

La competitività economica dei camion elettrici e a idrogeno: a che punto siamo e quali sono i potenziali sviluppi futuri?

Mariangela Scorrano^{1,2,*}, Romeo Danielis^{1,2}, Arsalan Muhammad Khan Niazi¹, Manuela Masutti^{1,3}

¹ Dipartimento di Scienze Economiche, Aziendali, Matematiche e Statistiche (DEAMS) "Bruno de Finetti", Università degli Studi di Trieste

² Centro interdipartimentale per l'Energia, l'Ambiente e i Trasporti "Giacomo Ciamician", Università degli Studi di Trieste

³ Area Science Park, Trieste

* Corresponding author: mscorrano@units.it

L'articolo valuta la competitività economica dei camion elettrici e a idrogeno rispetto ai veicoli diesel attraverso l'analisi del costo totale di possesso (CTP) per tre classi di potenza (fino a 300 kW, tra 301 e 400 kW, oltre 400 kW). L'analisi economica evidenzia come, nonostante i minori costi operativi, i camion elettrici siano competitivi solo per potenze fino a 400 kW. I camion a idrogeno, invece, risultano i meno convenienti con costi sia di investimento sia operativi sensibilmente più elevati. Barriere come autonomia limitata, tempi di ricarica e infrastrutture insufficienti ostacolano la transizione. Le politiche pubbliche, come l'esenzione dai pedaggi, possono migliorare la competitività dei veicoli a zero emissioni, ma non bastano da sole. Investimenti in infrastrutture di ricarica e nello sviluppo di batterie ad alta densità e idrogeno verde sono necessari per accelerare la transizione verso un trasporto merci sostenibile.

Parole Chiave: camion elettrici; camion a idrogeno; competitività economica

1 Introduzione

Il trasporto merci contribuisce in modo rilevante alle emissioni globali. Pur costituendo appena il 2% del parco veicoli circolante, i camion sono responsabili di circa il 25% delle emissioni di CO₂ generate dal trasporto su strada nell'Unione Europea. La decarbonizzazione di questo segmento risulta quindi una priorità sempre più urgente, come dimostrano le recenti politiche e iniziative adottate a livello internazionale. L'UE ha fissato obiettivi ambiziosi per la riduzione delle emissioni dei veicoli pesanti: riduzione del 45% entro il periodo 2030-2034, con un ulteriore calo del 65% per il periodo 2035-2039, fino a raggiungere una diminuzione del 90% entro il 2040.

In questo scenario, i camion elettrici e a idrogeno hanno il potenziale per accelerare la transizione. I principali benefici sono di natura ambientale. Ad esempio, Mio et al. (2023)

evidenziano un vantaggio significativo dei veicoli a idrogeno rispetto ai camion convenzionali in termini di riduzione di CO₂ quando l'idrogeno è prodotto da fonti rinnovabili. Iyer et al. (2023) stimano una potenziale riduzione di GHG fino al 61% sia dei camion elettrici che di quelli a idrogeno rispetto ai camion diesel, a seconda della chimica delle batterie, del mix elettrico e della tecnologia di produzione dell'idrogeno.

Per raggiungere gli obiettivi posti dall'UE, sarà necessario introdurre entro il 2034 circa 390.000 camion elettrici a batteria (BEV, Battery Electric Vehicle) e a celle a combustibile (FCEV, Fuel Cell Electric Vehicle). La situazione attuale è però lontana da questo traguardo: nel 2024, in Europa sono stati venduti circa 10.000 camion elettrici (54.000 a livello globale), pari a una quota di mercato di appena l'1,5% (IEA, 2024). Tra i principali player emergono BYD (Cina), Mercedes-Benz Group AG (Germania), AB Volvo (Svezia), Ford Motor Company e Rivian (Stati Uniti). I camion a idrogeno, invece, si trovano ancora in fase prototipale e di sperimentazione presso alcune aziende di trasporto.

Entrambe le tecnologie presentano ostacoli significativi. Per i camion elettrici, i principali limiti riguardano l'autonomia, la riduzione del carico utile dovuta al peso delle batterie, i tempi di ricarica e l'elevato costo di acquisto (Noll et al., 2022; Sharpe e Basma, 2022; Danielis et al., 2024, 2025). I veicoli a idrogeno presentano vantaggi in termini di autonomia e tempi di rifornimento, paragonabili a quelli dei camion diesel (Burke et al., 2022), ma scontano costi ancora molto elevati sia per l'acquisto dei mezzi sia per la produzione dell'idrogeno (Rout et al., 2022; Mao et al., 2021; Basma et al., 2022; Basma e Rodríguez, 2023). Per entrambe le soluzioni, inoltre, manca ancora un'infrastruttura di ricarica e rifornimento capillare, comparabile alla rete dei carburanti tradizionali.

Questo contributo si concentra sull'aspetto economico, cruciale per le imprese di trasporto che devono scegliere se continuare ad investire in mezzi diesel o passare a soluzioni alternative, considerando la natura di investimento produttivo di un camion. L'obiettivo è sviluppare un modello di costo totale di possesso che includa tutte le voci di spesa – attuali e prospettiche – legate all'acquisto e alla gestione di un veicolo pesante, per confrontare tre tecnologie: diesel, elettrico e idrogeno.

I risultati ottenuti permetteranno di rispondere alle seguenti domande di ricerca: 1) I camion elettrici e a idrogeno sono attualmente competitivi in termini monetari, e in quali segmenti, rispetto ai camion diesel? 2) Quali sono i principali fattori che ne determinano la competitività economica? 3) Quali politiche sarebbero necessarie per colmare il divario di costo totale di possesso rispetto ai veicoli tradizionali? I risultati offrono indicazioni utili sia alle imprese di trasporto, per pianificare strategie di rinnovo della flotta, sia ai decisori pubblici, per progettare politiche di decarbonizzazione più efficaci ed efficienti.

2 Il Costo Totale di possesso

Il metodo del Costo Totale di Possesso (CTP) consente di valutare in modo completo la convenienza economica di un camion, considerando tutti i costi e i ricavi monetari che si generano durante l'intero periodo di utilizzo (Wu et al. 2015; Scorrano et al., 2020; Noll et al. 2022; per una recente rassegna della letteratura sul CTP applicato ai camion elettrici e a idrogeno, si veda Danielis et al., 2024, 2025). I costi si distinguono principalmente in spese in conto capitale (CAPEX) e costi operativi (OPEX), mentre tra i ricavi rientra il valore residuo del veicolo al termine del periodo di possesso.

La formula tipicamente utilizzata è:

$$\frac{\text{CTP}}{\text{km}} = \frac{\left[\text{CAPEX} - \frac{RV}{(1+i)^T} \right] \cdot CRF + OPEX}{ADT}$$

dove CAPEX rappresenta i costi iniziali sostenuti al momento dell'acquisto del camion, tra cui i costi di acquisizione e di immatricolazione, al netto di eventuali sussidi all'acquisto o di sconti, comprensivi di eventuali spese per infrastrutture di ricarica nel caso dei veicoli elettrici; OPEX comprende le spese variabili annuali; RV è il valore residuo del veicolo alla fine del periodo di possesso. Poiché si verificano in momenti diversi nel tempo, tali costi/ricavi devono essere adeguatamente attualizzati utilizzando un opportuno tasso di interesse. CRF è il fattore di recupero del capitale ed i è il tasso di sconto, pari al costo medio ponderato del capitale, che tiene conto della natura del pagamento (con fondi propri e/o con finanziamento); ADT rappresenta la percorrenza annuale del veicolo.

Il costo di acquisizione da considerare è al netto di eventuali sconti da parte del venditore, ma deve includere eventuali imposte sulle vendite (IVA) e spese di registrazione.

I costi operativi comprendono principalmente il costo del carburante utilizzato (F/E) e i costi di manutenzione ordinaria (MAINT). A questi vanno aggiunte le tasse di circolazione (CT) e i premi assicurativi (INS). Devono essere compresi anche i costi di manutenzione straordinaria e di eventuale sostituzione di componenti:

$$OPEX_n(ADT) = CT_n + INS_n + MAINT_n(ADT) + F/E_n(ADT)$$

Tra i costi operativi, quello del carburante/energia rappresenta una variabile cruciale ma difficile da prevedere. Esso dipende sia dal prezzo del carburante sia dall'efficienza energetica del veicolo, espressa come quantità di carburante consumato per chilometro percorso. Se il prezzo attuale del carburante è noto, la sua evoluzione futura – anche dipendente dal contesto geopolitico – non è facilmente prevedibile, pertanto esiste un ampio margine di incertezza. Il consumo di carburante per km viene solitamente dichiarato dal costruttore sulla base di procedure standardizzate (es. WLTP), ma i consumi effettivi possono variare sensibilmente in funzione dell'orografia, delle condizioni del traffico e dello stile di guida.

Ulteriori costi possono poi derivare da pedaggi autostradali, tariffe per ponti o attraversamenti montani e spese di parcheggio, che a volte sono modulate in base alla motorizzazione del veicolo: i mezzi a basse emissioni beneficiano in genere di esenzioni o tariffe ridotte, aumentando così la loro competitività.

Infine, se il veicolo non viene utilizzato fino alla fine della sua vita utile, occorre stimarne il valore residuo (RV), ossia il ricavo ottenibile da un'eventuale rivendita. Questa stima è particolarmente complessa per tecnologie emergenti come i camion a idrogeno, per i quali non esistono ancora dati storici consolidati. L'esperienza con le auto elettriche mostra che il valore residuo dipende fortemente dal progresso tecnologico e dalle strategie commerciali dei produttori.

In sintesi, nella stima del CTP di un camion ci sono molteplici aree di incertezza legate a condizioni operative (traffico, condizioni meteorologiche), a variabili di mercato (prezzo dei carburanti) e politiche pubbliche attuali o future.

Il nostro contributo si propone di calcolare e confrontare il CTP per tre tecnologie – diesel, elettrico e idrogeno – utilizzando dati di mercato ove disponibili e introducendo ipotesi coerenti laddove necessario. I risultati saranno analizzati anche in funzione della potenza del veicolo e completati da analisi di scenario per valutare l'impatto delle politiche di sostegno sulla competitività economica delle diverse soluzioni.

3 Dati e ipotesi

I veicoli utilizzati per il trasporto pesante possono essere suddivisi in categorie in base alla potenza, che riflette le differenti esigenze operative. I camion di piccola potenza (fino a 300 kW, circa 150–350 CV) sono mezzi pensati per le consegne locali e per l'ambiente urbano, dove risultano cruciali bassi consumi ed elevate prestazioni in termini di manovrabilità ed efficienza. I camion di media potenza (301–400 kW, circa 350–550 CV) sono destinati a operare su distanze

medio-lunghe e in contesti regionali, come il trasporto di merci refrigerate o materiali da costruzione tra città. Offrono un buon compromesso tra capacità di carico ed efficienza, rendendoli adatti a un'ampia gamma di applicazioni (logistica, edilizia, servizi pubblici). I camion di alta potenza (oltre 400 kW), progettati per trasporti pesanti e condizioni operative gravose, richiedono robustezza, affidabilità e prestazioni elevate.

Nella nostra analisi della competitività economica, abbiamo pertanto considerato queste tre classi di potenza: fino a 300 kW, 301–400 kW, oltre 400 kW.

Molti sono i modelli di camion diesel attualmente offerti dalle principali case produttrici: Volvo Truck (tra cui FH, FE, FM, FMX), Iveco (tra cui S-Way, T-Way, X-Way), Mercedes (tra cui Arocs, Actros), Scania (G14L, P14L, R17L, R20H, R20N, S20N). Trattandosi di un mercato ormai maturo, con caratteristiche tecniche ed economiche note, questa tecnologia verrà considerata come tecnologia di riferimento. Abbiamo pertanto considerato i modelli di camion diesel più venduti e le loro caratteristiche e assunto la media di tali valori come riferimento. I camion elettrici e a idrogeno sono in fase di sviluppo, ma non sono ancora pronti per la produzione in grandi volumi. Pertanto, è necessario fare delle assunzioni.

Ipotizziamo, anche sulla base delle stime nella letteratura più recente (Danielis et al., 2025) e da siti web specializzati (e.g., <https://www.motornet.it/>), che i camion elettrici abbiano un prezzo di acquisto doppio di quello di un camion diesel, mentre la presenza di una fuel cell e capienti serbatoi renda i camion a idrogeno tre volte più costosi mediamente rispetto ad un camion tradizionale. Non consideriamo il ruolo dei sussidi. Ipotizziamo, quindi, che nessun sistema di alimentazione sia favorito attraverso politiche di prezzo.

Tra i CAPEX, oltre al prezzo di acquisto del camion, vanno considerati anche i costi delle infrastrutture di ricarica (EVSE) necessarie per rifornire i veicoli in deposito. Le aziende di trasporto che operano con camion elettrici o a idrogeno, infatti, tendono ad acquistare una propria stazione di ricarica o dispenser per garantire la ricarica completa dei mezzi a tariffe più convenienti rispetto alle colonnine pubbliche. Poiché l'analisi CTP è condotta a livello di singolo veicolo, è necessario attribuire una quota dei costi dell'EVSE a ciascun camion, anche se l'infrastruttura viene condivisa da più mezzi. I dati sui costi effettivi sono scarsi, sia per la novità delle tecnologie, sia perché i fornitori mantengono riservate le tariffe, definite caso per caso in sede contrattuale. Dopo una revisione della letteratura (Wang et al., 2023), è stato ipotizzato un costo medio pari a 40.000 € per camion per le infrastrutture di ricarica sia dei camion elettrici che di quelli a idrogeno, ed un costo di €1.000 per camion diesel.

Sulla base di queste assunzioni, è stato calcolato il CAPEX medio per ciascuna tecnologia e per le tre classi di potenza. I risultati sono riportati nella Tabella 1.

Tabella 1: CAPEX per alimentazione e classe di potenza

	Elettrico	Diesel	Idrogeno
<i>fino a 300 KW</i>	417,188€	189,594€	605,783€
<i>tra 301 e 400 KW</i>	465,339€	213,669€	678,008€
<i>oltre 400 KW</i>	596,709€	279,354€	875,063€

Per quanto riguarda i costi operativi (OPEX), una delle componenti più rilevanti è rappresentata dal costo del carburante o dell'energia, che dipende sia dal prezzo unitario della fonte energetica sia dall'efficienza del veicolo. Dal punto di vista dell'efficienza energetica, i camion elettrici mostrano prestazioni nettamente superiori rispetto ai diesel. Secondo stime dell'*International Council on Clean Transportation* (ICCT), un camion elettrico consuma in media 1,5 kWh/km, mentre un camion diesel richiede circa 3,3 litri di carburante per 100 km, con una riduzione di circa il 60% del fabbisogno energetico a parità di percorrenza. Questa differenza è principalmente imputabile i) all'elevata efficienza dei motori elettrici, che convertono oltre il 90% dell'energia disponibile in trazione, contro valori medi attorno al 40% per i motori a combustione interna; ii) alla possibilità, per i veicoli elettrici, di recuperare parte dell'energia in frenata, contribuendo a

ricaricare le batterie e ad aumentare l'autonomia. Nell'analisi abbiamo adottato per l'efficienza energetica dei veicoli i valori medi riportati nella letteratura scientifica più recente (Danielis et al., 2025) e, quando disponibili, i dati forniti dai principali costruttori di camion (riassunti nella Tabella 2).

Tabella 2: Efficienza per alimentazione e classe di potenza

Alimentazione	Potenza	Efficienza
diesel	fino a 300 KW	24 l/100km
	tra 301 e 400 KW	35 l/100km
	oltre 400 KW	40 l/100km
elettrico	fino a 300 KW	90 kWh/100km
	tra 301 e 400 KW	130 kWh/100km
	oltre 400 KW	150 kWh/100km
idrogeno	fino a 300 KW	6 kg/100km
	tra 301 e 400 KW	7 kg/100km
	oltre 400 KW	10 kg/100km

Per stimare i costi del carburante/energia abbiamo considerato i prezzi medi al 2024, distinguendo tra diverse modalità e luoghi di ricarica/rifornimento: stazione di ricarica pubblica, deposito dell'azienda proprietaria del camion, luogo di destinazione delle merci. Nell'analisi assumiamo infatti che sia possibile per il camion ricaricare/fare rifornimento all'occorrenza e ogni volta che se ne presenta l'occasione (*opportunity charging*), ad esempio durante le soste operative per carico/scarico presso il deposito aziendale o la destinazione finale. Questa strategia, se implementabile, offre molteplici vantaggi: ottimizzazione dei tempi di ricarica e riduzione dei tempi di inattività, maggiore efficienza operativa grazie alla pianificazione flessibile, possibilità di ridurre i costi energetici, sfruttando tariffe più basse (ad esempio, nel caso della ricarica in deposito durante le fasce orarie non di punta). La ricarica presso la destinazione, inoltre, può avvenire su base opportunistica, ad esempio durante il tempo di riposo dell'autista o mentre si effettuano operazioni logistiche, migliorando la produttività complessiva.

Le ipotesi relative ai prezzi medi dell'energia e alla frequenza di utilizzo delle diverse modalità di ricarica/rifornimento sono sintetizzate nella Tabella 3.

Tabella 3: Frequenza e prezzo per luogo della ricarica

Alimentazione/Luogo ricarica		Deposito	Opportunity Charging	Stazione Pubblica			
	Potenza	%	Prezzo	%	Prezzo	%	Prezzo
Diesel	fino a 300 KW	0.8		0		0.2	
	tra 301 e 400 KW	0.8	1.5 €/l	0	1.6 €/l	0.2	1.8 €/l
	oltre 400 KW	0.7		0		0.3	
Elettrico	fino a 300 KW	0.7		0.2		0.1	
	tra 301 e 400 KW	0.7	0.22 €/kWh	0.2	0.5 €/kWh	0.1	0.6 €/kWh
	oltre 400 KW	0.5		0.3		0.2	
Idrogeno	fino a 300 KW	0.8		0		0.2	
	tra 301 e 400 KW	0.8	8 €/kg	0	8 €/kg	0.2	10 €/kg
	oltre 400 KW	0.7		0		0.3	

Un'ulteriore componente rilevante degli OPEX è rappresentata dai costi di manutenzione, che variano in modo significativo a seconda della tecnologia di propulsione adottata.

Secondo i dati forniti dai principali costruttori (Volvo, Scania, Mercedes, Tesla Semi), i pacchi batteria dei veicoli pesanti sono progettati per resistere a circa 1.200–1.500 cicli completi di carica e scarica, equivalenti a percorrenze complessive comprese tra 800.000 e 1.000.000 km. Considerando un periodo di possesso pari a 7 anni, abbiamo ipotizzato che nell'orizzonte temporale analizzato non sia necessaria una sostituzione completa della batteria, ma solo interventi di manutenzione.

Per quanto riguarda i camion a idrogeno, la componente critica è invece rappresentata dalla fuel cell, che ha una durata mediamente inferiore rispetto alle batterie e comporta costi elevati in caso di sostituzione. Questo rende la manutenzione dei veicoli a idrogeno generalmente più onerosa rispetto a quella dei camion elettrici a batteria.

Sulla base delle ipotesi più diffuse in letteratura, abbiamo quindi assunto costi medi di manutenzione pari a 0,30 €/km per i camion diesel, 0,10 €/km per i camion elettrici e 0,20 €/km per i camion a idrogeno.

4 Risultati

4.1 Scenario base

Abbiamo definito un primo scenario di riferimento, ipotizzando un periodo di possesso del camion pari a 7 anni e una distanza percorsa annualmente identica per tutte le tecnologie, pari a 119.000 km/anno (circa 330 km/giorno). Oltre alle componenti di costo precedentemente descritte, abbiamo incluso un costo medio del pedaggio pari a 0,075 €/km, assunto indipendente dal sistema di alimentazione.

La Figura 1 riporta i valori stimati del CTP (€/km) per alimentazione e classe di potenza, distinguendo la quota di CAPEX annualizzato e di OPEX.

I risultati mostrano come i camion diesel siano i più competitivi in tutte le fasce di potenza. I camion elettrici evidenziano OPEX significativamente inferiori rispetto alle altre tecnologie, grazie all'elevata efficienza energetica e ai minori costi di manutenzione, ma tali risparmi non compensano completamente i costi di investimento iniziale, soprattutto per i veicoli con potenze superiori. Per i camion elettrici con potenza fino a 400 kW, il CTP risulta tuttavia già competitivo rispetto al diesel, con un gap stimato pari a 0,01 €/km per la classe <300 kW e -0,02 €/km per la classe 301–400 kW. I camion a idrogeno emergono invece come l'opzione più costosa sia in termini di CAPEX sia di OPEX. Per potenze oltre 400 kW, il divario tra le tecnologie si amplia ulteriormente, con l'idrogeno che presenta valori di CTP decisamente più elevati.

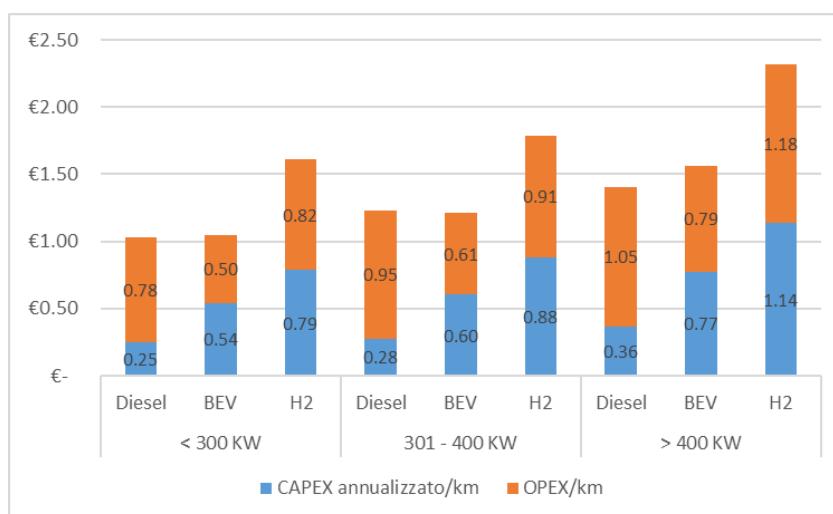


Figura 1: CTP per alimentazione e classe di potenza

4.2 Analisi di scenario: percorrenze ridotte per camion elettrici

Realisticamente, la scelta del sistema di alimentazione dipende non solo dal costo, ma anche dall'applicazione specifica e dalla distanza media da percorrere. Nonostante i loro vantaggi, i camion elettrici presentano ancora limiti operativi significativi, legati in particolare all'autonomia. Attualmente, a seconda del modello e dell'utilizzo, i veicoli elettrici per il trasporto pesante sono ancora lontani dal competere con l'autonomia di oltre 1.000 km dei camion diesel. Questa limitazione implica la necessità di ricariche frequenti, che si traducono in tempi di inattività e potenziali perdite di produttività. Inoltre, il tempo di ricarica varia in funzione della potenza della stazione utilizzata, con valori tipici compresi tra 2,5 e 11 ore per un ciclo completo.

Per tener conto di queste restrizioni operative, abbiamo definito uno scenario realistico in cui i camion elettrici non raggiungano le stesse percorrenze annuali dei veicoli diesel e a idrogeno, a causa della limitata capacità delle batterie attualmente disponibili. In questa ipotesi, abbiamo ridotto del 30% la distanza annua percorsa dai camion elettrici rispetto alle altre tecnologie.

I risultati, riportati nella Figura 2, mostrano che il CTP dei veicoli elettrici aumenta sensibilmente in tutte le classi di potenza, riducendo la competitività della tecnologia rispetto allo scenario di riferimento. Il gap rispetto al diesel sale a 0,27 €/km per i veicoli fino a 300 kW e a 0,51 €/km per i mezzi oltre 400 kW. I camion a idrogeno si confermano, anche in questo scenario, l'opzione con i costi totali di possesso più elevati.

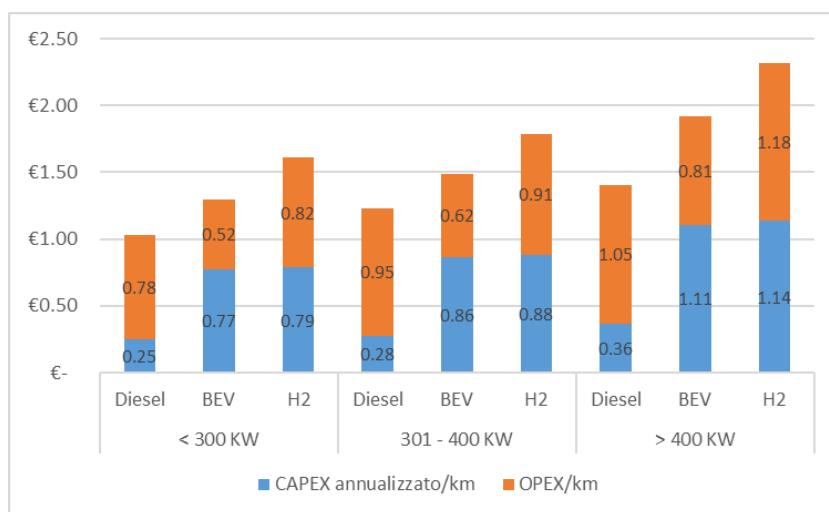


Figura 2: CTP per alimentazione e classe di potenza con percorrenze annuali ridotte per i camion elettrici

4.3 Analisi di scenario: esenzione dei pedaggi per i veicoli a zero emissioni

Le nuove normative europee mirano a incentivare l'adozione di camion elettrici e a idrogeno per ridurre le emissioni di CO₂ nel trasporto su strada, introducendo sconti fino al 50% sui pedaggi per i veicoli a basse o nulle emissioni. A partire dal 2026, le riduzioni previste varieranno tra il 50% e il 75%, con la possibilità per gli Stati membri di concedere esenzioni totali ai veicoli a zero emissioni.

Abbiamo quindi simulato uno scenario in cui i camion elettrici e a idrogeno siano completamente esentati dal pagamento dei pedaggi.

Come riportato nella Figura 3, questa politica comporterebbe una riduzione del gap di CTP tra camion elettrici e diesel in tutte le classi di potenza, migliorandone parzialmente la competitività economica. Tuttavia, l'esenzione non sarebbe sufficiente a rendere i veicoli elettrici più convenienti dei diesel, a meno di assumere la stessa percorrenza annua per tutte le tecnologie.

Per i camion a idrogeno, invece, il divario di costo rispetto ai veicoli diesel rimarrebbe significativamente elevato, anche in presenza di una totale esenzione dai pedaggi.

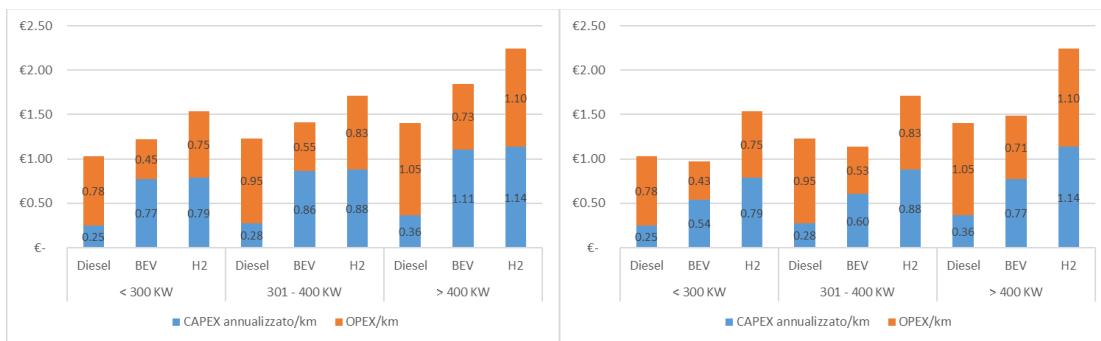


Figura 3: CTP per alimentazione e classe di potenza con esenzione dei pedaggi per i veicoli a zero emissioni con (a) operatività ridotta dei camion elettrici; (b) stessa operatività per tutte le alimentazioni

5 Conclusioni

L'analisi condotta evidenzia come il costo totale di possesso rappresenti un fattore determinante nella scelta delle tecnologie di propulsione per il trasporto pesante.

I camion diesel mantengono un vantaggio competitivo in termini di costi iniziali, mentre i veicoli elettrici possono risultare economicamente più convenienti in presenza di elevate percorrenze annuali o di lunghi periodi di possesso, grazie ai minori costi operativi. Al contrario, i camion a idrogeno si confermano, allo stato attuale, l'opzione meno competitiva, con costi di investimento e costi operativi significativamente più elevati.

Le politiche fiscali possono avere un ruolo determinante nell'accelerare la diffusione delle tecnologie a zero emissioni. Anche senza prevedere incentivi diretti all'acquisto, l'analisi mostra come rendere più oneroso l'utilizzo dei veicoli a combustione – ad esempio tramite la totale esenzione dai pedaggi per i camion elettrici e a idrogeno – possa effettivamente spingere gli operatori a valutare soluzioni più sostenibili.

Tuttavia, l'aspetto economico è solo una parte della questione. Le imprese di trasporto devono confrontarsi con sfide operative, logistiche e infrastrutturali nell'adozione delle nuove tecnologie.

L'autonomia limitata dei camion elettrici li rende meno adatti ai servizi a lunga percorrenza rispetto a diesel e idrogeno, riducendone la flessibilità operativa. La necessità di pianificare accuratamente le soste di ricarica rende la gestione dei dati un elemento strategico: flotte a zero emissioni richiedono sistemi avanzati per monitorare autonomia, ottimizzare i percorsi e ridurre i tempi di inattività.

La disponibilità di infrastrutture rappresenta un'altra barriera critica. In Italia, la rete di ricarica per camion elettrici è ancora limitata e necessita di un'espansione capillare, soprattutto lungo le principali arterie di trasporto merci. Iniziative come la partnership MAN Truck & Bus – E.ON, che prevede la realizzazione di 170 siti con 400 punti di ricarica in Europa, rappresentano passi concreti verso la risoluzione di questa sfida. La selezione strategica dei siti, principalmente in aree industriali, nodi logistici o in prossimità autostradale, permette di integrare facilmente questa ricarica nelle operazioni quotidiane, offrendo al contempo agli autisti la possibilità di beneficiare, durante il giorno, di servizi aggiuntivi, come servizi igienici e sale ricreative.

Innovazioni come il Megawatt Charging System (MCS) sviluppato da ABB e MAN, capace di erogare fino a 3,75 MW, potrebbero ridurre drasticamente i tempi di ricarica, migliorando l'efficienza operativa dei veicoli elettrici.

Per i camion a idrogeno, i tempi di rifornimento sono comparabili al diesel, ma il ciclo di produzione e distribuzione dell'idrogeno presenta ancora inefficienze e costi elevati, specialmente per quanto riguarda l'idrogeno verde.

La transizione verso un trasporto pesante sostenibile richiede quindi non solo interventi sui costi di acquisto e gestione, ma anche una parallela evoluzione tecnologica e infrastrutturale: batterie con maggiore densità energetica e ricarica ultra-rapida, sviluppo di una rete di

rifornimento per l'idrogeno e, in prospettiva, una riduzione dei costi di produzione dell'idrogeno verde. Solo un approccio integrato, che combini incentivi economici, investimenti infrastrutturali e innovazione tecnologica, potrà garantire una reale competitività delle soluzioni a zero emissioni rispetto al diesel.

Riferimenti bibliografici

- Basma, H., & Rodríguez, F. (2023). A total cost of ownership comparison of truck decarbonization pathways in Europe. *The International Council on Clean Transportation*: 1–35.
- Basma, H., Zhou, Y., & Rodríguez, F. (2022). Fuel-cell hydrogen long-haul trucks in Europe: A total cost of ownership analysis. *ICCT White Paper*.
- Burke, A. F., Zhao, J., Miller, M. R., Sinha, A., & Fulton, L. M. (2023). Projections of the costs of medium-and heavy-duty battery-electric and fuel cell vehicles (2020-2040) and related economic issues. *Energy for Sustainable Development*, 77, 101343.
- Danielis, R., Niazi, A. M. K., Scorrano, M., Masutti, M., & Awan, A. M. (2025). The Economic Feasibility of Battery Electric Trucks: A Review of the Total Cost of Ownership Estimates. *Energies*, Vol. 18, Page 429, 18(2), 429.
- Danielis, R., Scorrano, M., Masutti, M., Awan, A. M., & Niazi, A. M. K. (2024). The Economic Competitiveness of Hydrogen Fuel Cell-Powered Trucks: A Review of Total Cost of Ownership Estimates. *Energies*, 17(11), 2509.
- International Energy Agency (IEA) (2024). Global EV Outlook 2024. Moving towards increased affordability
- Iyer, R. K., Kelly, J. C., & Elgowainy, A. (2023). Vehicle-cycle and life-cycle analysis of medium-duty and heavy-duty trucks in the United States. *Science of the Total Environment*, 891, 164093.
- Mao, S., Basma, H., Ragon, P. L., Zhou, Y., & Rodríguez, F. (2021). Total cost of ownership for heavy trucks in China: Battery-electric, fuel cell electric, and diesel trucks. URL <https://theicct.org/wp-content/uploads/2022/01/ze-hdvs-china-tco-FS-EN-nov21.pdf>.
- Mio, A., Barbera, E., Massi Pavan, A., Danielis, R., Bertucco, A., & Fermeglia, M. (2023). Analysis of the energetic, economic, and environmental performance of hydrogen utilization for port logistic activities. *Applied Energy*, 347, 121431.
- Noll, B., del Val, S., Schmidt, T. S., & Steffen, B. (2022). Analyzing the competitiveness of low-carbon drive-technologies in road-freight: A total cost of ownership analysis in Europe. *Applied Energy*, 306, 118079.
- Rout, C., Li, H., Dupont, V., & Wadud, Z. (2022). A comparative total cost of ownership analysis of heavy duty on-road and off-road vehicles powered by hydrogen, electricity, and diesel. *Heliyon*, 8(12).
- Scorrano, M., Danielis, R., & Giansoldati, M. (2020). Dissecting the total cost of ownership of fully electric cars in Italy: The impact of annual distance travelled, home charging and urban driving. *Research in Transportation Economics*, 80, 100799.
- Sharpe, B., & Basma, H. (2022). A meta-study of purchase costs for zero-emission trucks. *International Council on Clean Energy Transportation*: Washington, DC, USA.
- Wang, G., Miller, M., & Fulton, L. (2023). *The Infrastructure Cost for Depot Charging of Battery Electric Trucks*. Institute of Transportation Studies, UC Davis.
- Wu, G., Inderbitzin, A., & Bening, C. (2015). Total cost of ownership of electric vehicles compared to conventional vehicles: A probabilistic analysis and projection across market segments. *Energy policy*, 80, 196-214.