



# CERTIFICATI BIANCHI

## Allegato 2.7 alla Guida Operativa

*Guide Settoriali*

***IL SETTORE DEI TRASPORTI***

**2022**

**INDICE**

1	INTRODUZIONE .....	4
2	DESCRIZIONE DEL SETTORE TRASPORTI .....	5
2.1	Il settore trasporti .....	5
2.2	I consumi energetici .....	6
2.3	La domanda di trasporto .....	8
2.3.1	<i>Trasporto passeggeri</i> .....	8
2.3.2	<i>Trasporto merci</i> .....	10
2.4	Mobilità sostenibile .....	10
3	DESCRIZIONE DEGLI INTERVENTI DI EFFICIENZA ENERGETICA E DELLE MIGLIORI TECNOLOGIE DISPONIBILI .....	12
3.1	Trasporto su strada .....	14
3.1.1	<i>L'aerodinamica</i> .....	15
3.1.2	<i>I sistemi di propulsione</i> .....	15
3.1.3	<i>I sistemi di recupero dai gas di scarico</i> .....	15
3.1.4	<i>I sistemi di guida efficiente</i> .....	16
3.1.5	<i>I carrelli elevatori</i> .....	16
3.2	Trasporto su rotaia .....	17
3.2.1	<i>L'aerodinamica e i materiali</i> .....	17
3.2.2	<i>I sistemi di propulsione e i sistemi di recupero di energia in frenata</i> .....	18
3.2.3	<i>I sistemi integrati per la produzione di energia elettrica da fonte rinnovabile</i> .....	18
3.2.4	<i>I sistemi di guida efficiente</i> .....	18
3.3	Trasporto marittimo .....	19
3.3.1	<i>La fluidodinamica e i materiali</i> .....	19
3.3.2	<i>I sistemi di propulsione</i> .....	20
3.3.3	<i>I sistemi integrati per la produzione di energia elettrica da fonte rinnovabile e i sistemi di gestione e controllo</i> .....	21
3.4	Trasporto aereo .....	21
3.4.1	<i>L'aerodinamica</i> .....	22
3.4.2	<i>I materiali</i> .....	22
3.4.3	<i>I sistemi di propulsione e i sistemi di gestione e controllo</i> .....	23
3.5	Ulteriori interventi di riduzione dei consumi nel settore dei trasporti .....	24
4	INDIVIDUAZIONE DEGLI ALGORITMI PER IL CALCOLO DEI RISPARMI ENERGETICI ADDIZIONALI .....	25
4.1	Algoritmi di calcolo del risparmio energetico aggiuntivo .....	26
4.2	Determinazione del consumo specifico di baseline e delle variabili operative .....	27
4.2.1	<i>Trasporto su strada</i> .....	28

	4.2.2	Trasporto su rotaia .....	29
	4.2.3	Trasporto marittimo .....	29
	4.2.4	Trasporto Aereo .....	29
5		METODOLOGIA ADOTTATA PER LA PRESENTE GUIDA .....	31
6		Bibliografia .....	32

## 1 INTRODUZIONE

La presente guida settoriale si rivolge a tutte le imprese e ai soggetti che intendono far richiesta di accesso al meccanismo dei Certificati Bianchi per la realizzazione di progetti di efficientamento energetico nel settore dei trasporti e, in accordo con l'art. 15 del D.M. 11 gennaio 2017 e ss.mm.ii. si pone l'obiettivo di riportare:

- a) *“le informazioni utili alla predisposizione delle richieste di accesso agli incentivi”* per gli interventi di efficienza energetica realizzabili nel settore dei trasporti e riconducibili alle tipologie di intervento di cui alla Tabella 1, dell'Allegato 2 del D.M. 11 gennaio 2017 ss.mm.ii.;
- b) *“la descrizione delle migliori tecnologie disponibili, tenendo in considerazione anche quelle identificate a livello europeo, delle potenzialità di risparmio in termini economici ed energetici derivanti dalla loro applicazione che fornisca indicazioni in merito all'individuazione del consumo di riferimento di cui all'art. 2, comma 1, lettera d)”*.

Ai fini dell'ammissione al meccanismo dei Certificati Bianchi i risparmi energetici addizionali rendicontabili sono quelli generati sul territorio nazionale. In particolare, i risparmi generati sul territorio nazionale possono essere unicamente intesi come quelli afferenti al *“servizio reso”* sul territorio nazionale (ad es. aeroporto di partenza italiano e/o aeroporto di destinazione italiano), prescindendo dalla nazionalità del luogo di destinazione, qualora il punto di partenza sia localizzato sul territorio nazionale, ovvero prescindendo dalla nazionalità del luogo di partenza, qualora il luogo di destinazione sia localizzato sul territorio nazionale, a fronte dell'evidenza che il rifornimento di carburante per ciascun tragitto venga effettuato esclusivamente sul territorio nazionale.

## 2 DESCRIZIONE DEL SETTORE TRASPORTI

### 2.1 Il settore trasporti

Il sistema dei trasporti può essere definito come l'insieme dei componenti, e delle loro reciproche interazioni, che determinano la domanda di mobilità fra punti diversi del territorio e l'offerta di servizi necessaria a soddisfarla [1].

Le principali modalità di trasporto sono quattro:

- trasporto su strada;
- trasporto su rotaia;
- trasporto marittimo;
- trasporto aereo.

Ciascuna di esse può adattarsi meglio delle altre a determinate esigenze e risultare più conveniente a seconda dell'importanza che assumono parametri decisionali quali costi, tempo, distanza di percorrenza, numero di persone, volumi da trasportare, flessibilità, etc. Tali aspetti saranno approfonditi nei paragrafi seguenti.

Quando differenti modalità di trasporto vengono combinate tra loro per lo spostamento di una stessa tipologia di carico *“unitizzato”* (container, casse mobili, pallet, etc.), si parla di trasporto *“intermodale”*, che viene definito come il *“trasporto di merci nella stessa unità di carico o sullo stesso veicolo stradale, che utilizza due o più modi di trasporto e che non implica l'handling della merce nelle fasi di scambio modale”* [2].

Le attività che rientrano in questo settore possono essere individuate tramite i codici ATECO, che stabiliscono una classificazione delle *“attività di trasporto di passeggeri o merci effettuate su base regolare o meno per ferrovia, mediante condotte, su strada, per via d'acqua o aereo e le attività ausiliarie quali servizi ai terminal, parcheggi, centri di movimentazione e di magazzinaggio di merci eccetera, l'attività di noleggio di mezzi di trasporto con autista od operatore. Sono anche incluse le attività postali ed i servizi di corriere”* [3].

49	TRASPORTO TERRESTRE E TRASPORTO MEDIANTE CONDOTTE	49.1	TRASPORTO FERROVIARIO DI PASSEGGERI (INTERURBANO)
		49.2	TRASPORTO FERROVIARIO DI MERCI
		49.3	ALTRI TRASPORTI TERRESTRI DI PASSEGGERI
		49.4	TRASPORTO DI MERCI SU STRADA E SERVIZI DI TRASLOCO
		49.5	TRASPORTO MEDIANTE CONDOTTE
50	TRASPORTO MARITTIMO E PER VIE D'ACQUA	50.1	TRASPORTO MARITTIMO E COSTIERO DI PASSEGGERI
		50.2	TRASPORTO MARITTIMO E COSTIERO DI MERCI
		50.3	TRASPORTO DI PASSEGGERI PER VIE D'ACQUA INTERNE
		50.4	TRASPORTO DI MERCI PER VIE D'ACQUA INTERNE
51	TRASPORTO AEREO	51.1	TRASPORTO AEREO DI PASSEGGERI
		51.2	TRASPORTO AEREO DI MERCI E TRASPORTO SPAZIALE
52	MAGAZZINAGGIO E ATTIVITÀ DI SUPPORTO AI TRASPORTI	52.1	MAGAZZINAGGIO E CUSTODIA
		52.2	ATTIVITÀ DI SUPPORTO AI TRASPORTI
53	SERVIZI POSTALI E ATTIVITÀ DI CORRIERE	53.1	ATTIVITÀ POSTALI CON OBBLIGO DI SERVIZIO UNIVERSALE
		53.2	ALTRE ATTIVITÀ POSTALI E DI CORRIERE

**Tabella 1 - Codici ATECO settore trasporti**

Come si evince dalla classificazione riportata in Tabella 1, la mobilità può essere caratterizzata principalmente attraverso due parametri, ovverosia il carico trasportato (merci o persone) e la modalità di trasporto.

Oltre alle succitate modalità di trasporto, è presente, all'interno dei codici ATECO, il trasporto tramite condotte. Tuttavia, la trattazione di tale ambito e degli interventi di efficienza energetica ad esso afferenti non sarà oggetto di approfondimento della presente guida settoriale. Infatti, trattandosi di un trasporto realizzato esclusivamente tramite una infrastruttura e non per mezzo di una flotta veicolare, le caratteristiche di questa modalità di trasporto e dei possibili interventi di efficienza energetica differiscono significativamente dalle altre, escludendo di fatto la possibilità di eseguire considerazioni e approfondimenti comuni.

Si segnala, altresì, che la presente guida settoriale sui trasporti non prevede approfondimenti in merito ai progetti di efficienza energetica relativi all'acquisto di flotte di veicoli stradali ibridi e/o elettrici<sup>1</sup> appartenenti ai segmenti di mercato<sup>2</sup> A, B, C, D, E, F, J, M, S, in quanto tali interventi sono già descritti all'interno dei progetti standardizzati inerenti l'“acquisto flotte di veicoli ibridi” e l'“acquisto flotte di veicoli elettrici” di cui all'Allegato 2, del D.M. 10 maggio 2018.

## 2.2 I consumi energetici

In Italia, il settore dei trasporti rappresenta una porzione significativa del consumo energetico nazionale, coprendo più del 30% del totale dei consumi finali di energia, come si evince dalle percentuali riportate nella seguente **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata..**

La suddetta Tabella, inoltre, mostra l'andamento dei consumi finali di energia negli ultimi anni: come si può notare, tra il 2013 e il 2019 si è registrata una riduzione circa pari all'1,5% dei consumi totali di energia finale (ktep totali), ferma restando, invece, l'incidenza del settore trasporti, che si mantiene nel corso degli anni tra il 32% e il 35% del totale.

	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Trasporti	<b>38.702</b>	<b>40.085</b>	<b>39.541</b>	<b>39.110</b>	<b>37.945</b>	<b>39.414</b>	<b>39.830</b>
<i>Trasporti stradali</i>	32.855	34.273	33.609	32.964	31.654	32.806	33.140
<i>Aviazione internazionale</i>	3.001	3.076	3.166	3.296	3.419	3.835	3.969
<i>Navigazione interna</i>	985	969	932	959	869	631	602
<i>Aviazione interna</i>	683	646	697	710	780	879	907
<i>Trasporti ferroviari</i>	471	446	461	484	508	535	521
<i>Altri trasporti</i>	451	430	454	452	465	462	478
<i>Condotte</i>	256	246	221	246	250	266	212
Industria	<b>26.817</b>	<b>26.133</b>	<b>25.810</b>	<b>26.169</b>	<b>24.925</b>	<b>24.302</b>	<b>24.928</b>
Residenziale	<b>34.231</b>	<b>29.546</b>	<b>32.494</b>	<b>32.185</b>	<b>32.899</b>	<b>32.056</b>	<b>31.138</b>
Servizi	<b>15.847</b>	<b>14.667</b>	<b>15.391</b>	<b>15.440</b>	<b>18.242</b>	<b>19.338</b>	<b>18.192</b>
Agricoltura/forestale, pesca, altro	<b>2.922</b>	<b>2.887</b>	<b>2.994</b>	<b>3.026</b>	<b>3.019</b>	<b>3.146</b>	<b>2.719</b>
<b>kTEP totali</b>	<b>118.519</b>	<b>113.319</b>	<b>116.231</b>	<b>115.931</b>	<b>117.030</b>	<b>118.256</b>	<b>116.808</b>
<b>% Trasporti sui consumi totali</b>	<b>32,7%</b>	<b>35,4%</b>	<b>34,0%</b>	<b>33,7%</b>	<b>32,4%</b>	<b>33,3%</b>	<b>34,1%</b>

Tabella 2 - Incidenza del consumo finale di energia del settore trasporti sul consumo totale nazionale– ktep (elaborazioni GSE su fonte dati Eurostat)<sup>3</sup> [4], [5]

<sup>1</sup> Per la definizione di veicoli a trazione elettrica e ibrida si faccia riferimento all'aggiornamento annuale 2015 del Piano nazionale infrastrutturale per la ricarica dei veicoli alimentati ad energia elettrica (PNire) pubblicato mediante il DECRETO 19 maggio 2016, n. 118.

<sup>2</sup> La classificazione in segmenti di mercato per gli autoveicoli fa riferimento al documento “Office for Official Publications of the European Communities, 17 marzo 1999, p. 2”.

<sup>3</sup> Si precisa che, a partire dall'anno di riferimento 2017, i bilanci Eurostat sono stati modificati. In particolare, i consumi per l'aviazione internazionale sono stati eliminati dai consumi finali del settore Trasporti e considerati invece tra i Consumi interni lordi di energia. In questo documento, tuttavia, l'aviazione internazionale viene considerata tra i consumi finali del settore trasporti.

Una prima analisi dei consumi relativi ai trasporti può essere condotta analizzando questi ultimi sulla base delle diverse modalità di trasporto (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**): i trasporti su strada costituiscono la voce di consumo più rilevante (circa l'83,2% del totale), seguiti da aviazione internazionale (10%), navigazione interna (2,3%), aviazione interna (1,5%) e trasporti ferroviari (1,3%). La quota restante è attribuibile al trasporto attraverso condotte e ad altre modalità non menzionate.

Il parco veicolare immatricolato al 2020 risulta composto principalmente da autovetture (circa il 75% dei veicoli), di cui circa il 30% sono al di sotto della classe EURO 4. Nonostante la loro minore incidenza numerica sul parco totale, gli autocarri per trasporto merci e gli autobus risultano particolarmente vetusti, presentando il 51% circa dei veicoli al di sotto della classe EURO 4 [6].

In base ai dati riportati il consumo di energia finale del settore trasporti costituisce una quota rilevante del consumo di energia finale totale dell'Italia. Pertanto, si ritiene di estrema importanza l'adozione di interventi nel settore trasporti che consentano il rinnovamento del parco veicolare ad oggi immatricolato in Italia, al fine di ottenere un significativo contributo per il raggiungimento degli obiettivi di efficienza energetica.

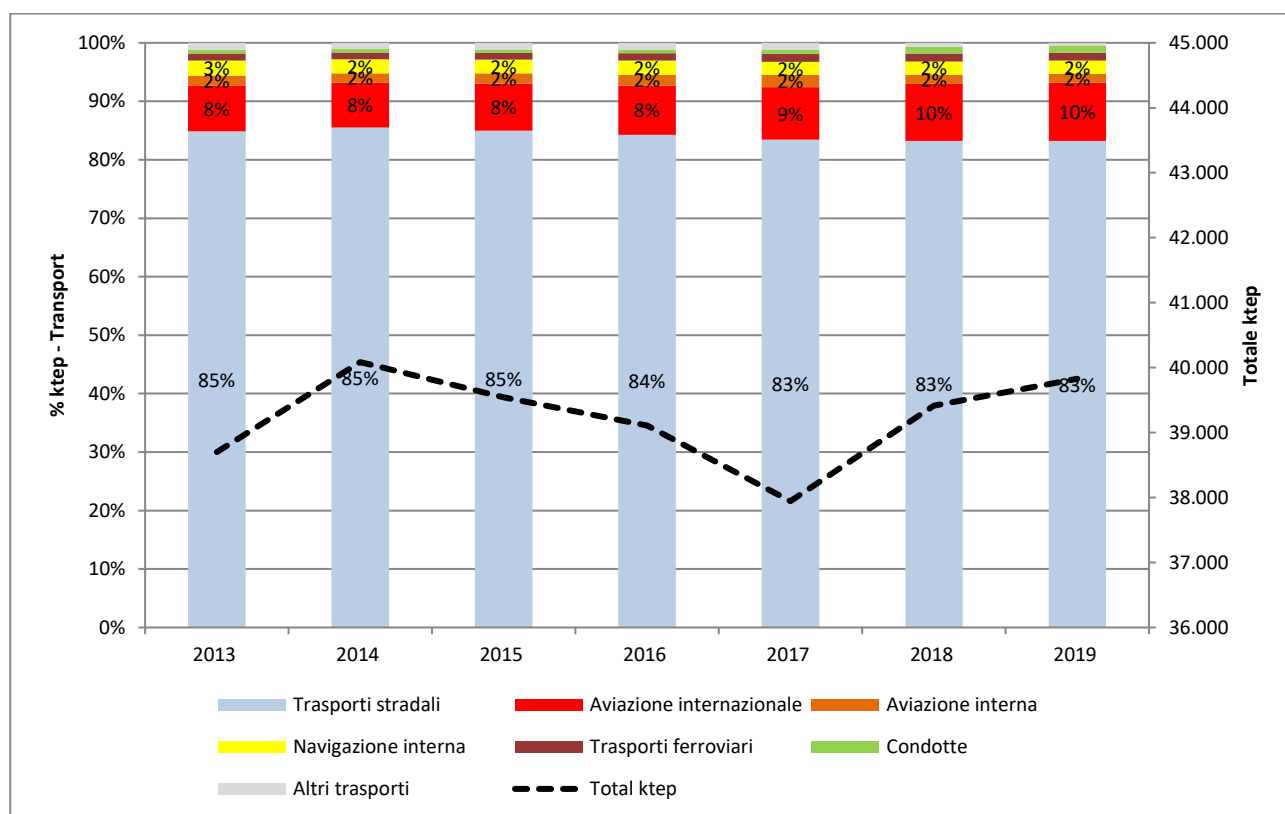


Figura 1 - Ripartizione percentuale dei consumi energetici per ambito dei trasporti (elaborazioni GSE su fonte dati Eurostat) [5]

Come si osserva dalla distribuzione dei fabbisogni per combustibile riportata in

Tipologia di alimentazione	Trasporti su strada	Aviazione internazionale	Aviazione interna	Navigazione interna	Trasporti ferroviari	Condotte	Altro	Totale	Totale
Prodotti petroliferi	30.893	3.969	907	602	44			36.414	91,4%
Gas	960					187		1.147	2,9%
Biocarburanti	1.276							1.276	3,2%
Elettricità	12				477	25	478	992	2,5%
da fonti rinnovabili	4				167	9	167	347	0,9%

<i>da fonti non rinnovabili</i>	8				310	16	311	645	1,6%
<b>Totale</b>	<b>33.141</b>	<b>3.969</b>	<b>907</b>	<b>602</b>	<b>521</b>	<b>212</b>	<b>478</b>	<b>39.829</b>	<b>100,0%</b>

Tabella 3, la quasi totalità dei consumi per il trasporto (91,4%) proviene dall'utilizzo di prodotti petroliferi, seguono le FER (4,1%, di cui il 3,2% è attribuibile ai biocombustibili e il restante 0,9% all'energia elettrica prodotta da fonti rinnovabili), il gas naturale (2,9%) e l'energia elettrica prodotta da fonti fossili (1,6%). Pertanto, sulla base di tali dati, si evince come il settore trasporti sia ancora fortemente dipendente dall'utilizzo di combustibili fossili.

Tipologia di alimentazione	Trasporti su strada	Aviazione internazionale	Aviazione interna	Navigazione interna	Trasporti ferroviari	Condotte	Altro	Totale	Totale
<b>Prodotti petroliferi</b>	<b>30.893</b>	<b>3.969</b>	<b>907</b>	<b>602</b>	<b>44</b>			<b>36.414</b>	<b>91,4%</b>
<b>Gas</b>	<b>960</b>					<b>187</b>		<b>1.147</b>	<b>2,9%</b>
<b>Biocarburanti</b>	<b>1.276</b>							<b>1.276</b>	<b>3,2%</b>
<b>Elettricità</b>	<b>12</b>				<b>477</b>	<b>25</b>	<b>478</b>	<b>992</b>	<b>2,5%</b>
<i>da fonti rinnovabili</i>	4				167	9	167	347	0,9%
<i>da fonti non rinnovabili</i>	8				310	16	311	645	1,6%
<b>Totale</b>	<b>33.141</b>	<b>3.969</b>	<b>907</b>	<b>602</b>	<b>521</b>	<b>212</b>	<b>478</b>	<b>39.829</b>	<b>100,0%</b>

Tabella 3 - Ripartizione dei consumi di energia finale per modalità di trasporto e tipologia di alimentazione al 2019 – ktep (elaborazioni GSE su fonte dati Eurostat) [5]

## 2.3 La domanda di trasporto

### 2.3.1 Trasporto passeggeri

Per domanda di mobilità delle persone si intende la mobilità richiesta ogni anno sul territorio nazionale e le scelte modali operate dagli utenti per soddisfarla, rappresentata sinteticamente con la cosiddetta “*percorrenza complessiva*” (passeggeri-km<sup>4</sup>).

Come si evince dalla Figura 2, a partire dal 2014, la percorrenza complessiva è andata costantemente aumentando fino al 2019, per poi subire una sensibile riduzione a causa dell'emergenza sanitaria da COVID-19

<sup>4</sup> Unità di misura della domanda di trasporto, equivalente al percorso di un viaggiatore per un chilometro. Si calcola come sommatoria dei prodotti del numero dei passeggeri trasportati per le relative percorrenze.



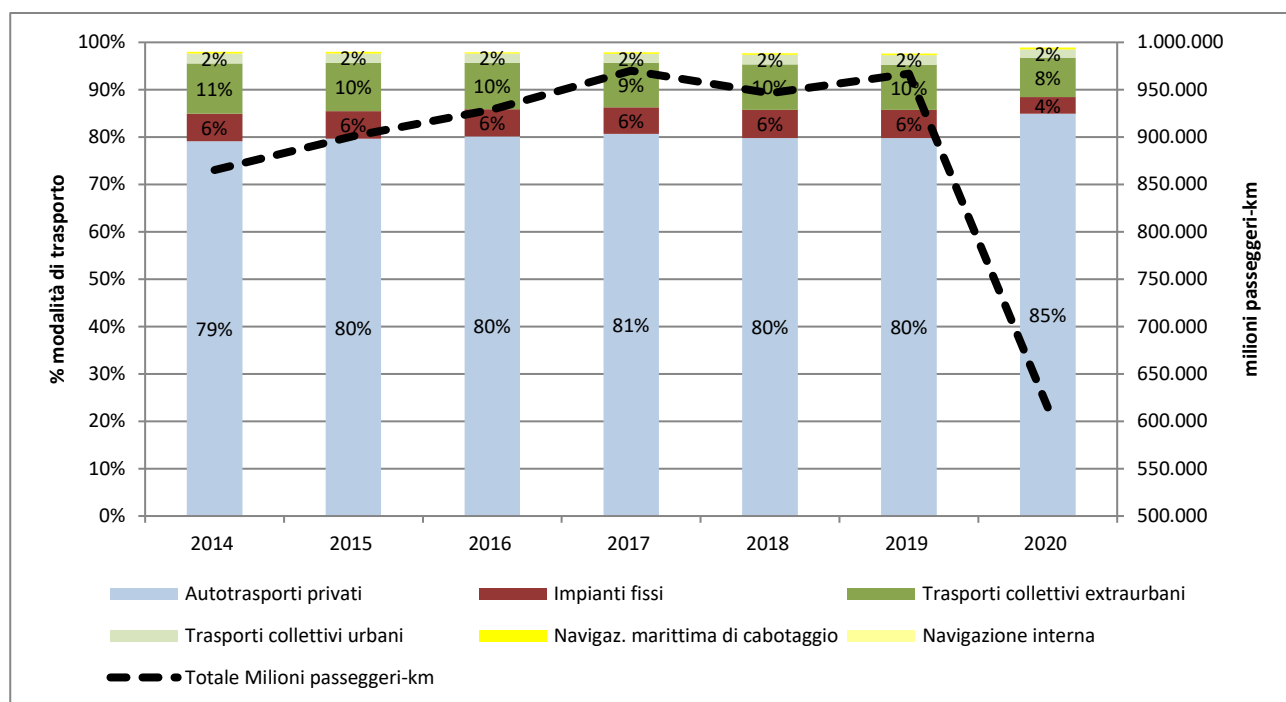


Figura 2: Trasporto passeggeri – ripartizione percentuale di “milioni di passeggeri-km” per modalità di trasporto (elaborazione GSE su dati Conto Nazionale delle Infrastrutture e della Mobilità sostenibili) [7]

Nella successiva tabella viene riportata la percorrenza complessiva distinta per modalità di trasporto: il trasporto privato pesa circa l'85% sul totale e l'automobile è il mezzo più utilizzato. Per il restante 15% relativo al trasporto collettivo, il trasporto su gomma risulta la voce più rilevante.

Modalità di trasporto	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
<b>Autotrasporti privati</b>	<b>684.581</b>	<b>717.675</b>	<b>744.931</b>	<b>782.780</b>	<b>755.127</b>	<b>771.618</b>	<b>522.066</b>
- di cui autovetture	642.920	676.350	704.542	744.919	722.894	732.429	488.299
- di cui motocicli e ciclomotori	41.661	41.326	40.389	37.860	32.233	39.189	33.766
<b>Impianti fissi</b>	<b>50.446</b>	<b>52.695</b>	<b>53.003</b>	<b>54.039</b>	<b>56.303</b>	<b>56.114</b>	<b>21.592</b>
Trasporti ferroviari	49.957	52.207	52.178	53.231	55.493	55.303	21.206
-di cui grandi Imprese	48.881	51.121	51.716	52.778	55.037	54.848	21.046
-di cui piccole e medie Imprese	1.076	1.086	462	453	456	454	160
Altri (tramvie extraurbane e funivie)	488	489	825	808	810	811	385
- di cui tranvie extraurbane	77	78	78	79	80	81	45
- di cui funivie	411	411	747	729	730	673	340
<b>Trasporti collettivi extraurbani</b>	<b>91.610</b>	<b>91.558</b>	<b>91.293</b>	<b>91.085</b>	<b>91.002</b>	<b>91.650</b>	<b>51.069</b>
Autolinee e filovie	17.905	17.783	17.452	17.174	17.036	17.627	10.060
Autolinee comp. statale, noleggio e privati	73.705	73.776	73.841	73.910	73.966	74.024	41.009
<b>Trasporti collettivi urbani</b>	<b>17.869</b>	<b>17.798</b>	<b>17.785</b>	<b>18.563</b>	<b>18.887</b>	<b>18.690</b>	<b>10.893</b>
Filovie e autobus	11.196	10.950	11.020	11.594	11.598	11.284	6.709

Altri modi	6.674	6.848	6.766	6.969	7.289	7.405	4.184
- di cui tranvie urbane	1.266	1.301	1.357	1.387	1.416	1.443	866
- di cui metropolitane	5.388	5.527	5.388	5.562	5.853	5.942	3.307
- di cui funicolari	19	20	20	20	21	20	11
<b>Navigazione aerea</b>	<b>17.031</b>	<b>17.802</b>	<b>18.647</b>	<b>19.824</b>	<b>20.962</b>	<b>21.800</b>	<b>6.008</b>
<b>Navigaz. marittima di cabotaggio</b>	<b>3.057</b>	<b>2.987</b>	<b>2.918</b>	<b>3.114</b>	<b>3.434</b>	<b>3.522</b>	<b>2.362</b>
<b>Navigazione interna</b>	<b>599</b>	<b>603</b>	<b>636</b>	<b>665</b>	<b>664</b>	<b>677</b>	<b>612</b>
<b>Totale Milioni passeggeri-km</b>	<b>865.192</b>	<b>901.120</b>	<b>929.215</b>	<b>970.070</b>	<b>946.379</b>	<b>964.071</b>	<b>614.602</b>

**Tabella 4 - Trasporto passeggeri – milioni di passeggeri-km (fonte dati: Conto Nazionale delle Infrastrutture e della Mobilità sostenibili ) [7]**

La scelta della modalità di trasporto, specialmente in ambito urbano, viene effettuata dall'utente sulla base di valutazioni di convenienza legate principalmente al valore del tempo, del costo e dello spazio, ovvero in base all'importanza che l'utente conferisce alla minimizzazione del tempo di percorrenza, alla sua disponibilità economica a spendere per la mobilità e al peso che l'utente conferisce a problematiche relative alla congestione del traffico o alla difficoltà di trovare parcheggio. Altri elementi che influenzano la scelta della modalità di trasporto sono quelle relative, ad esempio, alle caratteristiche ambientali del territorio, alla presenza di infrastrutture o di reti di TPL articolate ed efficienti che consentano all'utente di far ricadere la propria scelta nell'ambito dei trasporti collettivi [8].

### 2.3.2 Trasporto merci

Per quanto riguarda, invece, la mobilità delle merci, l'impatto dei consumi viene sinteticamente definito attraverso il parametro "tonnellate-km"<sup>5</sup>. Come si evince dalla Tabella 5 sotto riportata, la modalità di trasporto merci principalmente utilizzata è quella su strada (più del 50% sul totale), seguono la navigazione marittima, il trasporto ferroviario, le condotte e la navigazione aerea.

Modalità di trasporto	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Trasporti ferroviari	20.157	20.781	22.712	22.335	21.097	21.309	19.390
- di cui grandi Imprese	18.123	18.342	22.394	22.064	20.841	20.994	19.103
- di cui piccole e medie Imprese	2.034	2.440	319	271	256	315	287
Navigazione marittima di cabotaggio	52.867	51.145	56.713	60.005	64.859	57.975	51.130
Navigazione interna	64	62	67	61	67	55	50
Navigazione aerea	1.052	1.085	1.166	1.269	1.269	1.216	921
Autotrasporto (> 50 Km)	93.709	95.513	92.296	99.120	102.833	114.417	103.989
Oleodotti (> 50 Km)	9.152	8.790	9.599	9.793	9.925	9.696	8.707
<b>Totale Milioni di tonnellate-km</b>	<b>177.001</b>	<b>177.376</b>	<b>182.553</b>	<b>192.583</b>	<b>200.050</b>	<b>204.668</b>	<b>184.187</b>

**Tabella 5 - Trasporto merci – milioni di tonnellate-km per modalità di trasporto (fonte dati: Conto Nazionale delle Infrastrutture e della Mobilità sostenibili) [7]**

## 2.4 Mobilità sostenibile

<sup>5</sup> Unità di misura di trasporto merci, calcolata come sommatoria dei prodotti del numero delle tonnellate trasportate per le relative percorrenze.

Per mobilità sostenibile si intende un principio che è alla base di un sistema di trasporto ideale, di persone e di merci, che soddisfa le esigenze di spostamento o movimentazione garantendo una buona qualità della vita e permettendo la riduzione dei consumi e dell'impatto ambientale ad esse associate.

Volendo confrontare le diverse modalità di trasporto in termini di efficienza energetica, si può considerare, come parametro descrittivo, la quantità di energia consumata per trasportare l'unità (1 passeggero o 1 ton di merce) per una distanza di 1 km. Tale parametro risulta influenzato non solo dal rendimento di trazione veicolare, ma anche dalla capacità di trasporto per unità di peso del mezzo e dal relativo coefficiente di occupazione. In quest'ottica si evidenzia come i mezzi di trasporto collettivo risultino più efficienti di quelli privati: tra questi emerge il trasporto ferroviario che, oltre a garantire una elevata capacità di trasporto, avviene quasi completamente attraverso trazione elettrica con rendimenti molto più elevati rispetto a quelli della combustione.

Gli obiettivi nazionali di efficienza energetica, possono essere raggiunti anche grazie al contributo di interventi nel settore dei trasporti, adottando misure che intervengano sinergicamente su diversi ambiti. Un approccio particolarmente apprezzato negli ultimi anni è rappresentato dall'approccio A-S-I (*Avoid - Shift - Improve* ovvero evitare, cambiare e ottimizzare), sviluppato in Germania, il quale sintetizza le strategie di intervento in tre macro-categorie di azione, in grado di cogliere le molteplici sfaccettature della mobilità sostenibile:

- 1 AVOIDING**, ovvero ridurre la necessità di trasporto e la lunghezza dei percorsi da effettuare, ottimizzando la domanda di trasporto e favorendo l'utilizzo di sistemi di comunicazione. Ad esempio:
  - favorire lo *smart working*, anche tramite l'implementazione della banda larga su tutto il territorio nazionale;
  - stimolare la creazione di servizi on-line da parte di tutte le PA;
  - ottimizzare la logistica di merci e servizi;
- 2 SHIFTING**, ovvero orientare gli utenti verso modalità di viaggio più efficienti e sostenibili. Ad esempio:
  - stimolare l'utilizzo del trasporto pubblico locale (TPL);
  - promuovere il car-sharing;
  - promuovere il car-pooling;
  - favorire lo shift modale e l'intermodalità nel trasporto di persone e merci;
  - promuovere soluzioni di condivisione anche per la logistica urbana;
  - favorire la mobilità su due ruote (cicli e motocicli);
- 3 IMPROVING**, ovvero aumentare le performance ambientali dei trasporti, intervenendo anche sulla tecnologia dei veicoli. Ad esempio:
  - favorire la sostituzione di vecchi veicoli con nuovi Euro 6 o con combustibili alternativi;
  - favorire lo sviluppo della mobilità elettrica, a gas (GNC/GPL), a idrogeno per il trasporto individuale e collettivo;
  - favorire l'adozione di combustibili alternativi per il trasporto merci (LNG per il trasporto pesante e marittimo, veicoli alimentati a combustibili alternativi per la logistica urbana) [9].

### 3 DESCRIZIONE DEGLI INTERVENTI DI EFFICIENZA ENERGETICA E DELLE MIGLIORI TECNOLOGIE DISPONIBILI

Nel presente capitolo si riporta l'elenco dei possibili interventi di efficienza energetica realizzabili e delle migliori tecnologie disponibili per la riduzione dei consumi energetici nel settore dei trasporti.

Nella tabella sottostante sono riportati gli interventi di efficienza energetica relativi al settore dei trasporti e incentivabili nell'ambito del meccanismo dei Certificati Bianchi, così come elencati all'interno della tabella1, dell'Allegato 2 al D.M. 11 gennaio 2017 e ss.mm.ii.. All'interno della suddetta tabella sono indicati i valori di vita utile previsti per ciascuna tipologia di intervento.

ID	Interventi relativi al settore dei trasporti	Vita Utile (U)		
		Nuova installazione	Sostituzione	Efficientamento integrato
1	Acquisto flotte di mezzi di trasporto a trazione elettrica, gas naturale, GNL, GPL, ibride o a idrogeno	10	10	-
2	Efficientamento energetico di mezzi di trasporto alimentati a combustibili fossili	-	7	7
3	Acquisto flotte di mezzi di trasporto non a trazione elettrica e alimentati da uno o più combustibili anche diversi da gas naturale, GNL, GPL o idrogeno	10	10	-
4	Adozione di sistemi di segnalazione e gestione efficienti	3	-	-
5	Adozione di sistemi di analisi dati sui consumi di singoli impianti, utenze e veicoli	3	-	-
6	Adozione di iniziative finalizzate all'utilizzo di veicoli a basse emissioni	3	-	-
7	Adozione di iniziative di shift modale nei trasporti	3	-	-
8	Adozione di iniziative per la riduzione del fabbisogno di mobilità	3	-	-
9	Riduzione della velocità dei mezzi di trasporto a parità di servizio reso	3	-	-

**Tabella 6 – Interventi di efficienza energetica incentivabili mediante il meccanismo dei Certificati Bianchi**

Si precisa che, per quanto riguarda gli interventi che si configurano come misure comportamentali, il calcolo dei risparmi dovrà essere effettuato con riferimento al consumo specifico del *“Sistema tecnologico assunto come punto di riferimento”*.

Al fine di fornire un dettaglio maggiore in merito agli interventi di cui alla Tabella 6, si riporta di seguito un elenco esteso, ma non esaustivo, degli stessi distinguendoli in base alla modalità di trasporto (trasporto su strada, su rotaia, marittimo, aereo) e alla specifica tecnologia e/o tipologia di intervento a cui si fa riferimento. La tabella sottostante mostra per ciascuna modalità di trasporto: la tipologia di intervento, la metodologia di valutazione (PC, PS) e la corrispondenza con gli interventi elencati all'interno della Tabella 6.

Modalità di trasporto	Intervento	Tipo di progetto (PC e/o PS)	Riferimento all'ID intervento di cui alla Tabella 6
Trasporto su strada	Acquisto flotte di mezzi di trasporto passeggeri su strada	PC, PS*	1, 3
	Acquisto flotte di veicoli pesanti per il trasporto merci su strada	PC	1, 3
	Sistemi predittivi per l'efficientamento dello stile di guida	PC	4, 9
	Acquisto di carrelli elevatori più efficienti a trazione elettrica per la movimentazione merci	PC	1
Trasporto su rotaia	Acquisto flotte di treni più efficienti per il trasporto ferroviario passeggeri e/o merci nazionale	PC	1
	Acquisto flotte di treni per il trasporto passeggeri regionale	PC	1, 3
	Acquisto flotte di mezzi su rotaia (tram, metro) per il Trasporto Pubblico Locale (TPL)	PC	1
Trasporto marittimo	Acquisto flotte di navi adibite al trasporto persone e/o merci	PC	1, 3
	Interventi mirati all'ottimizzazione della fluidodinamica	PC, PS**	2
	Sostituzione gruppo motore	PC	2
	Installazione di sistemi di propulsione/alimentazione alternativa per l'efficientamento di mezzi di trasporto navale alimentati a combustibili fossili	PC	2
Trasporto aereo	Acquisto flotte di aerei per il trasporto passeggeri e/o merci	PC	1, 3
	Sostituzione dei sistemi di propulsione con altri a maggiore efficienza	PC	2
	Interventi mirati all'ottimizzazione aerodinamica di aerei	PC	2
,	Interventi riconducibili all'adozione di misure comportamentali	PC	4, 5, 6, 7, 8, 9

Tabella 7 - Possibili interventi nel settore Trasporti – PC: Progetti a Consuntivo, PS: Progetti Standardizzati

\* PS solo per progetti di efficienza energetica riconducibili alle tipologie di intervento "Acquisto flotte di veicoli ibridi" e "Acquisto flotte di veicoli elettrici" di cui alla Tabella 1, dell'Allegato 2 al D.M. 10 maggio 2018.

\*\* PS solo per progetti di efficienza energetica riconducibili alla tipologia di intervento "Sistema propulsivo delle navi" di cui alla Tabella 1, dell'Allegato 2 al D.M. 10 maggio 2018.

Nei paragrafi che seguono verranno espone alcune delle principali tecnologie ad oggi maggiormente diffuse per ciascuna modalità di trasporto e verranno approfonditi gli interventi elencati in Tabella 7.

### 3.1 Trasporto su strada

Come anticipato nel capitolo introduttivo, in questa guida settoriale non sono previsti approfondimenti in merito ai progetti di efficienza energetica relativi all'acquisto di flotte di veicoli ibridi e/o elettrici appartenenti ai segmenti di mercato A, B, C, D, E, F, J, M e S, in quanto per tali tipologie di interventi sono già presenti delle specifiche all'interno dei progetti standardizzati di *"acquisto flotte di veicoli ibridi"* e *"acquisto flotte di veicoli elettrici"*. Pertanto, il presente paragrafo analizza alcune delle migliori tecnologie ad oggi disponibili legate all'efficientamento dei veicoli pesanti per il trasporto di persone e merci.

I veicoli a motore aventi almeno quattro ruote possono essere classificati come:

- veicoli leggeri (autovetture e furgoni);
- veicoli pesanti (camion, autobus e pullman).

Un'ulteriore classificazione del Ministero delle infrastrutture e dei Trasporti, che fa riferimento alla *"massa massima"* del veicolo, intesa come la *"massa massima a pieno carico tecnicamente ammissibile"* suddivide i veicoli a motore, aventi almeno quattro ruote, in due categorie M<sup>6</sup> e N. In particolare:

- Categoria M: veicoli a motore progettati e costruiti per il trasporto di persone ed aventi almeno quattro ruote:
  - Categoria M1: veicoli progettati e costruiti per il trasporto di persone, aventi al massimo otto posti a sedere oltre al sedile del conducente;
  - Categoria M2: veicoli progettati e costruiti per il trasporto di persone, aventi più di otto posti a sedere oltre al sedile del conducente e massa massima non superiore a 5 t;
  - Categoria M3: veicoli progettati e costruiti per il trasporto di persone, aventi più di otto posti a sedere oltre al sedile del conducente e massa massima superiore a 5 t [10].
- Categoria N: veicoli a motore progettati e costruiti per il trasporto di merci ed aventi almeno quattro ruote.
  - Categoria N1: veicoli progettati e costruiti per il trasporto di merci, aventi massa massima non superiore a 3,5 t;
  - Categoria N2: veicoli progettati e costruiti per il trasporto di merci, aventi massa massima superiore a 3,5 t ma non superiore a 12 t;
  - Categoria N3: veicoli progettati e costruiti per il trasporto di merci, aventi massa massima superiore a 12 t [10].

I veicoli della categoria N aventi massa massima superiore a 3,5 t sono ulteriormente classificati secondo quanto previsto dall'Allegato I del Regolamento (UE) 2017/2400 [12].

Il trasporto su strada svolge un ruolo di primaria importanza in Italia per lo spostamento di merci e persone, come dimostrato dai dati riportati in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** e in Figura 1. Questa tipologia di trasporto è oggetto, oltre che di una continua crescita in termini di tonnellate e persone trasportate annue, di ottimizzazione in termini di efficienza energetica e di riduzione dell'impatto ambientale che da essa ne deriva. I principali campi d'azione legati allo sviluppo di tecnologie per migliorare l'efficienza energetica dei veicoli stradali riguardano:

- i sistemi di propulsione;
- i sistemi di recupero dai gas di scarico;
- i sistemi di guida efficiente;
- l'aerodinamica.

<sup>6</sup> La categoria M dei veicoli, di cui al D.lgs. 30 aprile 1992 n.285 e s.m.i. – *"Nuovo codice della strada"*, non è da confondere con il segmento di mercato M.

### 3.1.1 L'aerodinamica

L'aerodinamica dei mezzi adibiti al trasporto su strada rappresenta una variabile fondamentale nell'ottica della riduzione dei consumi. Infatti, come dimostrato da alcuni studi di settore, ad esempio, per un veicolo merci pesante che viaggia ad una velocità tipica urbana impiega poco più di un terzo dell'energia della propulsione per vincere la resistenza dell'attrito aerodinamico [16]. Per quanto riguarda i mezzi adibiti al trasporto di persone, la riduzione dell'attrito aerodinamico può essere ottenuta attraverso la realizzazione di cabine con forma arrotondata e l'installazione di alettoni sulla parte posteriore del mezzo. Per i mezzi adibiti al trasporto merci, invece, il contenimento dell'attrito aerodinamico è perseguibile attraverso: l'introduzione di deflettori laterali e spoiler regolabili, che consentono di ridurre lo spazio tra la cabina e il semirimorchio ed evitano lo svilupparsi di correnti e mulinelli d'aria nell'interspazio; l'adozione di dispositivi sotto-rimorchio (minigonne), che evitano il ricircolo dell'aria sotto il veicolo; dispositivi di riduzione dell'attrito aerodinamico applicati nella parte posteriore del rimorchio. Un'altra metodologia recentemente in fase di sviluppo è il cosiddetto *Truck Platooning*, ovvero la marcia di un convoglio di veicoli, il primo dei quali è guidato in maniera tradizionale, mentre gli altri sono gestiti in modo automatico e a breve distanza l'uno dall'altro. Questa tecnica consente di far viaggiare i mezzi del convoglio a breve distanza l'uno dall'altro, interconnessi tra loro e con l'infrastruttura stradale, al fine di ridurre la resistenza aerodinamica complessiva dell'intero convoglio sfruttando lo spostamento d'aria del veicolo di testa. [17]

### 3.1.2 I sistemi di propulsione

L'azione più significativa che può essere intrapresa per ridurre i consumi di energia primaria relativi a questa modalità di trasporto è quella di rinnovare il parco veicoli, introducendo in maniera graduale e sistematica mezzi più efficienti. Il mercato di riferimento è fortemente dipendente dalla motorizzazione diesel. Una valida alternativa alla motorizzazione diesel dei veicoli pesanti è rappresentata dal sempre più diffuso utilizzo di veicoli con motore alimentato a gas naturale liquefatto (GNL), che grazie allo sviluppo dell'infrastruttura di distribuzione si affermerà sempre più come combustibile alternativo. Per quanto riguarda i mezzi destinati al trasporto di persone, invece, le soluzioni motoristiche dei nuovi veicoli sono già orientate all'utilizzo di carburanti alternativi come biodiesel, biometano o soluzioni ibride ed elettriche.

I veicoli pesanti destinati al trasporto merci sono generalmente caratterizzati da motori con alimentazione a gasolio, infatti nel 2018 ne sono stati immatricolati con tale alimentazione circa il 92% rispetto al totale dei veicoli per il trasporto merci venduti. Il mercato di riferimento è orientato sia al perfezionamento delle tecnologie esistenti per ridurre consumi ed emissioni, sia allo sviluppo tecnologico di motorizzazioni ibride diesel/elettriche (*HEV* e *PHEV*). La tecnologia ibrida sviluppata per i mezzi pesanti ha portato in breve tempo alla commercializzazione dei primi motori *HEV* (*Hybrid Electric Vehicle*), caratterizzati dalla possibilità di ricaricare il pacco batterie durante la marcia, anche grazie al sistema di recupero dell'energia dalla frenata (frenata rigenerativa), che permette l'avviamento del mezzo e la circolazione a bassa velocità completamente in modalità elettrica. In un futuro prossimo, parallelamente allo sviluppo delle infrastrutture, sarà possibile introdurre la tecnologia *PHEV* (*Plug-in Hybrid Electric Vehicle*) che permetterà la possibilità di ricaricare le batterie in fase di fermata tramite connessione al sistema elettrico, garantendo uno stato di carica completa già ad inizio viaggio ed eliminando il transitorio iniziale. [13]

### 3.1.3 I sistemi di recupero dai gas di scarico

La ricerca per lo sviluppo tecnologico dei veicoli pesanti adibiti al trasporto merci procede anche nella direzione del recupero termico dai fumi di scarico, caratterizzati da un alto contenuto energetico, che altrimenti verrebbe disperso. La tecnologia "*Turbocompounding*" consente il recupero termico dai gas di scarico mediante una turbina. L'energia meccanica prodotta viene messa direttamente a disposizione dell'albero motore o viene utilizzata per alimentare un generatore elettrico, che carica un sistema di accumulo di energia a servizio dei sistemi ausiliari di guida. [14]



### 3.1.4 I sistemi di guida efficiente

L'efficientamento energetico dei mezzi di trasporto su strada si concentra sulla gestione del combustibile immesso nel motore, analizzando i processi e le cause per le quali si verificano le maggiori perdite di energia. In primo luogo, tali perdite si riscontrano nella fase di frenata e nella *"condizione di minimo"* del motore. Per questa categoria di veicoli la gestione del minimo carico del motore nelle situazioni di fermata è strettamente correlata alla grandezza del veicolo stesso e alla tipologia di servizio che svolge: per i veicoli che svolgono un servizio prevalentemente in ciclo urbano, la tecnologia implementata è quella *"Start&Stop"*, che rappresenta al giorno d'oggi una tecnologia standard diffusa sul mercato; per i veicoli che svolgono un servizio prevalentemente in ciclo extraurbano, invece, la gestione del minimo carico del motore non rappresenta una predominante voce di perdita. Per quanto riguarda le perdite di energia che si sviluppano in caso di frenata, vengono implementati sistemi di controllo della velocità, che si distinguono in *Adaptive Cruise Control (ACC)* e *Predictive Cruise Control (PCC)*. Il sistema *Adaptive Cruise Control (ACC)* rappresenta un'evoluzione del più noto sistema di mantenimento della velocità di crociera di un veicolo (*cruise control*) che garantisce, grazie ad un sensore laser, il mantenimento della distanza di sicurezza agendo direttamente sulla decelerazione o, in caso contrario, sulla fase di accelerazione per il ripristino della velocità ottimale. Il sistema *ACC* rappresenta una tecnologia matura che nel campo dei veicoli leggeri e pesanti trova largo impiego. Il sistema *Predictive Cruise Control (PCC)* incorpora funzionalità digitali avanzate che, grazie anche alla localizzazione del veicolo tramite tecnologie GPS, ottimizzano lo stile di guida al fine di garantire la velocità ideale in base al tipo di strada che si sta percorrendo e in funzione di altre variabili, quali ad esempio il traffico, la pendenza e il carico trasportato. [15]

### 3.1.5 I carrelli elevatori

Per quanto riguarda la movimentazione delle merci, il D.Lgs.10 settembre 1991, n. 304 definisce *"un carrello semovente per movimentazione qualsiasi veicolo a ruote, salvo quelli che si spostano su rotaie, destinato a trasportare, trainare, spingere, sollevare o accatastare, immagazzinare in scaffalature carichi di qualsiasi genere, comandato da un operatore a terra in prossimità del carrello stesso o da un operatore a bordo su un posto di guida fisso al telaio o sollevabile, appositamente allestito"*. [18]

I carrelli semoventi sono classificabili secondo quanto previsto dall'Allegato I del suddetto D.Lgs., e più in generale sono differenziabili in base al loro azionamento (a trazione termica, gas o diesel, o elettrica) e secondo le seguenti tipologie:

- carrello a forche ricoprenti;
- carrello con forche tra i longheroni;
- carrello con forche a sbalzo;
- carrello con montanti o forche retrattili;
- carrello a presa laterale;
- carrello a grande altezza;
- carrello commissionatore;
- carrelli a portale.

Tutte queste differenti tipologie possono prevedere tre modalità di guida del carrello: con operatore a terra, con operatore a bordo e con guida automatica. Possono accedere al meccanismo dei Certificati Bianchi i soli interventi relativi alla sostituzione o alla nuova installazione di carrelli guidati da un operatore a bordo, ovvero carrelli che siano dotati di sistemi di guida autonoma.

Il 60% dei carrelli elevatori acquistati oggi è di tipo elettrico. La transizione verso l'alimentazione elettrica dei carrelli elevatori è resa possibile dall'elevata efficienza dei motori elettrici e dal miglioramento prestazionale avuto negli ultimi anni sul sistema di accumulo, caratterizzato da batterie agli ioni di litio sempre più efficienti che stanno via via sostituendo le tradizionali batterie al piombo-acido. In particolare, i vantaggi dell'utilizzo delle batterie agli ioni di litio rispetto alle batterie tradizionali sono rappresentati da:

- migliori prestazioni, ovvero sia la capacità di fornire sempre la massima potenza indipendentemente dallo stato di carica;



- una gestione semplificata dei cicli di ricarica: le batterie agli ioni di litio sono ideali sia per cariche complete, che sono molto più veloci (*fast charging*) rispetto alla ricarica di batterie tradizionali, sia per cariche intermedie, che invece non erano possibili con le precedenti. Inoltre, la ricarica delle batterie non produce alcuna emissione;
- una manutenzione ridotta: le batterie agli ioni di litio non necessitano di una manutenzione ordinaria periodica. [19]

## 3.2 Trasporto su rotaia

I sistemi di trasporto su rotaia vengono classificati in base a differenti criteri, ognuno dei quali ha il compito di porre in evidenza determinati aspetti caratteristici della tipologia di trasporto individuata. Tra le possibili classificazioni, qui di seguito se ne elencano solamente alcune allo scopo di facilitare una descrizione dei possibili interventi di efficienza energetica, per cui si fa richiesta di accesso al meccanismo dei Certificati Bianchi, coerente con gli interventi elencati in Tabella 7, relativamente a questa specifica modalità di trasporto. Pertanto, il trasporto su rotaia può essere classificato in base alla tipologia di:

- servizio (merci, passeggeri, urbano, suburbano, regionale, media e lunga percorrenza, alta e media capacità, etc.);
- veicolo (tram, elettrotreno, autotreno, metropolitana, metropolitana leggera, etc.);
- linea (monorotaia, tranviaria, ferroviaria fondamentale, ferroviaria complementare, ferroviaria di nodo, ferroviaria alta velocità e alta capacità AV/AC, ferroviaria convenzionale, etc.).

Come mostrato all'interno del "*Railway handbook 2015*" [20], pubblicato dalla *International Energy Agency (IEA)* in collaborazione con la *International Union of Railways (UIC)*, il trasporto su rotaia costituisce una delle modalità di trasporto più efficienti sia per il trasporto passeggeri che per il trasporto merci. I dati raccolti a livello mondiale dimostrano come dal 1975 al 2012 si siano ottenuti significativi progressi dal punto di vista della riduzione dei consumi energetici dei treni, mentre negli ultimi anni si stanno mantenendo abbastanza costanti, in particolar modo all'interno dell'Unione Europea.

Nel trasporto ferroviario trovano già impiego diverse soluzioni per il miglioramento dell'efficienza energetica dei veicoli, come ad esempio l'installazione di sistemi di monitoraggio dei consumi, l'utilizzo di sistemi di recupero dell'energia dalla frenata, l'implementazione del *Driver Advisory System (DAS)* il cui scopo è quello di ridurre l'influenza del fattore umano, ovverosia dello stile di guida, sui consumi energetici di un veicolo, tenendo conto delle caratteristiche della tratta e degli orari delle fermate.

I principali campi d'azione legati allo sviluppo di tecnologie per l'efficienza energetica dei veicoli nel trasporto su rotaia riguardano:

- l'aerodinamica;
- i materiali;
- il sistema di propulsione;
- i sistemi di recupero di energia in frenata;
- i sistemi integrati per la produzione di energia elettrica da fonte rinnovabile;
- i sistemi di guida efficiente.

Gli ambiti sopra indicati caratterizzano il funzionamento di un veicolo su rotaia e ne influenzano in maniera più o meno significativa il consumo energetico, in quanto ognuno di essi contribuisce con un peso diverso a determinare il valore finale. Le azioni delle case costruttrici dei veicoli su rotaia sono alla costante ricerca di tecnologie e soluzioni innovative volte all'efficienza energetica in ciascuno dei suddetti ambiti. Di seguito verranno presentate alcune soluzioni e tecnologie che costituiscono l'attuale stato dell'arte del trasporto su rotaia, ovvero rappresentano l'insieme delle migliori tecnologie e dei possibili interventi per la riduzione dei consumi energetici [21].

### 3.2.1 L'aerodinamica e i materiali

Per quanto riguarda l'aerodinamica dei veicoli, studi di settore evidenziano come l'ottimizzazione del design di un veicolo su rotaia possa portare a una riduzione fino al 25% della resistenza aerodinamica dello stesso [21]. La resistenza aerodinamica diviene la principale forza di resistenza al moto al di sopra dei 200 km/h e,

pertanto, l'ottimizzazione dell'aerodinamica è molto importante soprattutto per i treni, e in generale per i veicoli su rotaia, ad alta velocità. Le ultime metodologie adottate per la riduzione dell'attrito aerodinamico si basano sulla bionica, ovvero sull'applicazione di sistemi biologici trovati in natura per il miglioramento del design dei veicoli su rotaia.

I materiali che generalmente sono utilizzati per la realizzazione di un veicolo su rotaia sono l'acciaio, l'alluminio e il titanio e sono presenti sul mercato materiali compositi che superano gli stringenti requisiti legati alle condizioni operative di un veicolo su rotaia. Tali materiali, oltre a comportare una riduzione dei costi di manutenzione ed esercizio, contribuiscono alla riduzione dei consumi energetici di un veicolo su rotaia in quanto caratterizzati da un ridotto peso specifico rispetto a quello dei materiali convenzionali.

### **3.2.2 I sistemi di propulsione e i sistemi di recupero di energia in frenata**

Dal punto di vista dei sistemi di propulsione, nel caso di veicoli su rotaia, le migliori tecnologie per la trazione sono costituite dall'impiego di motori elettrici sempre più efficienti dotati di inverter IGBT, ovvero l'impiego di motori a magneti permanenti.

Come accennato precedentemente, la tecnologia alla base dei sistemi di recupero dell'energia in frenata è largamente diffusa nei veicoli su rotaia di moderna concezione, pertanto gli sforzi dei costruttori sono oggi incentrati sulla massimizzazione dell'utilizzo dell'energia recuperata mediante l'adozione di sistemi di accumulo, quali ad esempio le batterie, che ne consentano l'immagazzinamento e la messa a disposizione nei momenti di successiva richiesta.

### **3.2.3 I sistemi integrati per la produzione di energia elettrica da fonte rinnovabile**

Per quanto concerne l'integrazione dei sistemi di produzione di energia elettrica da fonte rinnovabile con i veicoli su rotaia si hanno dei primi riscontri di tali applicazioni in India, dove, a titolo esemplificativo e non esaustivo, sono stati installati dei pannelli fotovoltaici sulle carrozze di treni diesel per fornire parte dell'energia elettrica necessaria per l'alimentazione dei servizi ausiliari (es. climatizzazione, illuminazione, etc.). Sebbene si tratti solo di soluzioni prototipali o applicazioni su piccola scala è sicuramente crescente l'interesse verso il tema di riduzione dei consumi di energia primaria da fonte fossile dei veicoli su rotaia mediante l'impiego di sistemi integrati di produzione di energia elettrica da fonte rinnovabile [21].

### **3.2.4 I sistemi di guida efficiente**

In tema di guida efficiente, la maggior parte dei sistemi oggi diffusi in campo ferroviario fanno riferimento alla tecnologia *S-DAS (Stand-alone Driver Advisory System)*, ovvero sia un sistema a bordo del veicolo che "suggerisce" al macchinista le operazioni da effettuare per una guida a ridotto consumo energetico sulla base delle condizioni del tracciato e degli orari delle fermate. Iniziano però a diffondersi in campo ferroviario i primi *C-DAS (Connected-Driver Advisory System)* [22], i quali si basano sull'interazione tra il *TMS (Traffic Management System)* e il *DAS*, al fine di suggerire una serie di azioni volte ad uno stile di guida efficiente sulla base dell'acquisizione di dati in tempo reale che derivano dal sistema di controllo del traffico dei veicoli presenti sulle linee. Nel trasporto metropolitano sono stati sviluppati e già implementati sistemi di controllo completamente automatico dei veicoli su rotaia senza presenza di macchinisti o operatori a bordo macchina. Tali sistemi sono classificati come "GoA 4" dall'associazione internazionale dei trasporti pubblici (*UITP-International Association of Public Transport*) [23]. I veicoli su rotaia con controllo automatico della guida sono in grado di ottimizzare le accelerazioni, le decelerazioni e le frenate, riducendo in maniera significativa i consumi energetici rispetto ai medesimi veicoli non dotati di tali sistemi. L'adozione di sistemi di controllo completamente automatico su veicoli su rotaia, come i treni, che percorrono lunghe distanze in tracciati aperti non è realizzabile con le attuali infrastrutture e tecnologie, in quanto non può essere esclusa la presenza di ostacoli accidentali lungo il percorso. Tuttavia, la ricerca tecnologica in tale ambito è in continua evoluzione, pertanto non si escludono ulteriori passi in avanti nel prossimo futuro [24].

### 3.3 Trasporto marittimo

Secondo la classificazione dell'*International Maritime Organization (IMO)* i mezzi di trasporto marittimo che effettuano un servizio di trasporto "*transport work*" [25] vengono suddivisi in:

- Ships: dry cargo carriers, tankers, gas tankers, containerships, ro-ro cargo ships, general cargo ships, navi passeggeri incluse le ro-ro;
- Cargo: includendo a titolo esemplificativo: all gas, liquid and solid bulk cargo, general cargo, containerized cargo, break bulk, heavy lifts, frozen and chilled goods, timber and forest products, cargo carried on freight vehicles, cars and freight vehicles on ro-ro ferries and passengers, etc.

In maniera più generale i natanti vengono abitualmente ordinati in base alla loro stazza, espressa spesso in tonnellate (*dead weight tonnage - DWT* o *gross tonnage - GT*) o in unità di volume trasportabile (*twenty-foot equivalent unit - TEU*), e classificati sulla base di tre criteri principali:

- tipo di propulsione (a remi, a vela, a motore);
- tipo di servizio svolto (da pesca, militari, da diporto, mercantili, navi speciali, navi scuola, etc.);
- tipo di navigazione effettuata (nelle acque interne, fluviale, costiera, litoranea nazionale, mediterranea, oceanica).

Lo sviluppo continuo dell'industria navale, con particolare riguardo alle navi da crociera e al loro business in costante crescita, ha portato alla ricerca di nuove soluzioni di efficienza energetica, da applicare sia nel design delle nuove imbarcazioni sia nel retrofit di quelle esistenti, al fine di contenere i consumi e l'impatto ambientale.

Le misure di efficienza energetica, che possono essere adottate per i mezzi di trasporto navale, sono molteplici e riguardano i seguenti principali campi d'azione:

- la fluidodinamica;
- i materiali;
- i sistemi di propulsione;
- i sistemi integrati per la produzione di energia elettrica da fonte rinnovabile;
- i sistemi di gestione e controllo.

#### 3.3.1 La fluidodinamica e i materiali

L'attenzione alla fluidodinamica di un'imbarcazione, intesa come l'ottimizzazione delle superfici a contatto con i fluidi con i quali interagisce (acqua e aria), costituisce un aspetto di fondamentale importanza ai fini dell'efficientamento energetico. Gli interventi di efficienza che è possibile realizzare sono difatti legati alla riduzione dell'attrito fluidodinamico, alla riduzione della resistenza e all'efficientamento delle superfici dei propulsori. In particolare, alcuni tra i più comuni interventi di efficienza energetica, applicabili sia allo scafo che ai sistemi di propulsione (es. eliche, timone), sono:

- l'ottimizzazione della forma e/o aggiunta di appendici;
- interventi sulle superfici.

In fase di progettazione la forma di una nave viene determinata in base al tipo di nave ed ai carichi trasportati, lasciando tuttavia un certo grado libertà nella definizione di alcuni miglioramenti mirati ad una maggiore stabilità dell'imbarcazione o ad una riduzione della resistenza fluidodinamica. La sezione dello scafo che maggiormente influisce sui consumi di una nave è la prua, per questa ragione oggi molte imbarcazioni di grande taglia hanno optato per l'aggiunta di un bulbo. Tale appendice è in grado di rompere l'onda di prua migliorando il flusso idrodinamico sullo scafo e generando dei risparmi energetici, nell'intorno del 10% [26]. La modifica del bulbo, da realizzarsi durante le operazioni di messa a secco della nave, può generare notevoli vantaggi anche nel caso di retrofit.

Altre variabili caratteristiche della forma di una nave, quali ad esempio la linea d'acqua, il pescaggio, la *streamline*, la disposizione dell'albero motore (*shaftline*), la forma dello *skeg*, il bordo d'uscita della poppa (*trailing line*), possono influenzare considerevolmente la resistenza fluidodinamica e quindi i consumi energetici dell'imbarcazione. Allo stesso modo l'aggiunta di appendici o deviatori del flusso costituiscono

valide ed innovative opzioni per la riduzione dei consumi. Tra le soluzioni proposte da alcuni produttori vi sono per esempio l'adozione di una poppa piatta (*ducktail*), di sistemi di propulsione laterali (*wing thruster*) o l'installazione di piani intercettori sullo specchio di poppa (*interceptor trim planes* o *trim trim wedges*) con la funzione di deviare il flusso aumentando la pressione nella parte posteriore delle eliche [27].

Un ulteriore efficace sistema per la riduzione dell'attrito fluidodinamico sulla carena dell'imbarcazione è rappresentato dalla lubrificazione per mezzo di aria compressa. Questa tecnica consiste nella generazione di uno strato di bolle d'aria che, frapponendosi tra lo scafo e il flusso acqueo, ne riduce la resistenza fluidodinamica generando considerevoli risparmi di carburante, specialmente per petroliere e navi cargo [28].

A seconda della classe e dell'utilizzo dell'imbarcazione è usuale che gli armatori tirino a secco le proprie navi per eseguire le operazioni di ordinaria manutenzione. Durante questa fase di forzata inattività vengono generalmente eseguiti trattamenti superficiali sulle carene mirati ad eliminare le incrostazioni di organismi marini, a prevenirne la rigenerazione (per esempio per mezzo di vernici anti-vegetative) e a diminuire la rugosità dello scafo. Queste attività sono in grado di portare ad un risparmio dei consumi<sup>7</sup> fino ad un 9% [29], [30].

Per limitare ulteriormente la resistenza incontrata in acqua nello spostamento è possibile ridurre il peso della nave utilizzando materiali più leggeri e ad alta resistenza, come ad esempio materiali compositi o acciai ad alta resistenza [27]. A causa dei loro costi elevati, tuttavia, il loro impiego è solitamente limitato alle piccole imbarcazioni ad alta velocità (es. barche da regata).

### 3.3.2 I sistemi di propulsione

Come mostrato dai dati riportati in

Tipologia di alimentazione	Trasporti su strada	Aviazione internazionale	Aviazione interna	Navigazione interna	Trasporti ferroviari	Condotte	Altro	Totale	Totale
<b>Prodotti petroliferi</b>	<b>30.893</b>	<b>3.969</b>	<b>907</b>	<b>602</b>	<b>44</b>			<b>36.414</b>	<b>91,4%</b>
<b>Gas</b>	<b>960</b>					<b>187</b>		<b>1.147</b>	<b>2,9%</b>
<b>Biocarburanti</b>	<b>1.276</b>							<b>1.276</b>	<b>3,2%</b>
<b>Elettricità</b>	<b>12</b>				<b>477</b>	<b>25</b>	<b>478</b>	<b>992</b>	<b>2,5%</b>
<i>da fonti rinnovabili</i>	4				167	9	167	347	0,9%
<i>da fonti non rinnovabili</i>	8				310	16	311	645	1,6%
<b>Totale</b>	<b>33.141</b>	<b>3.969</b>	<b>907</b>	<b>602</b>	<b>521</b>	<b>212</b>	<b>478</b>	<b>39.829</b>	<b>100,0%</b>

Tabella 3, i consumi energetici legati al trasporto marittimo sono quasi esclusivamente attribuibili all'utilizzo di prodotti petroliferi. Ad oggi, infatti, il motore a combustione interna risulta ancora il sistema di generazione dominante per quanto riguarda i mezzi di trasporto marittimo.

I combustibili più utilizzati possono essere distinti in due categorie, che si differenziano per le diverse temperature di distillazione del petrolio: olio combustibile pesante (HFO) e diesel marino (MDO). Le navi da crociera di recente costruzione fanno sempre più spesso affidamento all'iniezione *common rail* per i loro motori diesel, che consente un migliore controllo della combustione e una riduzione delle emissioni di NOx [27].

Anche le emissioni di zolfo rappresentano una problematica non trascurabile nell'utilizzo dei combustibili tradizionali, al punto che l'IMO ha imposto limiti molto stringenti sul tenore di zolfo consentito per i combustibili a bordo delle navi.

In tale contesto, un'interessante soluzione alternativa è rappresentata dal Gas Naturale Liquido (GNL). Infatti, molte compagnie di navigazione, sia in Italia sia all'estero, si stanno muovendo in questa direzione,

<sup>7</sup> Si rappresenta che, tale risparmio non rientra nei risparmi energetici addizionali del mezzo, in quanto gli interventi di manutenzione mirano unicamente al ripristino delle normali condizioni di operatività dello stesso.

adeguando le loro flotte all'utilizzo di un combustibile che, seppur di natura fossile, risulta più sostenibile, oltre che più economico del diesel a basso contenuto di zolfo.

Recentemente, sono in fase di sviluppo nel settore navale sistemi di propulsione elettrica o ibrida, che consentono numerosi vantaggi in termini di ottimizzazione dei consumi, riduzione delle emissioni di inquinanti, di emissioni acustiche e miglioramento della flessibilità. In particolare, la propulsione ibrida prevede la presenza di un motore principale a combustione interna e una sorgente elettrica (motore o batterie), opportunamente combinati utilizzando in modo proficuo ciascuna macchina nei diversi assetti operativi più congeniali. La natura modulare del motore ibrido, inoltre, si rivela particolarmente vantaggiosa in ambito navale, dove gli spazi sono solitamente limitati, consentendo anche una maggiore facilità di adeguamento della propulsione per far fronte ad eventuali mutate esigenze [31]. Gli elevati costi e le maggiori complessità di installazione, accompagnati dalla contenuta capacità dei sistemi di stoccaggio dell'energia attualmente disponibili, fanno sì che la diffusione di tali sistemi sia ancora limitata a pochi ambiti di applicazione.

### 3.3.3 I sistemi integrati per la produzione di energia elettrica da fonte rinnovabile e i sistemi di gestione e controllo

L'installazione di sistemi di propulsione/alimentazione alternativa per l'efficientamento di mezzi di trasporto navale alimentati a combustibili fossili, ovvero sia l'integrazione dei sistemi di propulsione con le fonti rinnovabili, può portare benefici sia in termini di riduzione dei consumi sia in termini ambientali. Un'opzione innovativa è costituita dall'installazione di sistemi di sfruttamento del vento [26], che possono configurarsi come sistemi di propulsione ausiliaria: le soluzioni tecnologiche più diffuse prevedono l'installazione di vele tradizionali, vele ad ala rigida, rotor *Flettner* e *kite*. Le vele ad ala rigida offrono una maggiore spinta rispetto alle vele tradizionali, mentre i rotor *Flettner* utilizzano l'effetto Magnus per produrre spinta dai venti laterali attraverso dei cilindri rotanti installati sul ponte dell'imbarcazione. Tali tecnologie trovano applicazione principalmente nelle navi cargo e, sebbene collaudate dal punto di vista tecnico, sono considerate ancora sperimentali e, a causa degli elevati costi di installazione, risultano attualmente poco diffuse. Tali sistemi di sfruttamento del vento possono essere integrati con software di navigazione a bordo che consentono di individuare la rotta migliore analizzando i dati meteorologici, garantendo quindi il massimo risparmio ottenibile. Alcune tecnologie molto innovative sono in grado di sfruttare contemporaneamente l'energia del vento e del sole riducendo le emissioni: si tratta delle vele fotovoltaiche [32], una tecnologia che può essere installata su ogni tipo di nave. Tale vela rigida è posizionata su un albero telescopico realizzato in acciaio ad alta resistenza o fibra di carbonio, e viene orientata da un apposito software che ne ottimizza la posizione sia in termini di sfruttamento della spinta del vento che di captazione dei raggi solari. L'energia prodotta viene utilizzata principalmente per sopperire al fabbisogno degli ausiliari.

Altre tipologie di software che migliorano ulteriormente l'efficienza energetica della nave sono gli *Energy Management System* e in generale i sistemi di automazione e monitoraggio che, analizzando le performance della nave o della flotta, consentono di programmare la manutenzione in modo da ottenere il più possibile prestazioni ottimali del mezzo marittimo [27].

## 3.4 Trasporto aereo

Il trasporto aereo è una delle fonti di emissione di gas serra con maggiore tasso di crescita al livello globale: le proiezioni di anidride carbonica (CO<sub>2</sub>) prodotta dal settore dell'aviazione al 2050, infatti, si attesteranno oltre il 300% rispetto ai valori attuali. Ciò malgrado, al 2016 l'industria aeronautica non ha chiari obiettivi di efficienza energetica definiti dall'*International Civil Aviation Organization (ICAO)* per la costruzioni di nuovi aeromobili da qui al 2030 [33].

A seconda delle funzioni o delle caratteristiche che si vogliono mettere in risalto nello specifico contesto operativo, gli aeromobili possono essere classificati secondo diversi criteri.

Tra le tipologie di classificazione degli aeromobili vi sono:

- giuridica (aeromobili di stato, militari, aeromobili privati, etc.);
- tecnica:

- aerostato (dirigibile, pallone);
- aerodina:
  - a velatura fissa (aeroplano, etc.);
  - a velatura mobile (elicottero, etc.);
- secondo l'impiego:
  - aeromobili da trasporto pubblico per il trasporto di persone e/o cose;
  - aeromobili da lavoro aereo non adibiti al trasporto di persone e/o cose;
  - aeromobili da turismo (aeroplani scuola, velivoli acrobatici, etc.) [34].

Altre possibili classificazioni distinguono il tipo di volo percorso dal velivolo a seconda dei confini nei quali si muove lo stesso o a seconda delle distanze percorse. Pertanto, è possibile classificare i voli come:

- intercontinentali, internazionali, nazionali;
- corta corsa (CC), media corsa (MC) e lunga corsa (LC). [35]

I principali ambiti all'interno dei quali possono essere applicate misure finalizzate all'efficienza energetica sono:

- l'aerodinamica;
- i materiali;
- i sistemi di propulsione;
- i sistemi di gestione e controllo.

### 3.4.1 L'aerodinamica

Da sempre, nel campo dell'aviazione, la riduzione della resistenza aerodinamica rappresenta un obiettivo di primaria importanza per la progettazione di qualsiasi classe di velivolo. Oggigiorno, elevati potenziali di miglioramento vengono offerti dal controllo del fluido laminare attraverso l'aspirazione dello strato limite [36] al fine di sostituire i flussi turbolenti a contatto con le superfici dell'aeromobile con flussi laminari. La ricerca si è concentrata fondamentalmente sulla parziale "laminarizzazione", sviluppando tecnologie e applicazioni *NLF* (*Natural Laminar Flow*) o *HLFC* (*Hybrid Laminar Flow Control*) sulle superfici del velivolo. I risultati ottenuti dall'investigazione scientifica sulla parziale o completa laminarizzazione di ali, fusoliere e impennaggi sono molto promettenti e rappresentano l'avanguardia del settore. Un'altra tecnologia mirata ad ottenere un flusso laminare sulla superficie del velivolo fu ideata dalla NASA a fine secolo scorso [37] ed è attualmente oggetto di re-investigazione: si tratta di sottili strati adesivi caratterizzati da micro-scanalature (*riblets*), da applicare alle superfici esterne di fusoliere o ali al fine di ridurre la resistenza aerodinamica. I risultati ottenibili possono portare ad un risparmio fino all'1,6%-2% del carburante [38], [33] nonostante tale soluzione sia fortemente sensibile al deterioramento e all'usura generata dalle condizioni esterne. La semplicità di questi *riblets* consente anche applicazioni di retrofit su aeromobili esistenti, tuttavia il loro impatto sui consumi è più contenuto rispetto alle tecnologie *NLF* e *HLFC*.

Più in generale sono diverse le soluzioni progettuali o tecnologiche che è possibile mettere in pratica per migliorare l'aerodinamica di un aeromobile, quali ad esempio l'aumento dell'apertura alare, l'impiego di strutture a morfologia variabile, la variazione del camber alare, fino ad arrivare al concetto più innovativo e avveniristico della *Smart Wing*, una tecnologia che consente di ottimizzare la morfologia del profilo alare grazie ad un approccio multidisciplinare in tema di materiali e sistemi di controllo attivo e passivo del fluido [39]. Un'ulteriore possibilità di miglioramento della resistenza indotta generata dai vortici d'estremità, già fortemente collaudata fin dagli anni '80, consiste nell'impiego di alette d'estremità o *Winglet*. Nei più recenti aeromobili destinati a tratte di lunga percorrenza, l'introduzione di grandi *Winglet*, definite dalla compagnia aerea *Sharklet*, è stata in grado di generare risparmi di combustibile superiori al 3% [40]. Sono invece oggi oggetto di ricerca radicali rivisitazioni del design dell'ala basati su una struttura più estesa, sottile e leggera, a tal punto da richiedere l'aggiunta di travature di supporto fissate sul lato della fusoliera. I primi esperimenti in galleria del vento condotti dalla NASA, affiancata da costruttori all'avanguardia, hanno mostrato risultati sorprendenti, con risparmi di carburante fino al 50% rispetto alla tecnologia corrente [41].



### 3.4.2 I materiali

Come per altre modalità di trasporto, il peso del mezzo gioca un ruolo importante nella definizione dei consumi. Pertanto, per limitare ulteriormente il consumo di combustibile, è possibile adottare strategie che consentono di ridurre il peso dell'aereo, utilizzando ad esempio materiali o componenti più leggeri. Per quanto riguarda i materiali, la soluzione più promettente è rappresentata dai materiali compositi, ovvero quei materiali caratterizzati dall'unione di due o più elementi di differenti caratteristiche chimico-fisiche. Tali materiali possono essere considerati come composti da una fase fibrosa, detta rinforzo, che ha il compito di resistere alle sollecitazioni, e una fase omogenea, detta matrice, che ha il compito di trasferire le sollecitazioni alle fibre stesse. L'unione di queste fasi dà come risultato un materiale in grado di garantire proprietà meccaniche elevatissime a fronte di una massa volumica molto bassa. In campo aeronautico e aerospaziale, questi materiali sono utilizzati principalmente per la costruzione di strutture e parti mobili dell'ala. Infatti, la struttura del velivolo costituisce circa il 50% del peso totale, per cui appare evidente come l'utilizzo di materiali leggeri come leghe di alluminio, di titanio o materiali compositi costituisca una soluzione promettente. Un'altra possibilità percorribile consiste nell'adozione di tecniche avanzate di assemblaggio. Tecnologie di assemblaggio come il laser, ad esempio, permettono di non dover ricorrere all'utilizzo di rinforzi e rivetti, alleggerendo quindi ulteriormente il peso della struttura. Per quanto riguarda, invece, i sistemi di frenata, sono disponibili freni in carbonio, più leggeri dei diffusi freni in acciaio; sono inoltre disponibili sistemi di frenata elettrici, che risultano più leggeri e semplici da monitorare rispetto a quelli pneumatici o idraulici [40].

Come per le altre modalità di trasporto, la limitata diffusione dei materiali compositi è principalmente legata ai costi elevati.

### 3.4.3 I sistemi di propulsione e i sistemi di gestione e controllo

Il sistema di propulsione del velivolo incide in maniera importante sui consumi energetici dello stesso. Pertanto, a parità di altre condizioni al contorno, l'incremento dell'efficienza dei propulsori comporta una significativa riduzione dei consumi dei consumi energetici del velivolo.

Diversi studi dimostrano come vi sia un cospicuo margine di miglioramento dell'efficienza globale delle turbine a gas utilizzate per la propulsione dei velivoli, con un potenziale che arriva al 30% di incremento dell'efficienza rispetto ai sistemi di propulsione attualmente in servizio. Tali livelli di efficienza possono essere raggiunti non tanto mediante l'introduzione di una nuova tecnologia, quanto tramite l'ottimizzazione dei componenti utilizzati e della capacità degli stessi di lavorare ad elevate temperature [42]. Naturalmente, l'efficienza del sistema propulsivo non è legata solamente al motore o alla turbina del velivolo, ma dipende anche dalla configurazione del velivolo e all'integrazione in esso del sistema propulsivo.

Per quanto concerne i sistemi di propulsione che adottano turbine a gas, i limiti di incremento dell'efficienza termodinamica sono legati ai vincoli di temperatura e pressione di lavoro ai quali si trovano ad operare tali sistemi, nonché alla contemporanea esigenza di riduzione del peso, del fabbisogno di raffreddamento e delle perdite di attrito aerodinamico. A tal proposito, sono allo studio l'impiego di materiali ceramici che permetteranno ai componenti di raggiungere temperature di lavoro fino a 1480 °C, consentendo l'eliminazione dei sistemi di raffreddamento in svariate parti del sistema di propulsione. Al contempo, altri studi, prevedono l'impiego di leghe di alluminio a base di nickel, oppure l'utilizzo di rivestimenti per l'incremento della resistenza alle alte temperature.

Nell'ambito di ricerca relativo allo sviluppo di differenti tecnologie di sistemi di propulsione rispetto ai sistemi convenzionali per velivoli commerciali, sono allo studio dei sistemi di propulsione elettrica che consentano la riduzione delle emissioni di CO<sub>2</sub>. Le sfide per l'elettrificazione di questi mezzi sono relative al miglioramento dei parametri di energia specifica (Wh/kg) e potenza specifica (kW/kg), quest'ultimo soprattutto in relazione ai sistemi di accumulo presenti su alcune configurazioni di tali sistemi. A tal proposito si possono suddividere i sistemi di propulsione elettrica in tre principali famiglie: sistemi completamente elettrici, ibridi e turboelettrici. Per il completo sviluppo e la commercializzazione di queste tecnologie si dovranno attendere i prossimi decenni. I reali vantaggi di un sistema di propulsione elettrica rispetto al sistema di propulsione convenzionale dovrà essere verificato rispetto all'efficienza dei componenti che lo costituiscono,

all'efficienza del sistema di distribuzione dell'energia elettrica e meccanica e all'incremento di peso del velivolo dovuto all'eventuale presenza di un sistema di accumulo.

I sistemi di propulsione elettrica che richiedono tempi di sviluppo tecnologico minore sono quelli che utilizzano tecnologia turboelettrica e che prevedono un sistema di propulsione distribuita. Tali sistemi di propulsione saranno in grado di ridurre del 20% il consumo di combustibile rispetto ad un analogo velivolo commerciale costituente lo stato dell'arte [42].

A causa della complessità e della profonda integrazione dei sistemi ed i sottosistemi che compongono un aeromobile, il reale beneficio che può apportare un intervento di efficienza energetica nel settore aeronautico non dipende solamente dai meriti della nuova tecnologia installata ma è legato anche al grado di integrazione di tale tecnologia con gli altri sistemi che compongono lo specifico velivolo. Allo stesso modo, per via di queste intrinseche interazioni, più miglioramenti apportati allo stesso aeromobile non portano necessariamente ad un beneficio globale pari alla somma dei singoli interventi [40]. Da ultimo si rappresenta che circa l'8% dei consumi legati al trasporto aereo sia frutto di rotte inefficienti. Purtroppo, spesso la rotta che rappresenta l'ottimo in termini di consumi non può essere percorsa, perché molti sono i fattori che entrano in gioco nella scelta: sicurezza, traffico aereo, capienza degli aeroporti, condizioni meteorologiche, etc.

### 3.5 Ulteriori interventi di riduzione dei consumi nel settore dei trasporti

Ulteriori interventi di riduzione dei consumi nel settore dei trasporti sono quelli relativi allo shift modale verso sistemi di trasporto più efficienti e caratterizzati quindi da consumi di energia inferiori a parità di servizio reso. Peraltro, la scelta di tali modalità di trasporto coincide spesso con l'utilizzo di veicoli a basse emissioni. In aggiunta a tali interventi è possibile ottenere una riduzione dei consumi energetici nel settore dei trasporti mediante l'adozione di iniziative per la riduzione del fabbisogno di mobilità, come ad esempio l'impiego dello smart working, oppure la riduzione della velocità di mezzi di trasporto a parità di servizio reso. Altri interventi di efficienza energetica riportati in Tabella 1 del D.M. 11 gennaio 2017 e ss.mm.ii., che non riguardano strettamente la modalità di trasporto ma il settore dei trasporti in generale, e non solo, consistono principalmente nell'efficientamento degli impianti ausiliari di mezzi di trasporto alimentati con combustibili fossili (illuminazione, sistemi di pompaggio, impianti di climatizzazione, sistemi di ventilazione, gru, impianti aria compressa, recupero del calore, etc.), pertanto sono da ricondurre alla tipologia di intervento *"Efficientamento energetico di mezzi di trasporto alimentati a combustibili fossili ivi compreso il trasporto navale"* di cui alla Tabella 1, Allegato 2, del D.M. 11 gennaio 2017 e ss.mm.ii.

Le principali voci di consumo afferenti ai servizi generali dei mezzi riguardano essenzialmente l'illuminazione e il condizionamento. Per quanto riguarda i sistemi di illuminazione, l'indirizzo è quello di adottare la tecnologia LED quale sistema più efficace per ridurre i relativi consumi, nonché impiegare sensori di luce diurna per la riduzione del flusso luminoso di tali lampade qualora non sia necessario il loro apporto all'interno del mezzo.

Al fine di ridurre i consumi energetici imputabili al condizionamento, invece, alcune delle soluzioni ad oggi frequentemente adottate consistono ad esempio nel limitare le aree servite dall'impianto di condizionamento, utilizzare sistemi radianti per il riscaldamento degli spazi più grandi, adottare sistemi di rigenerazione che permettano di preriscaldare l'aria in ingresso con l'aria in uscita dal mezzo, migliorare l'efficienza dei sistemi di generazione del freddo, impiegare sistemi di ventilazione naturale. In linea generale, gli sforzi maggiori che si stanno facendo per ridurre i consumi degli ausiliari dei mezzi sono quelli relativi al monitoraggio del reale fabbisogno energetico delle utenze che li caratterizzano, al fine di implementare una serie di azioni che mirano ad ottimizzare l'effetto utile generato da tali sistemi avvicinandolo il più possibile a quella che è la reale richiesta da parte delle utenze [40]. L'utilizzo del *Building Management System (BMS)* consente di ottimizzare e modulare i sistemi precedentemente descritti in base al reale carico occupazionale del mezzo, che può essere monitorato, ad esempio, misurando la percentuale di anidride carbonica presente all'interno dei veicoli.



## 4 INDIVIDUAZIONE DEGLI ALGORITMI PER IL CALCOLO DEI RISPARMI ENERGETICI ADDIZIONALI

Di seguito si riporta sinteticamente la tabella riepilogativa degli interventi di cui alla Tabella 6, con indicazione del parametro di consumo energetico e dell'algoritmo di calcolo dei risparmi da utilizzare tra quelli indicati all'interno della Tabella 9 (si rappresenta che, laddove specificato, alla medesima tipologia di intervento possono corrispondere differenti algoritmi a seconda della tipologia di indicatore di consumo energetico da adottare). Tali aspetti saranno approfonditi nei paragrafi seguenti.

Modalità di trasporto	Intervento	Indicatore di consumo energetico (unità di misura)	ID Algoritmo
Trasporto su strada	Acquisto flotte di mezzi di trasporto passeggeri su strada	tep/(km-passeggero), tep/(km-posto passeggero) *	1, 3*
	Acquisto flotte di veicoli pesanti per il trasporto merci su strada	tep/(km·t)	2
	Sistemi predittivi per l'efficientamento dello stile di guida	tep/(km·t), tep/(km-passeggero), tep/(km-posto passeggero)	1, 2, 3
	Acquisto di carrelli elevatori più efficienti a trazione elettrica per la movimentazione merci	tep/(km·t)	2
Trasporto su rotaia	Acquisto flotte di treni più efficienti per il trasporto ferroviario passeggeri e/o merci nazionale	tep/(km-passeggero), tep/(km·t)	1, 2
	Acquisto flotte di treni per il trasporto passeggeri regionale	tep/(km-posto passeggero)	3
	Acquisto flotte di mezzi su rotaia (tram, metro) per il Trasporto Pubblico Locale (TPL)	tep/(km-posto passeggero)	3
Trasporto marittimo	Acquisto flotte di navi adibite al trasporto persone e/o merci	tep/(km-passeggero), tep/(km·t)	1, 2
	Interventi mirati all'ottimizzazione della fluidodinamica	tep/(km-passeggero), tep/(km·t)	1, 2, **
	Sostituzione gruppo motore	tep/(km-passeggero), tep/(km·t)	1, 2
	Installazione di sistemi di propulsione/alimentazione alternativa per l'efficientamento di mezzi di trasporto navale alimentati a combustibili fossili	tep/(km-passeggero), tep/(km·t)	1, 2
Trasporto aereo	Acquisto flotte di aerei per il trasporto passeggeri e/o merci	tep/(km-passeggero), tep/(km·t)	1, 2
	Sostituzione dei sistemi di propulsione con altri a maggiore efficienza	tep/(km-passeggero), tep/(km·t)	1, 2
	Interventi mirati all'ottimizzazione aerodinamica di aerei	tep/(km-passeggero), tep/(km·t)	1, 2

-	Interventi riconducibili all'adozione di misure comportamentali	-	-
---	---	---	---

**Tabella 8 - Possibili interventi nel settore Trasporti con indicazione dell'indicatore di consumo energetico e dell'algoritmo di calcolo da utilizzare.**

- \* Per progetti di efficienza energetica riconducibili alle tipologie di intervento "Acquisto flotte di veicoli ibridi" e "Acquisto flotte di veicoli elettrici" di cui alla Tabella 1, dell'Allegato 2 al D.M. 10 maggio 2018, presentati come PS, dovranno essere utilizzati gli indicatori di consumo e l'algoritmo specificati nelle rispettive schede di Progetto Standardizzato.
- \*\* Per progetti di efficienza energetica riconducibili alla tipologia di intervento "Sistema propulsivo delle navi" di cui alla Tabella 1, dell'Allegato 2 al D.M. 10 maggio 2018 e presentati come PS, dovrà essere utilizzato l'algoritmo specificato nella scheda del Progetto Standardizzato.

Nel paragrafo seguente sono riportati gli algoritmi che dovranno essere adottati per i diversi interventi. Si precisa che, nel caso di interventi differenti da quelli inseriti in Tabella 8, oppure nei casi in cui non sono espressamente indicati i riferimenti degli indicatori di consumo energetico e delle formule da adottare, dovrà essere il soggetto proponente a proporli sulla base dello specifico intervento per il quale si richiede l'accesso al meccanismo dei Certificati Bianchi.

#### 4.1 Algoritmi di calcolo del risparmio energetico addizionale

N.	Algoritmo
1	$REA = (Cs_{baseline} - Cs_{ex\ post}) \cdot km_{post} \cdot passeggeri_{post}$
2	$REA = (Cs_{baseline} - Cs_{ex\ post}) \cdot km_{post} \cdot t_{post}$
3	$REA = (Cs_{baseline} - Cs_{ex\ post}) \cdot km_{post} \cdot p_{ex\ post}$

**Tabella 9 - Algoritmi di calcolo dei risparmi per il settore trasporti**

dove:

- $REA$  è il Risparmio Energetico Addizionale, espresso in tep;
- $Cs_{baseline}$  e  $Cs_{post}$ <sup>8</sup> sono i consumi specifici nella situazione di baseline e post intervento, definiti rispettivamente come:
  - algoritmo n. 1: il rapporto tra il consumo di energia primaria e il prodotto tra i chilometri percorsi e il numero di passeggeri effettivamente trasportati, espresso in [tep/km·passeggero];
  - algoritmo n. 2: il rapporto tra il consumo di energia primaria e il prodotto tra i chilometri percorsi e le tonnellate di merce effettivamente trasportata, espresso in [tep/km·t];
  - algoritmo n. 3: il rapporto tra il consumo di energia primaria e il prodotto tra i chilometri percorsi e il numero massimo di posti passeggeri trasportabili (in piedi e seduti), espresso in [tep/km·posto passeggero];
- $passeggeri_{post}$  è il numero di passeggeri effettivamente trasportato nella situazione post intervento;
- $t_{post}$  tonnellate di merce effettivamente trasportate nella situazione post intervento;
- $p_{ex\ post}$  è il numero massimo di posti passeggeri trasportabili (in piedi e seduti).

<sup>8</sup> Il consumo specifico deve essere espresso in termini di energia primaria utilizzando, nel caso di consumo di energia elettrica, il fattore di conversione 0,187 tep/MWh. Nel caso di mezzi di trazione che utilizzano combustibili fossili si dovranno utilizzare degli opportuni coefficienti di conversione del consumo finale in consumo di energia primaria da valutare a seconda della specifica tipologia di combustibile utilizzato.

Il programma di misura dovrà prevedere il monitoraggio nella situazione post intervento, e nel caso di sostituzione o efficientamento anche nella situazione ante intervento, di tutti i vettori energetici coinvolti e delle variabili operative che influiscono sui consumi (ad es. tipo di tratta, velocità, etc.), al fine di normalizzare i consumi specifici rispetto alle condizioni esterne che li influenzano.

## 4.2 Determinazione del consumo specifico di baseline e delle variabili operative

Per la determinazione del consumo specifico di baseline di un qualsiasi mezzo di trasporto è necessario innanzitutto distinguere i casi di acquisto di uno o più veicoli (flotta) dai casi di efficientamento o sostituzione di uno o più veicoli (flotta) esistenti. Nel primo caso, in base a quanto previsto dall'art. 2, comma 1, lettera c) del D.M. 11 gennaio 2017 e ss.mm.ii., il consumo di baseline è pari *“al consumo antecedente alla realizzazione del progetto di efficienza energetica”*, negli altri casi invece il consumo di baseline è pari *“al consumo di riferimento”*.

Per determinare il consumo di riferimento di un mezzo di trasporto occorre identificare, per la specifica tipologia d'intervento, quali siano i sistemi e le tecnologie che costituiscono lo standard di mercato in termini tecnologici e normativi, mediante un'analisi di mercato, studi di letteratura e/o altra documentazione tecnica che consenta di verificare quale sia il progetto di riferimento. A titolo esemplificativo e non esaustivo, nel caso di acquisto di flotte di veicoli nell'ambito di appalti pubblici, il consumo di riferimento dovrà essere individuato tenendo conto dei requisiti minimi previsti dal Decreto Legislativo n. 187/2021. Il consumo di riferimento può essere quindi determinato a partire dall'utilizzo della Tabella 10, oppure, per i casi in essa non presenti, a partire dall'utilizzo di dati sperimentali (ad esempio flotte di mezzi di trasporto esistenti rappresentative dello standard di mercato in termini tecnologici e normativi), ovvero utilizzando dati ottenuti da simulazioni numeriche di cui sia possibile verificare il progetto di riferimento scelto, il modello di calcolo e le condizioni al contorno utilizzate (es. valori e variabili operative utilizzate). Si rappresenta che l'utilizzo delle simulazioni numeriche per determinare il consumo di riferimento è ammissibile purché si dimostri la rappresentatività del modello utilizzato rispetto al comportamento reale del mezzo, ovvero sia possibile dimostrare l'adozione di ipotesi e assunzioni conservative dal punto di vista della determinazione dei consumi energetici del sistema di riferimento, ad esempio l'esclusione del consumo di energia dei carichi ausiliari dal consumo del mezzo di trasporto e delle variabili operative.

Di seguito si riporta una tabella riepilogativa dei consumi di riferimento afferenti ad alcune casistiche e modalità di trasporto.

Modalità di trasporto	Mezzo di trasporto	Consumo di riferimento	Fonte
Trasporto su strada – Merci	Tutti i nuovi mezzi immatricolati	VEDI REGOLAMENTO (UE) 2017/2400 (Software - Vecto)*	REGOLAMENTO (UE) 2017/2400 (Software - Vecto)
Trasporto su rotaia – Passeggeri	Treni regionali a media capacità e alta capacità	0,016 kWh/(km·posto passeggero)**	database GSE
	Treni nazionali	0,034*** kWh/(km·passeggero)	database GSE
	Treni nazionali ad alta velocità	0,030*** kWh/(km·passeggero)	database GSE

**Tabella 10 - Consumi specifici di riferimento**

\* Si specifica che l'utilizzo del Software Vecto è consigliato, ma è possibile proporre riferimenti alternativi;

\*\* Il consumo specifico indicato per i treni regionali si riferisce ai soli treni a trazione elettrica.

\*\*\* In via cautelativa, qualora il consumo specifico di riferimento, le relative condizioni di esercizio e servizio reso siano di difficile determinazione o comunque non accettabili, dovrà essere utilizzato il valore di riferimento riportato in tabella.

Nel caso di sostituzione o efficientamento, la determinazione del consumo ante intervento di un mezzo di trasporto deve essere effettuata attraverso una campagna di misura, sia delle variabili operative, sia dei vettori energetici, in linea con quanto stabilito dal punto 1.3, dell'Allegato 1 del D.M. 11 gennaio 2017 e ss.mm.ii. Si rappresenta che, soprattutto nel caso del settore trasporti dove le variabili operative sono molteplici, soltanto l'adozione di un periodo di monitoraggio sufficientemente esteso e di una frequenza di campionamento (almeno giornaliera) coerente con le fluttuazioni delle grandezze rilevate, può consentire di ottenere dei risultati significativi dal punto di vista statistico, nonché rappresentativi dei consumi reali del mezzo di trasporto.

Qualora il consumo di baseline sia stato determinato in differenti condizioni operative rispetto alla situazione post intervento, si dovrà fornire un'opportuna descrizione della metodologia e dell'eventuale fattore di correzione o funzione di regressione che si intende adottare per riportare il consumo di baseline alle condizioni post intervento, ovvero le ipotesi conservative effettuate per la determinazione del consumo di baseline rispetto ai possibili valori che le variabili operative possono assumere nella situazione post intervento. Ad esempio, per tenere conto delle differenti condizioni di esercizio che si possono avere in base alla tratta percorsa, è opportuno definire un consumo di baseline per ciascun percorso. Inoltre, al fine di tener conto degli effetti sui consumi energetici legati alla possibile variazione delle condizioni di carico del mezzo di trasporto, tra la situazione di baseline e la situazione post intervento, è necessario adottare un fattore correzione "*fattore di carico*", o una funzione di regressione, che sia in grado di normalizzare il consumo di baseline rispetto al numero di passeggeri e/o alle tonnellate di merce trasportate nella situazione post intervento.

Nei paragrafi seguenti verranno approfondite, a titolo esemplificativo, alcune delle variabili caratteristiche delle diverse modalità di trasporto.

#### 4.2.1 Trasporto su strada

Nel caso del trasporto su strada le variabili operative da monitorare, al fine di consentire una normalizzazione del consumo di baseline rispetto alla situazione post intervento, sono:

- tipologia e lunghezza della tratta (chilometri percorsi dal veicolo, tipologia di percorso urbano/misto/extraurbano, numero di fermate, velocità media e velocità massima di percorrenza, etc.);
- numero di persone trasportate o tonnellate di merce trasportata;
- stile di guida dell'autista;
- tipologia di combustibile utilizzata dal singolo automezzo (nel caso di autoveicoli bi-fuel).

Per quanto riguarda il caso specifico dei carrelli elevatori le variabili operative da monitorare, al fine di consentire una normalizzazione del consumo di baseline rispetto alla situazione post intervento, sono:

- lunghezza dello spostamento (chilometri percorsi dal carrello);
- caratteristiche intralogistiche (tipologia e modalità di gestione del magazzino, tipologia di percorso, altezze di sollevamento, etc.);
- tonnellate di merce trasportata.

Per i progetti che prevedono la nuova installazione di carrelli elevatori, il consumo di riferimento può essere definito a partire dall'indice di consumo, stabilito secondo la norma VDI 2198, fermo restando che per la caratterizzazione dei sistemi e tecnologie che costituiscono lo standard di mercato in termini tecnologici e normativi, deve essere condotta un'analisi di mercato, ovvero studi di letteratura e/o altra documentazione tecnica che consenta di verificare il consumo di riferimento.

Il ciclo VDI2198 è un modello che consente di confrontare le prestazioni di funzionamento di diversi carrelli elevatori, appartenenti alla stessa tipologia, nelle stesse condizioni operative, secondo le modalità specificate all'interno della norma stessa.

L'indice di consumo, secondo il ciclo stabilito dalla norma VDI 2198, è generalmente riportato all'interno della scheda tecnica del carrello elevatore ed è espresso in funzione del tipo di alimentazione, l/h se diesel, kg/h se GPL, kWh/h se elettrico. Questo valore rappresenta il consumo di un carrello elevatore che ha eseguito un

“ciclo test di lavoro”, moderando attentamente la velocità in modo da completare  $n$  cicli di test in un’ora (per il numero di cicli del test si faccia riferimento alla Tabella 3 della norma VDI 2198).

Al fine di poter utilizzare all’interno dell’algoritmo di calcolo dei risparmi n. 2 (Tabella 9) il consumo di riferimento espresso secondo le unità di misura stabilite dalla norma VDI 2198, è necessario convertire tale grandezza in  $\text{tep}/(\text{t}\cdot\text{km})$  utilizzando i valori di:

- portata nominale da scheda tecnica;
- km percorsi nel ciclo test dal carrello come previsto dalla Tabella 3 della norma VDI 2198.

Ad esempio, si supponga di aver determinato un consumo di riferimento  $CS_{rif}$ , espresso in  $\text{l/h}$  o  $\text{kWh/h}$ , per una specifica tipologia di carrello elevatore. Al fine di convertire tale consumo di riferimento in  $\text{tep}/(\text{t}\cdot\text{km})$  sarà necessario:

1. dividere il  $CS_{rif}$  per il numero di cicli su ora previsti dal test;
2. dividere il valore ottenuto per le tonnellate nominali trasportabili dal mezzo e per la distanza percorsa dallo stesso nel singolo ciclo di test, ovverosia due volte la distanza “ $L$ ” espressa all’interno della Tabella 3 della suddetta norma;
3. riportare in  $\text{tep}$  il valore ottenuto utilizzando l’opportuno fattore di conversione a seconda della tipologia di alimentazione del mezzo.

Per i progetti di sostituzione di carrelli elevatori dovrà essere predisposto un programma di misura adeguato che consenta di determinare il consumo ante intervento in  $\text{tep}/(\text{t}\cdot\text{km})$  tenendo conto degli effettivi consumi dei mezzi e delle variabili operative sopra riportate.

#### 4.2.2 Trasporto su rotaia

Nel caso di trasporto su rotaia il programma di misura della situazione di baseline, nonché per analogia quello della situazione post intervento, deve tener conto di tutte le variabili operative che influenzano i consumi energetici, al fine di consentire una normalizzazione del consumo di baseline rispetto alla situazione post intervento. Le principali variabili operative che influenzano i consumi energetici sono:

- tipologia e lunghezza della tratta di percorrenza (chilometri percorsi, numero di fermate, presenza di gallerie, pendenze, velocità media e velocità massima di percorrenza, numero di curve e raggio di curvatura, ...);
- numero di persone trasportate o tonnellate di merce trasportata;
- stile di guida del macchinista (soprattutto nei veicoli a guida manuale e a guida semi automatica).

#### 4.2.3 Trasporto marittimo

Nel caso del trasporto marittimo il programma di misura, oltre ai consumi di combustibile post intervento, dovrà prevedere la misura delle distanze effettive percorse dalle imbarcazioni (chilometri percorsi) e del carico trasportato (in termini di passeggeri imbarcati, merci imbarcate). In tale ambito le variabili operative di cui si deve tener conto, sia in fase di definizione della baseline sia in fase post intervento, sono:

- rotta percorsa (peculiarità della tratta in termini ad esempio di correnti, venti dominanti, etc.);
- velocità di crociera;
- stile di guida;
- condizioni meteo marine (condizioni atmosferiche, condizioni del mare, intensità del vento, etc.);
- condizioni manutentive di scafo ed eliche (vedi §3.3);
- numero di persone trasportate o tonnellate di merce trasportata;
- tipologia di combustibile.

Il monitoraggio dei consumi dovrà essere eseguito durante le sole fasi di navigazione, escludendo pertanto le manovre di attracco e di partenza e i periodi di ancoraggio.

#### 4.2.4 Trasporto Aereo

Le variabili operative da dover considerare nel trasporto aereo sono le seguenti:

- numero di persone trasportate o tonnellate di merce trasportata;
- rotta percorsa (peculiarità della tratta in termini ad esempio di agenti atmosferici, di altezza di volo, di velocità media, di tempi di attesa precedenti alla fase di atterraggio, etc.);
- stile di guida;
- distanza percorsa;
- velocità di crociera;
- altezza di volo;
- condizioni atmosferiche;
- tipologia di combustibile.

A seconda che l'intervento preveda la nuova installazione o la sostituzione del componente, si dovranno considerare i risparmi addizionali rispetto alla soluzione di riferimento o alla situazione ante intervento.

## **5 METODOLOGIA ADOTTATA PER LA PRESENTE GUIDA**

La presente guida vuole fornire le metodologie di calcolo dei risparmi di energia primaria relativi agli interventi previsti dal D.M. 11 gennaio 2017 e ss.mm.ii., nonché i valori di consumo di riferimento nel caso l'intervento di efficienza energetica riguardi la nuova installazione di un componente.

I valori di consumo di riferimento inseriti all'interno della Tabella 10 riguardano unicamente alcune specifiche tipologie di mezzi di trasporto, pertanto per tutti gli altri mezzi di trasporto si demanda al soggetto proponente l'individuazione del valore del consumo di riferimento, seguendo le indicazioni contenute all'interno del paragrafo 4.2 della presente guida.

Nello specifico, la determinazione dei valori di consumo di riferimento riportati all'interno della Tabella 10 è stata effettuata tramite l'utilizzo dei dati di consumo di baseline e post intervento provenienti dal database del GSE, per quanto riguarda i casi di trasporto su rotaia limitatamente ai mezzi di trasporto indicati all'interno della Tabella 10.

La Tabella 10 contiene, inoltre, il riferimento da utilizzare per determinare il consumo di riferimento di alcune specifiche tipologie di mezzi per il trasporto merci, ovvero il Regolamento (UE) 2017/2400 per la determinazione del consumo di carburante dei veicoli pesanti.

## 6 Bibliografia

- [1] E. Cascetta, «Transportation Systems Analysis: Models and Applications», 2009.
- [2] Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, *Art.1, DECRETO 14 luglio 2017, n. 125*, 2017.
- [3] «<https://www.codiceateco.it>,» [Online].
- [4] Commissione Europea, [Online]. Available: <https://ec.europa.eu>.
- [5] GSE S.p.A., «ENERGIA NEL SETTORE TRASPORTI,» 2021.
- [6] Elaborazione GSE su dati ACI - Automobile Club d'Italia, 2020. [Online]. Available: <http://www.opv.aci.it/WEBDMCircolante/>.
- [7] Ministero delle Infrastrutture e della Mobilità Sostenibili, «Conto Nazionale delle Infrastrutture e della Mobilità Sostenibili - Anni 2019-2020», 2021.
- [8] ASSTRA - Associazione Trasporti, «IL TRASPORTO PUBBLICO NELLE CAPITALI EUROPEE: UN'ANALISI DI BENCHMARK,» [Online]. Available: <http://www.asstra.it/conoscenza/pubblicazione/il-trasporto-pubblico-nelle-capitali-europeeunanalisi-di-benchmark.html>.
- [9] UN - United Nations, «MOBILIZING FOR DEVELOPMENT Analysis and Policy Recommendations from the United Nations Secretary-General's High-Level Advisory Group on Sustainable Transport,» 2016.
- [10] Ministero delle infrastrutture e dei Trasporti, *D.lgs. 30 aprile 1992 n.285 e s.m.i. - Nuovo codice della strada*.
- [11] IL MINISTRO DELLE INFRASTRUTTURE, *DECRETO 23 dicembre 2003 - Uso, destinazione e distrazione degli autobus*, 2004.
- [12] REGOLAMENTO (UE) 2017/2400 DELLA COMMISSIONE EUROPEA, 2017.
- [13] G. Jean-Baptiste, «Electric Truck & Bus Grid Integration, Opportunities, Challenges & Recommendations,» 2016.
- [14] A. E. T. S. Jye, A. Pesiridis e S. Rajoo, Effects of Mechanical Turbo Compounding on a Turbocharged Diesel Engine, 2013.
- [15] F. Rodríguez, R. Muncrief, O. Delgado e C. Baldino, MARKET PENETRATION OF FUEL EFFICIENCY, 2017.
- [16] B. Paolo, «Obiettivo risparmio:con l'aerodinamica un taglio ai consumi,» 2015.
- [17] «European Truck Platooning Challenge 2016 - Lessons Learnt,» 2016. [Online]. Available: <https://www.eutruckplatooning.com>.
- [18] IL PRESIDENTE DELLA REPUBBLICA, DECRETO LEGISLATIVO 10 settembre 1991, n. 304.
- [19] F. Dallari e M. Viterbo, «Batterie carrelli elevatori: ioni di litio vs piombo acido: dossier,» 2019.
- [20] International Energy Agency (IEA) and the International Union of Railways (UIC), Railway Handbook 2015 - Energy Consumption and CO2 Emissions - Focus on Vehicle Efficiency, IEA, 2015.
- [21] UIC - INTERNATIONAL UNION OF RAILWAYS, «TECHNOLOGIES AND POTENTIAL DEVELOPMENTS FOR ENERGY EFFICIENCY AND CO2 REDUCTIONS IN RAIL SYSTEMS,» UIC - International Union of Railways, 2016.
- [22] K. Barrow, «C-DAS: taking driver advisory systems to the next level,» *International Railway Journal*, 2018.
- [23] International Association of Public Transport (UITP), «METRO AUTOMATION FACTS, FIGURES AND TRENDS,» [Online]. Available: <https://www.uitp.org/sites/default/files/Metro%20automation%20-%20facts%20and%20figures.pdf>. [Consultato il giorno 2019].
- [24] F. ESSER e C. SCHINDLER, «ASSISTED, AUTOMATED AND AUTONOMOUS DRIVING ("TRIPLE A") FOR RAILWAY TRAFFIC,» in *XVII SCIENTIFIC - EXPERT CONFERENCE ON RAILWAYS RAILCON '16*, Niš, 2016.
- [25] INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION, «The Global MTCC Network,» 17 Agosto 2009. [Online]. Available: <https://gmni.imo.org/wp-content/uploads/2017/05/Circ-684-EEOI-Guidelines.pdf>.



- [26] A. v. d. B. & U. W. Rob Winkel, «Energy Efficiency Technologies for Ships,» Publications Office of the European Union, Utrecht, Netherlands, 2015.
- [27] Z. Guangrong, Ship energy efficiency: now and the future, Tampere, Finland: VTT Technical Research Centre of Finland Ltd, 2017.
- [28] International Maritime Organisation (IMO), «REDUCTION OF GHG EMISSIONS FROM SHIPS, Marginal Abatement Costs and Cost Effectiveness of Energy-Efficiency Measures,» IMO, 2011.
- [29] A. B. o. Shipping, Ship Energy Efficiency Measures: Status and Guidance, Houston, USA, 2013.
- [30] International Council on Clean transportation (ICCT), «Reduce Greenhouse Gas Emissions from Ships - Cost Effectiveness of Available options,» Washington DC, 2011.
- [31] C. N. d. R. Istituto di Studi sui Sistemi Intelligenti per l'Automazione, «Rapporto Tecnico n. 417 anno 2013 - La propulsione marina ibrida: stato dell'arte e prospettive,» 2013.
- [32] Rinnovabili.it, «<http://www.rinnovabili.it/>,» 26 luglio 2017. [Online]. Available: <http://www.rinnovabili.it/energia/fotovoltaico/vele-fotovoltaiche-energysail/>.
- [33] D. R. M. Z. ANASTASIA KHARINA, «COST ASSESSMENT OF NEAR AND MID-TERM TECHNOLOGIES TO IMPROVE NEW AIRCRAFT FUEL EFFICIENCY,» ICCT, BEIJING | BERLIN | BRUSSELS | SAN FRANCISCO | WASHINGTON, 2016.
- [34] M. FLACCAVENTO e B. GIANNETTI, LEGISLAZIONE AERONAUTICA, Milano: ULRICO HOEPLI MILANO, 2010.
- [35] M. GIUNTA, «INFRASTRUTTURE AEROPORTUALI ED ELIPORTUALI - LECTURE 01 - GENERALITA' SUL TRASPORTO AEREO,» in *Corso di laurea Ingegneria Civile dell'università degli studi "Mediterranea" di Reggio di Calabria*, Reggio di Calabria, 2018/2019.
- [36] T. L. A. S. L. B. Y. L. R. R. Nils Beck, «Drag Reduction by Laminar Flow Control,» *Energies*, MDPI, 2018.
- [37] R. M. M. M. N. H. S. G. T. Gena Gibson, «Technology Brief T12 - Aviation Transport,» IEA ETSAP, 2011 January.
- [38] The International Bank for Reconstruction and Development / The World Bank, «Air Transport and Energy Efficiency,» *TRANSPORT PAPERS*, 2012.
- [39] Clean Sky, «Cleansky,» [Online]. Available: <https://www.cleansky.eu/smart-fixed-wing-aircraft-sfwa>.
- [40] The International Bank for Reconstruction and Development / The World Bank, «Air Transport and Energy Efficiency,» *TRANSPORT PAPERS*, 2012.
- [41] NASA, «phys.org,» 6 aprile 2016. [Online]. Available: <https://phys.org/news/2016-04-slimmed-down-aircraft-wing-fuel-emissions.html>.
- [42] Emissions, Committee on Propulsion and Energy Systems to Reduce Commercial Aviation Carbon; Board, Aeronautics and Space Engineering; Sciences, Division on Engineering and Physical, Commercial Aircraft Propulsion and Energy Systems Research: Reducing Global Carbon Emissions, Washington, DC: The National Academies Press, 2016.
- [43] Federacciai, «ACIES – Acciaio competitivo, intelligente e sostenibile,» Giugno 2008.
- [44] Federacciai, «L'industria siderurgica italiana 2015 – Acciaio competizione globale ma equa,» Maggio 2015.
- [45] Federacciai, «RAPPORTO AMBIENTALE 2009 - Il settore siderurgico italiano,» 2009.
- [46] Wärtsilä, "BOOSTING ENERGY EFFICIENCY," in *Energy Efficiency Catalogue / Ship Power R&D*, 2009.