichi elettrici attraverso l'energia elettrica prodotta dal fotovoltaico e conseguentemente andando a ridurre i carichi sull'alternatore e quindi sul motore stesso. L'analisi è stata applicata a bus e camion. Tutto lo studio è stato condotto attraverso i dati di irradianza ottenuti attraverso il software PVGIS, trascurando tutti gli effetti legati al solare dinamico, come ombreggiature (si è supposto un uso prevalentemente fuori da grandi centri abitati). È stato supposto un valore di performance ratio (PR) pari a 0,9, giustificandolo grazie alle basse temperature dei pannelli, raffreddati grazie al vento durante la marcia e grazie all'utilizzo di un sistema completamente in corrente continua, senza quindi perdite correlate all'alternatore. Per stimare il risparmio di carburante è stato calcolato il consumo aggiuntivo che si avrebbe avuto al fine di produrre la stessa quantità di energia elettrica supponendo un'efficienza del motore diesel pari a 40% ed un'efficienza dell'alternatore pari a 75%, quindi un'efficienza globale del sistema motore-alternatore pari a 30%. È stata assunta una densità energetica del Diesel pari a $9,82 \frac{\text{kWh}}{\text{l}}$. Per tutti gli scenari presi in analisi sono state inoltre utilizzate tre differenti configurazioni: pannelli monocristallini, policristallini e thin film stimando rispettivamente delle efficienze e dei costi pari ai valori riportati nella tabella sottostante.

Tecnologia PV	Efficienza	Costi di installazione [€/Wp]
mc-Si (silicio monocristallino)	18%	1,75
pc-Si (silicio policristallino)	14%	1,50
TF (thin film)	11%	1,40

Tabella 2: Costi ed efficienze delle differenti tecnologie di pannelli fotovoltaici prese in esame

È opportuno ricordare che ad oggi questi costi hanno raggiunto valori inferiori. Nel caso della tecnologia monocristallina si possono stimare prezzi attorno ad 1 €/kW_p.

Relativamente alla produzione annua si sono ricavati valori compresi 100 kWh e 240 kWh annui per ogni metro quadro di superficie fotovoltaica installata nel caso di Bolzano come località di utilizzo del veicolo, valori compresi tra $80 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}$ e $190 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}$ annui per Monaco e valori compresi tra

150 $\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}$ e 350 $\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}$ annui per Mombasa. Questo si traduce in un risparmio compreso tra i 35 l e 80 l di Diesel per ogni metro quadro di superficie fotovoltaica installata sul veicolo all'anno per la località di Bolzano e tra i 52 l e 120 litri per Mombasa.

Scenario	365 giorni di utilizzo			Utilizzo 5 giorni lavorativi		
	mc-Si	pc-Si	TF	mc-Si	pc-Si	TF
1.1	1,8	1,4	1,1	1,3	1,0	0,8
1.2	27,4	21,3	16,7	19,5	15,2	11,9
2.1	2,3	1,8	1,4	1,6	1,3	1,0
2.2	34,2	26,6	20,9	24,4	19,0	14,9
3.1	3,4	2,7	2,1	2,4	1,9	1,5
3.2	51,3	39,9	31,4	36,6	28,4	22,3

Tabella 3: Energia elettrica, in MWh prodotta in un arco di 10 anni

Per quanto concerne il payback time dell'installazione (a parità di area di fotovoltaica installata) questo ovviamente dipende dalla località e dall'uso che si fa del mezzo, per un utilizzo giornaliero lavorativo esso parte da 1,8 anni, con una media di 3,7 anni. Questi valori ad oggi, con l'enorme aumento dei costi del combustibile, si presenterebbero sicuramente molto più bassi. Ovviamente questi valori scendono all'aumentare dell'utilizzo del veicolo. Queste soluzioni porterebbero inoltre ad un risparmio compreso tra le 20 e le 50 tonnellate di CO₂ in un arco di vita di 10 anni [16].

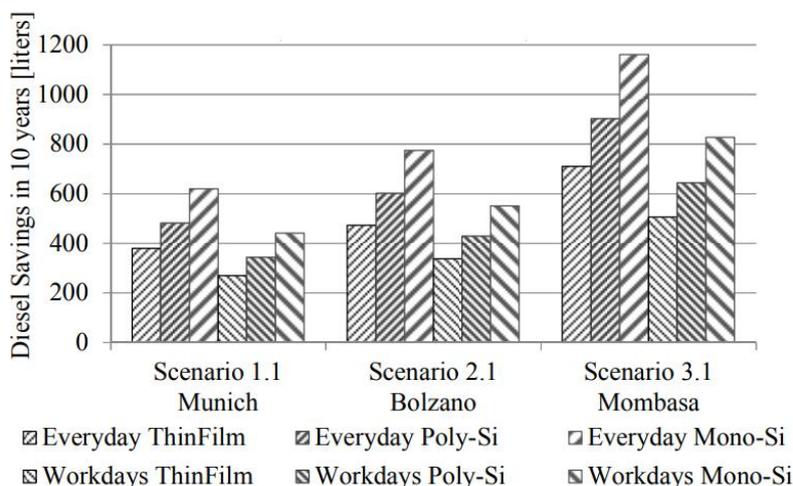


Figura 13: Risparmio di Diesel nell'arco di 10 anni per metro quadro di superficie fotovoltaica installata a seconda della tecnologia, utilizzo e zona

Uno studio simile a quest'ultimo è stato condotto nel 2021, eseguito sempre prendendo in considerazione diversi tipi di autoveicoli elettrici ed in 3 differenti città (Siviglia, Friburgo e Stoccolma) [17].

I veicoli presi in analisi sono stati differenti modelli di van e camion utilizzati per scopi commerciali, tutti a trazione elettrica. Gli scenari di utilizzo analizzati sono stati differenti: van per consegna pacchi (scenario A), camion per la consegna in zone rurali (scenario B), camion per trasporto a lungo raggio (scenario C), rimorchi (scenario D) e rimorchi provvisti di batterie (scenario E). L'area disponibile per l'installazione dei pannelli fotovoltaici è stata ottenuta attraverso le brochure delle differenti case che producono i veicoli. Per ogni veicolo è stato stimato un coefficiente di utilizzo dell'area disponibile al fine di tenere conto quelle parti non sfruttabili per l'installazione. Per quanto concerne la tecnologia fotovoltaica installata è stata supposta una potenza dei moduli pari a $210 \frac{Wp}{m^2}$

Tipo	Consumo medio [kWh/100 km]	Area tetto [m ²]	Percentuale di utilizzo dell'area	Potenza PV [Wp]	Scenario
Van; 3,5 t	27,5	11,0	94%	2170	A
Van; 3,5 t	18,5	7,3	94%	1440	A
Van; 3,2 t	30,6	4,1	94%	810	A
Camion; 7,5 t	82,8	15,1	95%	3010	A
Camion; 16 t	100,0	17,8	96%	3590	A
Camion; 15 t	100,0	17,8	96%	3590	B
Camion; 18 t	120,0	17,8	96%	3590	B
Camion; 26 t	97,4	17,8	96%	3590	B
Articolato	125,0	34,0	96%	6860	C,D
Articolato	137,5	34,1	96%	6860	C,D
Articolato	217,0	34,2	96%	6860	C,D
Articolato con batterie nel rimorchio	-	34,3	96%	6860	E

Tabella 4: Veicoli presi in analisi all'interno dello studio con relative caratteristiche dimensionali, di consumo, di potenza fotovoltaica installata e scenari di utilizzo



Figura 14: Esempi dei veicoli presi in analisi: (A) Reanalut Master E-Tech; (B) Framo E-165; (C) Tesla Semi; (D) ZF eTrailer

È opportuno far notare che quando il veicolo è a motore spendo i contatti del circuito di collegamento alla batteria sono aperti e di conseguenza non vi è possibilità di ricarica. Di conseguenza, per permettere la ricarica attraverso i pannelli fotovoltaici il circuito deve essere chiuso anche a motore spento. La chiusura del circuito di collegamento alla batteria implica l'ingresso in funzione dei sistemi di monitoraggio della batteria stessa, come per esempio il Battery Management System (BMS) ed il Vehicle Management System (VMS), questi sistemi portano ovviamente a dei consumi. Finché la produzione dal fotovoltaico è inferiore ai consumi di questi sistemi il circuito di collegamento alla batteria dovrà rimanere chiuso per evitare di scaricare la batteria stessa. All'interno di questa analisi si è realizzato un modello che tenesse conto di questo. Per ogni veicolo è stato definito un coefficiente, per ogni ora, che tenesse conto di quanto il veicolo stesse fermo durante l'arco di quell'ora in base ai diversi scenari considerati, questo coefficiente è stato definito "driving-to-standby ratio" ($r_{D2S,i}$). Per fare un esempio, nello scenario A (van per consegna pacchi) è stato stimato che l'autoveicolo possa addirittura arrivare a trascorrere più tempo da fermo che in marcia, in questo caso è stato quindi supposto un coefficiente ($r_{D2S,i}$) pari a 1. Tutti i valori supposti sono riassunti nella tabella sottostante.

Ore	A			B			C			D-E		
	Dal Lunedì al Venerdì	Sabato	Domenica	Dal Lunedì al Venerdì	Sabato	Domenica	Dal Lunedì al Venerdì	Sabato	Domenica	Dal Lunedì al Venerdì	Sabato	Domenica
0-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,07	0,07	0,07
1-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,06	0,06	0,06
2-3	0	0	0	0,01	0	0	0	0	0	0,06	0,06	0,06
3-4	0	0	0	0,40	0	0	0	0	0	0,05	0,05	0,05
4-5	0	0	0	0,55	0	0	0	0	0	0,05	0,05	0,05
5-6	0	0	0	0,52	0	0	0	0	0	0,05	0,05	0,05
6-7	0	0	0	0,47	0	0	0	0	0	0,08	0,08	0,08
7-8	0,5	0	0	0,38	0	0	1	0	0	0,10	0,10	0,10
8-9	0,5	0,5	0	0,30	0	0	1	0	0	0,13	0,13	0,13
9-10	0,5	0,5	0	0,18	0	0	1	0	0	0,13	0,13	0,13
10-11	0,5	0,5	0	0,33	0	0	1	0	0	0,14	0,14	0,14
11-12	0,25	0,25	0	0	0	0	0,5	0	0	0,15	0,15	0,15
12-13	0,5	0,5	0	0,20	0	0	0,75	0	0	0,17	0,17	0,17
13-14	0,5	0,5	0	0,47	0	0	1	0	0	0,20	0,20	0,20
14-15	0,5	0,5	0	0,35	0	0	1	0	0	0,21	0,21	0,21
15-16	0,5	0,5	0	0,17	0	0	1	0	0	0,20	0,20	0,20
16-17	0,5	0,5	0	0	0	0	1	0	0	0,19	0,19	0,19
17-18	0,5	0,5	0	0	0	0	0,5	0	0	0,16	0,16	0,16
18-19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,17	0,17	0,17
19-20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,16	0,16	0,16
20-21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,14	0,14	0,14
21-22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,11	0,11	0,11
22-23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,08	0,08	0,08
23-24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,08	0,08	0,08

Tabella 5: Driving-to-standby ratio per i differenti veicoli nelle varie fasce di orario

Come già citato prima, sono state prese in analisi le città di Stoccolma (Svezia), Friburgo (Germania) e Siviglia (Spagna). Anche per questo studio i dati relativi all'irradianza sono stati ottenuti attraverso PVGIS e non è stata presa in considerazione l'ombreggiamento. All'interno dello studio sono state tenute in considerazione le diverse perdite, l'energia prodotta sarà infatti sicuramente minore rispetto a quella stimata a causa, per esempio, delle perdite nella conversione DC-DC e le già citate perdite dovute ai sistemi di controllo. È stata supposta un'efficienza del pannello pari al 21% mentre le perdite di generazione sono state considerate attraverso coefficienti differenti in base alla località per tenere conto ad esempio delle differenti

temperature, per Stoccolma si è considerata un'efficienza di generazione pari a 90,7%, per Friburgo 85,4% e 84,4% per Siviglia. Le perdite di conversione sono state considerate pari al 2%. Infine, le perdite per stand by sono state misurate empiricamente per il camion Framo E-165 ed è stato adottato un valore pari a 25 W, che si è rivelato in accordo con i valori trovati in letteratura. Tuttavia, le misure empiriche hanno rivelate un consumo in stand by che in alcuni casi arrivava addirittura a 700 W.

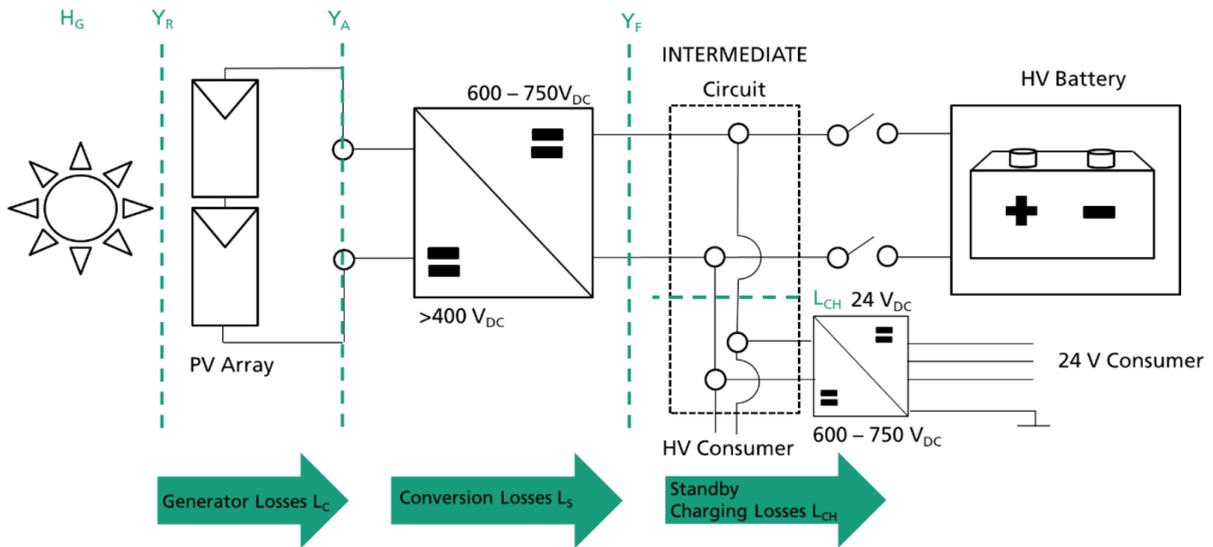


Figura 15: schema che mette in risalto le differenti perdite

Per quanto concerne i consumi, in kWh/100km sono stati presi in considerazione quelli forniti dalle case per ogni differente veicolo. È stato considerato un coefficiente di degradazione pari ad 1%. Per quanto concerne l'analisi economia è stato considerato all'interno del calcolo il risparmio che si avrebbe rispetto ad acquistare l'energia elettrica prodotta dall'impianto fotovoltaico VIPV direttamente dalla rete a prezzi pari a $0,17 \frac{\text{€}}{\text{kWh}}$ per Stoccolma, $0,30 \frac{\text{€}}{\text{kWh}}$ per Friburgo e $0,23 \frac{\text{€}}{\text{kWh}}$ per Siviglia. All'interno dell'analisi economica è stato preso in considerazione un periodo di vita dell'impianto pari a dieci anni. Per quanto concerne i costi di realizzazione del sistema sono stati considerati pari a $1,7 \frac{\text{€}}{\text{kWp}}$ ($0,5 \frac{\text{€}}{\text{kWp}}$ per quanto concerne il costo del modulo, $0,4 \frac{\text{€}}{\text{kWp}}$ per quanto concerne l'elettronica, $0,3 \frac{\text{€}}{\text{kWp}}$ per quanto concerne la strumentazione di sicurezza e $0,5 \frac{\text{€}}{\text{kWp}}$ per quanto concerne i costi di installazione). È stato anche analizzando un secondo scenario considerando un costo totale pari a $1 \frac{\text{€}}{\text{kWp}}$ (valore che si potrebbe raggiungere se l'implementazione del fotovoltaico su veicoli diventasse di massa).

I valori di copertura solare ottenuti, nelle diverse località per i differenti veicoli e i corrispondenti profili di utilizzo, all'interno dello studio sono riassunti nella tabella sottostante.

	Località	km grazie al PV [km]	Percorrenza annua media in Germania [km]	Copertura Solare [%]
A	Stoccolma	6637	Van ≤ 3,5 t: 19039	35
	Friburgo	7397		39
	Siviglia	11450		60
B	Stoccolma	3084	Camion >7,5 t: 35757	9
	Friburgo	3429		10
	Siviglia	5272		15
C	Stoccolma	4828	Motrice: 89667	5
	Friburgo	5356		6
	Siviglia	8173		9
D	Stoccolma	4791		5
	Friburgo	5317		6
	Siviglia	8134		0

Tabella 6: Valori di copertura solare in km ed in percentuale sull'utilizzo annuo ottenuti per le diverse località e per le diverse categorie di veicolo e di utilizzo

Per quanto concerne l'analisi economica, i valori ottenuti per il guadagno netto (Net Present Value) a 10 anni dall'installazione e il tempo necessario a rientrare dell'investimento ovviamente differiscono molto a seconda dell'utilizzo e della località. Per quanto riguarda lo scenario E (rimorchi provvisti di batterie) il tempo per rientrare dell'investimento nel caso di un costo di installazione pari a $1,7 \frac{\text{€}}{\text{kWp}}$ è pari a 5,8 anni a Siviglia, 6,8 anni a Friburgo e 11,8 anni a Stoccolma (con una vita di 10 anni quindi l'investimento non sarebbe economicamente vantaggioso) mentre nel caso di un costo di installazione pari a $1,0 \frac{\text{€}}{\text{kWp}}$ gli anni scendono a 3,4 per Siviglia, 4 per Friburgo e 6,9 per Stoccolma. Gli scenari più economicamente vantaggiosi sono lo scenario A, B e lo scenario C.

Nel capitolo 4 sarà riportata una analisi cronologica degli studi effettuati relativamente alla implementazione del fotovoltaico su camion e tir per il trasporto refrigerato, per sopperire al fabbisogno energetico dei sistemi di refrigerazione [17].

4. Trasporto refrigerato

Il trasporto refrigerato è un punto critico per quella che viene chiamata “la catena del freddo” a causa del suo impatto in termini di consumi e conseguentemente di emissioni di sostanze climalteranti. La cosiddetta “catena del freddo” indica il percorso, dal consumatore al produttore, seguito da quei prodotti che devono essere mantenuti ad una temperatura controllata ed è composta da: produzione e packaging, immagazzinamento, trasporto e preservazione. Si stima che circa il 15% dell’energia proveniente da combustibili fossili sia utilizzata per il trasporto refrigerato e che le emissioni di un sistema di refrigerazione a compressione di vapore per il trasporto refrigerato possono raggiungere il 40% delle emissioni totali del veicolo [18]. È quindi di primario interesse cercare di ridurre l’impatto ambientale.

I sistemi refrigeranti a compressione di vapore sono i più utilizzati, con uno share di circa l’80%, [18] sia per quanto riguarda la refrigerazione che per quanto concerne la climatizzazione; questi sistemi refrigeranti contribuiscono per circa il 10% all’immissione di gas serra in atmosfera [18]. Nel dettaglio questi sistemi sono causa di emissioni indirette, relative alla realizzazione di energia elettrica o meccanica per poter utilizzare il compressore, e di emissioni dirette, relative alle perdite di refrigerante. Quest’ultime inoltre causano una riduzione dell’efficienza del sistema refrigerante con conseguente aumento di consumi e quindi aumento di emissioni [19].

Numerosi studi si sono posti il problema di ridurre l’emissione di gas a effetto serra sostituendo i clorofluorocarburi (fluidi refrigeranti più utilizzati e che sono in crescente sostituzione a causa del loro forte impatto in termini di Global Warming Potential) con nuovi fluidi refrigeranti [20]. Questo comporta però un aumento dei consumi a causa della riduzione della capacità refrigerante di questi fluidi rispetto ai clorofluorocarburi, causando quindi un aumento delle emissioni indirette se viene utilizzata energia proveniente da combustibili fossili [21,22].

Si stima che più del 30% del cibo globale va a male durante la catena di trasporto refrigerato [23]. Le perdite di cibo durante il trasporto avvengono principalmente a causa di fattori quali aumento delle temperature a causa di infiltrazioni di aria durante le operazioni di carico e scarico merce, insufficiente capacità refrigerativa e trasporto di alimenti che andrebbero mantenuti a temperature differenti all’interno dello stesso compartimento.

Diversamente dalla refrigerazione statica il trasporto refrigerato è soggetto ad una forte variazione delle condizioni di lavoro (temperature, radiazione, carico e scarico..) con un conseguente COP inferiore rispetto alle soluzioni statiche [24].

Il carico termico a cui è sottoposto un sistema refrigerante è causato principalmente da 3 fattori [24]:

- Trasmissione termica, questa è funzione di diverse variabili come la forma, le dimensioni, la stratigrafia e le caratteristiche del percorso e ovviamente dell’ambiente esterno in cui il trasporto viene effettuato, quali la temperatura esterna e la velocità.
- Infiltrazioni durante l’apertura e le chiusure dei portelloni durante le funzioni di carico e scarico merce.
- Calore causato dalla trasformazione degli zuccheri che accade nei prodotti alimentari come frutta e verdura

Nel trasporto refrigerato, in particolare per quanto concerne le distanze medio-corte, ciò che ha una rilevanza sicuramente maggiore sono le infiltrazioni durante l'apertura e la chiusura dei portelloni. Questo punto, al contrario delle perdite per trasmissione termica, non è regolamentato. Le perdite per infiltrazioni dipendono da diversi fattori come ovviamente il numero di soste con apertura delle porte, la durata di esse e la differenza di temperatura tra l'interno e l'esterno dello spazio refrigerato. Al fine di minimizzare le perdite per infiltrazioni durante i processi di carico e scarico della merce, che possono essere molto impattanti (possono arrivare anche ad essere più del 50% del totale delle perdite [24]) esistono principalmente due differenti soluzioni. La prima soluzione, più economica, prevede l'utilizzo di una tenda a strisce in PVC che previene l'ingresso di aria calda all'interno dell'ambiente refrigerato; questa soluzione, tuttavia, è considerata non sicura, inefficiente, non igienica e causa di ostacolo durante i processi di carico e scarico. La seconda soluzione prevede l'utilizzo di flussi di aria, quest'ultima è più efficiente (può arrivare ad abbassare le perdite per infiltrazioni per più del 50%) ma richiede un costo maggiore.



Figura 16: Meccanismi per diminuire le perdite per infiltrazioni durante il carico e scarico della merce. (a) tenda a strisce in PVC, (b) meccanismo basato su flussi di aria

La presenza del sistema di refrigerazione, ovviamente, causa una crescita del carico sul motore termico causato principalmente da tre fattori:

- Peso aggiuntivo dovuto al sistema di refrigerazione
- Aumento della resistenza aerodinamica del veicolo. Questo ovviamente dipende fortemente dal tipo di installazione effettuata e l'eventuale implementazione del fotovoltaico sul tetto del veicolo potrebbe aumentare ancor di più la resistenza aerodinamica.

- Se il compressore dell'impianto frigorifero è direttamente gestito dal motore del veicolo questo avrà ovviamente un forte impatto sulle prestazioni, in particolare quando il motore sarà a bassi giri (idle condition).

Questo ovviamente porta ad un aumento delle emissioni, non solo direttamente correlate al funzionamento del sistema di refrigerazione ma anche secondarie.

Negli anni il settore del trasporto refrigerato ha visto una forte crescita a causa del numero sempre maggiore di prodotti refrigerati trasportati. Questa crescita ha portato ad un aumento dei consumi per questi sistemi. Questo ovviamente ha portato ad un aumento delle emissioni generate sia direttamente che indirettamente. L'interesse sempre maggiore che si sta sviluppando relativamente al trasporto refrigerato si può notare dalla crescita del numero di pubblicazioni di studi scientifici per questo settore.

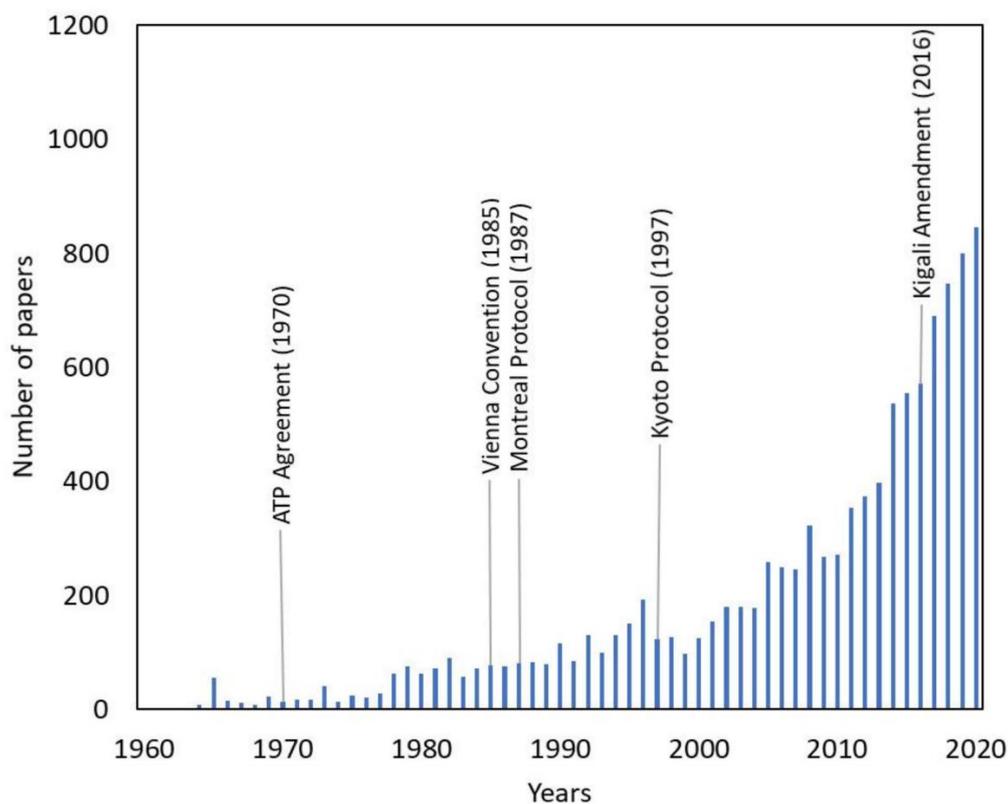


Figura 17: Numero di studi scientifici relativi al trasporto refrigerato pubblicati negli ultimi 60 anni

4.1 Gli standard per il trasporto refrigerato

La capacità isolante viene definita dall' ATP (Agreement for the transport of perishable foodstuffs) in base al valore del coefficiente globale di trasmissione termica calcolato nella seguente maniera:

$$K = \frac{W}{S * \Delta T} \quad \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$$

dove W è la potenza termica richiesta per mantenere costante la temperatura, ΔT è la differenza di temperatura tra quella esterna e la media interna ed S è l'area di scambio termico media, calcolata come:

$$S = \sqrt{S_i * S_e} \quad [m^2]$$

Dove S_i ed S_e sono rispettivamente l'area interna ed esterna del compartimento refrigerato.

L'ATP è aggiornato periodicamente e definisce gli standard per il trasporto su strada, su mare e ferroviario. Esso definisce anche le metodologie per condurre i test al fine di valutare capacità isolante e capacità di refrigerazione dei veicoli refrigerati. In caso di veicolo di forma parallelepipedica la temperatura media interna può essere calcolata come la media aritmetica delle temperature misurate a 10 cm dai vertici del parallelepipedo e al centro delle quattro facce caratterizzate dall'area maggiore. La misurazione della temperatura media esterna avviene nella stessa maniera, misurando la temperatura degli stessi punti, all'esterno del compartimento refrigerato. Se la forma non è parallelepipedica la misurazione deve essere condotta nel migliore dei modi per tenerne conto.

Il calcolo del coefficiente K è ottenuto attraverso un'analisi che prevede il mantenimento della differenza tra temperatura interna e temperatura esterna pari a $25^\circ C \pm 2^\circ C$ attraverso un sistema di raffreddamento.

L'ATP agreement definisce "veicoli fortemente isolati" i veicoli con K uguale o minore a 0,4

$\frac{W}{m^2 K}$ e mediamente isolati i veicoli con K uguale o minore a $0,7 \frac{W}{m^2 K}$.

Ulteriormente, i veicoli refrigerati possono essere classificati in base alle temperature che il sistema di refrigerazione può assicurare all'interno del compartimento. La normativa ATP classifica i mezzi di trasporto isotermici secondo tre tipologie: frigorifero, refrigerato, calorifero.

I mezzi di trasporto frigoriferi sono veicoli isotermici equipaggiati con un gruppo frigorifero in grado di mantenere, con una temperatura esterna costante di $30^\circ C$ una prefissata temperatura interna che, a seconda del valore determina la classe del veicolo nel modo seguente:

- Classe A: $0^\circ C \leq T \leq +12^\circ C$
- Classe B: $-10^\circ C \leq T \leq +12^\circ C$
- Classe C: $-20^\circ C \leq T \leq +12^\circ C$
- Classe D: $T \leq 0^\circ C$
- Classe E: $T \leq -10^\circ C$
- Classe F: $T \leq -20^\circ C$

I mezzi di trasporto refrigerati sono veicolo isotermici equipaggiati con un sistema, usualmente piastre eutettiche, che, con una temperatura esterna costante di +30°C, consente di raggiungere e di mantenere per almeno 12 ore una prefissata temperatura interna del vano di carico vuoto secondo la classificazione seguente:

- Classe A: $T \leq +7^{\circ}\text{C}$
- Classe B: $T \leq +0^{\circ}\text{C}$
- Classe C: $T \leq -10^{\circ}\text{C}$
- Classe D $T \leq -20^{\circ}\text{C}$

Le sigle di classificazione ATP presentano come lettera finale X qualora il veicolo sia equipaggiato con un gruppo frigorifero non autonomo (ossia quando è dotato di un compressore che viene azionato direttamente dal motore del veicolo stesso e quindi lavora solo a motore in funzione), qualora una parte del gruppo frigorifero sia amovibile e, infine, qualora le piastre eutettiche debbano essere rimosse dal veicolo per essere raffreddate. Il gruppo frigorifero è, invece, autonomo quando dispone di una motorizzazione indipendente da quella del veicolo e, quindi, può azionare il compressore anche quando il motore del veicolo è spento [25].

I sistemi di refrigerazione principalmente utilizzati per il trasporto refrigerato sono basati sul ciclo a compressione di vapore (VCR), ovviamente le performance del sistema saranno strettamente dipendenti non solo dalle condizioni esterne ma anche dalle condizioni a cui lavora il motore che alimenta il compressore.

La vita dell'isolante è stimata attorno ai 10-15 anni, con una degradazione annua tra il 3% ed il 5% [24]. Questo porta inevitabilmente ad un aumento delle dispersioni e conseguentemente ad un aumento dei consumi e delle immissioni. Il materiale isolante maggiormente utilizzato è la schiuma di poliuretano espanso [24]. La schiuma è normalmente inserita tra il compensato, rivestito con lastra di poliestere rinforzato con fibra di vetro, e la fibra di vetro o l'alluminio.

Cambridge Refrigeration Technology ha realizzato un'analisi di materiali isolanti alternativi come lana di vetro, aereogel e pannelli isolanti sottovuoto (vacuum insulation panels, VIP). Grazie alla lunga durabilità e alla bassa conduttività, quest'ultimi ($0,002 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}} - 0,004 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$) stanno acquisendo sempre più mercato, inoltre aumentando il volume di vuoto si può abbassare la conduttività. I contro sono la presenza di ponti termici e i costi elevati.

In aggiunta al calcolo della capacità isolante l'ATP prevede una serie di test per poter valutare la capacità di raffreddamento dell'unità refrigerativa:

- Test a 3 livelli di temperatura tra -25°C e +12°C attraverso l'utilizzo del termostato interno. La minore delle 3 temperature deve essere pari alla temperatura minima per la classe del veicolo;
- Test della massima capacità di refrigerazione senza l'utilizzo del termostato.

Durante ogni test un riscaldatore elettrico viene posizionato all'interno del compartimento per garantire l'equilibrio termico a ciascuna temperatura. Le seguenti quantità vengono misurate durante ogni test:

- Almeno 4 temperature uniformemente distribuite all'ingresso dell'evaporatore;
- Consumo di energia elettrica e di carburante;
- Velocità di rotazione del compressore. Se il compressore è direttamente collegato al motore del veicolo il test deve essere condotto sia alla velocità nominale di rotazione che

alla velocità minima mentre se la velocità di rotazione del compressore è autonoma questo viene condotto solo alla velocità nominale;

- Pressione al condensatore e all'evaporatore.

È sempre opportuno ricordare che le prestazioni nell'utilizzo reale saranno differenti, in particolare se il compressore è direttamente collegato al motore del veicolo.

4.2 Emissioni

Per quanto riguarda la stima delle emissioni e del consumo di carburante non vi sono modelli specifici per il trasporto refrigerato al momento. Solitamente vengono utilizzati gli stessi metodi per il trasporto di merci, ovvero MOBILE (Mobile Highway Vehicle Emission Factor Model), COPERT (Computer Programme to calculate Emissions from Road Transport), HBEFA (Handbook Emission Factors for Road Transport), ARTEMIS (Assessment and Reliability of Transport Emission Models and Inventory Systems), che è basato sulla velocità media durante il viaggio, o modelli a più bassa scala di analisi come il PHEM (Passenger Car and Heavy Duty Emission Model) ed il MOVES (Motor Vehicle Emission Simulator), che è basato sui dati istantanei (secondo per secondo) [26].

Nella tabella sottostante si possono osservare i consumi per alcuni veicoli di dimensioni differenti e operanti a -20°C o a 0°C .

Corpo Lunghezza interna/Volume interno/Tipo	Capacità minima di refrigerazione [W]		Capacità di refrigerazione richiesta per una distribuzione a più fermate [W]		Consumo di carburante [l/h]	
	-20°C $K=0,4 \text{ W/m}^2\text{K}$	0°C $K=0,7 \text{ W/m}^2\text{K}$	-20°C $K=0,4 \text{ W/m}^2\text{K}$	0°C $K=0,7 \text{ W/m}^2\text{K}$	-20°C $K=0,4 \text{ W/m}^2\text{K}$	0°C $K=0,7 \text{ W/m}^2\text{K}$
6,2 m/33,42 m ³ /Rigido	3765	3876	5630	4554	2,0	1,5
10,4 m/61,15 m ³ /Rigido	6155	6353	9897	7920	3,0	2,5
13,4 m/78,79 m ³ /Semi-articolato	7730	7986	13500	10078	4,0	3,0

Tabella 7: Consumi di carburanti per alcuni veicoli con motore ausiliario

Nel 2021 è stato condotto uno studio numerico e sperimentale per stimare il consumo specifico e le emissioni di tre differenti veicoli refrigerati equipaggiati con sistemi VCR [26]. Le caratteristiche dei veicoli presi in analisi sono riportate nella tabella sottostante.

Veicolo	A	B1	B2
Potenza del motore [kW]	90	120	120
Massa del veicolo [kg]	2150	3450	3450
Peso del carico del veicolo [kg]	375	0	4050
Tipo di percorso seguito	Urbano e Suburbano	Suburbano	Suburbano
Durata [s]	14,019	2930	2930
Distanza [km]	140	27	27
velocità media [km/h]	35,92	32,65	32,65

Tabella 8: Caratteristiche per ciascun veicolo testato

I risultati mostrano come le emissioni di CO₂ ed NO_x per i veicoli considerati sono più alte rispetto ai veicoli standard (tra il 15% ed il 18%).

Uno studio del 2019 [27] ha, inoltre, dimostrato che il motore diesel ausiliario per un sistema refrigerante applicato ad un autoarticolato di 13.6 m emette tra 25 e 66 volte più NO_x rispetto ad un moderno motore diesel Euro 6, a seconda delle condizioni di test. Questo è dovuto alle misure poco stringenti applicate a questo settore.

4.3 Veicoli

I veicoli per il trasporto refrigerato possono essere categorizzati anche in base al peso in tonnellate: da 3,5 a 7,5, da 7,5 a 14, da 14 a 17, da 17 a 25 ed infine i veicoli articolati con pesi superiori alle 25 tonnellate. I veicoli dimensioni maggiori hanno porte avvolgibili coibentate mentre i veicoli di piccole dimensioni hanno generalmente porte a battente. Il design di ciascun veicolo è in funzione della temperatura minima interna che deve garantire, della massima temperatura esterna a cui andrà ad operare, delle proprietà isolanti, delle massime infiltrazioni di aria consentite e dell'umidità massima interna. Ovviamente bisognerà operare una scelta di trade-off tra le caratteristiche costruttive ed i costi.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 18: categorizzazione veicoli refrigerati (a) <3,5 t, (b) 7,5 t, (c) 12 t, (d) articolato (arti)

	Categoria Veicolo			
	< 3,5 t	7,5 t	12 t	Articolati
Lunghezza interna [m]	3,7	5	6,5	11,8
Larghezza interna [m]	1,9	2,3	2,3	2,3
Altezza Interna [m]	1,9	2,3	2,3	2,6
Dimensioni porte [m]	1,8 x 1,9	2,2 x 2,2	2,2 x 2,2	2,2 x 2,5
Capacità volumetrica dell'unità di refrigerazione [m³h]	1075	2150	3200	5000
Spessore vano refrigerato[mm]	50	75	75	75

Tabella 9: Dimensioni interne di diversi veicoli

La distribuzione primaria, dalle aziende ai centri di distribuzione regionale, avviene solitamente usando autoarticolati mentre la distribuzione secondaria, dai centri di distribuzione regionale ai supermercati e grossi negozi avviene con veicoli di medie dimensioni. Per il cosiddetto “trasporto dell’ultimo miglio” vengono infine utilizzati van e furgoncini.

4.4 Sistema di refrigerazione VCR

I sistemi di refrigerazione utilizzati sono principalmente basati su ciclo a compressione di vapore (VCR). Per poter soddisfare i requisiti dettati dall'ATP e i bisogni di refrigerazione in un vasto numero di condizioni operative, questi sistemi sono solitamente sovradimensionati, al fine di garantire una capacità refrigerante pari a circa 1,75 volte il carico termico nominale [24].

I sistemi VCR basati su ciclo a compressione di vapore consistono dei seguenti componenti:

- Evaporatore: permette l'evaporazione del fluido refrigerante assorbendo energia termica dall'ambiente da refrigerare;
- Compressore: permette il cambiamento di pressione del fluido refrigerante, dalla pressione minima dell'evaporatore a quella massima al condensatore, assorbendo energia meccanica da una fonte esterna;
- Condensatore: permette la condensazione del fluido refrigerante rilasciando energia termica all'ambiente esterno;
- Valvola di laminazione: permette la caduta di pressione tra condensatore ed evaporatore.

I sistemi VCR per il trasporto refrigerato permettono diverse opzioni differenti per quanto concerne la fonte dell'energia meccanica necessaria al compressore [28]:

- Trasmissione diretta a cinghia: vi è una trasmissione diretta tra il motore del veicolo ed il compressore;
- Unità diesel ausiliaria: il compressore è alimentato da un'unità diesel ausiliaria;
- Alternatore ausiliario: un alternatore specifico alimentato dal motore del veicolo alimenta elettricamente il compressore;
- Alimentazione del compressore attraverso batteria: il compressore è alimentato elettricamente attraverso una batteria (che a seconda della potenza richiesta può essere quella del veicolo o una batteria ausiliaria) caricata dal motore del veicolo attraverso un alternatore ed un inverter.

Le ultime due soluzioni (ed in particolare l'ultima), rispetto alla prima consentono maggiore flessibilità e garantiscono il disaccoppiamento tra i giri del motore e quelli del compressore, aumentando l'efficienza del ciclo frigorifero, soprattutto quando i giri del motore sono al minimo. Questo solitamente accade dentro i centri abitati, nel trasporto finale ed in particolare durante le fasi di carico e scarico, che sono anche le fasi dove vi è necessità di più refrigerazione a causa delle perdite.

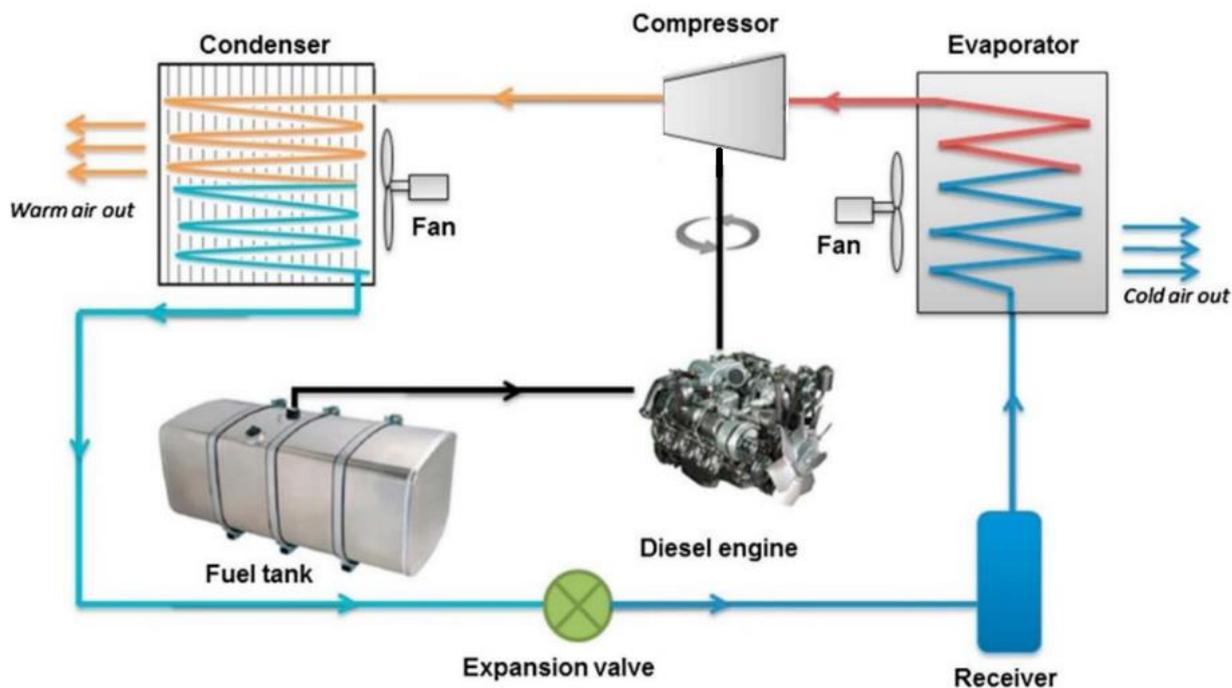


Figura 19: Diagramma schematico di un sistema refrigerante a compressione di vapore alimentato da motore diesel

Ad oggi la maggior parte dei veicoli refrigerati pesanti utilizza la soluzione 2 mentre i veicoli più leggeri utilizzano le soluzioni 1,3,4. La soluzione scelta dipende principalmente dalla potenza richiesta, dal peso del veicolo, dal rumore consentito in base alle differenti zone di utilizzo del veicolo e da costi. Generalmente il valore di COP si attesta tra 0,5 e 1,5.

Le configurazioni che prevedono il collegamento al motore della motrice sono limitate ad operare allo stesso numero di giri del motore principale, questo porta ad aumentare nettamente i consumi, soprattutto quando i giri del motore sono al minimo. Un momento particolarmente critico per questo tipo di configurazioni è proprio il carico-scarico delle merci, in quanto in questi momenti il fabbisogno termico di refrigerazione è elevato a causa delle ingenti perdite per infiltrazioni durante l'apertura delle porte ma il motore del veicolo starà girando al minimo o addirittura sarà spento.

Le soluzioni dotate di motore ausiliario prevedono la presenza di un serbatoio autonomo, hanno solitamente rendimenti del motore attorno al 25% e molte perdite dovute al collegamento meccanico di motore e compressore. Queste soluzioni solitamente prevedono l'utilizzo di cinghie e pulegge atte al funzionamento dei ventilatori. Questo non fa altro che aumentare la necessità di manutenzione.

Ad oggi tutte le soluzioni prevedono la possibilità di essere alimentate attraverso la rete elettrica a 240 V ed anche in trifase per i sistemi di potenza maggiore. Questo permette di aumentare le efficienze e di non consumare carburante per la refrigerazione quando il camion è fermo in deposito.

L'unità di refrigerazione è generalmente controllata da un termostato che può attivare/disattivare il compressore o ridurre la velocità di rotazione (on-off controller, PI controller, set point controller, model predictive controller) [29-30].

La maggior parte della ricerca e dello sviluppo in questo settore è focalizzata sulla possibilità di ridurre i consumi, e conseguentemente le emissioni, del sistema per ottenere l'energia necessaria al compressore.

Fard e Kajepour [31] hanno condotto uno studio sulla possibilità di minimizzare le inefficienze quando il motore primario opera a basse velocità (anti-idling system), sfruttando una batteria aggiuntiva caricata attraverso un alternatore ma con la possibilità di essere caricata da fonti esterne. Il compressore in questo caso è di tipo elettrico e completamente separato dal motore principale, questa soluzione ha permesso di ottenere un vantaggio nei consumi di circa il 12% in città e del 7% su tragitti su lunghe distanze autostradali. Altri studi hanno condotto analisi simili portando sempre a risultati favorevoli.

La possibilità dell'utilizzo di batterie, caricate attraverso rete, per alimentare elettricamente il compressore del sistema VCR al fine di ridurre consumi ed emissioni è stata analizzata in uno studio numerico del 2017 [32]. In questo caso è stato sviluppato un modello in grado di stimare i consumi dell'unità di refrigerazione. L'analisi è stata condotta su due camion, per il trasporto di alimenti tra i 4°C ed i 5°C, operanti a Vancouver, utilizzando fluido R404A e con sistemi rispettivamente di potenze pari a 9,38 kW e 10,26 kW. Questa soluzione ha portato ad una riduzione di 3105 kg di diesel all'anno, che significano una riduzione di CO₂ di 8320 kg ogni anno.

Questo studio si conclude con la riflessione sulla possibilità di sfruttare l'implementazione del fotovoltaico, un concetto non nuovo, come accennato nel capitolo precedente, ma che oggi potrebbe definitivamente avere una giustificazione economica, ambientale e di utilizzo (consentendo per esempio l'ingresso in aree cittadine anche di notte data la minimizzazione dei rumori).

4.5 Sistemi di refrigerazione alternativi

In questo capitolo saranno analizzati alcuni dei sistemi di refrigerazione alternativi.

4.5.1 Sistemi basato su piastre eutettiche e PCM

Tubi e piastre eutettiche sono utilizzati da più di 50 anni [33]. Essi sono riempiti di fluido eutettico, caricati elettricamente (raffreddate) durante la notte per circa 8-12 ore attraverso un gruppo refrigerante ed utilizzati su tetto e sui lati della camera frigorifera. L'effetto di refrigerazione avviene grazie all'assorbimento dell'energia termica necessaria a consentire il passaggio di stato del materiale da solido a liquido (calore latente). Questi sistemi possono operare tra 0°C e -30°C. I materiali utilizzati come PCM possono essere organici (paraffine e non paraffine) o inorganici (metalli o salt hydrates) [33]. Questi sistemi possono anche essere integrati con sistemi a compressione di vapore che possono agire come back-up.

Gli svantaggi di questo tipo di soluzione sono principalmente legati al fatto che il tempo di refrigerazione è limitato al tempo richiesto dalla soluzione per passare dalla forma solida alla forma liquida e se si vuole aumentare questo tempo bisogna inevitabilmente aumentare il numero o le dimensioni delle piastre andando ad aumentare il peso del veicolo e conseguentemente le emissioni ed i consumi, oltre a ridurre la capacità di trasporto di esso. Inoltre, questi sistemi non prevedono la possibilità di operare a temperature differenti, come si può fare con i sistemi a compressione di vapore, e non garantiscono una distribuzione di temperatura uniforme all'interno del compartimento.

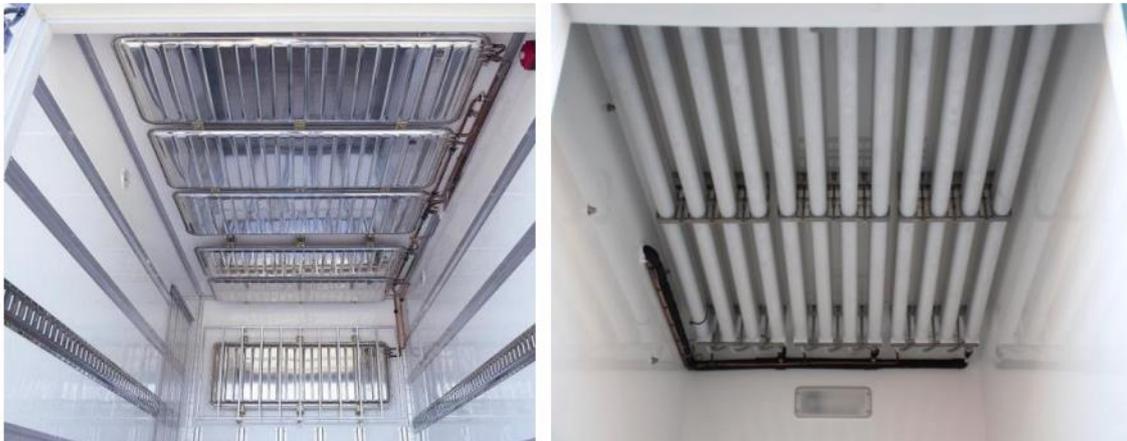


Figura 20: Esempio di piastre e tubi eutettici

4.5.2 Sistemi di refrigerazione alimentati da fuel cell (Hydrogen-fuel-cell powered auxiliary power unit)

In questi sistemi il compressore è azionato da un motore elettrico collegato ad una fuel cell alimentata ad idrogeno, la quale alimenta anche un altro motore elettrico dedicato alla trazione del veicolo. Questi sistemi sono al momento presenti solo in fase dimostrativa e prototipale. Al momento i prototipi configurati con questa soluzione prevedono anche un motore diesel, in grado di funzionare come backup, che non sarà presente nei veicoli quando verranno commercializzati [34]. Le barriere attualmente presenti per questa tecnologia riguardano l'assenza dell'infrastruttura dedicata al rifornimento dell'idrogeno ed i costi, data la tecnologia ancora molto immatura, inclusi quelli riguardanti la produzione di idrogeno. Visto l'enorme ricerca sul settore i costi tenderanno sicuramente ad abbassarsi nei prossimi anni e l'infrastruttura, di conseguenza, non potrà che crescere. Un ampio discorso si potrebbe fare sull'origine dell'idrogeno che verrebbe utilizzato in questi sistemi; se esso viene prodotto grazie all'elettrolisi dell'acqua, sfruttando energia rinnovabile in eccesso sicuramente si andrebbe verso una netta riduzione delle emissioni climalteranti ma se l'idrogeno venisse prodotto da combustibili fossili questa soluzione assumerebbe un senso molto più limitato per quanto concerne la lotta al cambiamento climatico.



Figura 21: Configurazione prototipo alimentato attraverso fuel cell

4.5.3 Sistemi di refrigerazione basati sull'integrazione del solare fotovoltaico

In questi sistemi i pannelli solari sono montati sul tetto del veicolo e la corrente continua (DC) prodotta viene convertita in corrente alternata (AC) attraverso un inverter con il fine di alimentare il sistema di refrigerazione. In aggiunta, in questa configurazione, viene integrato un pacco batterie in grado di immagazzinare l'energia prodotta in eccesso, anche quando il veicolo è fermo o il sistema di refrigerazione non è in funzione ed inoltre esso ha l'obiettivo di sopperire ai carichi quando la radiazione solare non è sufficiente attraverso la ricarica dalla rete.

Questo tipo di soluzione può anche essere integrata a sistemi basati su PCM al fine di immagazzinare l'energia prodotta dall'impianto fotovoltaico non attraverso l'utilizzo di batterie. Tuttavia, questa soluzione è stata, ad oggi, solo analizzata in letteratura senza la realizzazione di prototipi.

L'integrazione di un sistema fotovoltaico prevede anche l'utilizzo di un sistema back-up nel caso in cui la radiazione solare non fosse presente (utilizzo di notte) o non fosse abbastanza da garantire la refrigerazione. Il sistema di back-up prevede l'utilizzo del motore della motrice attraverso un alternatore al fine di caricare le batterie, con ovviamente la possibilità di caricarle anche attraverso la connessione alla rete quando il veicolo è fermo o l'utilizzo di un piccolo motore diesel ausiliario. Il sistema fotovoltaico è sempre quindi integrativo ad un impianto di refrigerazione totalmente elettrico o dotato di un motore ausiliario.

Un'analisi più approfondita degli studi relativi a questa soluzione verrà presentata nel capitolo successivo.



Figura 22: Esempio di solare fotovoltaico montato su camion per il trasporto refrigerato

4.5.4 Sistemi di refrigerazione basati sull'utilizzo di azoto liquido e di diossido di carbonio liquido

In questi sistemi vi è la presenza di un grande serbatoio isolato e sottovuoto, con capacità che variano tra 400 kg e 700 kg, montato sotto il rimorchio, che viene utilizzato per immagazzinare l'azoto o il diossido di carbonio liquidi. [35]. Attraverso un sistema diretto, il fluido criogenico è prelevato dal serbatoio ed è iniettato all'interno dello spazio refrigerato mediante l'utilizzo di spruzzatori. Quando il liquido viene iniettato all'interno dell'ambiente refrigerato si espande e passa allo stato gassoso. Attraverso questa tecnologia si possono raggiungere temperature interne di -20°C con temperature esterne di 30°C in meno di 30 minuti [36]. Uno dei problemi è che il fluido viene rilasciato in ambiente all'apertura delle porte e questo causa inevitabilmente la dispersione di sostanze nocive nell'aria. Questo sistema consente, quindi, una veloce ed efficiente refrigerazione ma porta rischi per la salute a causa della presenza del fluido all'interno del container, una volta rilasciato. Le moderne configurazioni che adottano questa soluzione vedono la presenza di sistemi per monitorare i livelli di ossigeno all'interno del container in maniera da evitare la possibilità di ingresso all'interno di esso in situazioni dove i livelli di ossigeno sono al di sotto del 19,5% [37]. Una soluzione alternativa è quella presente nei sistemi di immissione indiretta, in cui il fluido espande all'interno di un evaporatore per poi essere rilasciato in atmosfera e dei ventilatori permettono la circolazione dell'aria attorno all'evaporatore. Questa soluzione permette approssimativamente una capacità di refrigerazione pari a 0,101 kWh per kg di fluido [38]. Queste soluzioni hanno il compito di non permettere una refrigerazione veloce quanto quelle dirette. Il design di queste soluzioni può variare in base alla capacità di refrigerazione, dimensioni del veicolo ed utilizzo di sistema di refrigerazione addizionali.

Esistono anche soluzioni ibride che combinano sistema a compressione di vapore e sistema basato su liquido criogenico con immissione indiretta. Queste soluzioni sono utilizzate principalmente in casi in cui il veicolo deve entrare in centri urbani nelle ore in cui non è consentito un livello alto di inquinamento sonoro dato che fornisce la possibilità di sfruttare il sistema a compressione di vapore per i trasporti fuori dalle zone abitate ed il sistema basato su liquido criogenico all'interno di esse. L'azienda Dearman systems sta realizzando sistemi basati sull'utilizzo di azoto liquido che espande in uno scambiatore con l'obiettivo di refrigerare il container ma successivamente il fluido termina l'espansione all'interno dei pistoni di un motore che è collegato ad un sistema a compressione di vapore.

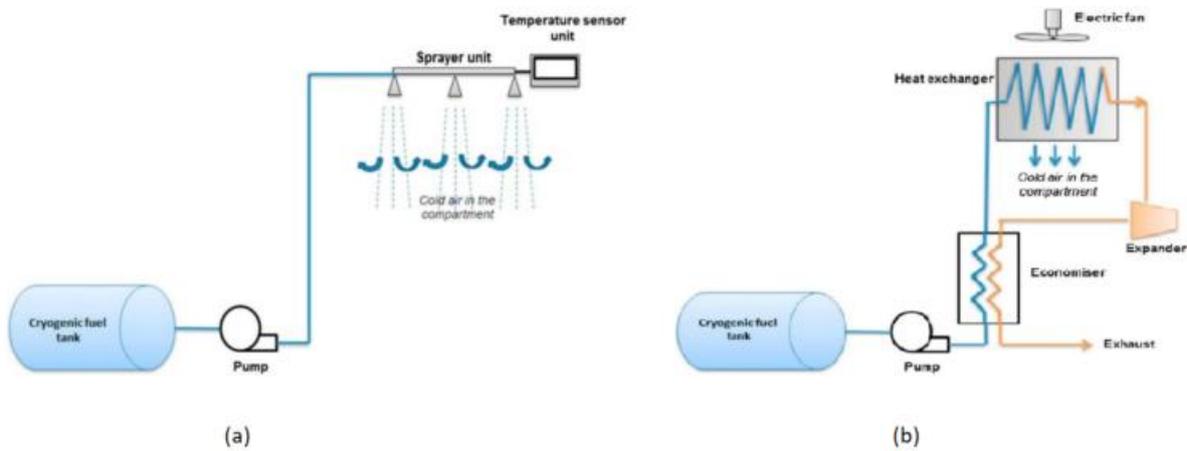


Figura 23: Sistemi di refrigerazione basati sull'utilizzo di fluidi criogenici.

(a) sistema indiretto, (b) sistema diretto.

Uno degli aspetti negativi di queste soluzioni è legato alla massa di fluido criogenico che deve essere trasportata e che conseguentemente aumenta i consumi e limita l'utilizzo del veicolo, anche a causa della scarsa infrastruttura presente. Inoltre, la produzione dei fluidi criogenici è energeticamente dispendiosa e contribuisce all'immissione di inquinanti nel caso vengano utilizzati combustibili fossili.

4.5.5 Sistemi di refrigerazione che sfruttano il calore prodotto dal motore diesel della motrice

Circa il 60% dell'energia, in un motore a combustione interna, è persa attraverso i fumi di scarico e il sistema di raffreddamento. Recuperare parte del calore, che andrebbe altrimenti perso, per alimentare altri sistemi, come quello di refrigerazione, consente di ridurre i consumi di combustibile. Il concetto di sfruttare il calore dei fumi di scarico è ancora in fase di ricerca.

I sistemi in grado di recuperare il calore dai gas di scarico possono essere basati su differenti tecnologie:

- Generatori termoelettrici (TEG): questi sfruttano l'effetto Seebeck producendo una corrente elettrica proporzionale alla differenza di temperatura tra due estremità di metalli differenti, in un circuito. Tuttavia, l'efficienza di conversione di questa tecnologia è ancora relativamente bassa, si attesta attorno al 10%-15% [39].
- Ciclo Rankine Organico (ORC): basato sull'utilizzo di un ciclo Rankine operante con un fluido organico. Il fluido organico sfrutta il calore di scarico per poi espandere e produrre lavoro utile [39]. Alcune simulazioni, consideranti un sistema di recupero calore attraverso un circuito OCR, operate su un motore diesel da 12 litri hanno mostrato la possibilità di produrre 14 kW di potenza meccanica (4,3% della potenza del motore) [40].

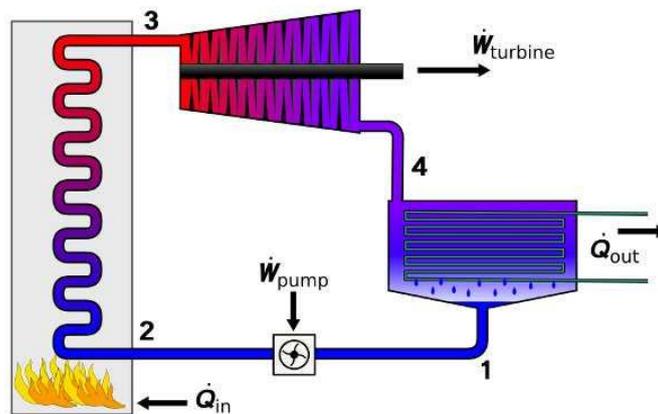


Figura 24: Schema funzionamento ciclo Rankine

- Integrazione di sistemi di refrigerazione ad adsorbimento o assorbimento [41-42].
Come avviene per il ciclo a compressione di vapore il ciclo ad assorbimento sfrutta l'effetto del raffreddamento prodotto dall'evaporazione di un fluido (il fluido frigorifero) a bassa temperatura e a bassa pressione. Il vapore, in questo caso, invece di essere compresso meccanicamente viene assorbito da una soluzione che ha una grande affinità con il fluido frigorifero. Per descrivere meglio il fenomeno è opportuno descrivere inizialmente l'impianto intermittente. Nell'impianto intermittente n recipiente contiene una miscela di fluido frigorifero e di solvente (per esempio acqua ed ammoniaca) in soluzione ricca di fluido frigorifero. Quando questa soluzione viene riscaldata il fluido refrigerante vaporizza e

passa in un secondo recipiente, dove viene raffreddato. La soluzione nel primo recipiente conseguentemente si impoverisce. Questa fase viene definita "rigenerazione". Al termine di questa fase può avere inizio la seconda fase, detta di "assorbimento". In questa fase il secondo recipiente funziona come evaporatore; l'evaporazione del fluido frigorifero produce l'effetto frigorifero. Il fluido frigorifero, sotto forma di vapore viene assorbito nel primo recipiente in cui la soluzione torna ad arricchirsi, nel mentre deve essere raffreddata. Questo processo può continuare finché è presente fluido frigorifero nell'evaporatore, con un equilibrio tra la pressione nell'evaporatore e la pressione parziale del frigorifero nella miscela. In questo gioca un ruolo fondamentale la temperatura di raffreddamento.

Utilizzando simultaneamente due coppie di recipienti si può ottenere un ciclo continuo ad assorbimento.

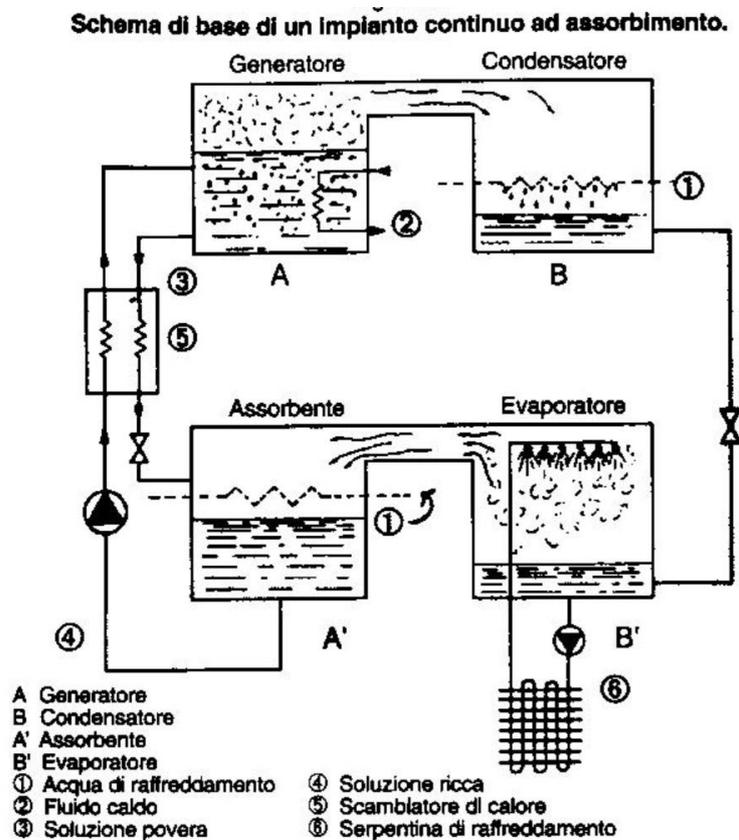


Figura 25: Schema impianto frigorifero ad assorbimento

Nello schema sovrastante l'evaporazione e l'assorbimento avvengono nella coppia di recipienti inferiori mentre la rigenerazione della soluzione e la condensazione del fluido frigorifero avvengono nei recipienti superiori, che sono ad una pressione più elevata. Come per l'impianto intermittente il vapore viene liberato dalla soluzione ricca per riscaldamento. Il vapore, a pressione elevata può essere condensato a temperatura ambiente o anche superiore. Il fluido frigorifero liquido viene inviato all'evaporatore e in seguito ricompresso.

La temperatura del flusso termico al generatore dipende dall'applicazione considerata e dalla coppia frigorifero/solvente utilizzata.

La coppia frigorifero/solvente maggiormente utilizzata negli impianti di refrigerazione ad assorbimento attualmente presenti in commercio (sfruttati per utilizzi stazionari) è acqua/bromuro di litio. In questo caso la temperatura di refrigerazione può essere inferiore ai 100°C. Tuttavia, questa soluzione è valida solo per la climatizzazione, in quanto è possibile utilizzare l'acqua come frigorifero solo a temperature di evaporazione superiori a 0°C. Una seconda soluzione è l'utilizzo di acqua/ammoniaca, la quale permette pressioni di esercizio più elevate ed un più ampio range di temperature. Vi sono anche altre coppie di fluido frigorifero/solvente in via di ricerca al fine di raggiungere temperature molto inferiori agli 0°C (fino anche a -30°C) e temperature di rigenerazione molto elevate.

La differenza tra un impianto ad assorbimento ed uno ad adsorbimento è che il primo utilizza un liquido come assorbente mentre il secondo utilizza un materiale solido. L'adsorbimento avviene all'interfaccia della superficie di separazione. Questi impianti presentano un COP inferiore.

I limiti di queste soluzioni sono principalmente i costi ancora molto elevati, non giustificanti l'investimento e le grandi dimensioni di questi sistemi, i quali richiedono anche molta manutenzione [43].

4.5.6 Sistemi di refrigerazione totalmente elettrici a batteria

In questi sistemi il compressore del sistema di refrigerazione funziona grazie ad un motore elettrico alimentato a batteria. Quando il camion è in deposito la batteria viene caricata attraverso l'apposito plug. Anche grazie all'aumentare del numero di veicolo elettrici questa soluzione sta diventando sempre più utilizzata, per lo più per i veicoli di piccole dimensioni [44-46]. L'azienda inglese Paneltex è specializzata nella realizzazione di veicoli di piccole-medie dimensioni interamente elettrici che integrino sistemi di refrigerazione totalmente elettrici, questi veicoli possono raggiungere fino a 11 tonnellate e prevedono motori fino a 150 kW, con batterie a ioni di litio con capacità fino a 100 kWh. Il plug di ricarica di questi veicoli può raggiungere 20 kW [47]. Le barriere di queste soluzioni sono dovute al fatto che l'autonomia è limitata dalle dimensioni della batteria, le infrastrutture di ricarica sono ancora in numero relativamente basso ed il tempo di ricarica potrebbe essere un limite. Inoltre, l'autoscarica della batteria potrebbe essere un problema e allo stato attuale sarebbe necessaria almeno una sostituzione dell'intero pacco batterie durante la vita del veicolo (probabilmente più di una a seconda dell'utilizzo). L'integrazione del fotovoltaico potrebbe portare enormi benefici relativamente a questi problemi. Infine, è sempre opportuno ricordare che con l'avanzamento della tecnologia queste soluzioni saranno sempre più vantaggiose economicamente, oltre a consentire una netta riduzione delle emissioni climalteranti.



Figura 26: Esempio di veicolo refrigerato totalmente elettrico con relativo plug di ricarica

5. Analisi dei precedenti studi relativi all'integrazione del fotovoltaico nel trasporto refrigerato

Il primo sistema di refrigerazione per camion alimentato attraverso solare fotovoltaico è stato sviluppato nel 1998 [48]. L'installazione prevedeva una superficie di 35 m^2 , per un totale di $4,4 \text{ kW}$ ed il sistema era provvisto di batterie al piombo da 28 kWh in sostituzione di un motore diesel da $2,25 \text{ l}$. Il payback time ottenuto era di circa 15 anni. Questo risultato è sicuramente molto differente da quelli ottenibili oggi.

Uno studio del 2009 è stato condotto in Australia con l'intento di minimizzare il consumo di diesel nel trasporto refrigerato [49]. I rimorchi refrigerati convenzionali possono essere configurati per trasportare merci refrigerate (attorno ai 2°C) o congelate (attorno ai -20°C). Spesso ogni rimorchio è progettato per trasportare merci a entrambe le temperature. Questo studio del 2009 è stato condotto basandosi sulla potenza elettrica necessaria a mantenere i prodotti a -18°C . Il carico termico è stato ottenuto attraverso un semplice modello termodinamico basato su un volume di controllo.

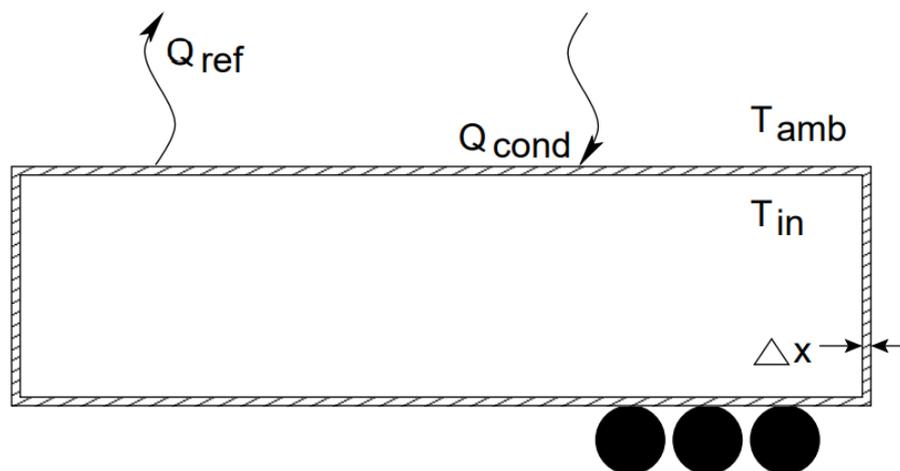


Figura 27: Modello semplificato con volume di controllo utilizzato nello studio

Alcune ipotesi semplificative sono state usate, come un coefficiente di conducibilità medio che teneva conto dell'isolamento termico e una capacità termica dei prodotti contenuti all'interno del vano refrigerato pari a circa il 75% di quella dell'acqua. Partendo dalla potenza termica necessaria al variare della temperatura esterna per la zona presa in esame (ottenute da rivelazioni storiche) è stata calcolata l'energia termica necessaria per permettere 18 ore continuative di refrigerazione e quindi l'energia elettrica necessaria.

Successivamente, attraverso i dati di radiazione solare per la zona presa in esame si è optato per l'installazione di un'area di pannelli fotovoltaici che massimizzasse i vantaggi economici. Si è optato per l'installazione di 52 moduli (90 W , 12 V), 3 batterie al piombo (48 V , 225 Ah) e un inverter da 5 kW e 48 V . La scelta dell'inverter è stata dettata dalla necessità di alimentare il

compressore in corrente alternata, questa scelta è stata presa inoltre perché i rimorchi prevedono anche l'utilizzo del sistema di refrigerazione attraverso la connessione alla rete a 240 V (questo per garantire refrigerazione quando il rimorchio è disconnesso dalla motrice) ed al periodo dello studio i sistemi potevano essere alimentati solo in corrente alternata. Il pacco batterie garantiva l'energia necessaria per un trasporto di 18 ore.

A causa degli elevati costi della tecnologia fotovoltaica (38 480 \$ per 52 moduli da 90W), delle batterie e del basso costo del diesel all'epoca dello studio l'investimento, a distanza di 25 anni esso non era giustificato nonostante l'elevata diminuzione del consumo di carburante [49].

Nel 2009 è stata analizzata la possibilità dell'integrazione del fotovoltaico in van e piccoli camion al fine di alimentare un sistema VCR elettricamente [50]. Il sistema preso in analisi consisteva di 6 moduli da 940 W posizionati sul tetto di un van delle dimensioni 3 m x 2 m x 2 m e di una batteria da 8640 kJ. Le batterie erano anche collegate all'alternatore dell'auto, utilizzato come sistema di backup. Il sistema di refrigerazione analizzato garantiva una potenza di 2 kW con una temperatura esterna di 30 °C ed una interna di 0 °C. Il tempo di utilizzo giornaliero del van è stato stimato tra le 7:00 e le 18:00. Lo studio è stato condotto in Grecia ed ha dimostrato che con questa configurazione l'energia prodotta è sempre maggiore di quella richiesta dal sistema di refrigerazione, consentendo la completa autonomia dal sistema di backup dato dall'alternatore del van.

Uno degli ultimi studi effettuati è del 2021 [51], all'interno di questo lavoro è stato sviluppato un modello in grado di dimensionare un sistema fotovoltaico (pannelli solo sul tetto del camion e batterie agli ioni di litio) per un semi rimorchio, tipico per il trasporto refrigerato. Il camion preso in analisi per questo studio operava servendo dieci supermercati nella regione del Friuli-Venezia Giulia (nord-est dell'Italia). Il COP del sistema VCR preso in analisi aveva valori compresi tra 0,42 e 0,77. La distanza tra i vari supermercati è stata considerata di circa 20 km. Il tempo giornaliero di viaggio è stato stimato di circa 7 ore e la partenza del camion alle 7:00. La velocità del camion è stata considerata tra i $40 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ ed i $70 \frac{\text{km}}{\text{h}}$, considerando sia strade urbane che suburbane. È stato ipotizzato che dopo aver servito l'ultimo supermercato il camion spegnesse il sistema di refrigerazione e venisse parcheggiato all'aperto, con il fine di ricaricare le batterie finché fosse ancora presente radiazione solare. In questo modello si è tenuto conto dei carichi termici sia durante la marcia che durante gli stop per lo scarico delle merci (incluse le perdite per infiltrazioni). La produzione da fotovoltaico è stata calcolata in funzione della distanza, del tempo in cui il veicolo rimaneva fermo, della velocità, dell'irradianza (ottenuta attraverso PVGIS, senza tener conto degli ombreggiamenti presenti durante il viaggio) e della temperatura esterna, mentre i carichi termici sono stati calcolati in funzione delle temperature esterna e interna, della velocità e della distanza nel caso delle perdite durante la marcia e del tempo di stop e di apertura portelloni nel caso delle perdite durante il fermo per scarico merci. Il modello realizzato è quindi un modello multi-periodo per poter tenere conto delle variazioni giornaliere e stagionali. Esso si basa sulla rappresentazione del tragitto in nodi ed archi, dove ogni nodo rappresenta una sosta mentre gli archi rappresentano il tragitto tra il nodo precedente e quello successivo. Per ogni nodo e arco vengono svolte una serie di equazioni per andare a calcolare i carichi termici da soddisfare e successivamente il modello modifica la configurazione in maniera da fornire quella economicamente migliore per soddisfare le richieste. La configurazione ottimale, fornita dal modello, prevedeva l'installazione di 13 pannelli, per un totale di 5 kW, 31 batterie, per un totale di 31 kWh, e 18 moduli PCS (power conversion system), per un totale di 9 kW.

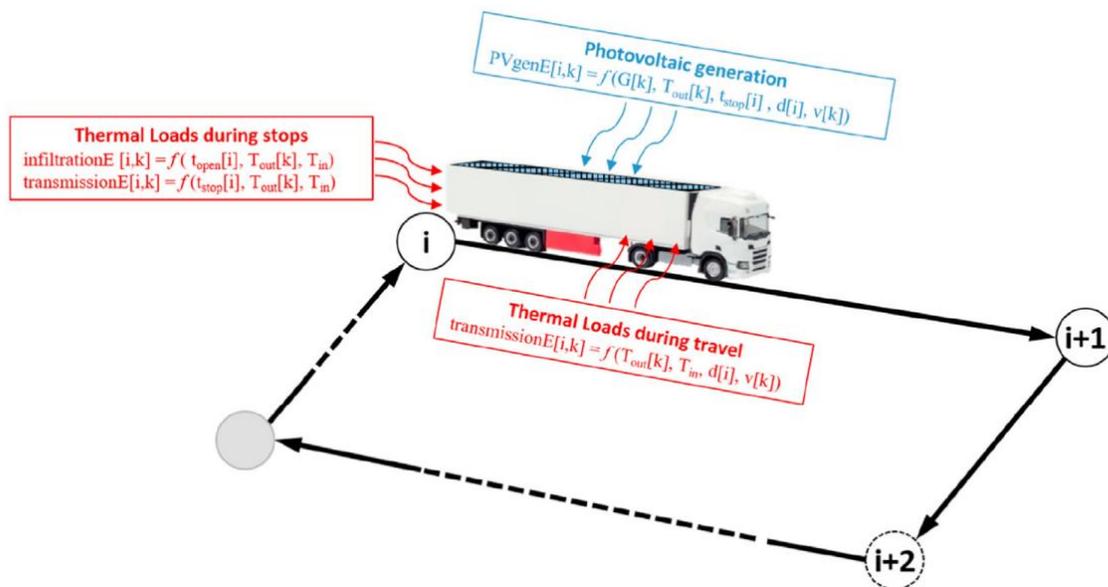


Figura 28: Schema del modello a nodi utilizzato nello studio

Questa configurazione permette una riduzione delle emissioni dell'89% (9572 kgCO₂eq all'anno per ogni singolo veicolo) grazie alla sostituzione del motore ausiliario diesel con sistema fotovoltaico e batteria. Essa presenta un payback period di 6 anni con una temperatura di set-up di -20°C. Questa soluzione porta ad una copertura fotovoltaica annua del 47%. Ad agosto la capacità delle batterie è interamente sfruttata per sopperire ai carichi termici mentre nei mesi invernali solo un terzo di tale capacità è richiesta in aggiunta alla generazione fotovoltaica. Ovviamente risultati migliori si possono ottenere nelle regioni più a sud, avendo esse una radiazione solare nettamente maggiore seppur a fronte di temperature medie superiori. In particolare, lo studio mette in evidenza che a Siracusa (sud Italia) questo sistema può raggiungere una copertura del fabbisogno energetico del sistema di refrigerazione dell'80%, con un conseguente payback period di 4 anni e mezzo. Nel caso di regioni più a nord il fabbisogno refrigerativo diminuirà ma con esso diminuirà anche la produzione di energia dell'impianto fotovoltaico. Ad Amburgo, per esempio, la configurazione ottimale prevederebbe 9 moduli fotovoltaici per un totale di 3.6 kW di potenza nominale che garantirebbero una copertura del 47% della domanda di refrigerazione, con un conseguente payback period di 6,28 anni e a 20,28 kgCO₂eq salvati per ogni viaggio. In una città come Helsinki la configurazione ottimale prediligerebbe l'uso della batteria piuttosto che l'installazione dei moduli fotovoltaici, dato il costo molto basso dell'energia elettrica in questa zona. Forzando l'installazione dei moduli fotovoltaici la configurazione migliore vedrebbe 8 moduli, per un totale di 3,2 kW di potenza nominale e lo stesso pacco batterie del caso di Amburgo, questo porterebbe ad un payback period di 5,68 anni contro 5,17 anni della scelta delle sole batterie. L'utilizzo del fotovoltaico porterebbe ad una riduzione di 20,28 kgCO₂eq per viaggio, molto simile ai valori ottenuti per Amburgo; tuttavia, in queste zone la carbon intensity per la produzione di energia elettrica è molto bassa (0,083 contro 0,419 $\frac{\text{kgCO}_2\text{eq}}{\text{kWh}}$ per la Germania) quindi anche la soluzione con le sole batterie permetterebbe un forte risparmio in termini di emissioni. Se infine consideriamo una regione tropicale come Singapore la configurazione ottimale prevede lo sfruttamento dell'intera area di tetto

disponibile (13 pannelli), e consente una copertura dell'82% del fabbisogno di refrigerazione, con un payback period di 5,26 anni ed un taglio delle emissioni pari a 42,9 kgCO₂eq per ogni viaggio.

I payback time ottenuti per ogni caso in esame non potranno che abbassarsi nei prossimi anni dato l'abbassamento del costo della tecnologia e l'aumento del costo del carburante.

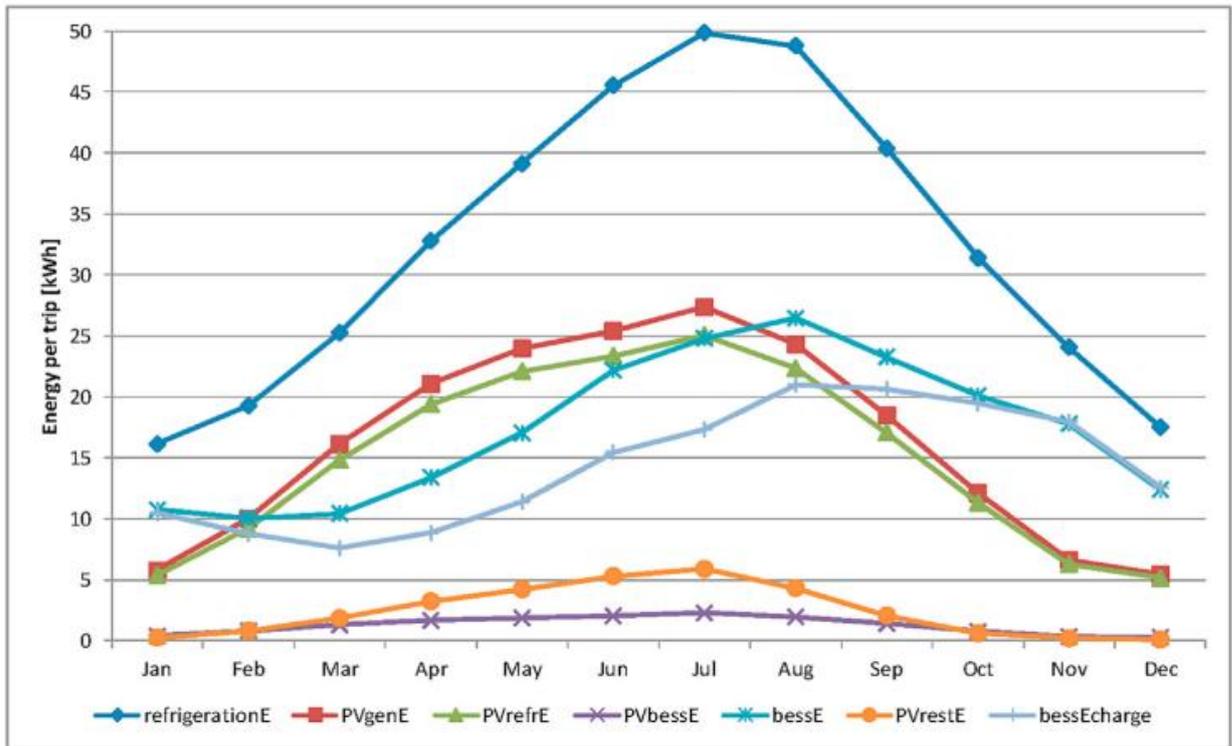


Figura 29: Energia necessaria alla refrigerazione (temperatura interna di -20°C) (refrigerationE), energia prodotta da PV (PVgenE), energia direttamente utilizzata per refrigerazione (PVrefrE), energia utilizzata per caricare il pacco batterie durante la marcia (PVbessE) e durante il fermo (PVrestE), energia fornita dalle batterie (bessE) ed energia fornita dalla rete per caricare le batterie (bessEcharge) per ogni viaggio in ogni mese dell'anno.

Costi	
Pannelli fotovoltaici [€]	8622
Batterie agli ioni di litio [€]	7750
PCS [€]	3168
Ricarica BESS [€/anno]	681
Manutenzione [€/anno]	149
Carburante per trazione (peso moduli) [€/annuo]	-72
Carburante risparmiato per refrigerazione [€/annuo]	3359
Manutenzione risparmiata per motore ausiliario [€/anno]	675
Payback [anni]	5,96

Tabella 10: Costi del sistema in configurazione base

Performance	Valore
Potenza PV installata [kW]	5,20
Capacità di storage [kWh]	31,00
Potenza PCS [kW]	9,00
Peso rispetto alla soluzione diesel [kg]	-68,80
Durata di un trasporto [h]	7,20
Domanda di refrigerazione media annua per trasporto [kWh]	32,60
Energia media annua persa per trasmissione per singolo trasporto [kWh]	21,24
Energia media annua persa per infiltrazioni per singolo trasporto [kWh]	11,36
Produzione media annua da PV [kWh]	16,43
Media annua di copertura della domanda attraverso produzione PV [kWh]	15,17
Energia media da PV utilizzata per caricare le batterie per viaggio [kWh]	1,26
Energia media fornita dalla batteria per viaggio [kWh]	17,43
Energia media annua necessaria da rete elettrica per ricaricare le batterie [kWh]	14,33
Emissioni di un sistema di refrigerazione diesel analogo per viaggio [kgCO ₂ eq]	33,91
Emissioni causate dalla ricarica della batteria attraverso la rete [kgCO ₂ eq]	3,71
Emissioni eliminate per viaggio [kgCO ₂ eq]	30,20

Tabella 11: Performance del sistema in configurazione base

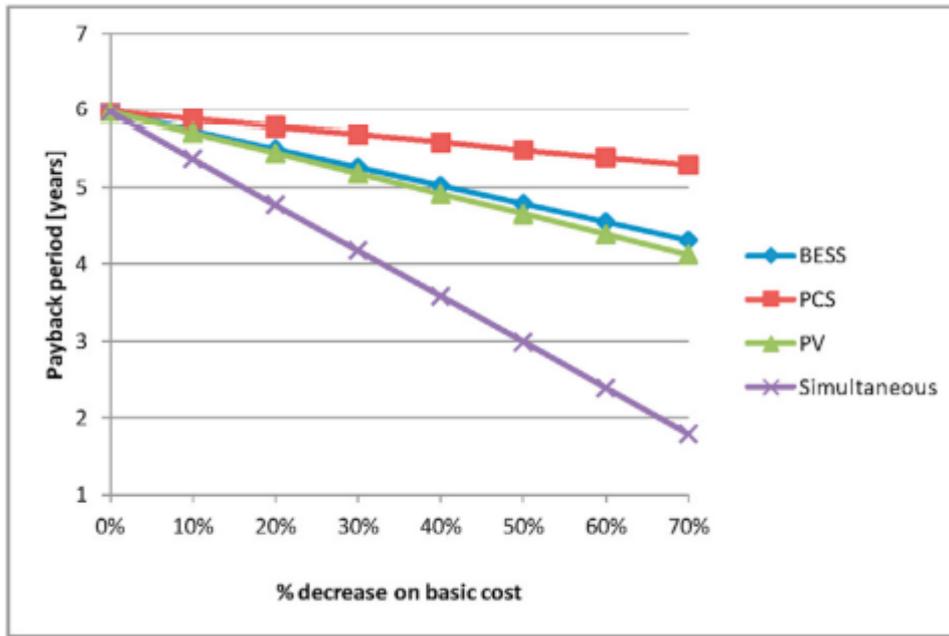


Figura 30: Payback time in funzione dei diversi componenti

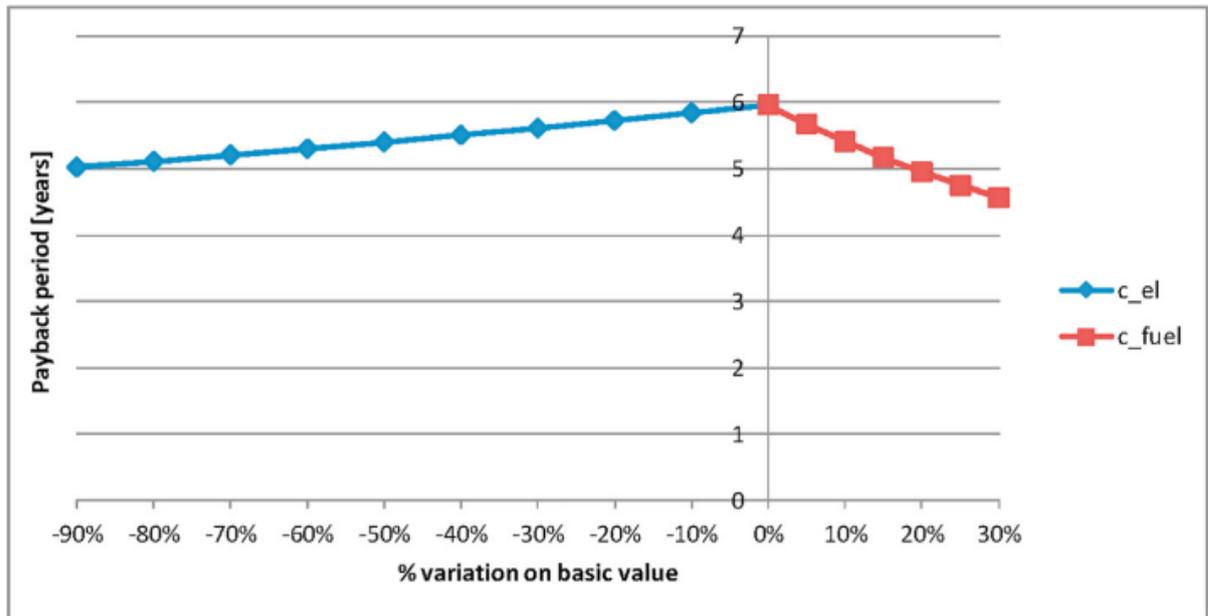


Figura 31: Payback time in funzione della variazione del costo di elettricità (c_{el}) e diesel (c_{fuel})

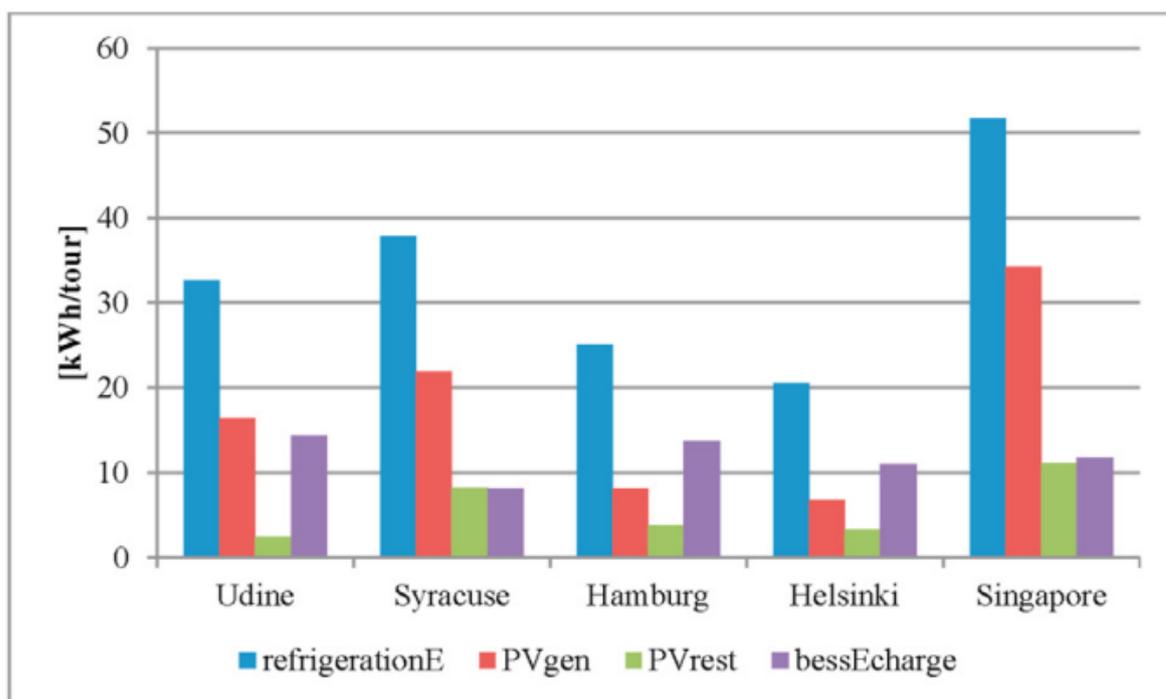


Figura 32: Performance per ogni singolo viaggio in diverse località

All'interno di questo studio sono stati analizzati, inoltre, diversi scenari. Il primo scenario prevedeva di simulare la giornata con le temperature più elevate degli ultimi 30 anni per le zone prese in analisi: in questa situazione il fabbisogno refrigerativo aumentava del 14,8% e la produzione da PV del 9,9% con conseguente necessità di aumentare la capacità delle batterie di 6 kWh, essendo già totalmente occupata la superficie utilizzabile sul tetto dell'autoveicolo per l'installazione dei moduli fotovoltaici. Questo comporta un aumento del costo di investimento del 9,5% rispetto allo scenario base. Tuttavia, vi è la possibilità, in caso di temperature così elevate, di andare a modificare il tragitto: se si salta uno dei punti di scarico merce, passando da 11 nodi a 10, le batterie possono essere ridotte a 33 kWh anche in caso di simulazione nel giorno con temperature più elevate degli ultimi 30 anni, mentre nel caso in cui i nodi saltati (clienti) fossero due sarebbe sufficiente una capacità del pacco batterie di 28 kWh, più bassa rispetto alla configurazione standard. Questo porta a ragionare sulla necessità di una sorta di trade off in base all'utilizzo che si andrà a fare dell'autoveicolo per poter stimare al meglio il numero di pannelli e la capacità delle batterie. Se ci fosse la possibilità di andare a variare il tragitto in caso di temperature estremamente alte si potrebbe optare per la configurazione standard mentre se l'acquirente ha bisogno di più flessibilità si potrebbe aumentare la capacità del pacco batterie.

Inoltre, come sopraccitato, l'analisi di base è stata condotta ipotizzando una temperatura interna di -20°C ma è stata effettuata un'analisi con temperatura interna di 0°C . Per questa situazione le perdite per infiltrazioni sono state interpolate sfruttando dati empirici e i valori di COP sono stati ricalcolati. In questo caso la configurazione ottimale presenterebbe 8 moduli per un totale 3,2 kW ed una capacità di storage delle batterie di 6 kWh (6 moduli da 1 kWh ciascuno), oltre a 8 moduli PCS (4,0 kW). In questa configurazione non è sfruttato l'interno tetto dell'veicolo e l'energia necessaria dalla rete si azzerà, consentendo addirittura di sfruttare l'energia in eccesso all'interno

della cabina (per esempio per l'aria condizionata in estate). Al momento dell'analisi questa configurazione presenta un payback period di 4,22 anni.

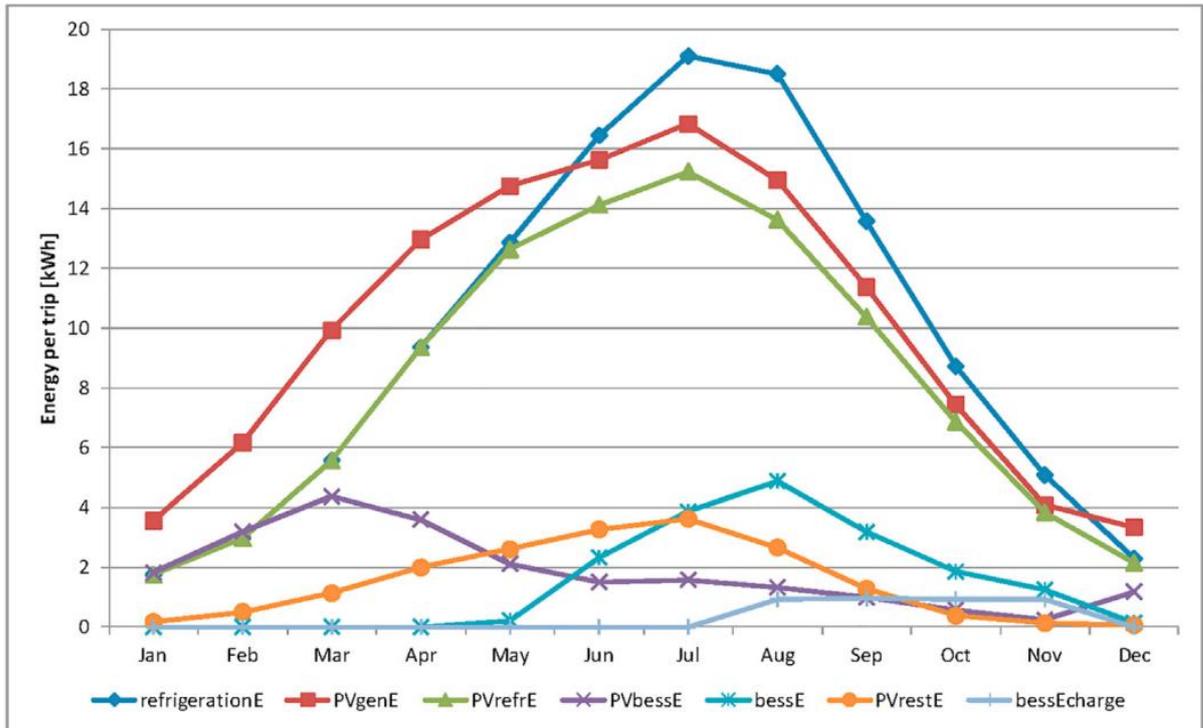


Figura 33: Energia necessaria alla refrigerazione (temperatura interna di 0°C) (refrigerationE), energia prodotta da PV (PVgenE), energia direttamente utilizzata per refrigerazione (PVrefrE), energia utilizzata per caricare il pacco batterie durante la marcia (PVbessE) e durante il fermo (PVrestE), energia fornita dalle batterie (bessE) ed energia fornita dalla rete per caricare le batterie (bessEcharge) per ogni viaggio in ogni mese dell'anno.

A seguito di questo studio ne è stato condotto un altro [52], adottando lo stesso modello, al fine di verificare la fattibilità dell'implementazione di batterie e fotovoltaico nel caso di trasporti a lungo raggio. In questa situazione si aggiungono altri elementi di cui tenere conto come, per esempio, l'attraversamento di zone che possono avere differenti condizioni climatiche e di irradianza (con la conseguente necessità di rendere il modello non più solo multi-periodo per tenere conto della variazione giornaliera e stagionale delle condizioni ma anche multi-zona) ma soprattutto la necessità di fare pause più lunghe per garantire agli autisti il riposo necessario prima di ripartire. Nei trasporti di lunga distanza, inoltre, le batterie si ricaricherebbero durante il viaggio di ritorno, con sistema frigorifero spento, se l'autoveicolo percorresse il viaggio di ritorno vuoto. In molti casi però i veicoli percorrono anche il viaggio di ritorno carichi in maniera da massimizzare

l'economicità del trasporto. Questo apre la strada a due diverse configurazioni, di cui si è cercato di tenere conto attraverso il modello utilizzato.

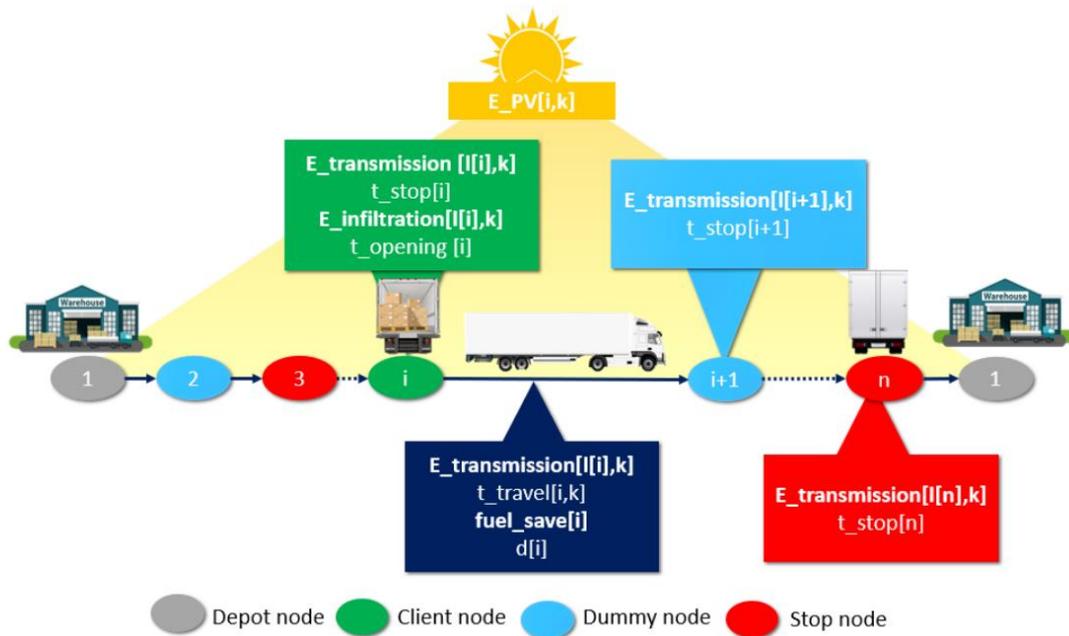


Figura 34: Schema del modello a nodi adattato per trasporti a lungo raggio

Lo studio è stato condotto analizzando un network di tre clienti locati in Bologna, Arezzo e Roma con partenza da Gorizia.

Node	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
Location	Gorizia	San Stino di Livenza	Padua	Ferrara	Bologna	Castiglione dei Pepoli	Florence	Reggello	Arezzo	Foiano della Chiana	Orvieto	Fiano Romano	Rome	Rome	Fiano Romano	Orvieto	Foiano della Chiana	Reggello	Castiglione dei Pepoli	Ferrara	Padua	San Stino di Livenza
d[i]	80	80	80	39	41	40	40	59	21	80	80	36	0	36	80	80	80	80	80	80	80	80
Type																						
Stop cause																						
Arrival time	06:00	07:00	08:00	09:00	09:30	10:30	11:00	12:16	13:00	14:17	15:17	16:17	16:44	06:00	06:27	07:27	08:27	09:27	11:12	12:12	13:42	14:42

Client node
 Depot node
 Dummy node
 Stop node
 Restart node
 Driving breaks
 Lunch/dinner stop
 Daily rest

Figura 35: Tragitto simulato nello studio

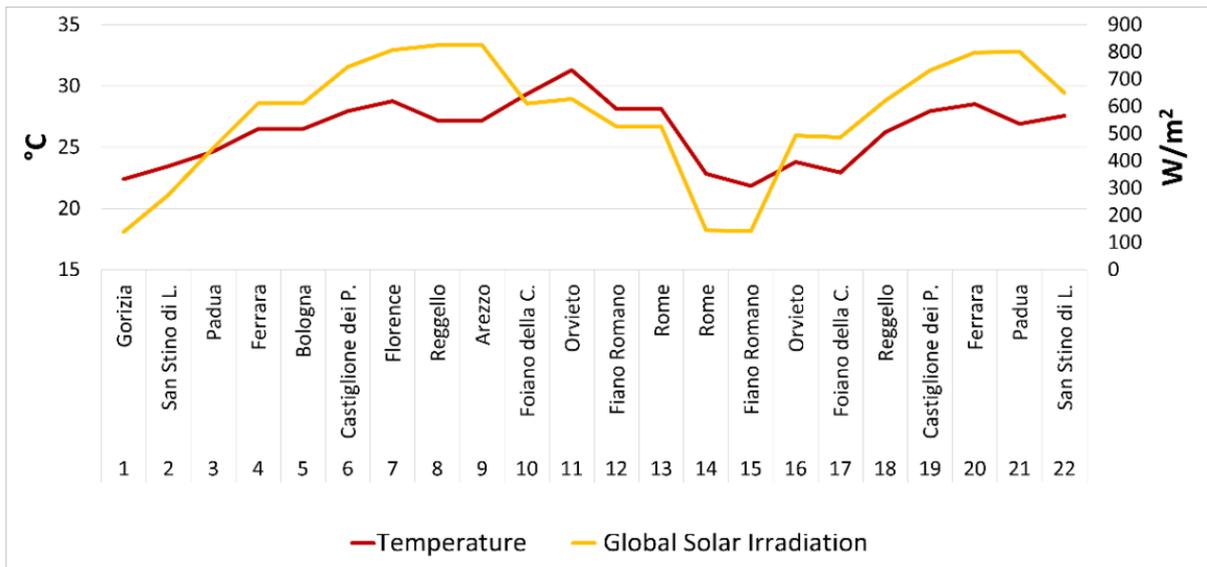


Figura 36: Temperatura esterna e radiazione solare globale per un tipico giorno di luglio lungo l'intero tratto di viaggio

La configurazione ottimale in questo caso è risultata essere composta da 7 pannelli, per una copertura del 52% dello spazio disponibile sul tetto del veicolo e 12 batterie per un totale di 12 kWh di capacità. Globalmente i pannelli riescono a coprire il 63% della richiesta necessaria alla refrigerazione mentre la restante quota è coperta dal pacco batterie, con un picco di richiesta da batterie nel mese di agosto. Tuttavia, non è necessario caricare esternamente le batterie nel caso in cui il viaggio di ritorno è effettuato con sistema di refrigerazione spento, in quanto in questo caso la produzione da fotovoltaico è sufficiente per la ricarica. Per gran parte dell'anno, inoltre, le batterie sono ricaricate più del necessario fabbisogno, con la possibilità di sfruttare l'energia in eccesso per gli utilizzi interni della cabina e durante gli stop.

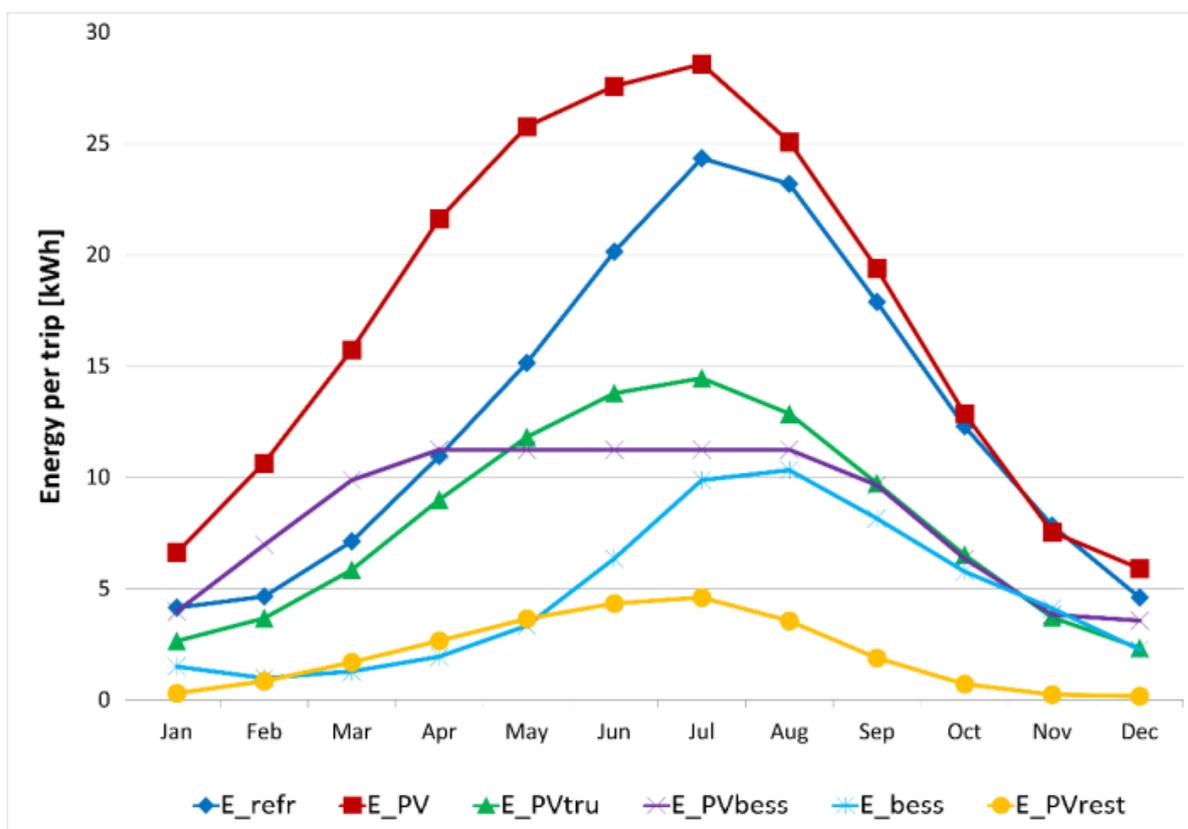


Figura 37: Energia necessaria alla refrigerazione (E_{refr}), energia prodotta da PV (E_{PV}), energia direttamente utilizzata per refrigerazione (E_{PVtru}), energia utilizzata per caricare il pacco batterie durante la marcia (E_{PVbess}) e durante il fermo (E_{PVrest}) ed energia fornita dalle batterie (E_{bess}) per mantenere una temperatura interna di 0°C per ogni viaggio in ogni mese dell'anno.

Performance	Valore
Potenza PV installata [kW]	2,80
Capacità di storage [kWh]	12,00
Potenza PCS [kW]	5,00
Peso rispetto alla soluzione diesel [kg]	-306,20
Durata di un trasporto [h]	32
Domanda di refrigerazione media annua per trasporto [kWh]	12,51
Energia media annua persa per trasmissione per singolo trasporto [kWh]	10,02
Energia media annua persa per infiltrazioni per singolo trasporto [kWh]	2,48
Produzione media annua da PV [kWh]	16,99
Media annua di copertura della domanda attraverso produzione PV [kWh]	7,91
Energia media da PV utilizzata per caricare le batterie per viaggio [kWh]	8,23
Energia media fornita dalla batteria per viaggio [kWh]	4,60
Energia media annua necessaria da rete elettrica per ricaricare le batterie [kWh]	0,00
Emissioni eliminate per viaggio [kgCO ₂ eq]	13,00

Tabella 12: Performance del sistema in configurazione base

In questo caso, non essendo necessaria la connessione alla rete per ricaricare le batterie, le emissioni date dall'utilizzo del sistema di refrigerazione sono totalmente azzerate. Ciò comporterebbe circa 2055 KgCO₂eq eliminati ogni anno per veicolo di questa tipologia (trasporti a lungo raggio). Il payback time stimato per questo tipo di configurazione è di 4,6 anni. Nell'analisi economica oltre ai costi di investimento per pannelli, batterie e strumentazione è stato considerato un risparmio dovuta alla minore manutenzione e ovviamente questa analisi è fortemente dipendente dal costo del diesel.

Voce di Costo	Valore
Investimento per PV [€]	4642
Investimento per batterie [€]	3000
Investimento per PCS [€]	1761
Ricarica batterie [€/anno]	-
Manutenzione [€/anno]	81
Combustibile risparmiato per refrigerazione [€/anno]	642
Manutenzione sistema diesel risparmiata [€/anno]	509
Payback [anni]	4,59

Tabella 13: Costi del sistema in configurazione base

Nel caso in cui anche durante il viaggio di ritorno il sistema di refrigerazione rimanesse in funzione la configurazione ottimale rimarrebbe la medesima ma vi sarebbe la necessità di caricare le batterie dalla rete. In questo caso il risparmio in termini economici sul combustibile aumenta del 67% ed il payback time scende a 3,3 anni. Ciò ovviamente porta ad un vantaggio ancora maggiore in termini di emissioni. In questo scenario, questa configurazione comporterebbe, considerando una carbon intensity per generazione di energia elettrica in Italia di 0,259 kgCO₂eq/kWh, ad un risparmio in termini di emissioni pari a 20,60 kgCO₂eq per ogni viaggio e quindi una crescita del 58,4% rispetto al caso base.

Voce di Costo	Valore
Investimento per PV [€]	4642
Investimento per batterie [€]	3000
Investimento per PCS [€]	1761
Ricarica batterie [€/anno]	98
Manutenzione [€/anno]	81
Combustibile risparmiato per refrigerazione [€/anno]	1070
Manutenzione sistema diesel risparmiata [€/anno]	969
Payback [anni]	3,31

Tabella 14: Costi del sistema in configurazione base considerando anche il viaggio di ritorno refrigerato

Se invece si utilizza il modello per stimare la configurazione ottimale in grado di soddisfare il fabbisogno di refrigerazione per le temperature del mese più caldo degli ultimi 30 anni e non le temperature medie si ottiene che il numero di pannelli rimarrebbe invariato ma andrebbe ad aumentare la capacità della batteria, fino a 23 kWh con un conseguente aumento del payback time che raggiungerebbe 7,08 anni ed un aumento dei consumi correlato all'aumento di peso dato dalle batterie aggiuntive. Anche in questo caso la scelta potrebbe essere di andare a modificare il tragitto in caso di giornate con temperature eccezionalmente elevate.

Come è stato precedentemente descritto, i risultati ottenuti sono funzione anche della temperatura interna, l'analisi è stata condotta con una temperatura minima di 0°C. Nel caso di temperatura interna pari a -20°C questo tipo di soluzione non è ancora economicamente vantaggiosa. Forzando una soluzione che preveda l'installazione di un sistema fotovoltaico il modello suggerisce l'installazione di 13 pannelli, per un totale di 5.2 kW, che andrebbero a coprire interamente lo spazio disponibile sul tetto del veicolo e 46 moduli batteria per un totale di 46 kWh.

Le batterie ovviamente necessiterebbero in qualsiasi caso di essere collegate attraverso la rete e il peso aggiuntivo andrebbe ad aumentare i consumi.

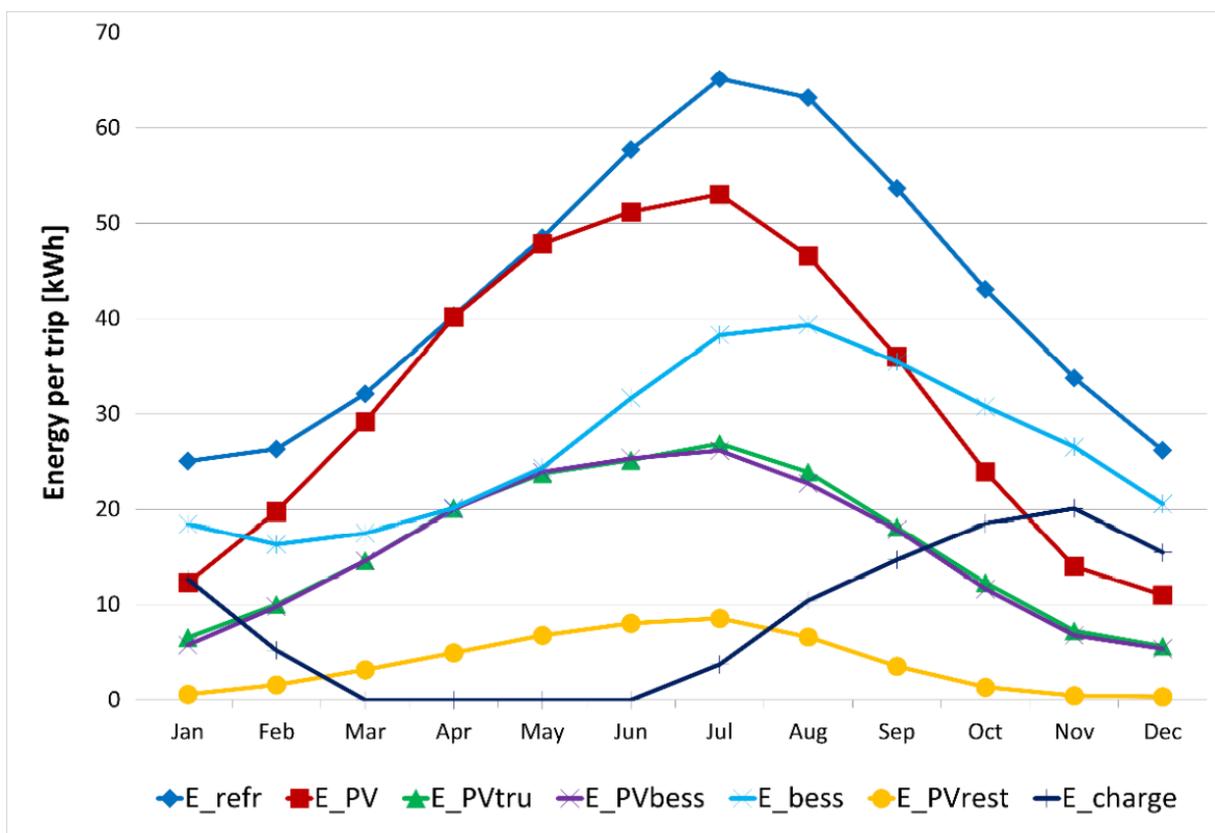


Figura 38: Energia necessaria alla refrigerazione (E_{refr}), energia prodotta da PV (E_{PV}), energia direttamente utilizzata per refrigerazione (E_{PVtru}), energia utilizzata per caricare il pacco batterie durante la marcia (E_{PVbess}) e durante il fermo (E_{PVrest}), energia fornita dalle batterie (E_{bess}) ed energia fornita dalla rete (E_{charge}) per manetenerne una temperatura interna di -20°C per ogni viaggio in ogni mese dell'anno.

Infine, sono state realizzate delle analisi relative a differenti tragitti, partendo dallo stesso punto iniziale (Gorizia), circa della stessa lunghezza. Il primo tragitto (Westward tour) prevedeva un viaggio verso ovest, servendo le città di Vicenza, Bergamo e Cuneo, seguendo quindi un percorso in zone con circa le stesse condizioni climatiche. Il secondo tragitto (Eastward tour) prevedeva un viaggio verso zone più fredde ad est, servendo le città di Ljubljana (Slovenia), Pécs (Ungheria) e Szeged (Ungheria). Il terzo tragitto (Northward tour) prevedeva, infine, un percorso verso zone più a nord, quali le città di Klagenfurt (Austria), Wien (Austria) e Brno (Repubblica Ceca). Come ci si può aspettare, muovendosi verso regioni più fredde diminuisce il carico termico refrigerativo ma diminuisce anche la generazione da fotovoltaico. Il numero di pannelli fotovoltaici si abbassa da 7 nella configurazione standard (Southward tour) a 5 per queste altre tratte e la produzione da fotovoltaico, seppure molto inferiore rispetto al caso base, riesce comunque a coprire il fabbisogno refrigerativo nel caso in cui in viaggio di ritorno sia effettuato con sistema di refrigerazione spento. In queste configurazioni il payback time si abbassa leggermente arrivando a 4 anni a causa del minore investimento per i pannelli fotovoltaici.

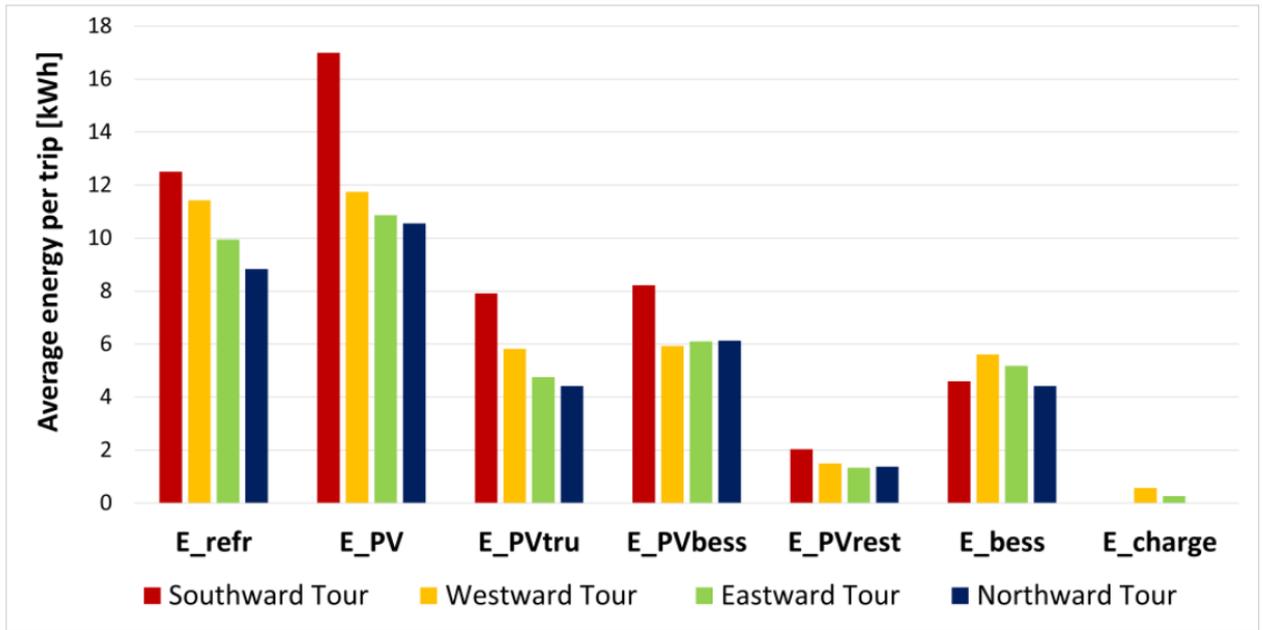


Figura 39: Performance per ogni singolo viaggio per differenti tragitti

Nella tabella seguente è presente un riassunto di tutti gli studi effettuati per quanto concerne l'integrazione del fotovoltaico nel trasporto refrigerato [53].

Autori	Breve Descrizione	Risultati principali
Bahaj, 1998,2000,2002	Primo sistema di refrigerazione alimentato attraverso la tecnologia PV	Payback time di circa 15 anni
Berheron, 2001	Studio di fattibilità sull'integrazione di della tecnologia PV al fine di alimentare un sistema VCR. Sono stati considerati anche PCM e batterie.	L'utilizzo con PCM presenta più problematiche di implementazione ma garantisce maggior longevità
Elliston e Dennis, 2009	Studio di fattibilità sull'integrazione di della tecnologia PV al fine di alimentare un sistema VCR in Australia. Soluzione con batteria	Riduzione del consumo di combustibile del 85% per trasporti refrigerati a -18°C
Garde, 2012	Sviluppo di un tool per dimensionare le fuel cells utilizzate per alimentare un sistema VCR. Integrazione del PV al fine di produrre idrogeno	l'integrazione di PV e fuel cell potrebbe arrivare ad avere un payback time di circa 4 anni e portare ad avere una riduzione di 21 tonnellate di CO2
Fard e Kajepour, 2016	Sistema anti-idling ottenuto utilizzando un motore elettrico ausiliario e una batteria. E' stato considerato anche l'utilizzo di un sistema di ricarica di tipo rigenerativo durante la frenata	Riduzione del consumo di carburante sia in città (-11,9%) che in autostrada (-6,6%)
Bagheri, 2017	Modello matematico utilizzato per simulare le performance di un sistema VCR	Riduzione del consumo di combustibile (-3105 Kg/anno) e di emissioni di CO2 (-8320 kg/anno) sfruttando un sistema VCR alimentato a batteria
Rossetti, 2019	Prototipo di un sistema VCR alimentato attraverso PV. Simulazione numerica al fine di valutare la fattibilità economica	La fattibilità è stata dimostrata
Meneghetti, 2021	Modello di ottimizzazione per il dimensionamento di un sistema PV-batterie per il trasporto refrigerato	La riduzione di emissione di Co2 può arrivare all'89% al nord Italia, ed un payback time di circa 6 anni

Tabella 15: Riassunto degli studi effettuati sull'integrazione del fotovoltaico nel trasporto refrigerato.

6. Analisi dell'impatto ambientale di un sistema di refrigerazione a compressione di vapore

Sulla base del modello sviluppato da Ashika Rai della Brunel University di Londra [54] si è realizzato un semplice tool su Excel che possa stimare l'impatto ambientale di un sistema di refrigerazione a compressione di vapore partendo dalle caratteristiche strutturali del rimorchio refrigerato, del materiale trasportato, della tipologia di trasporto in termini di tempo, fermate, periodo di apertura dei portelloni e ovviamente in base alle temperature all'interno del vano refrigerato e dell'esterno. In questo capitolo verrà analizzato il suddetto modello, preso come riferimento.

Ovviamente questo modello sottostà a determinate semplificazioni ma è particolarmente utile in quanto può fornire una stima della quantità di emissioni, in termini di emissioni di anidride carbonica equivalenti (KgCO_2eq), che si possono risparmiare sfruttando un sistema elettrico interfacciato ad un impianto fotovoltaico. Questo ovviamente al netto delle emissioni che comunque vanno considerate se vi è necessità di ricaricare le batterie del veicolo attraverso l'utilizzo della rete; a tal proposito è opportuno ricordare che l'impatto ambientale della generazione di energia elettrica dipende fortemente dalle tecnologie utilizzate all'interno dello stato preso in considerazione, uno stato basato principalmente sullo sfruttamento di combustibili fossili presenterà infatti un impatto ambientale nettamente maggiore rispetto ad uno stato principalmente basato su risorse rinnovabili per quanto concerne l'energia elettrica immessa in rete.

Il modello seguito per la realizzazione del tool è basato sulla metodologia di calcolo proposta dall'ASHRAE (American Society of heating, Refrigeration and Air-Conditioning). Il modello tiene in considerazione diversi parametri in input come il settaggio di temperatura interna, la temperatura dell'ambiente esterno, le dimensioni del veicolo, il tipo di isolamento, il tempo di apertura delle porte e il tempo di utilizzo del sistema di refrigerazione. La metodologia seguita per stimare l'impatto ambientale è basata sullo standard EN16528 [55] e i fattori di conversione sono basati sui dati Defra [56].

6.1 Modellazione del carico termico

Per poter stimare l'impatto ambientale bisogna conoscere il consumo di combustibile necessario al funzionamento del sistema refrigerazione e di conseguenza è necessario conoscere i carichi termici a cui deve far fronte l'impianto. Il carico termico necessario alla refrigerazione include il carico termico dovuto alle perdite per trasmissione, il carico termico dovuto all'eventuale presenza di prodotti organici, il carico termico dovuto alle infiltrazioni e l'eventuale carico termico necessario all'iniziale refrigerazione.

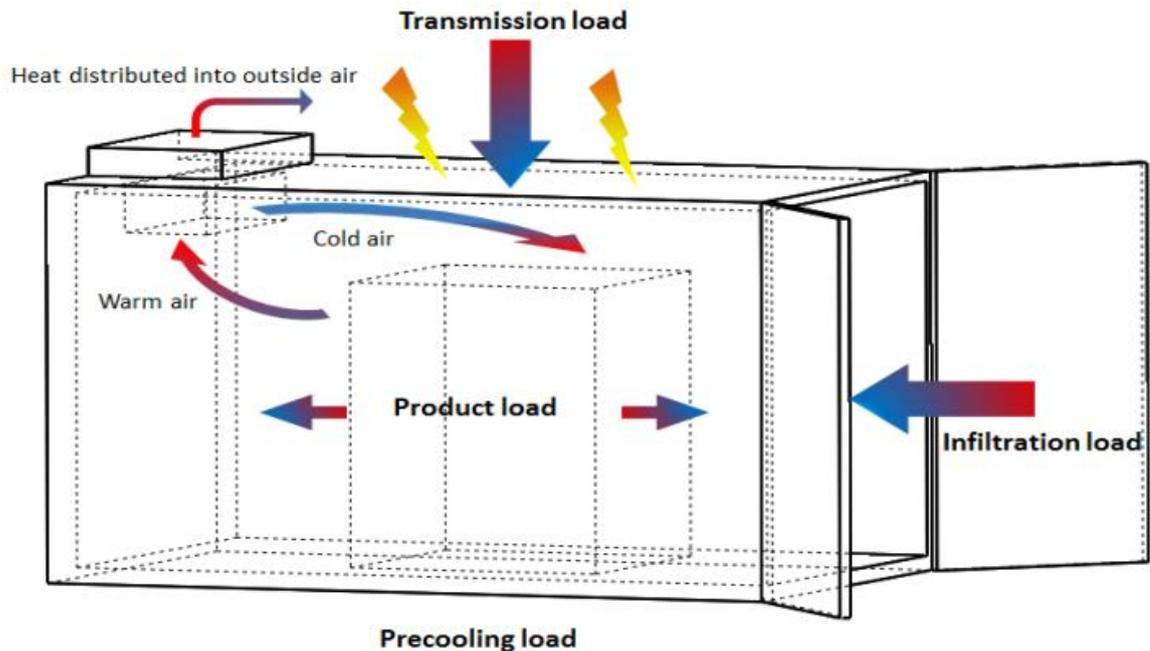


Figura 41: Rappresentazione dei carichi termici a cui deve far fronte l'impianto di refrigerazione.

6.1.1 Carico termico totale

Il carico termico totale (Q_{ref}) necessario alla refrigerazione può essere stimato sommando i differenti apporti.

$$Q_{ref} = Q_{trans} + Q_{pro} + Q_{pre} + Q_{inf} \quad [\text{kWh}]$$

Dove:

- Q_{trans} fa riferimento alle perdite per trasmissione [kWh];
- Q_{pro} fa riferimento alle perdite dovute alla presenza di prodotti organici [kWh];
- Q_{pre} fa riferimento all'eventuale preraffreddamento iniziale [kWh];
- Q_{inf} fa riferimento alle perdite per infiltrazioni [kWh]

6.1.2 Perdite per trasmissione

Le perdite per trasmissioni rappresentano il flusso termico, attraverso l'involucro della cabina dell'ambiente refrigerato (incluso pavimento e soffitto), dovuto alla differenza di temperatura tra esterno ed interno.

$$Q_{\text{trans}} = \sum_{i=1}^{n^{\circ} \text{ di ore di trasporto}} U * A * (T_{\text{amb},i} - T_{\text{int}})$$

Dove:

- U rappresenta il coefficiente globale di scambio termico $[\frac{W}{m^2 * K}]$;
- A rappresenta la superficie di scambio termico $[m^2]$;
- T_{amb} rappresenta la temperatura dell'ambiente esterno $[K]$;
- T_{int} rappresenta la temperatura dell'ambiente interno refrigerato $[K]$;

La sommatoria è data dal fatto che l'analisi è eseguita in termini energetici su base oraria; la discretizzazione del viaggio viene infatti eseguita su base oraria e la temperatura esterna varia secondo questo intervallo di tempo. Il termine sommatoria va quindi ad indicare il fatto che si esegue la somma, su tutte le ore di utilizzo del sistema di refrigerazione, dei kW necessari per un periodo di tempo pari ad un'ora per mantenere la temperatura interna pari a quella fissata, dati dalla formulazione $U * A * (T_{\text{amb}} - T_{\text{int}})$.

Il coefficiente globale di scambio termico è calcolato nella seguente maniera:

$$U = \frac{1}{\sum_{i=1}^{n^{\circ} \text{ di strati}} \frac{x_i}{k_i}} \quad [\frac{W}{m^2 * K}]$$

Dove:

- x_i indica lo spessore del materiale $[m]$;
- k_i rappresenta la conducibilità termica del materiale $[\frac{W}{m * K}]$;
- $\frac{x_i}{k_i}$ rappresenta la resistività termica (R_i) del materiale;

È opportuno indicare che l'ASHRAE specifica che la differenza di temperatura andrebbe corretta al fine di tenere conto del colore del veicolo e di conseguenza dell'effetto dei raggi solari sul calcolo del carico termico. Inoltre, tutti i danneggiamenti fisici e la penetrazione di condensa vanno ad influire sull'isolamento che un determinato materiale può garantire e andrebbe tenuto conto di questo effetto in fase di calcolo. Per semplificazione, in questo modello, questi fattori non sono stati tenuti in considerazione

6.1.3 Perdite dovute alla presenza di prodotti organici

I prodotti alimentari normalmente sono preraffrigerati e precongelati alla temperatura richiesta in delle camere di refrigerazione prima di essere caricati sul veicolo. In questo caso non entra nel calcolo il carico termico dovuto all'abbassamento di temperatura dei prodotti. Inoltre, bisogna considerare che i prodotti congelati non causano un carico termico dovuto alla respirazione. Nel caso di prodotti non congelati questo fattore può essere stimato nella seguente maniera:

$$Q_{\text{pro}} = \frac{h_r * m}{1000} * n^{\circ}\text{ore di viaggio}$$

Dove:

- h_r indica il calore prodotto dalla respirazione [$\frac{\text{mW}}{\text{Kg}}$];
- m rappresenta la massa totale [Kg];

Dalla tabella sottostante si può notare come il calore prodotto dalla respirazione degli elementi biologici non congelati vari anche in base alla temperatura a cui sono mantenuti.

Alimento	Calore generato per respirazione per unità di massa [mW/kg]			
	0°C	5°C	10°C	15°C
mele	10-13	15-21	41-61	41-92
albicocche	15-17	19-27	33-56	63-101
more	46-68	85-135	154-280	208-431
broccoli	55-63	102-474	-	514-1000
cavoli	13-40	28-63	36-86	66-169
sedano	21	32	58-81	110
mais	125	230	331	482
porri	28-48	58-86	158-201	245-346
lattuga	27-50	39-59	64-118	114-121
cipolle	7-9	10-20	21	33
arance	9	14-19	35-40	38-67
pesche	11-19	19-27	46	98-125
patate	-	17-20	20-30	20-35
fragole	36-52	48-98	145-280	210-273

Tabella 16: Esempi di alcuni valori relativi al calore prodotto dalla respirazione, a differenti temperature, per alcuni elementi.

Nel caso in cui i prodotti non siano preraffrigerati o precongelati in camere apposite prima di essere immesse all'interno del trailer questa procedura può avvenire all'interno del trailer stesso ma questo ovviamente porta ad un aumento del carico termico. Il calore da rimuovere per raffreddare o refrigerare i prodotti può essere stimato nella seguente maniera:

$$Q_{\text{pre-congelamento}} = m * c_1 * (T_1 - T_2) \quad [\text{kJ}]$$

$$Q_{\text{post-congelamento}} = m * c_2 * (T_f - T_2) \quad [\text{kJ}]$$

Dove:

- c_1 rappresenta il calore specifico del prodotto prima di raggiungere a congelamento $[\frac{\text{kJ}}{\text{Kg} \cdot \text{K}}]$;
- c_2 rappresenta il calore specifico del prodotto dopo aver raggiunto la temperatura di congelamento $[\frac{\text{kJ}}{\text{Kg} \cdot \text{K}}]$;
- T_1 rappresenta la temperatura di partenza [K];
- T_2 rappresenta la temperatura finale [K];
- T_f rappresenta la temperatura di congelamento [K].

Se il prodotto viene solo raffreddato basta applicare la formulazione valida fino a precongelamento mentre se il prodotto viene portato al di sotto della temperatura di congelamento il carico termico deve essere scorporato in due fattori: un primo fattore che tiene conto del calore da rimuovere necessario a portare il prodotto a congelamento e successivamente un secondo fattore che tiene conto del calore da rimuovere successivamente al congelamento del prodotto. In questo caso quindi la temperatura finale nel calcolo del calore di precongelamento indicato prima diventerebbe la temperatura di congelamento T_f . Questa differenziazione è necessaria dato il cambiamento del valore di calore specifico per i prodotti biologici dopo il congelamento.

A titolo informativo, nella seguente immagine, viene inserita una porzione di tabella riepilogativa dei calori specifici pre e post congelamento di alcuni prodotti biologici [57].



Food	Specific Heat above Freezing		Specific Heat below Freezing	
	(KJ/kg°C)	(Kcal/kg°C)	(KJ/kg°C)	(Kcal/kg°C)
Apples	3.64	0.87	1.76	0.42
Apricots, fresh	3.68	0.88	1.8	0.43
Artichokes	3.64	0.87	1.76	0.42
Asparagus	3.94	0.94	1.88	0.45
Asparagus beans	3.68	0.88	1.8	0.43
Avocados	3.01	0.72	1.55	0.37
Bananas	3.35	0.8	1.67	0.4
Barracuda	3.35	0.8	1.67	0.4
Bass	3.43	0.82	1.72	0.41
Beef, carcass	2.85	0.68	2.01	0.48
Beef, flank	2.34	0.56	1.34	0.32
Beef, loin	2.76	0.66	1.47	0.35
Beef, rib	2.81	0.67	1.51	0.36
Beef, round	3.1	0.74	1.59	0.38
Beef, rump	2.6	0.62	1.42	0.34
Beef, shanks	3.18	0.76	1.63	0.39
Beef, corned	2.64	0.63	1.42	0.34
Beets	3.77	0.9	1.8	0.43
Blackberries	3.64	0.87	1.76	0.42
Blueberries	3.64	0.87	1.76	0.42
Brains	3.52	0.84	1.72	0.41
Broccoli	3.85	0.92	1.84	0.44
Brussels sprouts	3.68	0.88	1.8	0.43
Butter	1.26	0.3	1	0.24
Butterfish	3.22	0.77	1.63	0.39
Cabbage	3.94	0.94	1.88	0.45
Candy	3.89	0.93	3.89	0.93
Carp	3.43	0.82	1.72	0.41
Carrots	3.81	0.91	1.84	0.44
Cauliflower	3.89	0.93	1.84	0.44
Celery	3.94	0.94	1.88	0.45
Chard	3.89	0.93	1.8	0.43
Cherries, sour	3.68	0.88	1.72	0.41
Cherries, sweet	3.52	0.84	1.67	0.4
Chicken, squab	3.35	0.8	1.63	0.39
Chicken, broilers	3.22	0.77	1.59	0.38
Chicken, fryers	3.1	0.74	1.47	0.35
Chicken, hens	2.72	0.65	1.84	0.44
Chicken, capons	3.68	0.88	1.72	0.41
Clams, meat only	3.52	0.84	1.51	0.36
Coconut, meat and milk	2.85	0.68	1.88	0.45
Coconut, milk only	3.98	0.95	1.76	0.42
Codfish	03:06	0.86	1.63	0.39
Cod Roe	03:18	0.76	1.63	0.39
Cowpeas, fresh	03:06	0.73	0.92	0.22
Cowpeas, dry	01:17	0.28	1.72	0.41
Crabs	03:52	0.84	1.72	0.41
Crab apples	03:56	0.85	1.8	0.43
Cranberries	3.77	0.9	1.59	0.38
Cream	3.77	0.9	1.88	0.45
Cucumber	4.1	0.98	1.88	0.45

Figura 42: Tabella riepilogativa dei calori specifici pre e post refrigerazione per alcuni prodotti alimentari.

6.1.4 Prerefrigerazione iniziale

La prerefrigerazione iniziale rappresenta il carico termico che deve essere rimosso al fine di portare la temperatura interna a quella desiderata per il trasporto. Questo carico termico può essere stimato nella seguente maniera:

$$Q_{pre} = \frac{V * C_{pa} * \rho_a * (T_{ini} - T_{int})}{1000}$$

Dove:

- V rappresenta il volume del vano [m^3];
- C_{pa} rappresenta il calore specifico dell'aria [$\frac{kJ}{kg \cdot K}$];
- ρ_a rappresenta la densità dell'aria [$\frac{kg}{m^3}$];
- T_{ini} rappresenta la temperatura iniziale all'interno dell'involucro [K];
- T_{int} rappresenta la temperatura settata dal termostato interno [K].

Relativamente al calore specifico e alla densità dell'aria questi dipendono dalla quantità di umidità presente all'interno di essa e dalla temperatura (nonché anche dalla pressione che però in questi utilizzi è costante e pari a quella ambiente) e di conseguenza questi valori possono variare leggermente nei singoli casi. A fine semplificativo, all'interno del tool realizzato, si è selezionata una densità pari a $1,225 \frac{kg}{m^3}$ ed un calore specifico pari a $1020 \frac{kJ}{kg \cdot K}$.

6.1.5 Perdite per infiltrazioni

Stimare le perdite causate dalle infiltrazioni è molto complesso ma è di fondamentale importanza in quanto questo fattore ha un'importante rilevanza, in particolare nei trasporti che prevedono più fermate per il carico e scarico delle merci. Diverse formulazioni empiriche sono state presentate con l'intento di stimare il carico termico dovuto alle perdite per infiltrazioni [58].

Modello	Equazione
Brown-Solvason (1963)	$\dot{v} = 0.343(wh)(gh)^{0.5} \left(\frac{\rho_i - \rho_0}{\rho_{ave}}\right)^{0.5} \left[1 - 0.498\left(\frac{b}{H}\right)\right]^{0.5}$
Tamm (1966)	$\dot{v} = 0.333A(gh)^{0.5} \left(\frac{\rho_i - \rho_0}{\rho_i}\right)^{0.5} \left\{2 / \left[1 + \left(\frac{\rho_0}{\rho_i}\right)^{0.333}\right]\right\}^{1.5}$
Fritzsche-Lilienblum (1968)	$\dot{v} = 0.333K_{F,L}A(gh)^{0.5} \left(\frac{\rho_i - \rho_0}{\rho_i}\right)^{0.5} \left\{2 / \left[1 + \left(\frac{\rho_0}{\rho_i}\right)^{0.333}\right]\right\}^{1.5}$
Gosney-Olama (1975)	$\dot{v} = 0.221A(gh)^{0.5} \left(\frac{\rho_i - \rho_0}{\rho_i}\right)^{0.5} \left\{2 / \left[1 + \left(\frac{\rho_0}{\rho_i}\right)^{0.333}\right]\right\}^{1.5}$
Pham-Oliver (1983)	$\dot{v} = 0.226A(gh)^{0.5} \left(\frac{\rho_i - \rho_0}{\rho_i}\right)^{0.5} \left\{2 / \left[1 + \left(\frac{\rho_0}{\rho_i}\right)^{0.333}\right]\right\}^{1.5}$
Jones et al. (1983)	$\dot{v} = 0.173A\rho_{ave}(gh)^{0.5} \left(\frac{T_0}{T_i} - \frac{T_i}{T_0}\right)^{0.5}$
Wilson-Kiel (1990)	$\dot{v} = \frac{K}{3}w \left[hr^3g \frac{\rho_i - \rho_0}{\rho_{ave}}\right]^{0.5}$
	$\rho_{ave} = (\rho_i + \rho_0) / 2K_{F,L} = 0.48 + 0.004 (T_0 - T_i)K = C_d(1 - C_m)$

Figura 43: Alcuni modelli empirici per il calcolo delle perdite per infiltrazioni durante l'apertura portelloni

Le formule empiriche riportate nella tabella sovrastante si sono dimostrate consistenti nei casi di grandi volumi refrigerati e tempi di apertura dei portelloni bassi. In questo caso, infatti, il flusso raggiunge velocemente le condizioni di stazionarietà siccome l'inerzia termica del volume interno sarà molto superiore rispetto al carico termico perso a causa delle infiltrazioni [58].

All'interno del tool sviluppato su Excel è stata implementata la formula empirica sviluppata da Gosney-Olama mentre nel modello sviluppato dalla Brunel University di Londra, preso come riferimento, si è scelto di analizzare le perdite per infiltrazioni considerando un'analogia con il flusso d'aria che si sviluppa attraverso le porte di una stanza a temperatura minore rispetto all'ambiente esterno per effetto della differenza di densità. Alcune analisi effettuate tramite modellazione CFD hanno dimostrato che le condizioni sono molto vicine a quelle che si sviluppano all'apertura dei portelloni di un veicolo per il trasporto refrigerato. In questo modello si è quindi implementata un'analisi CFD con l'intento di descrivere nella maniera più accurata possibile il carico termico dovuto alle infiltrazioni.

La formula implementata nel modello di Ashika Rai della Brunel University è la seguente:

$$q = 0,577 * W * H^{1,5} * \left(\frac{Q_s}{A}\right) * \left(\frac{1}{R_s}\right)$$

Dove:

- $\frac{Q_s}{A}$ rappresenta il carico termico sensibile causato dall'apertura dei portelloni per metro quadrato di portellone [$\frac{kW}{m^2}$];
- W rappresenta la larghezza dei portelloni [m];
- H rappresenta l'altezza dei portelloni [m];
- R_s rappresenta la frazione di carico termico sensibile rispetto al carico termico totale

Come precedentemente descritto l'utilizzo di questa formula prevede un'analisi CFD al fine di stimare il carico termico sensibile, per metro quadro di portellone, e che frazione questo rappresenta rispetto al totale, sotto la semplificazione di modellare il fenomeno prendendo in analisi il flusso termico tra una stanza a temperatura minore e l'ambiente esterno. Nel tool realizzato parallelamente a questo lavoro questa soluzione non poteva essere adottata in quanto vi era la necessità di svilupparlo totalmente in Excel.

$$Q_{inf} = \frac{T}{3600} * q$$

Siccome tutto l'analisi è stata condotta su base oraria, anche il tempo di apertura dei portelloni (T) che sarà espresso in secondi viene normalizzato su base oraria.

6.1.6 Consumo di combustibile

Il consumo di combustibile di un motore diesel ausiliario per la refrigerazione dipende da diversi fattori. La densità energetica del diesel è stata assunta pari a $12,2 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}}$ e conseguentemente pari a $10,7 \frac{\text{kWh}}{\text{l}}$. È stata assunta un'efficienza dell'intero sistema di refrigerazione, basato su motore ausiliario alimentato a diesel, pari a 0,6 [53].

Il combustibile, espresso in litri, necessario a soddisfare il fabbisogno refrigerativo può quindi essere calcolato nella seguente maniera:

$$F_{\text{diesel}} = \frac{Q_{\text{ref}}}{\eta_{\text{ref}} * E_{\text{density Diesel}}} \quad [1]$$

Dove:

- Q_{ref} rappresenta il carico termico da rimuovere per la refrigerazione, calcolato nella maniera precedentemente descritta [kWh];
- η_{ref} rappresenta l'efficienza dell'intero sistema di refrigerazione, assunta pari 0,6;
- $E_{\text{density Diesel}}$ è la densità di energia del diesel al litro, assunta pari a $10,7 \frac{\text{kWh}}{\text{l}}$.

6.1.7 Emissioni di gas ad effetto serra

È stato adottato il modello dettagliato nello standard ENI 16528 al fine di calcolare le emissioni di gas ad effetto serra.

In questa analisi sono state trascurate le emissioni dirette, causate da perdite di fluido refrigerante.

Al fine di calcolare le emissioni di diossido di carbonio equivalenti per ogni litro di Diesel è stato utilizzato un fattore di conversione pari a 2,6762 kgCO₂e per litro (il quale è stato assunto che, a seguito della combustione, emetta 2,65564 kg di CO₂, 0,0006 kg di CH₄ e 0,020906 kg di N₂O).

Le emissioni equivalenti di CO₂ sono quindi calcolate nella seguente maniera:

$$\text{Emissioni}_{\text{CO}_2\text{e}} = F_{\text{diesel}} * EF_{\text{diesel}} \quad [\text{kg CO}_2\text{e}]$$

Dove:

- F_{diesel} rappresenta la quantità di combustibile utilizzando [1]
- EF_{diesel} rappresenta il fattore di conversione discusso precedentemente, pari a 2,6762 kg di CO₂.

6.2 Risultati

In questo paragrafo si riporteranno alcuni risultati ottenuti, sfruttando questo modello, dalla Brunel University. Il modello è stato applicato ipotizzando che il trasporto avvenisse nella regione attorno a Londra, prendendo come temperature esterne durante l'anno quelle di quest'ultima. I risultati ottenuti si sono successivamente dimostrati concordi con alcune misurazioni empiriche effettuate sfruttando sensori applicati a veicoli reali durante le operazioni di trasporto.

In particolare, il modello è stato applicato a tre differenti categorie di veicoli, atti al trasporto refrigerato, le cui caratteristiche sono riportate nella tabella sottostante.

Parametri	Tipologia di veicolo		
	Rigido 7,5 tonnellate	Rigido 12 tonnellate	Articolato
Dimensioni portellone [m]	5x2,3x2,3	6,5x2,3x2,3	11,8x2,3x2,6
Ore di utilizzo giornaliere	14,5	14,1	17,5
Giorni di utilizzo annui	276	282	301
Velocità media [km/h]	13,9	25,3	31,3
Fermate per scarico merce giornaliere	26	10	6
Apertura portellone per ogni fermata	3	4	5
Tempo medio di apertura portellone [min]	5	8,5	15
Tempo di refrigerazione medio giornaliero [h]	10	14	24
Spessore isolante [mm]	75	75	74

Tabella 17: Caratteristiche 3 differenti veicoli presi in analisi.

L'analisi è stata condotta ipotizzando il trasporto di prodotti alimentari refrigerati a 2°C (chilled) e congelate a -20°C (frozen).

I risultati ottenuti relativamente al carico termico su base oraria sono rappresentati nel grafico seguente.

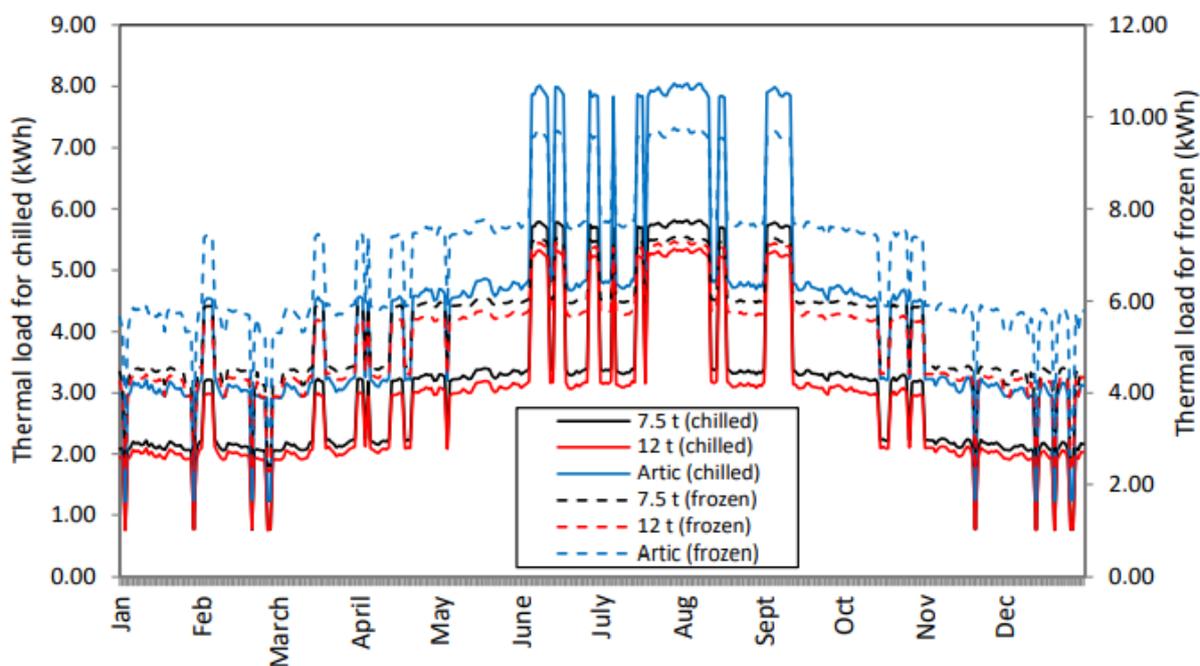


Figura 44: Carico termico su base oraria per merci congelate a 2°C (chilled) e congelate a -20°C (frozen) per 3 differenti tipologie di veicolo.

Come ci si può attendere il trasporto di merce refrigerata a 2°C presenta un carico termico nettamente minore rispetto al trasporto di merce congelata a -20°C. Questo ovviamente è dovuto soprattutto ad una minore differenza di temperatura tra l'interno e l'esterno del vano refrigerato e conseguentemente una minore perdita per trasmissione.

Inoltre, i mesi tra ottobre e marzo presentano in tutti i casi un carico termico minore rispetto agli altri mesi dell'anno. Anche questo ovviamente è da ricondurre alla minore differenza di temperatura tra il vano refrigerato e l'ambiente esterno grazie ad una temperatura esterna inferiore rispetto ai mesi che vanno da giugno a settembre.

Un'altra osservazione degna di nota è che i veicoli rigidi (indicati nel grafico precedente con linee di colore nero e rosso) seppur di dimensioni differenti presentano quasi lo stesso carico termico. Al contrario del veicolo articolato (indicato nel grafico precedente con linee di colore blu). Inoltre, tra i due veicoli rigidi, quello di dimensioni minori presenta un carico addirittura leggermente maggiore ma questo è dettato dal fatto che nello scenario proposto per questo veicolo vi sono più fermate per carico/scarico merci e di conseguenza aumenteranno le perdite per infiltrazioni.

Questa riflessione porta inevitabilmente ad esaminare l'impatto che hanno le differenze cause di carico termico, descritte nei paragrafi precedenti.

Prendendo in considerazione il caso di veicolo rigido da 7,5 t, per il trasporto refrigerato ad una temperatura di 2°C si può ottenere la distribuzione mostrata nel diagramma a torta rappresentato nell'immagine sottostante.

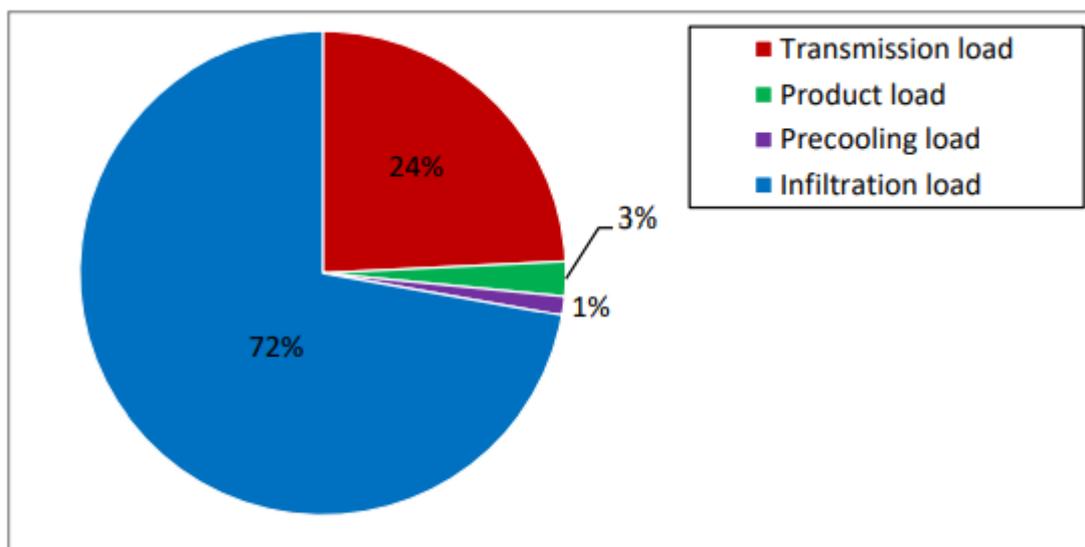


Figura 45: Percentuale di impatto di ogni differente causa di carico termico, rispetto al totale, per l'analisi di veicolo rigido da 7,5 t presentata prima, refrigerato a 2°C

Come si può evincere dal grafico il carico termico dovuto alle infiltrazioni causate dal carico/scarico della merce rappresenta più del 70% rispetto al totale, seguito dal carico termico per trasmissione e con gli apporti relativi a prerrefrigerazione e carico termico dovuto alla presenza di prodotti che sono molto limitati. È opportuno ricordare che nel caso in cui i prodotti alimentari trasportati fossero congelati il carico termico dovuto ai prodotti sarebbe nullo.

Dato l'importante impatto del carico termico dovuto alle infiltrazioni si è esaminato l'effetto che avrebbe una riduzione del 50% del periodo di apertura dei portelloni. In questo scenario il carico termico totale si ridurrebbe di circa il 35% e la percentuale di impatto delle infiltrazioni scenderebbe al 59%.

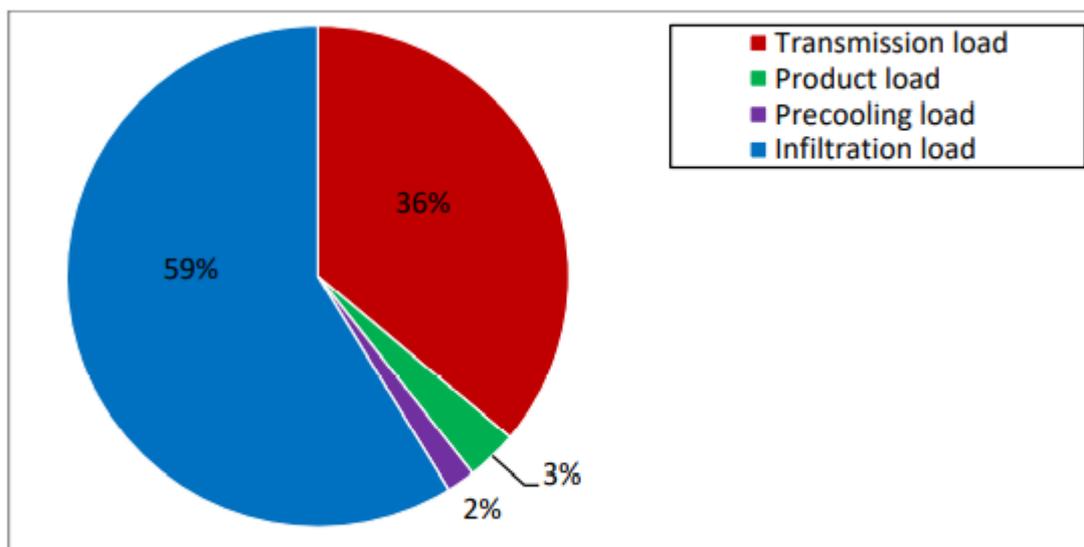


Figura 46: Percentuale di impatto di ogni differente causa di carico termico, rispetto al totale, per l'analisi di veicolo rigido da 7,5 t presentata prima, refrigerato a 2°C considerando una riduzione del 50% del periodo di apertura portelloni.

6.2.1 Consumo energetico – Consumo di combustibile

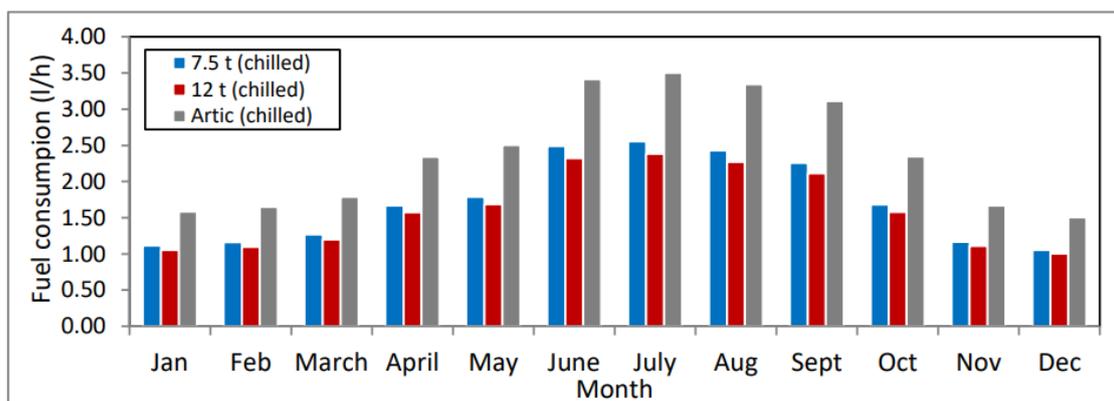


Figura 47: Consumi medi orari di combustibile per le tre differenti categorie di veicolo ed una temperatura interna al vano refrigerato di 2°C

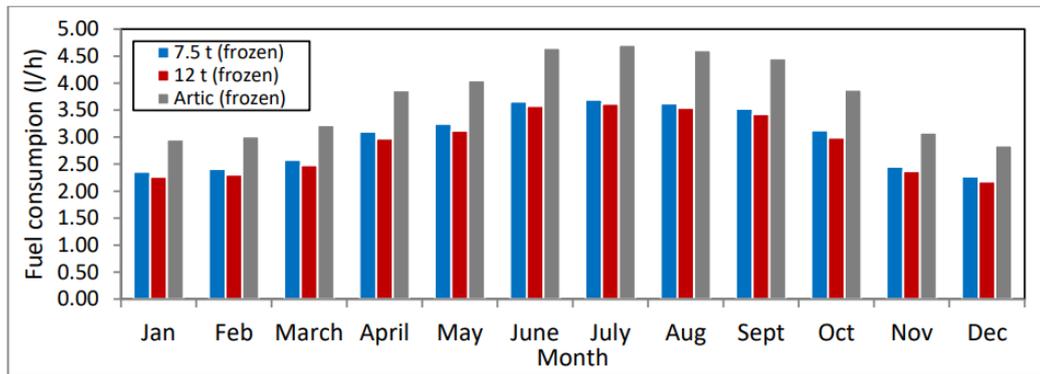


Figura 48: Consumi medi orari di combustibile per le tre differenti categorie di veicolo ed una temperatura interna al vano refrigerato di -20°C

Per quanto concerne il consumo di combustibile per garantire una temperatura del vano di refrigerazione pari a 2°C , come si può evincere dai due precedenti grafici, il valore medio per veicoli semirigidi (da 7,5 e 12 tonnellate) varia tra $1,00 \frac{1}{\text{h}}$ e $2,38 \frac{1}{\text{h}}$, mentre nel caso di veicolo articolato il valore medio si assesta tra $1,5 \frac{1}{\text{h}}$ e $3,5 \frac{1}{\text{h}}$. Nel caso di trasporto ad una temperatura di -20°C i consumi si alzano a valori compresi tra $2,18 \frac{1}{\text{h}}$ e $3,69 \frac{1}{\text{h}}$ nel caso di veicoli semirigidi e tra $2,85 \frac{1}{\text{h}}$ e $4,71 \frac{1}{\text{h}}$ nel caso di veicoli articolati.

Come ci si può ovviamente attendere il consumo nel caso di merci congelate a -20°C è maggiore rispetto al caso di merci refrigerate a 2°C a causa del maggiore carico termico. Discorso analogo si può fare relativamente alla variazione annuale di consumo di combustibile, con i mesi più caldi che vedranno un consumo nettamente maggiore a causa dell'aumento di carico termico. Anche dai grafici relativi al consumo di combustibile si può notare come il consumo del veicolo di dimensioni minori (7,5 t) sia maggiore rispetto al consumo del veicolo di dimensioni maggiori (12 t). Questo è sempre dovuto al fatto che il veicolo di dimensioni minori preso in analisi farà, durante il suo tragitto, un maggior numero di soste con un conseguente maggiori numero di volte di apertura dei portelloni che, come precedentemente osservato, portano ad un notevole aumento di perdite per infiltrazioni.

Nel caso di una riduzione del 50% del periodo di apertura dei portelloni anche il consumo di combustibile, e conseguentemente il dispendio energetico, cambia notevolmente.

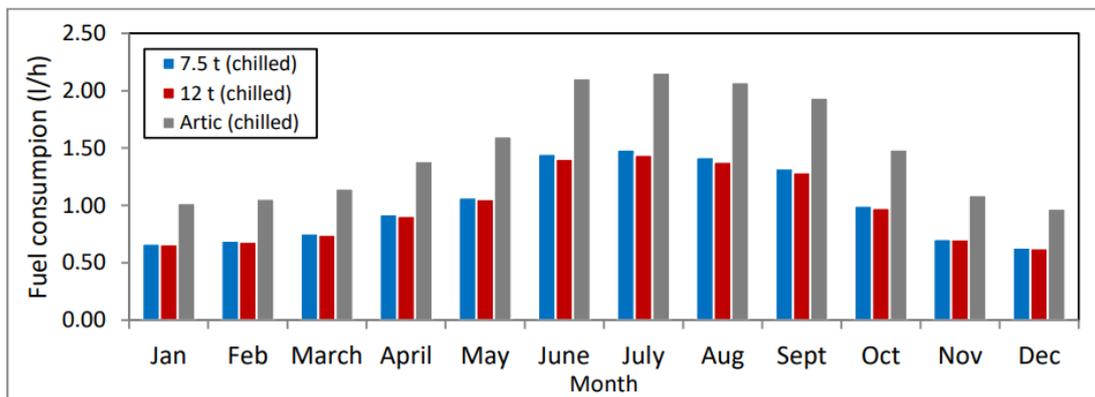


Figura 49: Consumi medi orari di combustibile per le tre differenti categorie di veicolo ed una temperatura interna al vano refrigerato di 2°C nel caso di una riduzione del 50% del tempo di apertura portelloni

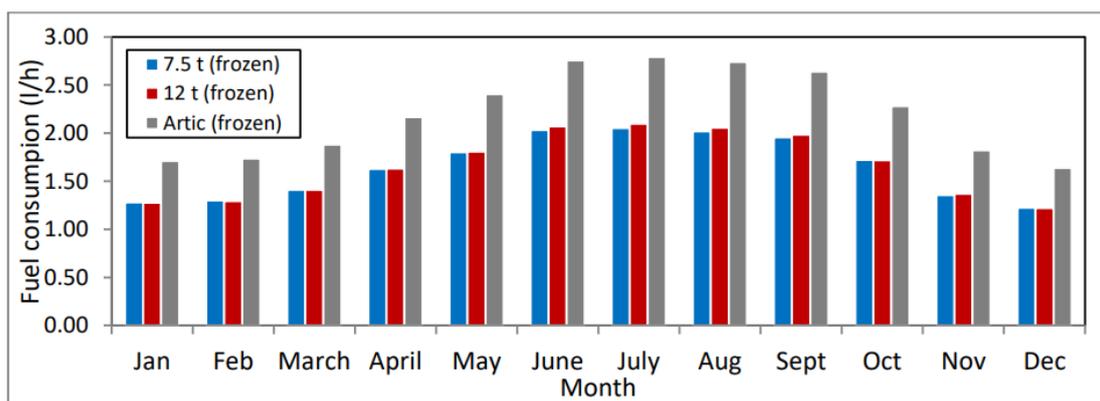


Figura 50: Consumi medi orari di combustibile per le tre differenti categorie di veicolo ed una temperatura interna al vano refrigerato di 2°C nel caso di una riduzione del 50% del tempo di apertura portelloni

In questo caso, per il trasporto refrigerato a 2°C si hanno dei consumi tra $0,63 \frac{1}{h}$ e $1,49 \frac{1}{h}$ per i veicoli rigidi da 12 t e 7,5 t mentre per quanto concerne il trasporto su veicolo articolato si hanno valori compresi tra $0,97 \frac{1}{h}$ e $2,16 \frac{1}{h}$. Se si analizzano i consumi per il trasporto ad una temperatura di -20°C i valori passano ad essere compresi tra $1,22 \frac{1}{h}$ e $2,10 \frac{1}{h}$ nel caso di veicoli rigidi e $1,64 \frac{1}{h}$ e $2,79 \frac{1}{h}$ nel caso di veicolo articolato.

Ciò che salta immediatamente all'occhio dai grafici precedenti è il fatto che, nel caso di una riduzione del 50% del tempo di apertura dei portelloni durante il carico/scarico merce, i consumi tra i due veicoli rigidi sono molto vicini, nonostante un maggior numero di fermate per il veicolo più piccolo. Nel caso di trasporto refrigerato a -20°C i consumi tra i due veicoli sono pressoché identici, con consumi addirittura superiori per quanto concerne il veicolo di dimensioni maggiori durante i mesi più caldi dell'anno. Questo è dettato dal fatto che durante questi mesi più caldi e grazie alla riduzione delle perdite per infiltrazioni il consumo maggiore dovuto alla trasmissione termica del veicolo più grosso prevale, nonostante il maggior numero di fermate del veicolo di dimensioni minori.

6.2.2 Emissioni climalteranti dovute al processo di combustione del combustibile

Come ci si può ovviamente attendere i valori di emissioni di gas ad effetto serra (GHG emissions, dove GHG sta per "Green house gases) seguiranno l'andamento del consumo di combustibile.

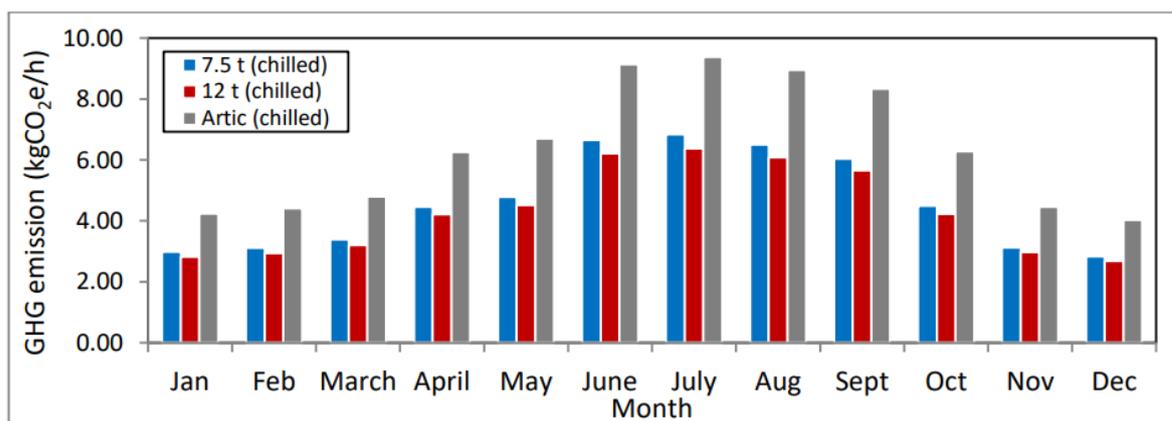


Figura 51: Emissioni medie orarie di CO_2e per le tre differenti categorie di veicolo ed una temperatura interna al vano refrigerato di 2°C

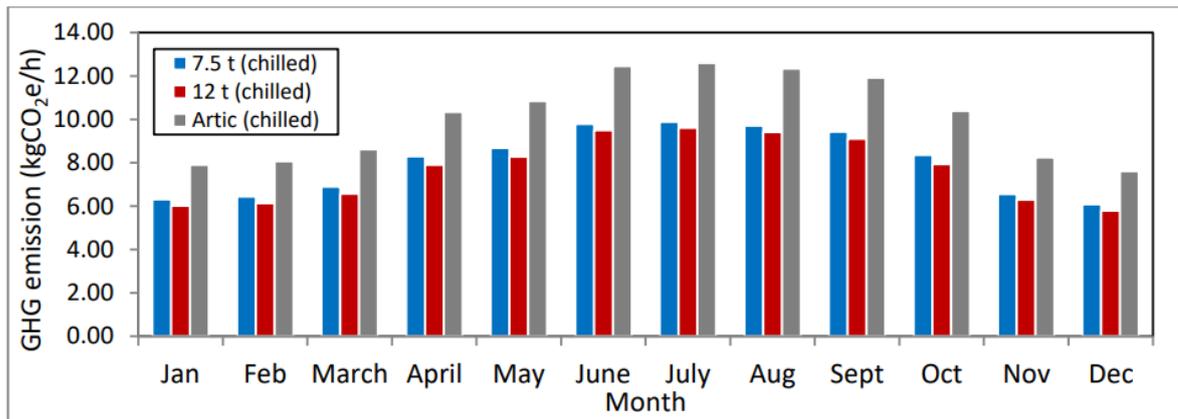


Figura 52: Emissioni medie orarie di CO₂e per le tre differenti categorie di veicolo ed una temperatura interna al vano refrigerato di -20°C

Come si può osservare dai grafici soprastanti i sistemi di refrigerazioni sono responsabili di un elevata quantità di emissioni di gas climalteranti. Nel caso di refrigerazione a 2°C per i camion rigidi si hanno valori compresi tra $2,68 \frac{\text{kgCO}_2\text{e}}{\text{h}}$ e $6,83 \frac{\text{kgCO}_2\text{e}}{\text{h}}$ e per veicoli articolati valori compresi tra $4,03 \frac{\text{kgCO}_2\text{e}}{\text{h}}$ e $9,37 \frac{\text{kgCO}_2\text{e}}{\text{h}}$. Nel caso di temperatura di refrigerazione a -20°C i valori di emissioni orarie salgono tra $5,83 \frac{\text{kgCO}_2\text{e}}{\text{h}}$ e $9,69 \frac{\text{kgCO}_2\text{e}}{\text{h}}$ per i veicoli da 7,5 tonnellate e 12 tonnellate e tra $7,62 \frac{\text{kgCO}_2\text{e}}{\text{h}}$ e $12,60 \frac{\text{kgCO}_2\text{e}}{\text{h}}$ per il camion articolato. Ovviamente, seguendo l'andamento dei consumi e conseguentemente del carico termico, i valori di emissioni orarie saranno maggiori nei periodi più caldi e minori nei periodi più freddi.

Se si riduce del 50% il periodo di apertura dei portelloni le emissioni scendono a valori compresi tra $1,68 \frac{\text{kgCO}_2\text{e}}{\text{h}}$ e $3,85 \frac{\text{kgCO}_2\text{e}}{\text{h}}$ per i veicoli di dimensioni minori e tra $2,60 \frac{\text{kgCO}_2\text{e}}{\text{h}}$ e $5,77 \frac{\text{kgCO}_2\text{e}}{\text{h}}$ nel caso di camion articolato, per una temperatura interna di 2°C. Se la temperatura interna scende a -20°C questi valori si abbassano ad un intervallo compreso tra $3,26 \frac{\text{kgCO}_2\text{e}}{\text{h}}$ e $5,61 \frac{\text{kgCO}_2\text{e}}{\text{h}}$ per camion rigidi e tra $4,38 \frac{\text{kgCO}_2\text{e}}{\text{h}}$ e $7,47 \frac{\text{kgCO}_2\text{e}}{\text{h}}$ per semi articolati.

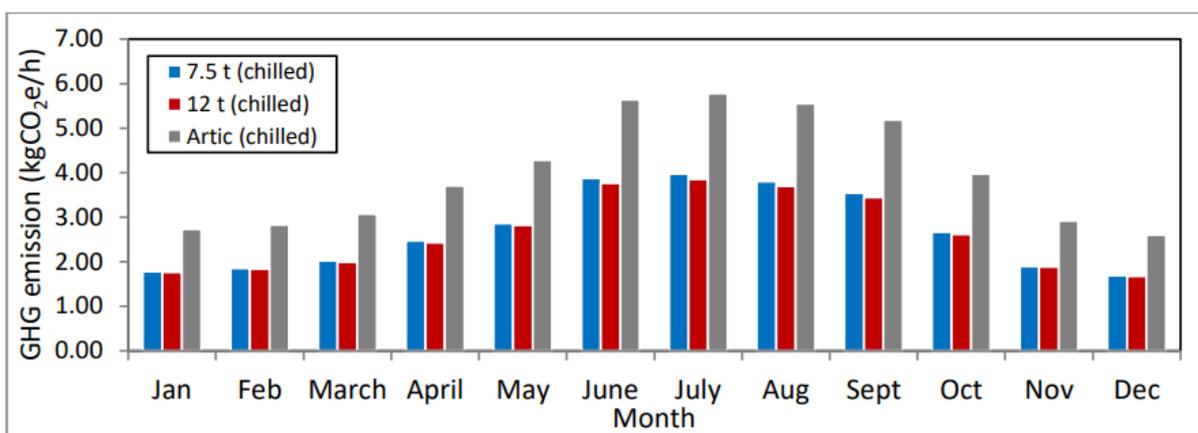


Figura 53: Emissioni medie orarie di CO_2e per le tre differenti categorie di veicolo ed una temperatura interna al vano refrigerato di $2^\circ C$ nel caso di una riduzione del 50% del tempo di apertura portelloni

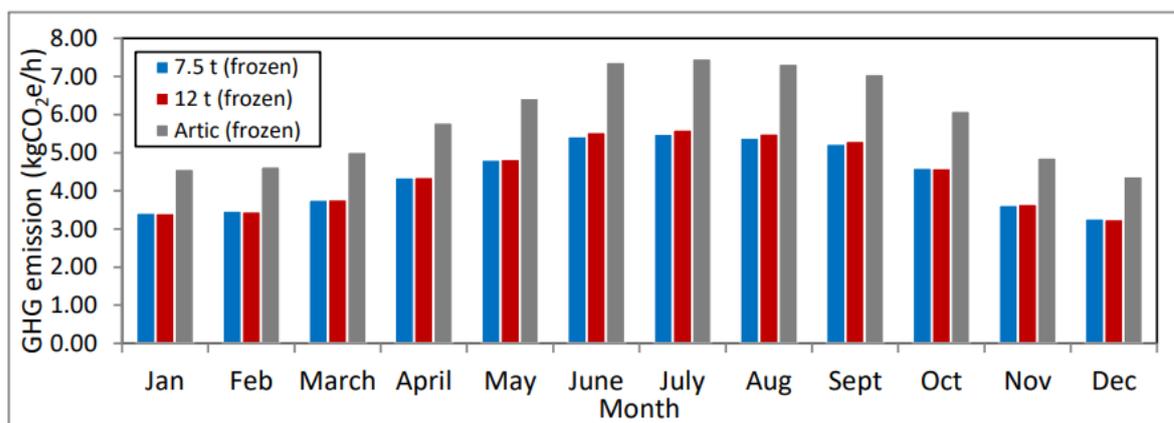


Figura 54: Emissioni medie orarie di CO_2e per le tre differenti categorie di veicolo ed una temperatura interna al vano refrigerato di $-20^\circ C$ nel caso di una riduzione del 50% del tempo di apertura portelloni.

7. Stato dell'arte e prospettive future relative alla tecnologia PV utilizzati nei VIPV

La generazione di energia fotovoltaica ha trovato la prima applicazione commerciale nel settore aerospaziale nel 1958. Da allora diverse tecnologie sono state testate e realizzate per differenti utilizzi. Le celle fotovoltaiche per utilizzi terrestri, al contrario di quelle per utilizzi spaziali, hanno ovviamente rendimenti inferiori ma costi nettamente minori

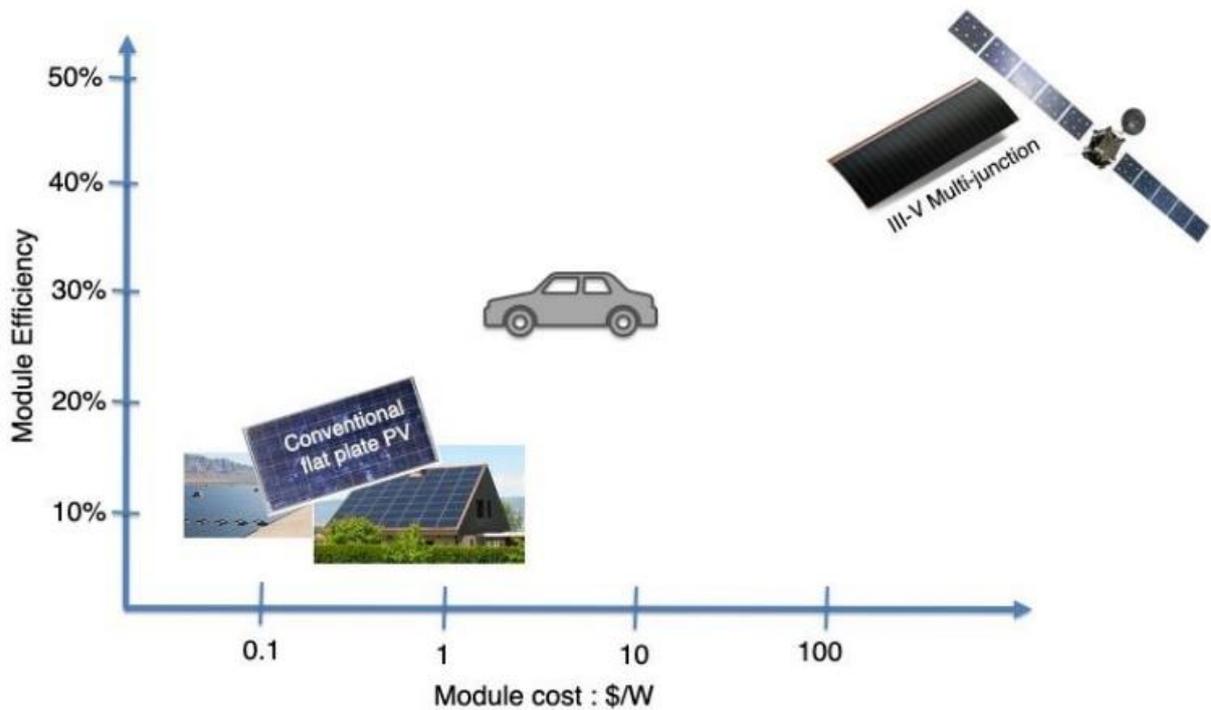


Figura 55: grafico che mostra come le celle solari più convenzionali presentano una minore efficienza a fronte di un costo minore mentre le celle solari per usi spaziali devono garantire alte efficienze

Vi è quindi una forte polarizzazione nelle differenti tecnologie, la quale ha lasciato una “zona” libera in cui i costi sarebbero troppo elevati per un utilizzo terrestre fisso ma contemporaneamente le efficienze sarebbero troppo basse per un utilizzo spaziale. In quest’area potrebbero ricadere i futuri moduli fotovoltaici da integrare nei veicoli, in quanto il costo più elevato sarebbe giustificato dall’utilizzo di pannelli con efficienze superiori dato lo spazio di installazione molto limitato (questo soprattutto nel settore automobilistico).

Nella tabella sottostante si possono notare le efficienze di differenti tecnologie fotovoltaiche per alcuni produttori.

Tipo di cella	Tipo di modulo	Efficienza	Area moduli	Produttore
III-V thin-film	InGa/GaAs/InGaAs thin-film	31,2%	0,97	Sharp
	GaAs thin-film	25,1%	0,87	Alta Devices
Silicio	Silicio monocristallino	24,4%	1,32	Kaneka 2016
	Silicio policristallino	20,4%	1,48	Hanwa Q cells
	a-Si/nc-Si tandem	12,3%	1,43	TEL solar
Chalcogenide thin film	CIGS thin-film	19,2%	0,84	Solar frontier
	CdTe thin-film	19,0%	2,36	First Solar
	Pevroskite	17,9%	0,80	Panasonic
	Organico	8,7%	0,80	Toshiba

Tabella 18: Efficienze di differenti tecnologie fotovoltaiche

Il formato del modulo può essere di due differenti tipologie. La prima tipologia, denominata “Wafer based” prevede un mosaico di celle solari assemblate in un modulo di più grandi dimensioni generalmente connesse in serie. La seconda tipologia, denominata “Large format substrate” prevede la deposizione del materiale semiconduttore direttamente sopra il metallo o la superficie di vetro. Questa tecnologia, ad oggi, è ritenuta tra le più promettenti per le future implementazioni del fotovoltaico su veicoli. L’obiettivo è quello di avere la possibilità di rivestire le carrozzerie di materiali che possano generare effetto fotovoltaico e di conseguenza ottenere una produzione da tutte le parti esposte alla luce solare.

Di seguito una breve analisi di ciascuna tecnologia:

- **Celle solari al silicio monocristallino e policristallino(c-Si)**

Le celle realizzate con silicio monocristallino e policristallino ad oggi sono la tecnologia di moduli fotovoltaici dominante, con una percentuale del 94% nel 2019. Esse vengono realizzate a partire da wafers che vengono ottenuti a partire da un lingotto formato da un singolo cristallo o da un blocco policristallino ottenendo rispettivamente celle monocristalline o policristalline. Quest’ultime sono meno costose, essendo possibile realizzare il blocco di partenza dagli scarti della lavorazione dei singoli lingotti monocristallini ma hanno anche una minore efficienza. Grazie ai costi di realizzazione minori queste si sono imposte negli anni trascorsi ma negli ultimi anni la riduzione dei costi di realizzazione delle celle monocristalline ha fatto sì che quest’ultime si siano imposte maggiormente nel mercato grazie alla migliore efficienza. Secondo la International Technology Roadmap relativa al fotovoltaico le celle solari del tipo n-type back contact hanno raggiunto il 21% della produzione rispetto al totale di celle solari prodotte e raggiungeranno il 23% nel 2020. Questa tipologia di celle solari, ad alta efficienza (>21,5%) sono quelle utilizzate per il veicolo Lightyear One. Convenzionalmente questa tipologia di celle utilizza spessi vetri frontali che rendono il modulo fotovoltaico rigido. Negli ultimi anni, tuttavia, si è raggiunta la possibilità di incapsulare queste celle all’interno di polimeri, avendo la possibilità di ottenere una struttura flessibile. Questa tipologia si presta molto bene all’utilizzo su veicolo grazie all’elevata modellabilità e anche grazie al peso minore. La degradazione di questa

tipologia di celle solari è la migliore in termini di degradazione in quanto è stimata una perdita solo del 0,5% rispetto alla potenza nominale all'anno, questo è il valore più basso ottenuto tra tutte le differenti tecnologie [59].

- **Celle solari Thin Film**

Questa tipologia di celle solari è quella con la più alta efficienza ma anche quella con il costo più elevato. Le celle sono realizzate depositando il semiconduttore su un substrato cristallino (solitamente GaAs o Ge) attraverso un processo epitassiale, il quale consente di realizzare dispositivi multi-giunzione altamente efficienti. Questa tipologia di celle solari viene utilizzata principalmente in ambito spaziale. I costi maggiori per questa tipologia di pannelli fotovoltaici sono relativi proprio alla particolare tipologia di realizzazione e quindi sono dati dal costo per la realizzazione del substrato, della deposizione epitassiale e dalla realizzazione dei contatti metallici [59]. Attualmente i costi di questa tecnologia non sono sostenibili per l'utilizzo su veicoli ma alcuni studi sostengono la possibilità di raggiungere, nei prossimi anni, costi al di sotto di 1\$ al Wp grazie al miglioramento della tecnologia di realizzazione [59].

- **Celle solari amorfe**

Questo tipo di celle sono composte da sottili strati di silicio depositati su vetro. Questa tecnologia è la meno costosa ma anche la meno efficiente. Ha raggiunto un picco pari al 9% del mercato nel 2000, quando i pannelli fotovoltaici erano ancora molto cari, ma ora solo lo 0,2% delle vendite è di questa tipologia di pannelli. Questa tecnologia presenta anche una più elevata degradazione (circa pari all'1% all'anno) ma ha il pregio di poter essere parzialmente trasparente. Grazie alla realizzazione attraverso deposizione su di una superficie questa tecnologia si presta bene ad essere implementata direttamente sulle carrozzerie [59].

- **Celle Chalcogenide Thin Film**

Questa tipologia di celle solari coprono circa il 6% del mercato e sono realizzate con semiconduttori di CdTe o Seleniuro di rame indio gallio (CIGS) depositati su un vetro o su un foglio metallico. Seppur non raggiungono le efficienze del silicio questa tipologia di celle solari rappresenta una promettente tecnologia per la realizzazione di carrozzerie che possano direttamente produrre energia elettrica attraverso l'effetto fotovoltaico senza dover installare i pannelli successivamente alla realizzazione del veicolo. Secondo i più recenti studi presentano una degradazione molto simile a quella dei moduli al silicio ma l'efficienza scende di molto quando incorrono in ombreggiatura parziale [59].

- **Celle solari organiche e perovskite**

Queste celle solari presentano gli stessi pregi delle precedenti relativamente alla possibilità di essere utilizzate come rivestimento per una vasta gamma di substrati ma con l'aggiunta di poter essere processate a temperatura inferiore. Queste tecnologie sono relativamente nuove e ancora in via di analisi [59].

Ad oggi, la tecnologia più matura e pronta per l'implementazione su veicoli è quella basata su celle al silicio, in particolare le celle al silicio monocristallino riescono a garantire il miglior compromesso tra costo e prestazioni.

Una tematica fondamentale di cui tenere conto nell'implementazione del fotovoltaico su veicoli è quella della sicurezza e della soddisfazione degli standard. L'industria automobilistica e più in generale quella relativa ai veicoli per trasporto su strada è altamente regolata ed i veicoli devono

garantire alti standard di sicurezza prima di poter essere commercializzati. Più precisamente ogni diversa nazione può avere delle differenze negli standard di sicurezza che ovviamente possono variare in base alle differenti caratteristiche dei veicoli. In questo contesto, al fine di poter implementare la tecnologia fotovoltaica nei veicoli è fondamentale che i pannelli e le varie strutture garantiscano di sottostare agli standard di sicurezza. Un altro aspetto è relativo alle tensioni e alle correnti del sistema al fine di poter garantire un adeguato isolamento dei veicoli. Infine, anche la struttura deve soddisfare criteri più stringenti rispetto a quelli di una soluzione fissa in quanto deve sopportare carichi ciclici e vibrazioni.

È opportuno quindi modificare i pannelli attualmente utilizzati nelle strutture fisse per poterli integrare su veicoli. Tuttavia, oggi la tecnologia fotovoltaica è disponibile in diverse soluzioni, prima tra tutte le differenti tecnologie delle celle fotovoltaiche, come precedentemente descritto, ma anche relativamente all'incapsulamento delle celle, che può rendere i pannelli capaci di poter essere applicati su strutture curve.

- **Pannelli fotovoltaici curvi**

Sono provvisti di una copertura in vetro, in maniera analoga ai pannelli piatti, ma quest'ultima è curva. Per essere realizzati sfruttano tecnologie atte alla realizzazione di vetri curvi. Queste soluzioni hanno il limite di essere curvi ma di avere una curvatura definita e non modificabile.

- **Pannelli fotovoltaici flessibili**

Le celle solari, che possono essere delle differenti tecnologie precedentemente illustrate, sono incapsulate all'interno di una struttura polimerica che garantisce flessibilità al pannello rendendolo ovviamente anche più leggero e meno fragile e conseguentemente molto più adatto alle installazioni su veicoli.

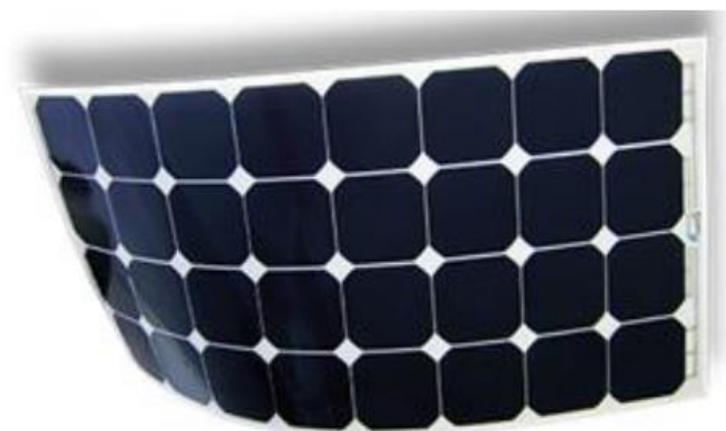


Figura 56: Esempio pannello solare flessibile con celle solari monocristalline Solbian.

8. LCA

I life cycle assessment (LCA) sono uno strumento molto importante che ha l'intento di quantificare, in maniera olistica, l'impronta ambientale di un prodotto o di un servizio. Un LCA è inteso come una compilazione e valutazione degli input, output e potenziali impatti ambientali di un prodotto o di un sistema durante la sua intera vita. Il processo inizia con l'estrazione dei materiali, includendo l'ammontare di energia necessaria all'estrazione di tali materiali, proseguendo si passa per la realizzazione, la distribuzione, l'utilizzo, il riutilizzo e la manutenzione, per poi terminare con il riciclo e la dimissione.

Al termine dei calcoli, il valore di impronta ambientale di un prodotto o di un servizio viene così restituito secondo diverse "categorie di impatto", che rappresentano tutti i diversi impatti che questo genera nei vari comparti ambientali. Una delle categorie di impatto considerate è il contributo che questo prodotto o servizio ha nell'aumento dell'effetto serra (Global Warming Potential 100 years) misurato sulla base della quantità di emissioni equivalenti di anidride carbonica emesse in atmosfera durante il suo intero ciclo vitale [60]

Un LCA consiste di quattro passaggi principali:

- Il primo step consiste nel definire gli obiettivi e lo scopo dell'analisi
- Il secondo step consiste nel realizzare un inventario (life cycle inventory, LCI)
- Il terzo step consiste nel realizzare il life cycle impact assessment (LCIA), utilizzato per analizzare l'impatto dei vari input e output
- Il quarto step consiste nell'interpretare i risultati ottenuti.

Nel 2019 è stato realizzato un LCA proprio mirato ad esaminare l'impatto ambientale dell'integrazione della tecnologia fotovoltaica su veicoli [61]. L'analisi è stata condotta sfruttando il software GaBi e il database Ecoinvent v2.2. L'unità funzionale presa in analisi nel seguente studio è stata 1 kWh di energia fornita alle batterie del veicolo VIPV. Sono stati presi in considerazione 3 pannelli SHJ di tipologia heterojunction (consistenti in uno strato di silicio cristallino n-type ed uno strato di silicio amorfo su ambo i lati, depositato attraverso tecnologia CVD), per un totale di 930 Wp, prodotti in Cina. Sono stati tenuti in considerazione l'estrazione del materiale grezzo necessario alla realizzazione del pannello stesso, la realizzazione del pannello, la realizzazione della struttura di fissaggio di quest'ultimo al veicolo, la realizzazione dell'inverter e le fasi di installazione e operazione. Per quanto concerne l'impatto ambientale dell'energia necessaria alla realizzazione dei pannelli è stato tenuto conto dell'impatto dell'energia elettrica prodotta in Cina, pari a $0,831 \frac{\text{kgCO}_2}{\text{kWh}}$ ed è stato tenuto conto inoltre dell'impatto del trasporto dalla Cina alla Germania, dove i pannelli verranno installati ed utilizzati, seguendo un tragitto di circa 20000 km, inizialmente in Camion, dal luogo di produzione fino al porto di Shanghai, per proseguire in nave fino in Belgio e per terminare nuovamente in camion fino in Cologne, in Germania.

L'impatto ambientale è stato analizzato in termini di kgCO_2e .

L'impatto maggiore per una soluzione fotovoltaica è ovviamente quello causato dalla realizzazione della tecnologia, la quale avrà successivamente un impatto ambientale sostanzialmente nullo durante la vita utile per poi essere nuovamente impattante a fine vita. L'impatto ambientale causato nelle fasi di realizzazione è stato distribuito lungo la vita utile dell'implementazione fotovoltaica. Le emissioni risparmiate sono state calcolate moltiplicando l'energia elettrica prodotta dal sistema fotovoltaico per il tasso di emissione della corrente elettrica della linea nazionale. Successivamente l'impatto ambientale di questa soluzione VIPV è stato

stimato sottraendo le emissioni risparmiate da quelle emesse per realizzare la soluzione stessa. Come dissertato nei capitoli precedenti la stima dell'energia prodotta è molto complessa da ottenere e dipendente da innumerevoli fattori. In questa analisi è stata utilizzata l'irradianza ottenuta attraverso PVGIS per la città di Cologne, in Germania. È stato assunto un'efficienza del pannello pari al 19,7%, tenendo in considerazione una riduzione dell'efficienza pari a 0,7% dell'efficienza originaria ogni anno. Per quanto concerne le altre cause di perdite è stata considerata una perdita pari al 5% causata dal sistema MPPT interfacciato alla batteria, una perdita del 30% causata dagli ombreggiamenti, una perdita del 5% causata dalla conversione DC/DC, una perdita pari al 9% causata dalla temperatura raggiunta dal pannello ed una perdita del 2% a seguito della carica/scarica delle batterie.

E' stato preso in considerazione un spessore del vetro a protezione del pannello pari a 2 mm ed una struttura di supporto in alluminio molto simile a quella delle soluzioni fisse. Ovviamente una struttura polimerica, come la soluzione presentata nel capitolo precedente consentirebbe di risparmiare peso e conseguentemente di andare ad aumentare l'efficienza della soluzione, oltre che la possibilità di garantire un'installazione più semplice senza la necessità del frame in alluminio. Per quanto concerne le emissioni risparmiate a seguito del non utilizzo della rete elettrica nazionale, come discusso precedentemente questo cambia molto a seconda del paese che si prende in considerazione. Un paese con un alto tasso di fonti rinnovabili avrà inevitabilmente un impatto inferiore rispetto ad un paese che ha rete elettrica basata principalmente sulle fonti fossili. In questo caso, prendendo in considerazione la Germania, il valore è pari a $0,486 \frac{\text{kgCO}_2}{\text{kWh}}$.

L'impatto della soluzione VIPV è ovviamente fortemente influenzato anche dall' utilizzo che si fa del veicolo e dal veicolo stesso. In questo caso è stato preso in considerazione l'utilizzo di un veicolo commerciale, di piccole dimensioni, atto al trasporto della merce in zone urbane, della marca Streetscooter. Il veicolo preso in considerazione ha un peso di 1695 kg ed una capacità di carico di 905 kg, esso è provvisto di un sistema di batteria al litio da 40 kWh che gli consente l'autonomia giornaliera necessaria a percorrere circa 40 km (distanza giornaliera tipica per un veicolo di questa tipologia). Il veicolo è provvisto di un motore sincrono a magneti permanenti. Al termine della vita dell'impianto fotovoltaico è stato considerato che le parti metalliche ed il silicio saranno riciclati, senza però tenere in considerazione gli impatti e i benefici di questo riciclo all'interno dello studio.

Da questa analisi è emerso che per la soluzione adottata all'interno del progetto di integrazione fotovoltaica su veicolo elettrico di Streetscooter le emissioni causate dalla realizzazione del pannello, dell'inverter e del sistema di ancoraggio all'autoveicolo sono pari a 1143,12 kgCO₂e. Anche questo valore è ovviamente influenzato da svariati fattori, come la tecnologia stessa della cella fotovoltaica, il tipo di incapsulamento scelto e la regione in cui viene prodotto il pannello, la quale influenzerà sulle emissioni causate in fase di produzione a seconda dell'impatto ambientale dell'energia elettrica proveniente della rete. Tuttavia, è molto utile al fine di rendere l'idea dell'impatto che un sistema da 930 Wp può avere.

La quantità di energia prodotta dal sistema fotovoltaico varierà durante l'arco dell'anno, con un valore medio di 1,3 kWh/giorno, stimando un utilizzo del veicolo di 200 giorni. Questo porta ad una copertura media giornaliera pari al 6,5% della capacità della batteria. Nell'arco degli 8 anni, stimati, di utilizzo la soluzione fotovoltaica porterebbe, sotto le ipotesi precedentemente descritte, ad una produzione di circa 3740 kWh, mentre se si prolunga la vita del sistema fotovoltaico fino a 12 anni questo produrrebbe globalmente circa 5530 kWh. Questo porterebbe ad un risparmio di 1630 kgCO₂e nel caso di una vita di 8 anni e 2267 kgCO₂e nel caso di una vita utile di 12 anni se si prende come riferimento l'impatto dell'energia elettrica prodotta in Germania.

L'impatto ambientale di questa soluzione, secondo tutte le ipotesi descritte, nel caso di una vita utile di 8 anni è pari a $357 \frac{\text{kgCO}_2}{\text{kWh}}$, mentre nel caso di una vita utile di 12 anni è pari a $0,221 \frac{\text{kgCO}_2}{\text{kWh}}$. Confrontando questi valori con le emissioni causate da ogni kWh prelevato dalla rete elettrica tedesca, pari a $0,435 \text{ kgCO}_2$, si può evincere come l'implementazione del fotovoltaico ha sicuramente un impatto positivo sotto l'aspetto ambientale, anche ipotizzando un utilizzo di soli 8 anni.

Essendo la fase di produzione la più impattante, andando ad abbassare le emissioni causate dall'energia elettrica utilizzata in questa fase (per esempio producendo il pannello in una regione che abbia una produzione maggiormente basata su fonti rinnovabili rispetto alla Cina) l'impatto di questa implementazione sarebbe sicuramente nettamente minore.

Come già citato, la percentuale di perdite causate dallo shading gioca un ruolo focale nell'analisi svolta, aumentando l'influenza dello shading fino al 40% si ottiene un valore di emissioni dell'implementazione fotovoltaica pari a $0,435 \frac{\text{kgCO}_2}{\text{kWh}}$, mentre riducendolo al 20% si ottiene un valore pari a $0,303 \frac{\text{kgCO}_2}{\text{kWh}}$.

Un risultato degno di nota, infine, è che se si ipotizza un utilizzo di 25 anni, magari sfruttando i pannelli per soluzioni stazionarie, come l'utilizzo domestico, quando questi non sono più soddisfacenti per l'utilizzo su veicoli, le emissioni scendono a $0,082 \frac{\text{kgCO}_2}{\text{kWh}}$.

9. Ringraziamenti

Arrivati a questo punto non posso non ringraziare tutte le persone che hanno reso possibile il raggiungimento di questo traguardo. I miei ringraziamenti non possono, quindi, che andare alla mia famiglia, agli amici, quelli che sono ancora presenti e quelli che si sono allontanati, e a tutti i miei professori, che fin dalle elementari hanno sempre creduto in me, onorando enormemente il loro inestimabile ruolo di formatori. Ci tengo anche a ringraziare il mio relatore, prof. Umberto Lucia, e i miei correlatori, prof. Marco Carlo Masoero e dott. Giulia Grisolia, che mi hanno seguito in questo lavoro di laurea. Infine vorrei anche ringraziare Solbian s.r.l per avermi dato l'opportunità di eseguire, presso la loro realtà, il tirocinio che ha portato a questa tesi.

10. Referenze

[1] <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreemen>

[2] https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_it

[3] <https://eurlex.europa.eu/legalcontent/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:52020DC0299&from=EN>

[4] New Energy and Industrial Technology Development Organization, "PV-Powered Vehicle Strategy Committee Interim Report," 2018.

[5] International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme, "Trends in Photovoltaic Applications 2019," 2019

[6] Impact of climatic conditions on prospects for integrated photovoltaics in electric vehicles;

Christian Thiel, Ana Gracia Amillo, Alessandro Tansini, Anastasios Tsakalidis, Georgios Fontaras, Ewan Dunlop, Nigel Taylor, Arnulf Jager-Waldau, Kenji Araki, Kensuke Nishioka, Yasuyuki Ota, Masafumi Yamaguchi; European Commission, Joint Research Centre (JRC), Ispra, Italy, University of Miyazaki, Japan, Toyota Technological Institute Nagoya, Japan, 2022.

[7] M. Kühnel, B. Hanke, S. Geißendörfer, K. von Maydell, and C. Agert, "Energy forecast for mobile photovoltaic systems with focus on trucks for cooling applications," *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 25, no. 7, pp. 525-532, 2017

[8] Kronthaler, L. Maturi, D. Moser, and L. Alberti, "Vehicleintegrated Photovoltaic (ViPV) systems: Energy production, Diesel Equivalent, Payback Time; an assessment screening for trucks and busses," in 2014 Ninth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER), 2014, pp. 1-8

[9] T. Tayagaki, K. Araki, M. Yamaguchi, and T. Sugaya, "Impact of Nonplanar Panels on Photovoltaic Power Generation in the Case of Vehicles," (in English), *IEEE Journal of Photovoltaics*, Article vol. 9, no. 6, pp. 1721-1726, Nov 2019.

[10] K. Araki, Y. Ota, K. Lee, N. Yamada, and M. Yamaguchi, "Curve Correction of the Energy Yield by Flexible Photovoltaics for VIPV and BIPV Applications Using a Simple Correction Factor," in 2019 IEEE 46th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2019, pp. 1584-1591.

[11] A Tropical Case Study Quantifying Solar Irradiance Collected on a Car Roof for Vehicle Integrated Photovoltaics Towards Low-Carbon Cities; Cheryl W. X. Ng; Ji Zhang; Stephen E. R. Tay, National University of Singapore, 2020

[12] High time resolution measurement of solar irradiance onto driving car body for vehicle integrated photovoltaics; Gustav Wetzel; Leon Salomon; Jan Krügener; Dennis Bredemeier; Robby Peibst; 2021

[13] Reducing CO2 emissions of conventional fuel cars by vehicle photovoltaic roofs; Chiara Lodi, Antti Seitsonen, Elena Paffumi, Michele De Gennaro, Thomas Huld, Stefano Malfettani; European Commission, Joint Research Centre (JRC), Directorate for Energy, Transport & Climate, Via E. Fermi 2749, I-21027 Ispra, VA, Italy; 2018

- [14] Measurement and Modeling of 3D Solar Irradiance for Vehicle-Integrated Photovoltaic; Kenji Araki; Yasuyuki Ota; Masafumi Yamaguchi; Toyota Technological Institute; University of Miyazaki; 2020
- [15] Urban solar potential for vehicle integrated photovoltaics; Miguel Centeno Brito; Teresa Santos; Filipe Moura; David Pera; Jorge Rocha; 2021
- [16] Vehicle-integrated Photovoltaic (ViPV) Systems: Energy Production, Diesel Equivalent, Payback Time; an Assessment Screening for Trucks and Busses; Ludwig Kronthaler; Laura Maturi, David Moser; Luigi Alberti; Institute for Renewable Energy; Faculty of Science and Technology, Bolzano, 2014
- [17] YIELD POTENTIAL OF VEHICLE INTEGRATED PHOTOVOLTAICS ON COMMERCIAL TRUCKS AND VANS; Christoph Kutter, Luis Eduardo Alanis, Dirk Holger Neuhaus, Martin Heinrich; Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE, Heidenhofstraße 2, 79110 Freiburg, Germany, 2021
- [18] She, X.; Cong, L.; Nie, B.; Leng, G.; Peng, H.; Chen, Y.; Zhang, X.; Wen, T.; Yang, H.; Luo, Y. Energy-Efficient and -Economic Technologies for Air Conditioning with Vapor Compression Refrigeration: A Comprehensive Review. *Appl. Energy* 2018, 232, 157–186.
- [19] Koronaki, I.P.; Cowan, D.; Maidment, G.; Beerman, K.; Schreurs, M.; Kaar, K.; Chaer, I.; Gontarz, G.; Christodoulaki, R.I.; Cazauran, X. Refrigerant Emissions and Leakage Prevention across Europe—Results from the RealSkillsEurope Project. *Energy* 2012, 45, 71–80.
- [20] The European Parliament and the Council of the European Union. The European Parliament and the Council of the European Union Regulation (EU) No 517/2014 of the European Parliament and the Council of 16 April 2014 on Fluorinated Greenhouse Gases and Repealing Regulation (EC) No 842/2006; The European Parliament and the Council of the European Union: Brussels, Belgium, 2014.
- [21] The European Parliament and the Council of the European Union. The European Parliament and the Council of the European Union Regulation (EU) No 517/2014 of the European Parliament and the Council of 16 April 2014 on Fluorinated Greenhouse Gases and Repealing Regulation (EC) No 842/2006; The European Parliament and the Council of the European Union: Brussels, Belgium, 2014.
- [22] Heredia-Aricapa, Y.; Belman-Flores, J.M.; Mota-Babiloni, A.; Serrano-Arellano, J.; García-Pabón, J.J. Overview of Low GWP Mixtures for the Replacement of HFC Refrigerants: R134a, R404A and R410A. *Int. J. Refrig.* 2020, 111, 113–123.
- [23] The Future of Food and Agriculture—Trends and Challenges; FAO: Rome, Italy, 2017
- [24] Tassou, S.; De-Lille, G.; Ge, Y. Food transport refrigeration—Approaches to reduce energy consumption and environmental impacts of road transport. *Appl. Therm. Eng.* 2009, 29, 1467–1477.
- [25] Il trasporto refrigerato; ZeroSottoZero; Massimo Moscati;
- [26] Yang, Z.; Tate, J.E.; Morganti, E.; Shepherd, S.P. Real-World CO₂ and NO_x Emissions from Refrigerated Vans. *Sci. Total Environ.* 2021, 763. [CrossRef]
- [27] Lawton, R.; Mynott, T.; Marshall, N.; Wagner, F. Emission Testing of a Transport Refrigeration Unit. In Proceedings of the 25th IIR International Congress of Refrigeration, Montreal, QC, Canada, 24–30 August 2019; pp. 3729–3736.
- [28] Rai, A.; Tassou, S.A. Environmental Impacts of Vapour Compression and Cryogenic Transport Refrigeration Technologies for Temperature Controlled Food Distribution. *Energy Convers. Manag.* 2017, 150, 914–923. [CrossRef]

[29] Li, B.; Otten, R.; Chandan, V.; Mohs, W.F.; Berge, J.; Alleyne, A.G. Optimal On-off Control of Refrigerated Transport Systems. *Control. Eng. Pract.* 2010, 18, 1406–1417. [CrossRef]

[30] Huang, Y.; Khajepour, A.; Khazraee, M.; Bahrami, M. A Comparative Study of the Energy-Saving Controllers for Automotive Air-Conditioning/Refrigeration Systems. *J. Dyn. Syst. Meas. Control. Trans. ASME* 2017, 139, 014504-9. [CrossRef]

[31] Mohagheghi Fard, S.; Khajepour, A. An Optimal Power Management System for a Regenerative Auxiliary Power System for Delivery Refrigerator Trucks. *Appl. Energy* 2016, 169, 748–756. [CrossRef]

[32] Delivery Refrigerator Trucks. *Appl. Energy* 2016, 169, 748–756. [CrossRef] 31. Bagheri, F.; Fayazbakhsh, M.A.; Bahrami, M. Évaluation Des Performances en Temps Réel et de La Réduction Potentielle Des GES Dans Les Remorques Frigorifiques. *Int. J. Refrig.* 2017, 73, 24–38.

[33] Hubbard, Hubbard Eutectic System – Transport Refrigeration Unit for deep frozen and ice cream applications

[34] R. Garde, F. Jiménez, T. Larriba, G. García, M. Aguado, M. Martínez, Development of a Fuel Cell-Based System for Refrigerated Transport, *Energy Procedia* 29 (2012) 201-207.

[35] A. Rai, S.A. Tassou, Environmental impacts of vapour compression and cryogenic transport refrigeration technologies for temperature controlled food distribution, *Energy Conversion and Management* (2017).

[36] UNEP, Lower-GWP Alternatives in Commercial and Transport Refrigeration: An expanded compilation of propane, CO₂, ammonia and HFO case studies, Section2: Transport Refrigeration Case Studies DTI/2015/PA (2015).

[37] H. Pedolsky, R. La Bau, International Refrigeration and Air Conditioning Conference, Reintroduction of Cryogenic Refrigeration for Cold Transport Paper 1021 (2010) 2137.

[38] Z. Bengherbi, Liquid Air on the European Highway(2015).

[39] R. Saidur, M. Rezaei, W.K. Muzammil, M.H. Hassan, S. Paria, M. Hasanuzzaman, Technologies to recover exhaust heat from internal combustion engines, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16 (2012) 5649-5659.

[40] S. Dieter, L. Thomas, G. Jürgen, Waste Heat Recovery for Commercial Vehicles with a Rankine Process (2012).

[41] Y. Lu, Y. Wang, C. Dong, L. Wang, A.P. Roskilly, Design and assessment on a novel integrated system for power and refrigeration using waste heat from diesel engine, *Appl. Therm. Eng.* 91 (2015) 591-599.

[42] J. Wang, J. Wu, Investigation of a mixed effect absorption chiller powered by jacket water and exhaust gas waste heat of internal combustion engine, *International Journal of Refrigeration* 50 (2015) 193-206.

[43] IMPIANTI FRIGORIFERI MEDIANTE ENERGIA SOLARE; GUIDA ALLA REFRIGERAZIONE PRODOTTA DALL'ENERGIA SOLARE; Francois Billiard

[44] Paneltex, Paneltex Electric Trucks and Zero-Emission Vehicles 2017 (2014).

[45] Mitsubishi, TEJ35A Electric Transport Refrigeration Unit Using Inverter for Light Trucks (June 2014) Mitsubishi Heavy Industries Technical Review Vol. 51 No. 2 (June 2014) (2014).

- [46] J. Prynne, Electric van fleet to guarantee food from farms is truly green in London (9 May 2016), Evening Standard (2016).
- [47] Global Cold Chain News, Paneltex enters electric truck challenge (Oct 16, 2012) 2017 (2012).
- [48] Bahaj, A. World's first solar powered transport refrigeration system. *Renew. Energy* 1998, 15, 572–576.
- [49] Bergeron, D. Solar Powered Refrigeration for Transport Application—A Feasibility Study; Sandia Report; Sandia National Laboratories: Livermore, CA, USA, 2001.
- [50] Rossetti, A.; Artuso P.; Minetto S.; Marinetti S.; Zennaro, D.; Innovative Layout for Electric Powered Refrigeration for Insulated Trucks: The Integration of Photovoltaic Generator. In *Proceedings of the 25th IIR International Congress of Refrigeration*, Montreal, QC, Canada, 24–30 August 2019; pp. 3704–3711.
- [51] Meneghetti A.; Dal Magro F.; Romagnoli A.; Renewable Energy Penetration in Food Delivery: Coupling Photovoltaics with Transport Refrigerated Units. *Energy* 2021, 232, 120994.
- [52] Decarbonizing the Cold Chain: Long-Haul Refrigerated Deliveries with On-Board Photovoltaic Energy Integration; Meneghetti A.; Pagnin A.; Simeoni P; DPIA-Polytechnic Department of Engineering and Architecture, University of Udine; 2021
- [53] Refrigerated Transport: State of the Art, Technical Issues, Innovations and Challenges for Sustainability; Angelo Maiorino, Fabio Petruzzello, Ciro Aprea; 2021.
- [54] Energy demand and environmental impacts of food transport refrigeration and energy reduction methods during temperaturecontrolled distribution, Brunel University London, Ashika Rai, 2019
- [55] M. Schmied, W. Knorr, Calculating GHG emissions for freight forwarding and logistics services in accordance with EN 16258 (2012).
- [56] Defra - Greenhouse Gas Conversion factor 2015, , DCFCarbonFactors_29_1_2016_161748 Version1.2 (2015).
- [57] TEMPCO
- [58] Lafaye De Micheaux, T.; Ducoulombier, M.; Moureh, J.; Sartre, V.; Bonjour, J. Experimental and Numerical Investigation of the Infiltration Heat Load during the Opening of a Refrigerated Truck Body. *Int. J. Refrig.* 2015, 54, 170–189
- [59] PVPS State-of-the-Art and Expected Benefits of PV-Powered Vehicles, IEA, 2021
- [60] LCA - Life Cycle Assessment (Analisi del ciclo di vita) - Rete Clima
- [61] Environmental Impacts of Integrating Photovoltaic Modules on Electric Light Utility Vehicles, Forschungszentrum Jülich, Olga Kanz, 2019