

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica

Tesi di Laurea Magistrale

Riduzione delle emissioni di CO₂

Scenari di sostenibilità tecnico – economica per i veicoli commerciali leggeri nel periodo 2020 – 2030 in Europa



Relatore:

Prof. Federico MILLO

Tutor FCA:

Dott. Carloandrea MALVICINO

Candidato:

Salvatore LETIZIA

Ottobre 2019

Sommario

La tesi ha l'obiettivo di identificare la soluzione più adeguata a rispettare gli obiettivi di riduzione delle emissioni di CO₂ fissati dalla UE per i veicoli commerciali leggeri (LCV) nel periodo 2020 – 2030, tenendo conto dei vincoli tecnici, normativi, commerciali ed economici.

L'analisi include la valutazione dell'efficacia delle tecnologie più significative, grazie allo sviluppo di modelli matematici specifici, degli aspetti commerciali e della prospettiva dell'utente finale.

Lo studio del mercato degli LCV, focalizzando l'attenzione sui dati di vendita (OEM, alimentazione, segmentazione), ha permesso di sintetizzare lo scenario competitivo attuale evidenziando come il segmento "midsize-large" sia quello più rilevante e per dimensioni e per necessità di tecnologie specifiche non derivabili dal settore delle autovetture.

Infine, utilizzando un secondo modello matematico, sono stati valutati differenti scenari di prodotto e di intensità tecnologica definendo le alternative migliori in termini di rapporto costo – beneficio. Il modello matematico utilizzato per valutare le alternative tecnologiche è stato ottenuto evolvendo un modello del veicolo sviluppato in Matlab che ha permesso di calcolare l'impatto di alcune soluzioni tecnologiche sulle emissioni di CO₂; in particolare, sono state implementate delle strategie di controllo (quali disattivazione cilindri, sistema stop–start e la possibilità di valutare una modifica di pre-setting, selezionabile o meno dall'utente, del piano quotato del motore che si traduce in un risparmio del consumo di combustibile) ed è stata valutata la variazione di alcune caratteristiche del veicolo (quali alleggerimento della massa e la riduzione sia del coefficiente della resistenza a rotolamento che del coefficiente che esprime la resistenza aerodinamica).

Si è inoltre affrontata un'analisi del Total Cost of Ownership (TCO), relativamente a tre differenti powertrain, in modo da tenere in considerazione l'ottica del consumatore. Nella parte finale della trattazione, sono stati analizzati i risultati ottenuti, in modo da poter fare delle valutazioni sia di natura tecnica che economica.

Abstract

The thesis aims to identify the most appropriate solution to meet the EU CO₂ emission reduction targets set for light commercial vehicles (LCVs) in the period 2020 - 2030, taking into account the technical, regulatory, commercial and economic constraints.

The analysis includes the evaluation of the effectiveness of the most significant technologies, thanks to the development of specific mathematical models, of the commercial aspects and the end user perspective.

The study of the LCV market, focusing on sales data (OEM, power supply, segmentation), has allowed us to summarize the current competitive scenario, highlighting how the "midsize-large" segment is the most relevant in terms of size and necessity of specific technologies not deriving from the car sector.

Finally, using a second mathematical model, different product and technological intensity scenarios were evaluated, defining the best alternatives in terms of cost-benefit ratio.

The mathematical model used to evaluate the technological alternatives was obtained by evolving a model of the vehicle developed in Matlab which made it possible to calculate the impact of some technological solutions on CO₂ emissions; especially, control strategies were implemented (such as cylinder deactivation, stop-start system and in addition to this, we made it possible to evaluate a pre-setting modification, selectable or not by the user, in relation to the engine map that translates fuel consumption and its saving) and variations of some vehicle parameters (such as lightening the mass, the reduction of both the rolling resistance coefficient and drag coefficient) was evaluated.

An analysis of the Total Cost of Ownership (TCO) was also included, in relation to three different powertrains, in order to observe consumer perspectives.

In the final part of the report, were analyzed the results obtained, in order to make evaluations both technical and economic.

Indice

1.	INTRODUZIONE	8
2.	CONTESTO NORMATIVO E DI MERCATO DEI VEICOLI	
	COMMERCIALI LEGGERI: SCENARIO 2020-2030	10
2.1	CICLI OMOLOGATIVI.....	10
2.1.1	<i>Ciclo NEDC</i>	<i>10</i>
2.1.2	<i>Ciclo WLTP.....</i>	<i>11</i>
2.2	REGOLAMENTO UE 2019/631	13
2.2.1	<i>Oggetto e finalità.....</i>	<i>13</i>
2.2.2	<i>Ambito di applicazione.....</i>	<i>14</i>
2.2.3	<i>Obiettivi specifici per le emissioni di CO₂.....</i>	<i>14</i>
2.2.4	<i>Eco-innovazioni.....</i>	<i>20</i>
2.2.5	<i>Raggruppamento.....</i>	<i>20</i>
2.2.6	<i>Deroghe per determinati costruttori.....</i>	<i>21</i>
2.2.7	<i>Indennità per le emissioni in eccesso.....</i>	<i>21</i>
2.3	ANALISI DEL MERCATO EUROPEO	22
2.3.1	<i>Market share.....</i>	<i>23</i>
2.3.1.1	<i>Market share: OEM.....</i>	<i>24</i>
2.3.1.2	<i>Market share: Alimentazione</i>	<i>24</i>
2.3.1.3	<i>Market share: Segmenti.....</i>	<i>25</i>
2.3.2	<i>Situazione attuale e sfide future.....</i>	<i>26</i>
3.	MODELLI MATEMATICI PER LA VALUTAZIONE TECNICO-	
	ECONOMICA DI SCENARI ALTERNATIVI.....	29
3.1	SCHEMATIZZAZIONE MODELLO ECOS (ECONOMIC SUSTAINABILITY)	29
3.2	PARAMETRI UTILIZZATI.....	31
3.2.1	<i>Parametri tecnico – commerciali</i>	<i>31</i>
3.2.1.1	<i>Tipologie di powertrain esaminati.....</i>	<i>31</i>
3.2.1.2	<i>Caratteristiche commerciali</i>	<i>34</i>
3.2.2	<i>Parametri normativi.....</i>	<i>34</i>
3.2.3	<i>Parametri economici.....</i>	<i>36</i>
3.3	DESCRIZIONE DEL MODELLO ECOS	37

3.3.1	<i>Modulo Eco-innovazioni</i>	37
3.3.2	<i>Modulo Tecnologie</i>	39
3.3.3	<i>Modulo Main</i>	40
4.	MODELLI MATEMATICI (MATLAB) PER LA VALUTAZIONE DELLE TECNOLOGIE SULLE EMISSIONI DI CO₂	43
4.1	DESCRIZIONE DEL MODELLO DYVE (DYNAMIC VEHICLE ENERGY MANAGEMENT) 43	
4.1.1	<i>Parametri caratteristici</i>	45
4.1.2	<i>Assunzioni utilizzate nel modello</i>	45
4.2	PROCEDURA OPERATIVA.....	47
4.2.1	<i>Determinazione punti operativi (caso Base)</i>	48
4.2.1.1	Calcolo del numero di giri del motore	48
4.2.1.2	Calcolo della pressione media effettiva.....	49
4.2.2	<i>Calcolo dei consumi (caso Base)</i>	51
4.2.3	<i>Calcolo delle emissioni di CO₂ (caso Base)</i>	52
4.2.4	<i>Strategie di controllo</i>	53
4.2.4.1	Stop-Start.....	53
4.2.4.2	Disattivazione cilindri	54
4.2.4.3	Offset consumo di combustibile.....	57
4.2.5	<i>Variazione caratteristiche veicolo</i>	58
4.2.5.1	Alleggerimento della massa	58
4.2.5.2	Riduzione del coefficiente di resistenza aerodinamica	58
4.2.5.3	Riduzione del coefficiente di resistenza a rotolamento.....	59
4.2.6	<i>Diesel Optimized: Calcolo dei consumi e delle emissioni di CO₂</i>	60
5.	ANALISI DI SENSIBILITÀ DEL TCO (TOTAL COST OF OWNERSHIP)...	62
5.1	PROCEDURA DI CALCOLO	62
5.2	ESEMPI DI CALCOLO DEL TCO.....	66
6.	ANALISI DI SOSTENIBILITÀ TECNICO-ECONOMICA: SCENARI ALTERNATIVI.....	69
7.	CONCLUSIONI	77
8.	APPENDICE.....	79
9.	BIBLIOGRAFIA	82

Indice delle Figure

<i>Figura 2.1 – Comparazione dei profili di velocità tra i cicli nedc e wltp</i>	12
<i>Figura 2.2 - Confronto tra le pendenze dei regolamenti futuri</i>	19
<i>Figura 2.3 – Domanda di lcv nel 2018 relativamente ai 5 principali mercati dell’ue</i>	23
<i>Figura 2.4 – Suddivisione del mercato di lcv in eu28 in funzione dell’alimentazione</i>	25
<i>Figura 2.5 – Suddivisione del mercato di lcv in eu28 in funzione della segmentazione</i>	26
<i>Figura 2.6 – LCV (CI): situazione attuale e sfide future</i>	27
<i>Figura 2.7 – Segmento large: posizionamento dei competitors</i>	28
<i>Figura 3.1 – Schematizzazione modello EcoS</i>	29
<i>Figura 3.2 – Stato di carica della batteria: charge sustaining e charge depleting</i>	32
<i>Figura 4.1 – Schematizzazione del modello DyVE</i>	43
<i>Figura 4.2 – ciclo guida wltp</i>	47
<i>Figura 4.3 – Andamento regime motore</i>	48
<i>Figura 4.4 – Andamento pressione media effettiva caso base</i>	50
<i>Figura 4.5 – piano quotato: caso base</i>	51
<i>Figura 4.6 – Consumo di combustibile caso base</i>	52
<i>Figura 4.7 - Esempio di disattivazione cilindri per un motore avente quattro cilindri in linea con i due più interni disattivati e i restanti attivi</i>	55
<i>Figura 4.8 – Piano quotato: disattivazione cilindri</i>	57
<i>Figura 4.9 – consumo di combustibile: base vs disattivazione cilindri</i>	61

Indice delle Tabelle

<i>Tabella 2.1 – Confronto dei parametri tra i cicli nedc e wltp</i>	12
<i>Tabella 2.2 – Suddivisione del mercato degli lcv in eu28</i>	24
<i>Tabella 3.1 – Parametri Economici</i>	37
<i>Tabella 3.2 – estratto modulo eco-innovazioni: solar roof</i>	38
<i>Tabella 3.3 – estratto modulo tecnologie: sistema stop-start</i>	39
<i>Tabella 3.4 – estratto modulo main</i>	40
<i>Tabella 4.1 – Parametri caratteristici generico veicolo midsize-large</i>	45
<i>Tabella 4.2 – Soluzioni Tecnologiche: Benefit di CO₂ sul ciclo WLTC</i>	61
<i>Tabella 5.1 – Esempio di calcolo del TCO</i>	67
<i>Tabella 5.2 – Calcolo del TCO a parità di PREZZO</i>	68
<i>Tabella 5.3 – Calcolo del PREZZO a parità di TCO</i>	68
<i>Tabella 6.1 – Scenario 1: Business As Usual</i>	70
<i>Tabella 6.2 – Scenario 2 (DyVE): Diesel Optimezed - CNG</i>	71
<i>Tabella 6.3 – Scenario 3: DS Optimized - BEV</i>	72
<i>Tabella 6.4 – Scenario 4: DS Optimized - BEV - PHEV Petrol</i>	73
<i>Tabella 6.5 – Scenario 5: DS Optimized - BEV - REEV Petrol</i>	74
<i>Tabella 6.6 – Scenario 6 (Green): BEV - PHEV Petrol - MHEV Petrol</i>	75
<i>Tabella 6.7 – Scenario 7: REEV Petrol - MHEV Petrol</i>	76
<i>Tabella 6.8 – Confronto Scenari: Margini/Perdite (lordo)</i>	76
<i>Tabella 8.1 - Segmento Small</i>	79
<i>Tabella 8.2 - Segmento Compact</i>	80
<i>Tabella 8.3 - Segmento Mid-Size</i>	80
<i>Tabella 8.4 - Segmento Large</i>	81

Elenco degli acronimi

LCV – Light Commercial Vehicle	CNG – Compressed Natural Gas
OEM – Original Equipment Manufacturer	PHEV – Plug-in Hybrid Electric Vehicle
TCO – Total Cost of Ownership	REEV – Range Extender Electric Vehicle
NEDC – New European Driving Cycle	MHEV – Mild Hybrid Electric Vehicle
UDC – Urban Driving Cycle	BEV – Battery Electric Vehicle
EUDC – Extra Urban Driving Cycle	ESS – Engine Stop Start
WLTP – Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Test Procedures	pme (bmep) – pressione media effettiva (brake mean effective pressure)
WLTC – Worldwide harmonized Light-duty vehicles Test Cycles	BSFC – Brake Specific Fuel Consumption
PMR – Power Mass Ratio	FC – Fuel Consumption
ICCT – International Council of Clean Transportation	BAU – Business As Usual
EEA – European Environment Agency	SOC – State Of Charge
PMR – Power Mass Ratio	LED – Light Emitting Diode
ZLEV – Zero and Low Emission Vehicle	SI – Spark Ignition
PC – Passenger Car	CI – Compression Ignition
EcoS – Economic Sustainability	BSFC – Brake Specific Fuel Consumption
DyVE – Dynamic Vehicle Energy management	HEA – High Efficiency Alternator
DS – Diesel	

1. Introduzione

Il settore dei trasporti, al fine di contribuire agli obiettivi dell'accordo di Parigi sui cambiamenti climatici per limitare il riscaldamento globale al di sotto dei 2°C rispetto ai livelli preindustriali, sta affrontando una trasformazione sempre più tempestiva e significativa. Per riuscire a rispondere a tali cambiamenti, le case costruttrici devono rivoluzionare il panorama dei propri sistemi e processi aziendali, sfruttando le tecnologie più innovative per mantenersi conformi ai nuovi requisiti senza compromettere la sostenibilità economica.

Il presente elaborato si inserisce in questo contesto, ponendosi l'obiettivo di trovare la risposta al seguente quesito: considerando lo scenario di compliance di CO₂ nel periodo 2020 – 2030 per gli LCV nell' UE, qual è il miglior compromesso, in termini di soluzioni tecnologiche, che permette di ottenere sia il rispetto dei limiti imposti dalla normativa che il soddisfacimento delle esigenze del cliente, al fine di salvaguardare la sostenibilità economica?

È, dunque, fondamentale identificare con dettaglio il perimetro normativo nel quale si colloca tale segmento di veicoli, limitatamente alle emissioni di CO₂, focalizzando l'attenzione sui cicli omologativi e sulle modalità di calcolo dei target, in modo da evitare le onerose indennità previste per le emissioni in eccesso. Analogamente, l'analisi del contesto di mercato, permette di conoscere il posizionamento dei vari competitors, le tecnologie impiegate, ovvero i vettori energetici utilizzati, sino alla distinzione dei segmenti presenti. In tal modo, è possibile avere una panoramica della situazione attuale e delle sfide future cui è sottoposto questo particolare segmento di veicoli. Una volta individuato l'ambito di riferimento, si passa all'attività centrale del presente lavoro di tesi, ovvero implementare un modello matematico per la valutazione degli scenari tecnico-economici al fine di raggiungere i target normativi, tecnico-commerciali ed economici. A supporto di questo, si è scelto di sviluppare un ulteriore modello, ottenuto mediante il software Matlab, attraverso il quale è stato possibile simulare alcune soluzioni tecnologiche, realizzare le relative mappe di funzionamento e misurarne il relativo impatto, in termini di prestazioni ed emissioni, sui cicli omologativi. I risultati di questa fase sono essenziali per le valutazioni degli scenari suddetti.

Infine, viene osservata anche la prospettiva del cliente poiché, diversamente dalle autovetture, dove il contributo di natura emozionale tende spesso ad assumere un ruolo rilevante durante il momento dell'acquisto, nel caso degli LCV tale aspetto tende ad essere trascurabile ai fini decisionali in quanto, in tal caso, il cliente ha uno scopo di tipo funzionale e quindi tende a convergere verso la soluzione che minimizza i consumi che si traduce in un incremento dei profitti.

2. Contesto normativo e di mercato dei veicoli commerciali leggeri: scenario 2020-2030

Il capitolo in esame ha lo scopo di fornire al lettore gli strumenti minimi necessari alla comprensione del lavoro svolto durante la tesi, condensando quelli che sono gli elementi normativi e di mercato, relativamente agli LCV. La base normativa di riferimento è il Regolamento (UE) 2019/631 del Parlamento Europeo e del Consiglio del 17 aprile 2019. Nel seguito si riportano dei cenni sui cicli omologativi, un sunto del Regolamento precedentemente citato ed infine è presente una panoramica del contesto di mercato che si è scelto di approfondire.

2.1 Cicli omologativi

Per essere commercializzati, gli LCV devono effettuare una serie di test che si basano su specifici cicli guida per accertare la loro conformità alle normative. I cicli omologativi sono dei profili di velocità, realizzati sulla base di dati statistici, riprodotti su banchi a rulli per valutare le emissioni di CO₂ e di inquinanti (quest'ultime esulano dall'elaborato in esame) prodotte dal veicolo in analisi. Focalizzando l'attenzione sul contesto europeo, i cicli omologativi protagonisti sono il ciclo NEDC ed il ciclo WLTC.

2.1.1 Ciclo NEDC

Il ciclo NEDC, New European Driving Cycle, è il ciclo di marcia standard di omologazione utilizzato, sino ad agosto 2017, per i veicoli commercializzati all'interno dell'Unione Europea. Esso deriva dalla combinazione di due moduli elementari: il ciclo UDC (Urban Driving Cycle) che è indicativo di un ciclo urbano con una velocità di punta pari a 50 *km/h*, e il ciclo EUDC (Extra Urban Driving Cycle) che è indicativo di un ciclo extraurbano con una velocità di punta pari a 120 *km/h*. La prova è complessivamente composta da quattro segmenti UDC, ripetuti senza interruzione, seguiti dal segmento EUDC. I primi quattro coprono una distanza totale di 4.052 *km* in un tempo pari a 780 secondi, mentre l'ultimo segmento copre una distanza di 6.955 *km* in un tempo pari a 400 s. Il consumo medio è dato dalla combinazione dei valori urbani ed extraurbani.

La durata complessiva del ciclo è di 1180 s mentre per quanto riguarda la distanza percorsa risulta pari a 11 km circa. Il ciclo è effettuato con vettura a motore inizialmente a temperatura ambiente, la quale risulta essere circa 22 °C. I punti di cambiata sono predefiniti per vetture con cambio manuale, liberi per quelle con cambio automatico. Tuttavia il ciclo è considerato poco realistico, in quanto le accelerazioni presenti sono piuttosto blande e poco rappresentative della guida reale. Esso è piuttosto da intendersi come strumento per effettuare confronti dei consumi e delle emissioni tra diversi veicoli, essendo il ciclo normato e riproducibile.

2.1.2 Ciclo WLTP

Per ridurre le evidenti discrepanze che intercorrono tra il ciclo di guida teorico e le condizioni di funzionamento reali, si è pensato di affidare le omologazioni al nuovo ciclo WLTC, Worldwide harmonized Light-duty vehicles Test Cycle. In particolare, per gli LCV di classe I, si ha che la procedura WLTP si applica ai nuovi modelli omologati a partire dal 1° settembre 2017 e a tutte le immatricolazioni a partire dal 1° settembre 2018; mentre, per quanto concerne gli LCV di classe II e III, la nuova procedura si applica ai nuovi modelli omologati a partire dal 1° settembre 2018 e a tutte le immatricolazioni a partire dal 1° settembre 2019. Il WLTC prevede tre profili di velocità differenti in funzione del PMR (Power Mass Ratio) ed un algoritmo per calcolare i punti di commutazione, nei veicoli con cambio manuale, in funzione del veicolo utilizzato in modo da essere quanto più prossimo ad una condizione di guida reale. Facendo riferimento, relativamente al PMR, alla categoria di classe 3, il ciclo è suddiviso in quattro fasi principali in funzione della velocità massima: bassa (o low), media (o medium), alta (o high) ed extra alta (o extra-high). Queste parti del ciclo simulano la guida urbana, sub-urbana e la guida sulle strade extra-urbane e sulle autostrada.

Per quanto concerne le condizioni di prova, diversi aspetti sono valutati in modo più rigoroso, ad esempio l'influenza dell'aerodinamica e del peso supplementare dovuto ad accessori opzionali; quest'ultimo aspetto si ripercuote nel contempo sui coefficienti di coast-down i quali risulteranno anch'essi superiori.

È doveroso precisare la differenza che sussiste tra la procedura WLTP ed il ciclo WLTC. L'acronimo generale WLTP (Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Test

Procedures) comprende sia il ciclo di prova in sé sia l'intero processo di prova, incluse le condizioni di misurazione e le disposizioni relative alla prova; mentre con l'acronimo WLTC, precedentemente citato, si intende unicamente il ciclo di prova, ovvero in altri termini si riferisce al profilo di guida sul banco di prova.

Dai grafici di seguito riportati (Tabella 2.1 e Figura 2.1), si evince come, rispetto al ciclo NEDC (caratterizzato da rampe di geometria ben definita e da numerose fasi in stazionario), il WLTC è caratterizzato da un profilo di velocità che risulta essere molto più aggressivo (indice di accelerazioni più repentine); inoltre, è importante sottolineare come l'effetto del warm up del motore (tempo impiegato dal motore per raggiungere il punto di migliore efficienza; in particolare, maggiore è il warm up e maggiore risulterà il tempo impiegato dall'olio a ridurre la proprio viscosità che si tradurrà in un incremento dei consumi e quindi delle emissioni di CO₂) risulti essere meno influente sul ciclo WLTC.

Parameter	NEDC	WLTC	Delta
Total time (s)	1180	1800	620
Distance (km)	11,0	23,3	12
Max speed (km/hr)	120	131	11
Average Speed (km/hr)	34	47	13
Max acceleration (m/s ²)	1,1	1,7	0,6
Max deceleration (m/s ²)	-1,4	-1,5	-0,1
Constant driving time (s)	475 (40%)	66 (3.5%)	-37%
Acceleration time (s)	247 (21%)	789 (44%)	23%
Deceleration time (s)	178 (15%)	719 (40%)	25%
Stop time (s)	280 (24%)	226 (12.5%)	-12%

TABELLA 2.1 – CONFRONTO DEI PARAMETRI TRA I CICLI NEDC E WLTC

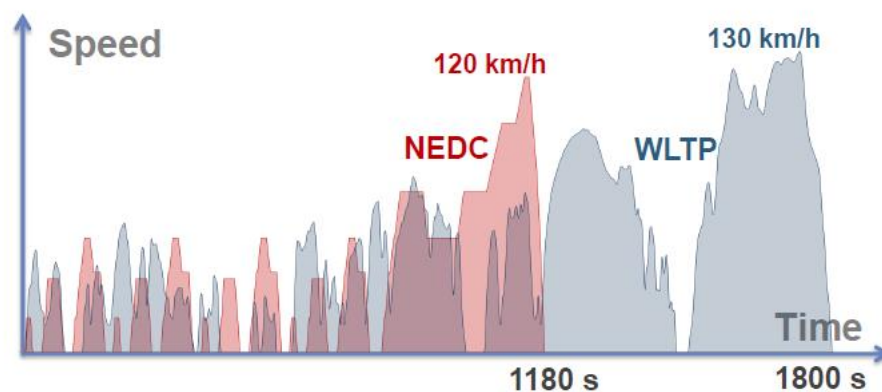


FIGURA 2.1 – COMPARAZIONE DEI PROFILI DI VELOCITÀ TRA I CICLI NEDC E WLTC

La procedura WLTP sta sostituendo gradualmente quella NEDC. In una fase transitoria, compresa tra il 2017 e la fine del 2020, vengono misurati fisicamente e registrati i valori WLTP e, contemporaneamente, si continuano a indicare i valori NEDC. È importante sottolineare come, sino alla fine del 2020, per il calcolo degli obiettivi di emissione di CO₂ e delle relative sanzioni, continueranno ad essere utilizzati i valori NEDC. I valori WLTP vengono infatti riconvertiti in valori NEDC con l'ausilio dello strumento di correlazione CO2MPAS predisposto dalla Commissione europea, mentre in alcuni casi i valori NEDC continueranno ad essere misurati fisicamente. Questi "nuovi" valori NEDC si basano su condizioni di prova in parte adattate secondo la WLTP e sono denominati valori NEDC 2.0; si prevede che quest'ultimi si distingueranno dai valori precedenti, cioè i valori denominati NEDC 1.0.

2.2 Regolamento UE 2019/631

2.2.1 Oggetto e finalità

Il Regolamento (UE) 2019/631 stabilisce i livelli di prestazione in materia di emissioni di CO₂ dei veicoli commerciali leggeri nuovi al fine di contribuire al raggiungimento dell'obiettivo dell'Unione di ridurre le proprie emissioni di gas a effetto serra, come stabilito nel regolamento (UE) 2018/842, e degli obiettivi dell'accordo di Parigi, assicurando inoltre il corretto funzionamento del mercato interno.

A decorrere dal 1° gennaio 2020, tale regolamento fissa un obiettivo per l'intero parco veicoli dell'UE di 147 g CO₂/km per le emissioni medie degli LCV nuovi immatricolati nell'Unione, misurato fino al 31 dicembre 2020 in conformità del regolamento (CE) n. 692/2008 unitamente ai regolamenti di esecuzione (UE) 2017/1152 e (UE) 2017/1153, e, dal 1° gennaio 2021 misurato in conformità del regolamento (UE) 2017/1151.

In altri termini, si ha:

- *Target per l'intero parco veicoli dell'UE₂₀₂₀ = 147 [g_{CO2}/km (NEDC)] (2.1)*
- *Target per l'intero parco veicoli dell'UE₂₀₂₁ = 147 • k [g_{CO2}/km (WLTP)] (2.2)*

dove il coefficiente *k* rappresenta il rapporto tra le emissioni di CO₂ WLTP e quelle NEDC calcolate nel 2020.

A decorrere dal 1° gennaio 2025 si applica un obiettivo per l'intero parco veicoli dell'UE pari a una riduzione del 15% dell'obiettivo nel 2021; mentre, dal 1° gennaio 2030, tale obiettivo verrà ridotto al 31% rispetto al target del 2021.

Inoltre, per quanto riguarda le soglie di riferimento dei veicoli a zero e a basse emissioni (ZLEV), si ha, a partire dal 2025 una quota pari al 15% delle rispettive flotte di veicoli commerciali leggeri nuovi mentre per il 2030 tale soglia di riferimento risulta essere pari al 30%.

2.2.2 Ambito di applicazione

Questo regolamento si applica ai veicoli di categoria N1, ovvero veicoli a motore progettati e costruiti essenzialmente per il trasporto di merci con una massa massima che non supera le 3.5 tonnellate, aventi una massa di riferimento massima di 2610 kg ed ai veicoli di questa categoria ai quali è estesa l'omologazione a norma dell'articolo 2, paragrafo 2, del regolamento (CE) n. 715/2007 («veicoli commerciali leggeri»), che siano immatricolati per la prima volta nell'UE e che non siano stati precedentemente immatricolati al di fuori del territorio dell'Unione («veicoli commerciali leggeri nuovi»).

A decorrere dal 1° gennaio 2025, ai fini di tale Regolamento e fatti salvi la direttiva 2007/46/CE e il regolamento (CE) n. 715/2007, i veicoli a zero emissioni di categoria N, aventi una massa di riferimento superiore a 2 610 kg o 2 840 kg, a seconda del caso, sono considerati veicoli commerciali leggeri che rientrano nell'ambito di applicazione del regolamento in esame se la massa di riferimento in eccesso è dovuta unicamente alla massa del sistema di stoccaggio dell'energia.

2.2.3 Obiettivi specifici per le emissioni di CO₂

Per l'anno civile 2020, le emissioni specifiche di CO₂ di ciascun LCV nuovo sono determinate con la seguente formula:

$$\text{Emissioni specifiche di CO}_2_{2020} = 147 + a \cdot (M - M_0) \quad (2.3)$$

dove M indica la massa in ordine di marcia del veicolo in chilogrammi (kg), ovvero la massa del veicolo carrozzato in ordine di marcia (compreso liquido di raffreddamento,

lubrificanti, carburante, ruota di scorta, attrezzatura e conducente), M_0 indica la massa di riferimento che, nel caso in esame, è pari a 1766.4 kg ed a , pari a 0.096, rappresenta la pendenza della retta in esame.

L'obiettivo specifico per le emissioni di un costruttore nel 2020 è calcolato come la media delle emissioni specifiche di CO₂, determinate conformemente alla formula (2.3), di ciascun LCV nuovo immatricolato nell'anno civile interessato di cui egli è il costruttore. In altri termini, per un certo costruttore, considerando una flotta di LCV si ha che ogni veicolo avrà una data emissione di CO₂ che, ponderata per il relativo mix di volume di vendita, contribuirà all'emissione media di CO₂ della flotta di tale costruttore; l'obiettivo specifico per le emissioni di un costruttore (Target di CO₂ in termini di flotta) sarà calcolato come la media dei Target relativi ad ogni singolo LCV ottenuti a sua volta mediante la relazione (2.3). In tal modo sarà possibile calcolare il Gap dal Target, per ogni costruttore, considerando anche l'impatto che hanno alcuni parametri in termini di riduzione di CO₂ (es. eco-innovazione, riportate al paragrafo 2.2.4).

Per gli anni civili dal 2021 al 2024, l'obiettivo specifico di riferimento per le emissioni di un costruttore è calcolato come segue:

$$Emiss. \text{ specif. di } CO_{2,2021-2024} = WLTP_{target \text{ di riferimento}} + a [(M_{\phi} - M_0) - (M_{\phi 2020} - M_{0,2020})] \quad (2.4)$$

Dove, $WLTP_{target \text{ di riferimento}}$ rappresenta l'obiettivo specifico di riferimento per le emissioni WLTP e viene calcolato come segue:

$$WLTP_{target \text{ di riferimento}} = NEDC_{2020 \text{ target}} \cdot \left(\frac{WLTP_{CO_2, 2020}}{NEDC_{CO_2, 2020}} \right) \quad (2.5)$$

Dove:

- $NEDC_{2020 \text{ target}}$ è il target (riferito alla flotta) del singolo costruttore per il 2020, calcolato come spiegato precedentemente
- $WLTP_{CO_2, 2020}$ corrisponde alle emissioni specifiche medie di CO₂ nel 2020, determinate conformemente al regolamento (UE) 2017/1151 senza includere i risparmi di CO₂ derivanti dalle eco-innovazioni

- $NEDC_{CO_2, 2020}$ corrisponde alle emissioni specifiche medie di CO₂ nel 2020, determinate conformemente al regolamento (UE) 2017/1152 senza includere i risparmi di CO₂ derivanti dalle eco-innovazioni
- a rappresenta la pendenza della retta ed è pari a 0.096
- M_{ϕ} è la media della massa in ordine di marcia (M) dei nuovi LCV del costruttore immatricolati nell'anno obiettivo in questione, in chilogrammi (kg)
- M_0 è pari a 1766.4 kg nel 2020 e, per gli anni 2021, 2022 e 2023, il valore M_0 viene calcolato come media delle masse in ordine di marcia (M) dei LCV nuovi nei tre anni civili precedenti
- $M_{\phi 2020}$ è la media della massa in ordine di marcia (M) dei nuovi LCV del costruttore immatricolati nel 2020, in chilogrammi (kg)
- $M_{\phi 0, 2020}$ è 1766.4 kg.

Per gli anni civili dal 2025 al 2029, l'obiettivo specifico di riferimento per le emissioni di un costruttore è calcolato come segue:

$$Target\ spec.\ emiss.\ 2025-2029 = [Target\ spec.\ di\ riferim.\ emiss. - (\phi_{obiettivi} - Target\ intero\ parco\ veicoli\ UE_{2025})] \cdot fattore\ ZLEV \quad (2.6)$$

dove:

- *Target spec. di riferim. emiss.* rappresenta l'obiettivo specifico di riferimento per le emissioni e viene calcolato come segue:

$$Target\ spec.\ di\ riferim.\ emiss. = Target\ intero\ parco\ veicoli\ UE_{2025} + \alpha \cdot (TM - TM_0) \quad (2.7)$$

in cui:

- $Target\ intero\ parco\ veicoli\ UE_{2025} = Target\ intero\ parco\ veicoli\ UE_{2021} \cdot (1 - 15\%) \quad (2.8)$
- $\alpha = a_{2025}$ se $TM \leq TM_0$ e $\alpha = a_{2021}$ se $TM > TM_0$ dove TM_0 dal 2025 è calcolato come media delle masse di prova TM_0 del 2022- 2023 e poi aggiornato ogni due anni

dove:

- $a_{2025} = \frac{a_{2021} \cdot \text{Target intero parco veicoli UE}_{2025}}{\text{Media delle emissioni}_{2021}}$
- a_{2021} rappresenta la pendenza della retta di regressione lineare determinata applicando il metodo dei minimi quadrati alla massa di prova (variabile indipendente) e alle emissioni di CO₂ specifiche (variabile dipendente) di ogni veicolo commerciale leggero nuovo immatricolato nel 2021
- $\text{Media delle emissioni}_{2021}$ è la media delle emissioni di CO₂ specifiche di tutti gli LCV nuovi immatricolati nel 2021 dei costruttori per i quali un obiettivo specifico per le emissioni è calcolato attraverso la relazione (4)
- TM è la massa media di prova in chilogrammi (kg) di tutti gli LCV nuovi del costruttore immatricolati nell'anno civile in questione
- TM_0 è la massa di riferimento che sarà disponibile entro il 31 ottobre 2024, e successivamente ogni due anni, il cui valore, applicato a partire dal 2025, è ottenuto attraverso la massa media di prova dei LCV immatricolati nel corso dei due precedenti anni civili, a partire dal 2022 e 2023.
- $\phi_{obiettivi}$ è la media ponderata per il numero dei veicoli commerciali leggeri nuovi di ciascun costruttore, di tutti gli obiettivi specifici di riferimento per le emissioni per ciascun costruttore, conformemente alla relazione (2.8)
- *fattore ZLEV* è pari a $(1 + y - x)$, tranne quando tale somma è superiore a 1,05 o inferiore a 1,0 nel qual caso il fattore *ZLEV* è fissato a 1.05 o 1.0, secondo i casi

in cui:

- y indica la quota di ZLEV presente nel parco di LCV nuovi di un costruttore calcolato come il numero totale dei veicoli nuovi a zero e a basse emissioni, ciascuno dei quali è contato come $ZLEV_{specifico}$ conformemente alla formula seguente, diviso per il numero totale di veicoli commerciali leggeri nuovi nel corso dell'anno civile in questione:

$$ZLEV_{specifico} = 1 - \left(\frac{\text{emissioni specifiche di CO}_2}{50} \right)$$

- x è pari al 15%

Infine, per l'anno civile 2030, il Target specifico per le emissioni segue una procedura simile a quella appena descritta per il 2025-2029 ma con le seguenti differenze:

$$\text{Target spec. emiss.}_{2030} = [\text{Target spec. di riferim. emiss.} - (\phi_{\text{obiettivi}} - \text{Target intero parco veicoli UE}_{2030})] \cdot \text{fattore ZLEV} \quad (2.9)$$

In cui:

- *Target spec. di riferim. emiss.* rappresenta l'obiettivo specifico di riferimento per le emissioni e viene calcolato come segue:

$$\text{Target spec. di riferim. emiss.} = \text{Target intero parco veicoli UE}_{2030} + \alpha \cdot (TM - TM_0) \quad (2.10)$$

Dove:

- $\text{Target intero parco veicoli UE}_{2030} = \text{Target intero parco veicoli UE}_{2021} \cdot (1 - 31\%) \quad (2.11)$
- $\alpha = a_{2030}$ se $TM \leq TM_0$ e $\alpha = a_{2021}$ se $TM > TM_0$

In cui:

$$a_{2030} = \frac{a_{2021} \cdot \text{Target intero parco veicoli UE}_{2030}}{\text{Media delle emissioni}_{2021}}$$

- $\phi_{\text{obiettivi}}$ è calcolato come nel caso precedente ma conformemente alla relazione (11)
- *fattore ZLEV* è calcolato come ma il parametro x , in tal caso, è pari al 30%.

Il grafico rappresentato in figura 2.2 ha lo scopo di illustrare le differenze tra i vari Regolamenti, rispettivamente 2021, 2025 e 2030, in termini di pendenza (indicata come "slope"). Il valore TM_0 è puramente indicativo e basato su stime; ai fini del presente studio, è stato assunto uguale sia per il 2025 che per il 2030.

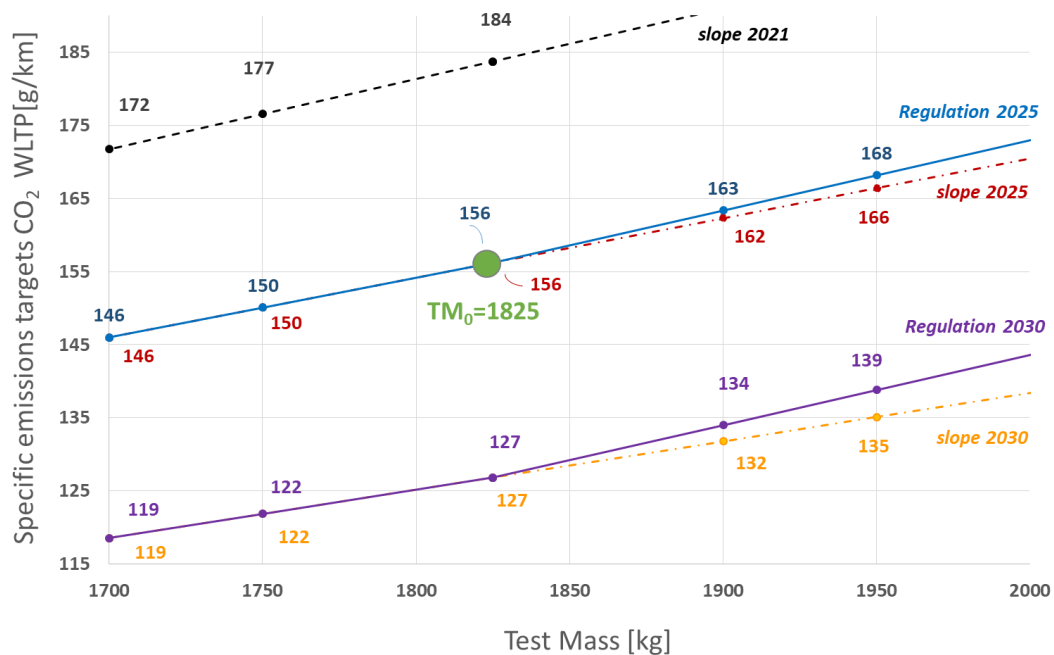


FIGURA 2.2 - CONFRONTO TRA LE PENDENZE DEI REGOLAMENTI FUTURI

Si può notare come, per valori di $TM \leq TM_0$ il Regolamento relativo al 2025 (rappresentato dalla retta continua blu) segua la pendenza a_{2025} (evidenziata dalla retta tratto-punto in rosso) mentre per valori di $TM > TM_0$ tale Regolamento segua la pendenza a_{2021} (si noti infatti il parallelismo che sussiste tra la retta tratteggiata in nero, rappresentante la pendenza del 2021, ed il tratto del Regolamento 2025 considerato). Analogamente, il Regolamento relativo al 2030 (rappresentato dalla retta continua in viola) segue i medesimi criteri ma ovviamente, come si evince dal grafico, la pendenza seguirà limiti più stringenti.

Diversamente dal caso delle autovetture, per gli LCV non sono previsti né i *super credits* né *phase-in*. In particolare, con l'espressione "*super credits*" s'intendono dei benefit ottenibili nel computo delle emissioni medie di CO₂ relativamente alle autovetture; nella fattispecie, ogni autovettura avente emissioni specifiche di CO₂ inferiori ai 50 g/km conterà come: 2 autovetture nel 2020, 1.67 autovetture nel 2021, 1.33 autovetture nel 2022 ed 1 autovettura dal 2023; fatto salvo un limite massimo cumulabile nel periodo 2020-2022 pari a 7.5 g/km. Per quanto riguarda il concetto di "*phase-in*", s'intende che, nel computo delle emissioni medie di CO₂ relativamente alle autovetture, viene escluso, solo per il 2020, il 5% delle autovetture aventi emissioni maggiori.

2.2.4 Eco-innovazioni

Il Regolamento EU28 tiene conto dei risparmi di CO₂ realizzati attraverso l'uso di tecnologie innovative i cui benefit non sono pienamente rilevati dalla procedura di omologazione. Il beneficio ottenuto da ogni eco-innovazione deve essere certificato dall'autorità di omologazione.

Il contributo totale di tali tecnologie alla riduzione delle emissioni specifiche medie di CO₂ di un costruttore può giungere ad un massimo di 7 g CO₂/km; esiste quindi un limite riferito all'intera flotta mentre non si ha un limite sul singolo veicolo. Questa soglia sarà riesaminata prima del 2025 e probabilmente subirà una riduzione. Il beneficio ottenuto dalle eco-innovazioni sarà moltiplicato per i coefficienti 1.9, 1.7 e 1.5 rispettivamente per il 2021, 2022 e 2023, come misura per compensare l'impatto del ciclo WLTP sulla compliance. E' da sottolineare come le eco-innovazioni saranno in vigore sino al 2030.

Attualmente esistono 28 eco-innovazioni approvate dal Legislatore che possono essere raggruppate in 7 categorie:

- Alternatore ad alta efficienza, includendo BSG 12V
- Sistema di illuminazione esterna che si avvale di diodi a emissione di luce (LED)
- Coasting con motore a regime minimo per AT/MT
- Tetto solare con funzione di caricabatteria
- Incapsulamento del vano motore
- Serbatoio ad accumulo entalpico
- Sistema di preconditionamento dello stato di carica della batteria di un veicolo ibrido
- Generatore-starter a 48 V ad alta efficienza (BRM) associato a un convertitore CC/CC a 48 V/ 12 V.

2.2.5 Raggruppamento

I costruttori possono costituire un raggruppamento al fine di adempiere agli obblighi fissati per il raggiungimento degli obiettivi specifici di emissioni di CO₂; in particolare, si hanno 2 tipologie di Raggruppamento:

- Raggruppamento chiuso: i membri sono un gruppo di imprese collegate (ad esempio, relativamente agli LCV si ha: FCA Italy, FCA US; mentre, relativamente alle PC si ha: FCA Italy, FCA US, AR)
- Raggruppamento aperto: i membri non sono imprese collegate (ad esempio, relativamente alle PC, si ha: FCA Italy, FCA US, AR, Tesla).

2.2.6 Deroghe per determinati costruttori

Un costruttore di un numero di veicoli commerciali leggeri nuovi immatricolati nell'Unione inferiore a 22 000 unità per anno civile, può presentare una domanda di deroga rispetto all'obiettivo specifico per le emissioni se:

- a) non è parte di un gruppo di costruttori collegati; o
- b) fa parte di un gruppo di costruttori collegati che è responsabile in totale di un numero di LCVs nuovi immatricolati nell'Unione inferiore a 22'000 unità nell'unione per anno civile; o
- c) è parte di un gruppo di costruttori collegati, ma gestisce i propri impianti di produzione e il centro di progettazione.

La deroga può essere concessa per una durata massima di cinque anni civili, rinnovabile.

2.2.7 Indennità per le emissioni in eccesso

Per ogni civile per il quale le emissioni specifiche medie di CO₂ di un costruttore superano l'obiettivo specifico per le emissioni, la Commissione impone al costruttore o, nel caso di un raggruppamento, al responsabile del raggruppamento, di versare un'indennità per le emissioni in eccesso.

Tale indennità è calcolata secondo la seguente formula:

$$\text{Indennità emissioni in eccesso} = (\text{emissioni in eccesso} \cdot 95\text{€}) \cdot n^{\circ} \text{di LCVs di nuova immatricolazione} \quad (2.12)$$

Dove, ai fini della formula suddetta, si intende per:

- *Emissioni in eccesso*: il numero positivo di g CO₂/km corrispondente allo scarto tra le emissioni specifiche medie di CO₂ del costruttore e l'obiettivo specifico per le emissioni per l'anno civile o parte di esso cui si applicano gli obblighi citati precedentemente al punto 2.2.3, arrotondato al terzo

decimale più vicino, tenendo conto delle riduzioni delle emissioni di CO₂ determinate dalle tecnologie innovative (eco-innovazioni), citate precedentemente; e

- *n° di LCVs di nuova immatricolazione* il numero di veicoli commerciali leggeri nuovi conteggiati separatamente che il costruttore produce e che sono stati immatricolati in quel periodo.

Le indennità per le emissioni in eccesso si considerano entrate del bilancio generale dell'Unione.

2.3 Analisi del mercato Europeo

Il paragrafo in esame ha come obiettivo l'analisi del mercato degli LCV in Europa, centrando l'attenzione sui volumi di vendita, sui combustibili utilizzati e sui differenti competitors.

Complessivamente nel 2018, la domanda di LCV nell'Unione Europea è aumentata del 3.1% rispetto al 2017, convalidando il sesto anno consecutivo di crescita. Raggiungendo la quota di circa 2 milioni (2'065'000), le immatricolazioni di LCV rappresentano approssimativamente il 12%; la restante quota, 88%, è relativa alle autovetture.

Osservando la figura 2.3, si può notare come nei cinque principali mercati dell'UE, la domanda di LCV nel 2018 sia diminuita in Italia (-6.0%) e nel Regno Unito (-1.3%) mentre hanno registrato un incremento i mercati relativi alla Spagna (+7.8%), alla Germania (5.4%) ed alla Francia (+4.6%).

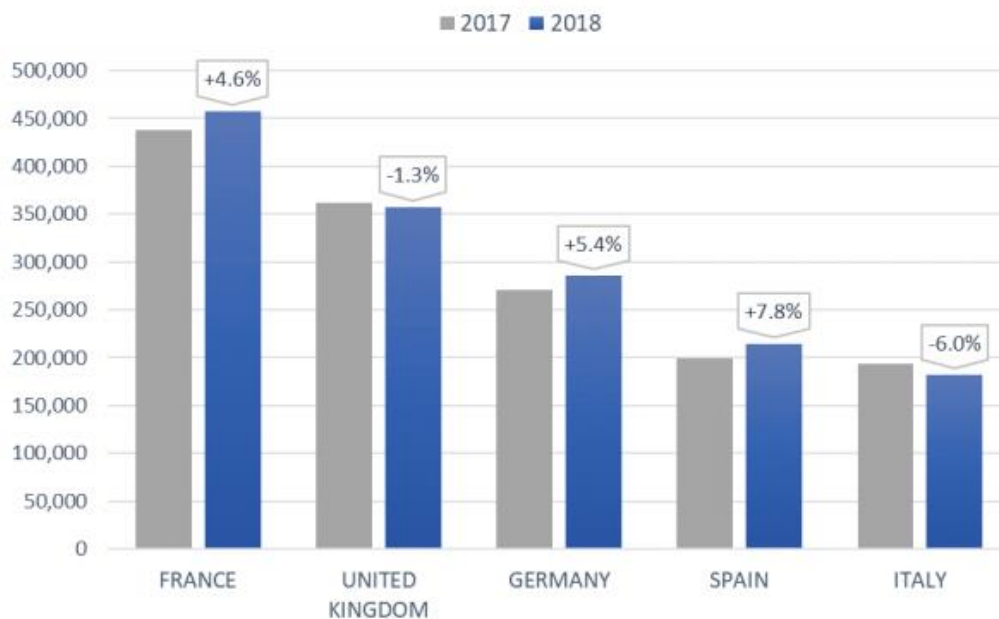


FIGURA 2.3 – DOMANDA DI LCV NEL 2018 RELATIVAMENTE AI 5 PRINCIPALI MERCATI DELL'UE

2.3.1 Market share

I dati di seguito riportati fanno riferimento esclusivamente agli LCV di classe N1, senza però tenere in considerazione i pick-up e le auto-van; sono inoltre esclusi dal presente studio i cosiddetti *veicoli ricreazionali*¹ ed i *veicoli per uso speciale*²; in particolare, nel 2018 sono stati immatricolati nell'UE circa 1'750'000 unità.

Attraverso i database della *EEA (European Environment Agency)* è stato possibile analizzare, per l'anno 2018, la suddivisione del mercato in funzione degli OEM, dei differenti segmenti (*small, compact, mid-size e large*) e della tipologia di alimentazione utilizzata al fine di avere una panoramica di tali aspetti che faciliti la comprensione dell'elaborato in esame.

¹ *veicoli ricreazionali*: veicolo a ruote a motore utilizzato per il campeggio o altre attività ricreative.

² *veicolo per uso speciale*: veicolo con caratteristiche tecniche specifiche che gli consentono di svolgere una funzione che richiede disposizioni o attrezzature speciali;

2.3.1.1 Market share: OEM

Facendo riferimento alla tabella 2.2, è possibile notare la suddivisione del mercato relativamente ai costruttori.

In particolare, dalla colonna *Volume mix*, si evince come il gruppo *PSA* si aggiudichi il primato raggiungendo il 25.5% dell'intera flotta Europea, seguito da *Ford* (20.9%), *Renault* (17.6%), *Volkswagen* (14.5%), *Daimler* (10.3%), *FCA* (9.8%) ed infine, per i restanti costruttori, si è scelto di agglomerarli visto il contributo (1.4%) nettamente inferiore rispetto ai precedenti competitors.

Inoltre, sempre in tabella 2.1, si riportano, per ogni raggruppamento di costruttori (*pool*), le immatricolazioni (*registrations*) del 2018 espresse in unità di veicoli, le masse in ordine di marcia (*MRO*) espresse in kg ed infine le emissioni di CO₂ normalizzate al ciclo *NEDC* espresse in g/km, relativamente all'intera flotta di veicoli.

Pool	Registrations [u]	MRO [kg]	CO2 NEDC [g/km]	Volume mix
PSA	376'368	1675.8	136.6	25.5%
FORD	306'768	2011.8	170.5	20.9%
RENAULT	262'879	1686.1	146.4	17.6%
VOLKSWAGEN	212'927	1880.9	163.9	14.5%
DAIMLER	152'136	2124.6	187.8	10.3%
FCA	143'213	1689.8	150.3	9.8%
OTHERS	19'334	1911.6	186.1	1.4%

TABELLA 2.2 – SUDDIVISIONE DEL MERCATO DEGLI LCV IN EU28

2.3.1.2 Market share: Alimentazione

Per quanto riguarda le tipologie di alimentazione, la stragrande maggioranza degli LCV in Europa rimane alimentata dal combustibile diesel; in particolare, il 96% delle immatricolazioni risulta utilizzare tale combustibile. La restante quota è distribuita ai combustibili benzina (3%), gas naturale compresso (1% circa) e percentuali marginali relativamente all'elettrico.

Focalizzando l'attenzione sui principali costruttori, limitatamente ai segmenti ed alle categorie di cui si rimanda al paragrafo 2.3.1.3, è possibile notare le scelte di questi in termini di combustibili utilizzati. In particolare, il grafico rappresentato in figura 2.4, mostra come il gruppo PSA componga la propria quota del mercato europeo, pari al 25.5%, mediante i combustibili benzina (principalmente utilizzata per i segmenti small-compact) e CNG per lo 0.6%, l'elettrico ha un contributo irrisorio in quanto occupa lo 0.1% delle immatricolazioni, mentre fa da padrone il Diesel che possiede la restante quota (24.8%).

Passando alla Ford, il 20.9% della quota di mercato è costituita per lo 0.4% dai combustibili benzina – CNG e la restante (20.5%) è occupata dall'alimentazione Diesel. Questo trend è seguito anche dai restanti costruttori come si deduce dal grafico.

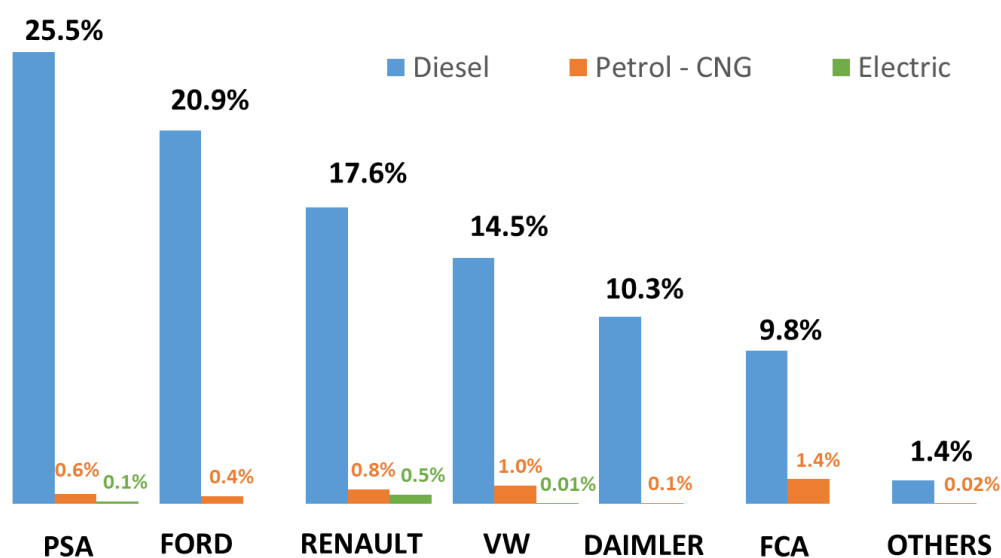


FIGURA 2.4 – SUDDIVISIONE DEL MERCATO DI LCV IN EU28 IN FUNZIONE DELL'ALIMENTAZIONE

2.3.1.3 Market share: Segmenti

Osservando la suddivisione del mercato in funzione della segmentazione, si riporta una breve analisi dei vari segmenti che vanno a comporre l'offerta di LCV per il mercato europeo. In particolare, lo studio si focalizza sui segmenti *Small* (es. Fiorino, Nemo, Bipper), *Compact* (es. Doblò, Kangoo, Partner), *Midsize* (es. Talento, Vito, Transporter) e *Large* (es. Ducato, Sprinter, Master).

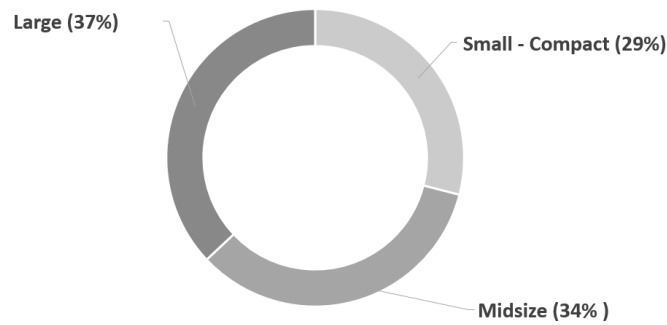


FIGURA 2.5 – SUDDIVISIONE DEL MERCATO DI LCV IN EU28 IN FUNZIONE DELLA SEGMENTAZIONE

Focalizzando l'attenzione sul grafico presente in figura 2.5, è possibile osservare la suddivisione dei segmenti analizzati; in particolare, il contributo del segmento *Large* risulta essere pari al 37% del mercato europeo mentre i restanti contributi sono relativi ai segmenti *Midsize* (34%) e *Small – Compact* (29%) per i quali si è scelto di agglomerare le relative quote.

2.3.2 *Situazione attuale e sfide future*

Il grafico riportato in figura 2.6 ha lo scopo di mostrare un'istantanea sia della situazione attuale che delle sfide future a cui sono sottoposti i segmenti degli LCV studiati, limitatamente al caso del motore ad accensione per compressione. In esso sono condensati differenti parametri in funzione della segmentazione analizzata; in particolare, sono riportate le emissioni di CO₂ (normalizzate sul ciclo *NEDC*) dei differenti LCV in funzione della massa in ordine di marcia. Osservando il grafico, in giallo si riportano i punti appartenenti al segmento *small*, in verde sono evidenziati i punti relativi al segmento *compact*, mentre in violetto può essere osservato il posizionamento dei differenti competitors relativamente al segmento *mid-size*. Infine, in rosso sono mostrati gli LCV appartenenti al segmento *Large*. I punti suddetti e la retta risultante, tratteggiata in blu, sono relativi al 2018. In aggiunta, è possibile notare sia la pendenza imposta dalla Regolamentazione attuale, rappresentata in figura 2.6 dalla retta tratteggiata in fucsia la quale, sino al 2019 incluso, presenta una pendenza pari a 0.093, sia la pendenza ottenuta dall'intero parco europeo (limitatamente ai segmenti considerati) evidenziata, come detto precedentemente, dalla retta tratteggiata in blu. Quest'ultima è stata ottenuta mediante interpolazione, applicando il metodo dei minimi

quadrati. Numericamente, in termini di intero parco veicoli, in Europa la *MRO* media risulta, per il 2018, pari a 1873.6 kg (indicata come $M_{\text{fleet-avg}}$) mentre per quanto riguarda il Regolamento attuale, tale grandezza assume il valore di 0.091.

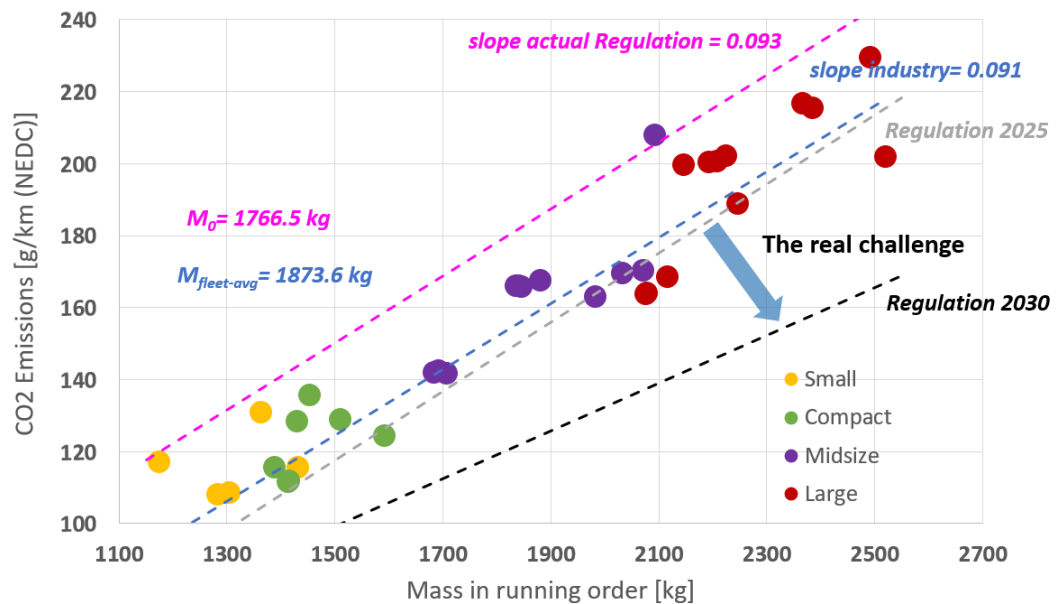


FIGURA 2.6 – LCV (CI): SITUAZIONE ATTUALE E SFIDE FUTURE

Al fine di sottolineare le sfide a cui è sottoposta l'industria dei veicoli commerciali leggeri, le rette tratteggiate in grigio, relativamente al Regolamento per il 2025, e nero, attinente al Regolamento per il 2030, mostrano i cambiamenti normativi a cui devono rispondere i diversi competitors.

Diversamente dai segmenti *small* e *compact*, i quali rappresentano dei veicoli commerciali leggeri derivati da autovetture e conseguentemente ereditano da queste le medesime tecnologie, i segmenti *midsize-large* richiedono tecnologie specifiche. Per questa ragione, si è scelto di analizzare nei capitoli successivi tale segmento di veicoli.

Infine, il grafico riportato in figura 2.7, ha lo scopo di fornire al lettore due informazioni relativamente al segmento scelto come oggetto di studio: la prima è relativa al prezzo base (indicato nel grafico come *Entry-level Price*), riportato in ordinata, dove è importante sottolineare che non sono tenuti in considerazione i costi relativi all'IVA ed alla messa su strada; mentre, la seconda informazione fornita, riguarda le relative emissioni di CO₂, rappresentate in ascissa, normalizzate al ciclo omologativo *NEDC*.

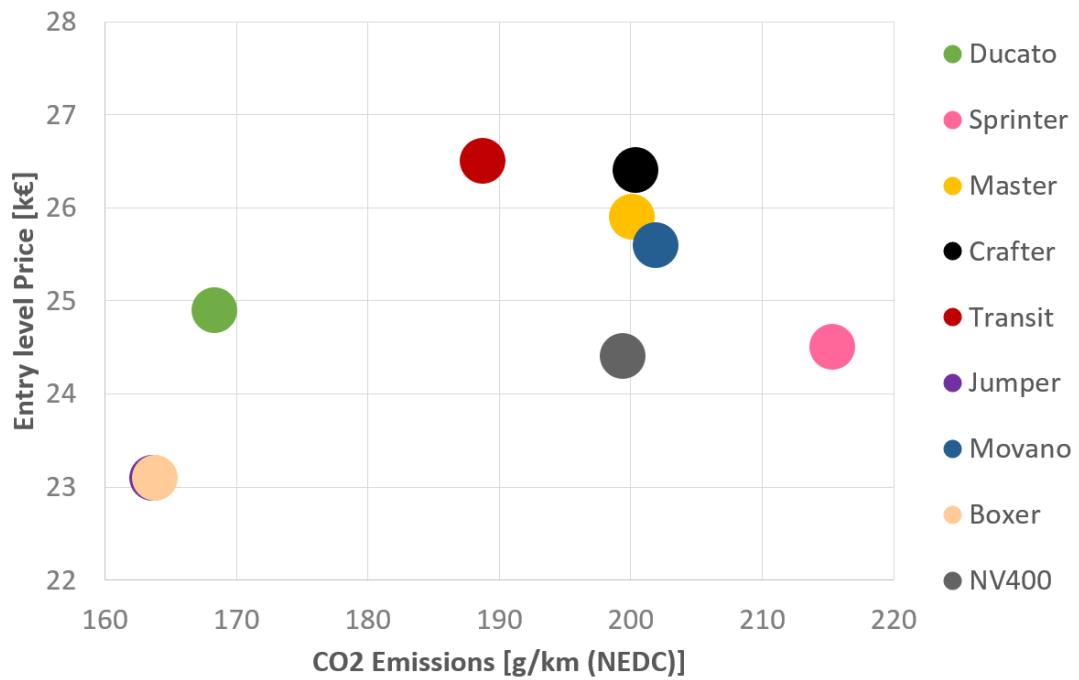


FIGURA 2.7 – SEGMENTO LARGE: POSIZIONAMENTO DEI COMPETITORS

Come si evince dalla figura, si è scelto di focalizzare l'attenzione sui principali competitors del segmento *large*, selezionato come oggetto di studio. Osservando il prezzo base, è possibile notare come la forbice oscilli tra un valore minimo di 23'100 € ed massimo di 26'500 €.

In funzione di ciò, nei capitoli successivi, si è scelto di fare riferimento ad un valore medio di prezzo base pari a 25'000 €.

3. Modelli matematici per la valutazione tecnico-economica di scenari alternativi

3.1 Schematizzazione modello EcoS (Economic Sustainability)

Una volta specificato il perimetro sul quale si focalizza lo studio in esame, evidenziando dunque il contesto di riferimento, sia dal punto di vista normativo che di mercato, si è passati a quello che rappresenta il core del presente elaborato: creare un modello matematico che permetta di definire, esaminare e classificare degli scenari alternativi al fine di rispondere alle esigenze viste durante l'introduzione ovvero fare in modo che il raggiungimento degli obiettivi normativi non vada a compromettere la sostenibilità economica del costruttore. Mediante la variazione dei mix di volumi dei powertrain considerati, è possibile, secondo certe assunzioni, selezionare il miglior compromesso costi – benefici, in modo da massimizzare il margine lordo dell'azienda.

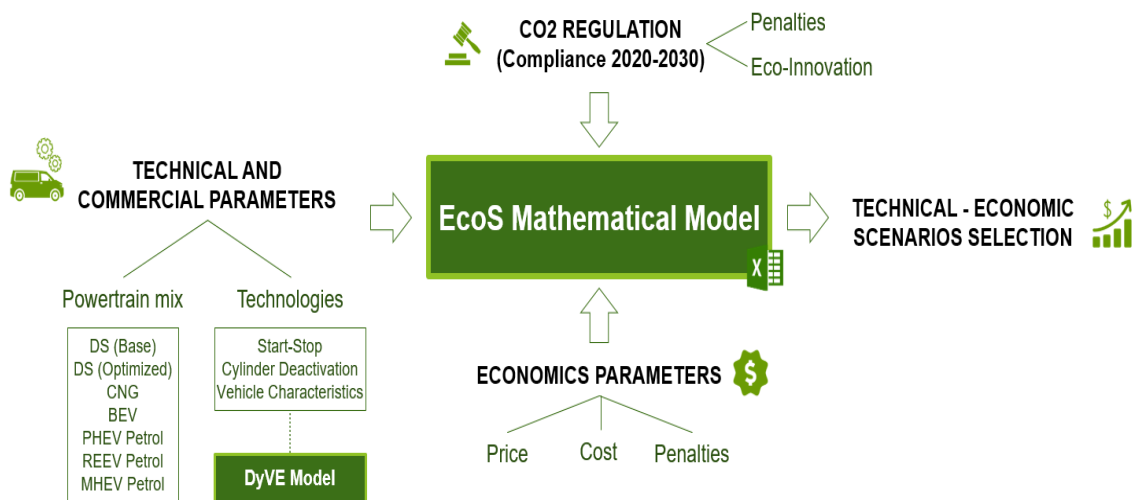


FIGURA 3.1 – SCHEMATIZZAZIONE MODELLO ECOS

Lo schema riportato in figura 3.1 ha lo scopo di sintetizzare il compito assolto da tale modello, denominato EcoS, che verrà spiegato più nel dettaglio nei punti successivi. Facendo riferimento allo schema illustrativo, si può notare come il modello, affinché generi il proprio output, richieda tre parametri di input.

Il primo parametro di input necessario al modello è rappresentato dal contesto normativo di riferimento (*CO2 REGULATION (Compliance from 2020 to 2030)*) che impone i propri vincoli ai costruttori che decidono di addentrarsi in tale ambito. Il modello tiene in considerazione tutte le specificità legislative che, come si è visto al capitolo 2, variano sia in funzione della tipologia di powertrain (tradizionale o elettrificato) che lungo il periodo osservato (necessita dunque del calcolo dei target legislativi, del contributo apportato dalle eco-innovazioni, dal benchmark, dal calcolo della pendenza, ecc.).

Passando al parametro di input successivo si hanno le caratteristiche tecnico-commerciali (*TECHNICAL AND COMMERCIAL PARAMETERS*) le quali si traducono nelle tipologie di powertrain esaminati e nelle soluzioni tecnologiche implementate. Come si evince dallo schema, i motopropulsori scelti (indicati come *Powertrain mix*) sono sia di tipo tradizionale (aventi alimentazione Diesel (*DS*), e Gas Naturale Compresso, (*CNG*)) sia alternativi come la versione del puro elettrico (*BEV*) e le versioni ibride benzina (*PHEV Petrol*, *REEV Petrol*, *MHEV Petrol*). Si è poi svolto un “deep dive” tecnologico attraverso un ulteriore modello (*DyVE*, Dynamic Vehicle Energy management) che, mediante il software *Matlab*, permette di valutare l’efficacia di alcune tecnologie, quali il sistema start-stop e la disattivazione dei cilindri (*Cylinder Deactivation*) e la variazione di alcune caratteristiche del veicolo.

Infine, l’ultimo parametro di input richiesto è relativo ai parametri economici, (*ECONOMICS PARAMETERS*) i quali si concretizzano nel prezzo di vendita (*Price*), nei costi legati alla produzione (*Cost*) e nelle indennità per le emissioni in eccesso (*Penalties*).

Noti i parametri di input suddetti, il modello è in grado di generare l’output richiesto ovvero selezionare, esaminare e classificare degli scenari alternativi per la sostenibilità tecnico-economica dell’azienda.

Come già anticipato, il modello si dimostra essere flessibile in quanto, tenendo conto delle articolazioni legislative, tecnico-commerciali ed economiche, offre la possibilità di valutare l’impatto di queste nel computo della compliance, sia in termini di riduzioni di

CO₂ che in termini di costi. Tali parametri rappresentano dunque delle variabili su cui è possibile fare leva per la valutazione degli scenari esaminati.

3.2 Parametri utilizzati

Di seguito si riporta la procedura seguita relativamente alla costruzione del modello. In particolare, la sequenza seguita inizia con un breve cenno sulle tipologie di moto-propulsori considerati, proseguendo con l'implementazione del contesto normativo, in funzione dell'anno considerato, in cui i diversi attori vengono a trovarsi fino ad arrivare ai parametri economici necessari per l'analisi dei differenti scenari.

3.2.1 Parametri tecnico – commerciali

3.2.1.1 Tipologie di powertrain esaminati

I moto-propulsori scelti come protagonisti della tesi in esame sono di seguito elencati:

- I. Motore tradizionale ad accensione per compressione con alimentazione Diesel (di seguito indicato come “*DS base*”)
- II. Motore tradizionale ad accensione per compressione *ottimizzato* (di seguito “*DS – ottimizzato*”). Con il termine “ottimizzato” si vuole intendere una versione uguale alla precedente ma che include una serie di soluzioni tecnologiche che permettono una riduzione dei consumi di combustibili e conseguentemente, trattandosi in tal caso di combustibili fossili, delle emissioni di CO₂. In particolare, le soluzioni tecnologiche scelte sono le seguenti:
 - sistema stop – start
 - disattivazione cilindri
 - il miglioramento delle caratteristiche del veicolo, quali un alleggerimento della massa (-5%) ed una riduzione dei coefficienti di resistenza aerodinamica e di rotolamento (-10%).

Per quanto riguarda i valori delle emissioni di CO₂ delle soluzioni tecnologiche precedenti, è stato scelto di implementare uno script sul software Matlab che permetta di valutare l'impatto di queste sul ciclo omologativo WLTC; in particolare, si rimanda al capitolo 4 per un'analisi di maggior dettaglio di quest'ultimo

- III. Motore ad accensione spontanea alimentato da gas naturale compresso (CNG)
- IV. Puro elettrico (BEV). Con l'acronimo BEV, *Battery Electric Vehicle*, si intende un veicolo avente unicamente propulsione elettrica; in particolare, il motore elettrico utilizza, come fonte primaria di energia, l'energia chimica immagazzinata in una o più batterie ricaricabili che viene resa disponibile da queste al motore sotto forma di energia elettrica.
- V. Ibrido plug-in con motore termico avente alimentazione benzina (PHEV – *Petrol*). Un veicolo ibrido di tipo plug-in presenta la possibilità aggiuntiva di essere collegato anche alla rete al fine di ricaricare la parte elettrica, a differenza dell'ibrido tradizionale dove invece questa può essere rigenerata o dal motore termico o mediante frenata rigenerativa. Un parametro di fondamentale importanza per questa categoria di ibridi è lo stato di carica della batteria (State Of Charge, SOC), il quale rappresenta il livello di carica disponibile rispetto alla capacità complessiva dell'accumulatore.

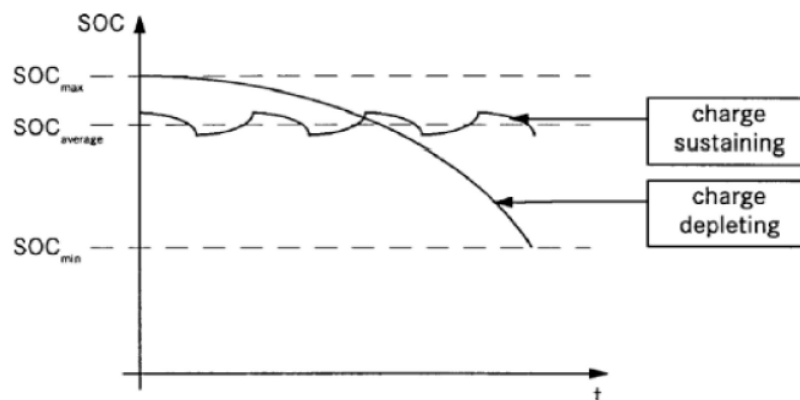


FIGURA 3.2 – STATO DI CARICA DELLA BATTERIA: CHARGE SUSTAINING E CHARGE DEPLETING

E' dunque necessario assicurare uno stato di carica minimo in modo da garantire alla batteria il corretto funzionamento. Osservando la figura 3.2, si può notare la variazione del SOC da un valore massimo (SOC_{max}) ad uno minimo (SOC_{min}). Nel caso di ibrido convenzionale, la batteria lavora utilizzando la modalità di funzionamento "charge sustaining" ossia prevede che, ad intervalli periodici regolari, il motore termico provveda a ricaricare la batteria in modo da mantenere lo stato di carica nell'intorno di un certo valore medio ($SOC_{average}$), riuscendo a garantire le migliori performance da parte del veicolo. Nel caso di

ibrido plug-in invece, il funzionamento avviene secondo due modalità: la prima è di tipo “charge depleting”, ossia durante la fase di trazione in modalità di puro elettrico, dove la batteria parte dal valore con stato di carica massimo e arriva sino al valore minimo; da questo istante in poi, inizia la seconda fase, ovvero il sistema ibrido provvede a far transitare alla modalità di funzionamento “charge sustaining”, comportandosi dunque come un ibrido tradizionale e permettendo distanze più estese

VI. Ibrido range-extender con motore termico avente alimentazione Benzina (*REEV – Petrol*). In questa tipologia di veicoli, il motore termico non è collegato alle ruote, esso assolve il compito di generare la corrente per alimentare il motore elettrico che la trasforma in moto, mentre l’energia superflua viene utilizzata per ricaricare le batterie. Nei momenti in cui viene richiesta una grande quantità di energia, essa viene attinta sia dal motore termico sia dalle batterie.

VII. Ibrido leggero con motore termico avente alimentazione Benzina (*MHEV – Petrol*).

La tecnologia mild hybrid prevede un sistema costituito da una macchina elettrica reversibile che recupera energia durante le fasi di decelerazione e frenata, immagazzinandola in una batteria dedicata, e la restituisce al sistema quando il motore elettrico entra in azione supportando il motore termico, fornendo una quota di potenza supplementare. Questa architettura presenta livelli medi di tensione e potenza, tipicamente valori di tensione superiori a 150 V e potenza di circa 20 kW. Sintetizzando, le caratteristiche ibride che contraddistinguono questo sistema sono: la presenza del sistema stop-start, la possibilità di recuperare energia durante le fasi di decelerazione e frenata, un continuo spostamento delle condizioni operative del motore a combustione interna verso zone a basso consumo ed infine una limitata modalità di funzionamento in puro elettrico, possibile solo a basse velocità e carico. Inoltre si ha la possibilità di adottare un moderato ridimensionamento del motore termico (downsizing ridotto) ed, in aggiunta, avere un rapporto di trasmissione al ponte più lungo. Si hanno inoltre differenti opzioni di layout quali, ad esempio, le configurazioni BAS e FAS.

3.2.1.2 *Caratteristiche commerciali*

Per ogni modello di powertrain analizzato, è stato necessario reperire tutte le caratteristiche commerciali in modo da popolare la flotta considerata. In particolare, sono stati considerati i parametri relativi al motore, alla trasmissione ed al veicolo.

In merito al motopropulsore, si ha:

- tipologia di accensione (SI o CI)
- potenza
- cilindrata / Voltaggio
- combustibile utilizzato (benzina, diesel, gas naturale) / capacità delle batterie

Per quanto concerne la trasmissione, si ha:

- tipologia (manuale, doppia frizione)
- trazione (anteriore, posteriore, integrale)
- numero di marce

Infine relativamente al veicolo, si ha:

- passo (in quanto si è scelto di confrontare veicoli aventi caratteristiche geometriche simili)
- carico utile

3.2.2 *Parametri normativi*

Il passo successivo consiste nell'implementare il contesto normativo, limitandosi, come dichiarato preventivamente, allo scenario di compliance attinente al periodo compreso tra il 2020 e il 2030. Per ogni anno dell'intervallo considerato, sono state inserite tutte le grandezze necessarie per la valutazione della compliance. In particolare, per ogni modello analizzato, sono stati utilizzati i seguenti parametri:

- massa in ordine di marcia (*MRO*), relativamente al periodo compreso tra il 2020 ed il 2024; mentre, per l'intervallo di tempo 2025 ÷ 2030, si fa riferimento alla massa di prova (*TM*)

- emissioni di CO₂ sia in termini *NEDC* (che si ricorda essere ottenuti dai valori misurati sul ciclo *WLTP* e convertiti in valori *NEDC* con l'ausilio dello strumento di correlazione *CO2MPAS* dell' UE) che *WLTP*. Inoltre all'interno di tale modello è possibile modificare i parametri relativi all'equipaggiamento minimo, detto *Low*, e massimo, detto *High* relativamente alla fase di omologazione. Ciò è applicato sia alle emissioni di CO₂ normalizzate al ciclo *NEDC* che alle emissioni di CO₂ normalizzate al ciclo guida *WLTP* in quanto in quest'ultimo ciclo, parametri quali la resistenza a rotolamento, resistenza aerodinamica e l'inerzia del veicolo, risultano avere un impatto differente rispetto al ciclo *NEDC*. Come già annunciato precedentemente, l'anno 2020 rappresenta un anno di fondamentale importanza in quanto durante tale anno sarà calcolato il rapporto (*k*) tra le emissioni *WLTP* e quelle normalizzate al ciclo *NEDC*. Tale rapporto, che deve essere calcolato per ogni costruttore/raggruppamento, impatterà sul target del 2021 e di conseguenza anche sui target del 2025 e del 2030. Risulta dunque scontato osservare che se le emissioni *WLTP* al 2020 risulteranno essere maggiori ed allo stesso tempo quelle *NEDC* minori, il rapporto *k* sarà maggiore e dunque i target relativi al 2021, 2025 e 2030 risulteranno essere maggiori; per cui un costruttore/pool avente tale rapporto di emissioni maggiore risulterà essere più competitivo rispetto a chi invece avrà un rapporto di emissioni al 2020 minore. Infine, è importante evidenziare come il rapporto delle emissioni non tiene conto dei contributi relativi alle eco-innovazioni
- eco-innovazioni (di cui al punto 2.2.4); in particolare, per lo studio in esame, si è scelto di considerare l'alternatore ad alta efficienza, il tetto solare con funzione di carica batterie ed il sistema di illuminazione LED

Una volta noti questi valori, in funzione dell'anno civile considerato, si è passati al calcolo del target di CO₂ relativamente ad ogni singolo modello considerato. In seguito, è stato possibile calcolare il *gap* rispetto al *target*, in modo da valutare lo scostamento che si ha, in termini di emissioni di CO₂, per ogni modello. Il *gap* dal target è ottenuto sottraendo alle *emissioni di CO₂* (*NEDC* o *WLTP*, in base all'anno di compliance di

riferimento) i contributi relativi alle *eco-innovazioni* ed al *target* di CO₂ (calcolato come descritto al capitolo 2) che si ha per il dato veicolo.

E' importante sottolineare come, ai fini del presente studio, il numero delle immatricolazioni degli LCV sia stato assunto costante lungo tutto il periodo considerato; in particolare, tale valore è stato adottato pari a 50'000 unità, facendo riferimento ai dati dell'agenzia europea dell'ambiente (EEA), relativamente al gruppo FCA.

3.2.3 Parametri economici

Focalizzando adesso l'attenzione sui parametri economici, di seguito si riportano le grandezze considerate:

- costi di produzione; in particolare, la cumulata finale risulta dipendere dai parametri selezionabili nei differenti scenari, quali tipologia di powertrain (DS, DS ottimizzato, CNG, BEV, PHEV – Petrol, REEV – Petrol, MHEV –Petrol), tecnologie (stop-start, cylinder deactivation, modifica del piano quotato) ed eco-innovazioni (alternatore ad alta efficienza, LED, tetto solare)
- prezzo di vendita
- indennità per le emissioni in eccesso
- margini/ perdite lordi

La tabella 3.1 riporta per ogni powertrain, il costo di produzione, il prezzo di vendita, i margini/perdite (lordi/e), dove però non è tenuto in considerazione il contributo legato alle sanzioni legislative, ed infine sono riportate le emissioni di CO₂, sia in termini di NEDC che in termini di WLTC.

POWERTRAIN	COST [k€]	PRICE [k€]	GROSS MARGIN/LOSSES [k€]	CO ₂ NEDC [g/km]	CO ₂ WLTP [g/km]
DS base (reference)	22.0	25.0	3.0	185	260
DS optimized	23.1	25.0	1.9	153	240
CNG	24.8	34.3	9.5	234	329
BEV	47.0	45.0	- 2.0	0	0
PHEV Petrol	36.0	37.0	1.0	84	97
REEV Petrol	34.4	36.0	1.6	42	53

MHEV Petrol	23.8	25.0	1.2	225	265
-------------	------	------	-----	-----	-----

TABELLA 3.1 – PARAMETRI ECONOMICI

3.3 Descrizione del modello EcoS

Il modello in esame utilizza un foglio di calcolo *Excel* per la sua implementazione; questo, è strutturato attraverso tre moduli: il modulo principale, denominato *main*, che assolve il compito centrale del modello ed i restanti moduli denominati *eco-innovazioni* e *tecnologie* i quali sono relazionati al *main* e assumono un ruolo subordinato.

Per meglio comprendere il funzionamento del modello, si è scelto di iniziare dai moduli *eco-innovazioni* e *tecnologie*.

3.3.1 Modulo Eco-innovazioni

Il modulo *eco-innovazioni* ha come obiettivo quello di fornire al modulo principale *main* tutte le informazioni relative, come si evince dal nome, alle eco-innovazioni. Entrando nel dettaglio, fissato un certo powertrain con le relative caratteristiche, tale modulo include, per ogni eco-innovazione scelta, il benefit che queste apportano sia in termini di emissioni di CO₂ normalizzate al ciclo *NEDC* sia in termini di emissioni di CO₂ relativi alla *WLTP*. Oltre ai valori di CO₂, sono tenuti in considerazione anche i costi necessari all'implementazione delle eco-innovazioni; in particolare si è scelto di considerare, per ogni eco-innovazione, il costo relativamente agli anni 2020 – 2025 – 2030.

Powertrain Model	Solar Roof				
	<i>NEDC</i>	<i>WLTP</i>	2020Cost	2025Cost	2030Cost
	[g/km]	[g/km]	[€]	[€]	[€]
DS base	2%	1%	786	593	504
DS optimized	2%	1%	786	593	504
CNG	3%	2%	786	593	504
BEV	0%	0%	0	0	0
PHEV Petrol	2%	1%	786	593	504
REEV Petrol	2%	1%	786	593	504
MHEV Petrol	2%	1%	786	593	504

TABELLA 3.2 – ESTRATTO MODULO ECO-INNOVAZIONI: SOLAR ROOF

Facendo riferimento alla tabella 3.1 che riporta un estratto del modulo relativo alle eco-innovazioni, si possono notare i contributi relativi al *Solar Roof* per ogni modello di powertrain considerato al fine di poter valutare l'impatto che questo ha, sia in termini di benefit di CO₂ che in termini di costo, nei differenti scenari esaminati. Si ritiene doveroso proporre una breve descrizione delle eco-innovazioni considerate; in particolare, si ha:

- alternatore ad alta efficienza (HEA) – come è noto, l'efficienza del motore di un veicolo è conseguenza diretta dell'efficienza dell'alternatore. Un alternatore standard ha un'efficienza prossima al 67%, mentre un alternatore HEA, permette di garantire un'efficienza compresa tra il 73% e, in alcuni casi consente di superare, il 78% garantendo dunque una ricarica più rapida della batteria. Di conseguenza, questi alternatori risultano molto efficienti nelle condizioni di bassi regimi del motore e quindi sono ideali per l'uso nei sistemi Stop-Start. La batteria è sufficientemente ricaricata dopo ogni arresto e consente il riavvio senza alcuna perdita di potenza. Gli alternatori ad alta efficienza utilizzano diodi ad alta efficienza (High Efficiency Diodes, HED) anziché quelli convenzionali, senza comportare alcun tipo di impatto sulle dimensioni dei componenti e sul packaging. In tal modo, dunque, si riesce a migliorare l'efficienza del motore e quindi a ridurre le emissioni di CO₂
- sistema di illuminazione esterna che si avvale di diodi a emissione di luce (LED) – adottare sistemi di questo tipo comporta una riduzione di circa la metà dell'elettricità richiesta rispetto ai fari alogeni convenzionali; ciò si traduce in modesti risparmi di combustibile durante il funzionamento. Ovviamente, i risparmi effettivi dipendono dal loro uso, con benefici maggiori nei paesi del Nord Europa dove le ore diurne sono inferiori. Un ulteriore vantaggio è dato dal fatto che i fari a LED dovrebbero durare per tutta la vita del veicolo. Per quanto riguarda gli svantaggi, si ha che questi hanno una maggiore propensione alla formazione del ghiaccio durante la stagione fredda, poiché generano molto meno calore rispetto alle lampadine alogene

- tetto solare – questa tecnologia permette, mediante un pannello solare integrato sul tetto del veicolo, di produrre elettricità la quale viene utilizzata per alimentare direttamente la batteria. Ciò comporta una riduzione del carico sull’alternatore che si traduce in una riduzione del consumo di combustibile ed in un migliore comfort termico. Inoltre, l’adozione di questa eco-innovazione, favorisce la *green image* dell’azienda.

3.3.2 Modulo Tecnologie

Analogamente al modulo *eco-innovazioni*, anche per il modulo relativo alle tecnologie è stato usato il medesimo approccio in quanto, questo, svolge la funzione di fornire i valori di emissione e di costo relativamente alle tecnologie implementate.

Come accennato precedentemente, i contributi delle emissioni di CO₂ per le differenti tecnologie sono stati ottenuti mediante implementazione sul software Matlab, simulando dunque l’impatto di queste sui cicli omologativi *NEDC* e *WLTP*.

Powertrain Model	Stop-Start				
	<i>NEDC</i>	<i>WLTP</i>	2020Cost	2025Cost	2030Cost
	[g/km]	[g/km]	[€]	[€]	[€]
DS base	0.0%	0.0%	0	0	0
DS optimized	8.3%	3.0%	128	96	89
CNG	8.3%	3.0%	128	96	89
BEV	0.0%	0.0%	0	0	0
PHEV Petrol	8.3%	3.0%	128	96	89
REEV Petrol	8.3%	3.0%	128	96	89
MHEV Petrol	8.3%	3.0%	128	96	89

TABELLA 3.3 – ESTRATTO MODULO TECNOLOGIE: SISTEMA STOP-START

La tabella 3.2 riporta un estratto del modulo relativo alle tecnologie e, in particolare, mostra i contributi relativi alla tecnologia stop-start sia in termini di riduzione delle emissioni di CO₂ (benefit) che in termini di costi. E’ importante sottolineare come sia imposto il valore nullo al powertrain DS (ovvero la versione base) in quanto, nello studio in esame, tale versione non prevede tale tecnologia.

Per quanto riguarda i costi, come si evince dalla tabella, sono stati considerati gli anni di riferimento 2020 – 2025 – 2030, riproponendo le stesse assunzioni fatte al punto 3.3.2.

3.3.3 Modulo Main

Focalizzando adesso l'attenzione sul modulo principale, definito *main*, si ha che questo tiene in considerazione tutti i parametri precedentemente discussi e necessari all'analisi degli scenari considerati. Come annunciato precedentemente, il modulo *main*, assolve il compito centrale della tesi e dunque esso permette di valutare differenti scenari al fine di giungere alle conclusioni ricercate. Il modulo *main* è correlato alle due restanti interfacce (di cui si è discusso rispettivamente ai punti 3.3.1 e 3.3.2) mediante una sorta di *flag* attraverso i quali, l'utente può decidere se attivare o disattivare, nel computo dell'intero scenario esaminato, una certa eco-innovazione piuttosto che una determinata tecnologia al fine di determinare l'influenza che queste hanno sia in termini di riduzione di CO₂ che in termini di costi.

Powertrain Model	Eco-innovations			Technologies	
	Solar Roof	HEA	LED	Engine Stop Start System	Cylinder Deactivation
DS base	0	0	0	0	0
Ds optimized	1	1	1	1	1
CNG	1	0	1	0	0
BEV	0	0	0	0	0
PHEV Petrol	1	0	1	0	0
REEV Petrol	1	0	1	0	0
MHEV Petrol	1	0	1	0	0

TABELLA 3.4 – ESTRATTO MODULO MAIN

Dalla tabella 3.3 si evince come, per ogni modello di powertrain considerato, sia possibile selezionare unicamente il valore 0, corrispondente alla disattivazione, o 1, per l'attivazione del parametro desiderato. Se, ad esempio, si considera il powertrain ad accensione per compressione nella versione ottimizzata (indicato come *DS optimized*), andando a selezionare il valore 1, relativamente alla eco-innovazione HEA, il modulo *main* terrà in considerazione, nello scenario esaminato, sia i benefit di CO₂ che i costi in merito a questa eco-innovazione in quanto andrà a "prelevare" i valori di riferimento presenti nei due moduli di supporto precedentemente discussi.

Seguendo la sequenza utilizzata in sede di implementazione si ha che, per ogni modello di powertrain, sono stati riportati i relativi parametri commerciali di cui al punto 3.2.1.2. Successivamente è stata introdotta, anno per anno, per il periodo compreso tra il 2020 ed il 2030, il relativo scenario di compliance. Oltre alle grandezze relative al modello, calcolate come spiegato durante il paragrafo 3.2, sono stati calcolati i valori in termini di flotta del pool/costruttore.

I parametri di flotta, per una certa grandezza, sono ottenuti mediante una media pesata; in particolare, i valori di ogni singolo modello della grandezza in esame vengono ponderati per il relativo numero di immatricolazioni (detti anche *mix di volumi*) e rapportate al totale delle immatricolazioni che si hanno per l'anno civile di riferimento (il cui valore, si ricorda, essere assunto costante e pari a 50'000 veicoli).

In particolare i parametri di flotta considerati sono i seguenti:

- *massa in ordine di marcia (MRO)* dal 2020 al 2024 e, come specificato nella WLTP al fine di riflettere meglio la massa del veicolo su strada, dal 2025 la *massa di prova del veicolo (TM)*; entrambe espresse in kg
- *CO₂ normalizzata al ciclo NEDC*, presente solo per la compliance del 2020, come imposto dal Regolamento
- *CO₂ in termini di WLTP*, presente anche nello scenario 2020 in quanto necessario per calcolare il rapporto *k* (di cui al capitolo 2) ma non utile nel computo della compliance; mentre, dal 2021 in avanti la compliance utilizza solo ed esclusivamente i valori WLTP.
- *Target di CO₂*
- *Gap dal target*
- *Costi di produzione*, il cui valore finale è ottenuto attraverso la sommatoria dei contributi dati dal prodotto tra il costo di ogni singolo modello (che sarà funzione della tipologia di powertrain, dell'alimentazione, della trasmissione, dei parametri relativi al veicolo, delle tecnologie implementate ed infine delle eco-innovazioni presenti) ed il relativo numero di immatricolazioni
- *Prezzo di vendita*

Successivamente, è necessario calcolare le *indennità per le emissioni in eccesso*, le quali, come imposto dalla normativa, sono ottenute dal prodotto di tre fattori di seguito riportati:

- il gap che si ha, in termini di emissioni di CO₂ relativamente alla flotta esaminata, rispetto al target
- il numero delle immatricolazioni (assunto costante in tutto il periodo di riferimento)
- coefficiente moltiplicativo, pari a $95 \left[\frac{\text{€}}{\text{g/km}} \right]$

Noti tutti i parametri di flotta suddetti, è possibile procedere al calcolo del *profitto economico* mediante la differenza tra il *prezzo di vendita* ed il contributo dato dalla somma tra i *costi di produzione* e le eventuali *indennità da pagare/crediti ottenibili per le emissioni in eccesso*.

Si può dunque procedere alla valutazione degli scenari; in particolare, forniti i parametri di input di cui al punto 3.2, mediante la funzione di analisi di Excel “*Risolutore*” è possibile ottimizzare il profitto economico facendo leva sui mix di volumi di vendita relativamente ai modelli considerati per un certo scenario. Tale funzione infatti, permette, fissate certe condizioni (sia dal punto di vista matematico che dal punto di vista della sostenibilità), di trovare il *mix ottimale* in termini di volumi di vendita per lo scenario in esame.

In altri termini, con l’espressione *mix ottimale* si intende la migliore ripartizione del numero totale di immatricolazioni, pari a 50'000 unità all’anno, tra i vari powertrain scelti negli scenari studiati.

Per ogni scenario, sono state eseguite una serie di simulazioni al fine di raggiungere il miglior compromesso costi – benefici ribadendo sempre quello che rappresenta l’obiettivo dei costruttori: incrementare il profitto economico.

I risultati ottenuti mediante questo modello sono mostrati al capitolo 5.

4. Modelli matematici (Matlab) per la valutazione delle tecnologie sulle emissioni di CO2

4.1 Descrizione del modello DyVE (Dynamic Vehicle Energy management)

Si analizza adesso il modello DyVE, sviluppato in ambiente Matlab, il quale si concentra sulla componente tecnica della trattazione in esame e che contribuisce in modo significativo al raggiungimento dell'obiettivo prefissato.

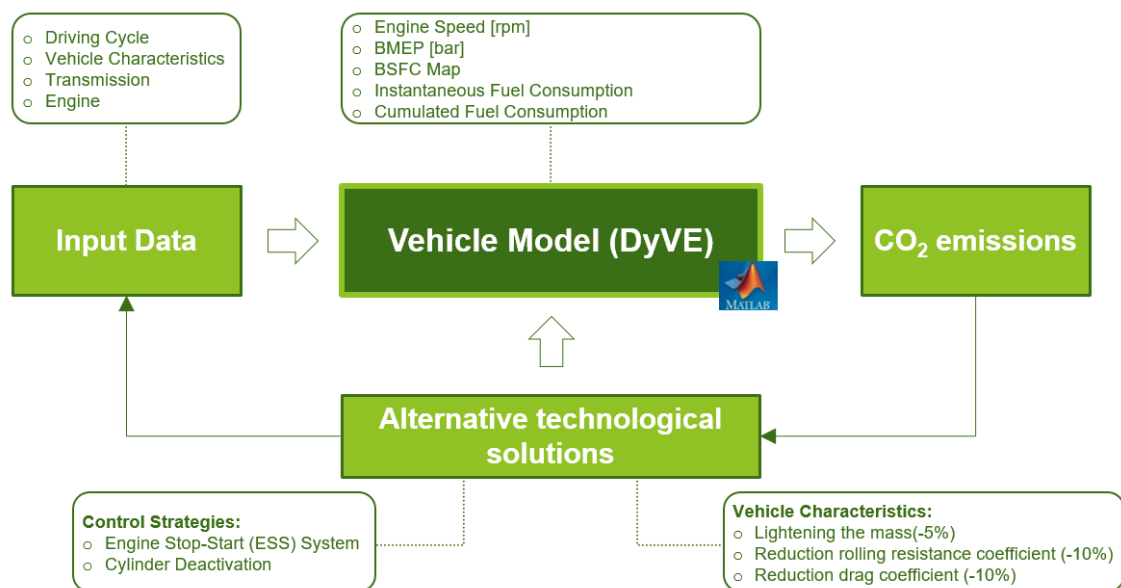


FIGURA 4.1 – SCHEMATIZZAZIONE DEL MODELLO DYVE

La figura 4.1 riporta la schematizzazione del modello DyVE. Partendo dai dati di input che si traducono nei dati necessari al ciclo omologativo WLTC, nelle caratteristiche del veicolo (coefficienti di "coast down", massa, raggio ruota, ecc.), nei dati relativi alla trasmissione (rapporti di trasmissione, rendimento della trasmissione) ed in quelli riferiti al motore (quali ad esempio la curva di "full load", la mappa motore contenente solo alcuni punti di funzionamento ottenuti da prove al banco), è possibile, mediante il modello DyVE, ottenere un modello di veicolo che, inizialmente, risulta essere nella configurazione "base" (ovvero privo di tutte le soluzioni tecnologiche esaminate nel seguito). Il modello di veicolo contiene le grandezze relative al ciclo omologativo quali ad esempio, i regimi motore (Engine Speed), la pressione media effettiva (BMEP), il consumo di combustibile istantaneo (Instantaneous Fuel Consumption), cumulato

(Cumulated Fuel Consumption), mappa dei consumi specifici (BSFC map) al fine di ottenere l'output ricercato: le emissioni di CO₂ durante il ciclo omologativo WLTC.

Successivamente, è stato valutato l'impatto sulle emissioni di CO₂ delle soluzioni tecnologiche illustrate in figura e che saranno discusse nel seguito del capitolo in esame. In tal modo è possibile valutare la migliore configurazione del generico LCV (appartenente al segmento "midsize- large") avente powertrain tradizionale con alimentazione Diesel (denominato "DS optimized").

Il veicolo in questione, è stato sottoposto al ciclo guida, secondo la procedura WLTP, in modo da poterne valutare, dapprima le emissioni relativamente al caso *DS base* e successivamente quelle del caso *DS optimized*.

Per lo studio in esame, si è scelto di considerare l'effetto del sistema *stop-start*, della *disattivazione dei cilindri* ed è stato simulato anche l'impatto dovuto alla variazione di alcune caratteristiche del veicolo quali, un alleggerimento della massa ed una riduzione sia del coefficiente di resistenza aerodinamica che della resistenza a rotolamento.

4.1.1 Parametri caratteristici

Nella tabella 4.1, di seguito riportata, sono riassunti i parametri caratteristici necessari alla stesura dello script.

Grandezza	Valore	Unità di misura
Momento d'inerzia motore (J_{Motore})	0.33	$[kg \cdot m^2]$
Momento d'inerzia ruote (J_{Ruote})	4.8804	$[kg \cdot m^2]$
Consumo di combustibile al minimo	649	$[g/h]$
Velocità di Rotazione al Minimo	800	$[rpm]$
Densità del combustibile	835	$[g/l]$
Raggio ruota	353.3	$[mm]$
Cilindrata motore	2.287	$[dm^3]$
Numero di cilindri	4 in linea	$[-]$
Numero marce del cambio	6	$[-]$
Rapporto di trasmissione al ponte (τ_p)	4.867	$[-]$
Rapporto di trasmissione 1° marcia ($\tau_{marcia1}$)	4.273	$[-]$
Rapporto di trasmissione 2° marcia ($\tau_{marcia2}$)	2.474	$[-]$
Rapporto di trasmissione 3° marcia ($\tau_{marcia3}$)	1.462	$[-]$
Rapporto di trasmissione 4° marcia ($\tau_{marcia4}$)	0.955	$[-]$
Rapporto di trasmissione 5° marcia ($\tau_{marcia5}$)	0.695	$[-]$
Rapporto di trasmissione 6° marcia ($\tau_{marcia6}$)	0.552	$[-]$
Rendimento della trasmissione (η_t)	0.95	$[-]$
Massa in ordine di marcia	1995	$[kg]$
Coast Down F_0	129.4	$[N]$
Coast Down F_1	0.35	$\left[\frac{N}{km/h} \right]$
Coast Down F_2	0.0822	$\left[\frac{N}{(km/h)^2} \right]$

TABELLA 4.1 – PARAMETRI CARATTERISTICI GENERICO VEICOLO MIDSIZE-LARGE

4.1.2 Assunzioni utilizzate nel modello

Il modello utilizzato per la simulazione è caratterizzato dalle seguenti semplificazioni:

- si trascura il transitorio termico iniziale, viene quindi simulato il cosiddetto “Ciclo caldo”; nella reale procedura di omologazione invece, si prevede che il ciclo venga eseguito ad una temperatura di 23°C;
- il profilo di velocità preso in considerazione è quello ideale; si ipotizza quindi che il guidatore sia in grado di seguire alla perfezione il ciclo guida previsto dalla normativa (viene seguito l’approccio cinematico, il quale prevede un metodo di tipo “BACKWARD” ovvero prevede il calcolo della velocità angolare del motore attraverso la velocità della ruota);
- non si tiene conto della variazione di efficienza del cambio in funzione della coppia;
- si trascurano gli effetti dei fenomeni transitori; nella realtà il motore si sposta da un punto ad un altro con dei transitori, per cui la descrizione del motore a combustione tramite mappe può essere limitativa in quanto viene a perdersi l’impatto degli effetti dinamici, come ad esempio il *Turbolag*.

Nel caso in esame, dunque, si è tenuto conto di una successione di stati stazionari in cui il veicolo si trova a regime termico, il cambio avviene in maniera istantanea e lo scostamento dal profilo ideale delle velocità è nullo.

Di seguito, in figura 4.1, si riporta il ciclo guida relativo alla procedura WLTP per il veicolo scelto come riferimento.

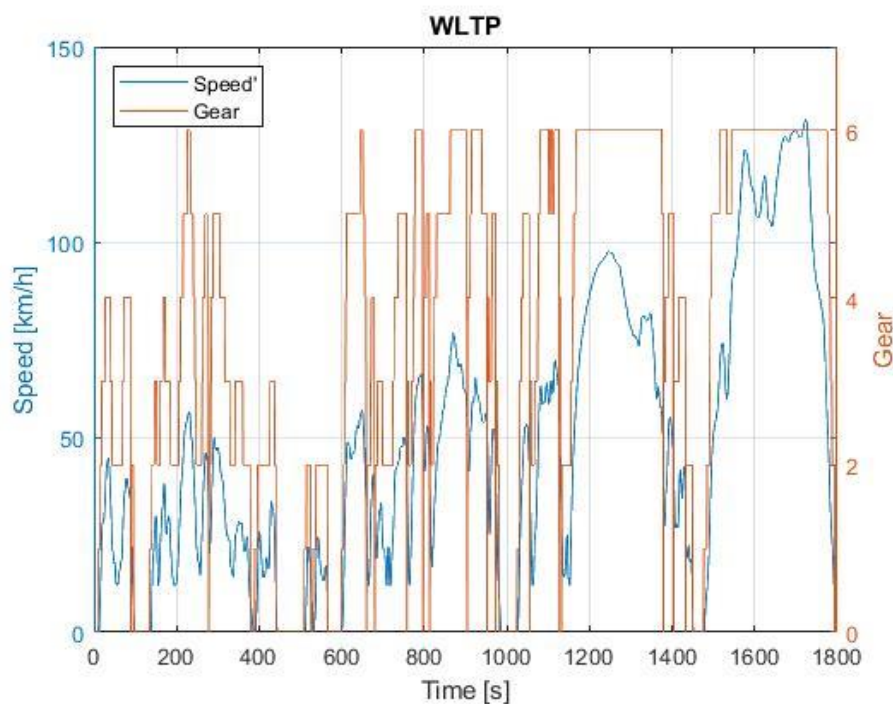


FIGURA 4.2 – CICLO GUIDA WLTC

4.2 Procedura operativa

Di seguito è riportata la procedura seguita per l'implementazione dello script che costituisce da una parte uno strumento di "pre-setting" utilizzabile per studi futuri e dall'altra permette di valutare l'efficacia delle soluzioni tecnologiche precedentemente citate sulle emissioni di CO₂. Il lavoro svolto può essere condensato nei seguenti punti:

1. Determinazione punti operativi (caso "base")
 - Calcolo del numero di giri del motore
 - Calcolo pressione media effettiva
2. Calcolo consumo di combustibile (caso "base")
3. Calcolo emissioni CO₂ (caso "base")
4. Implementazione strategie di controllo motore
 - Stop – Start
 - Disattivazione cilindri
 - Offset consumo di combustibile
5. Variazione caratteristiche veicolo
 - Alleggerimento della massa (- 5%)
 - Riduzione del coefficiente di resistenza aerodinamica (- 10%)

- Riduzione del coefficiente di resistenza a rotolamento (- 10%)
6. Calcolo dei consumi e delle emissioni di CO₂ relativamente ai punti 4 ed 5 del presente paragrafo al fine di ottenere la configurazione “DS optimized”

4.2.1 Determinazione punti operativi (caso Base)

4.2.1.1 Calcolo del numero di giri del motore

Il dato di partenza che rappresenta il vincolo operativo della prova è il profilo di velocità imposto dal ciclo omologativo ed il profilo di cambio marcia da utilizzare. Noti i suddetti dati e le caratteristiche del veicolo, quali rapporti di trasmissione e la dimensione della ruota, è possibile risalire alla velocità di rotazione del motore durante ogni istante del ciclo applicando la relazione seguente:

$$rpm = \frac{v \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot R_O \cdot 3.6} \cdot \tau_p \cdot \tau_{marcia} \quad (4.1)$$

In cui v è la velocità del veicolo nell’istante considerato, R_O il raggio della ruota, τ_p il rapporto al ponte e τ_{marcia} il rapporto di trasmissione della relativa marcia ingranata. L’andamento che si ottiene è riportato in figura 4.2.

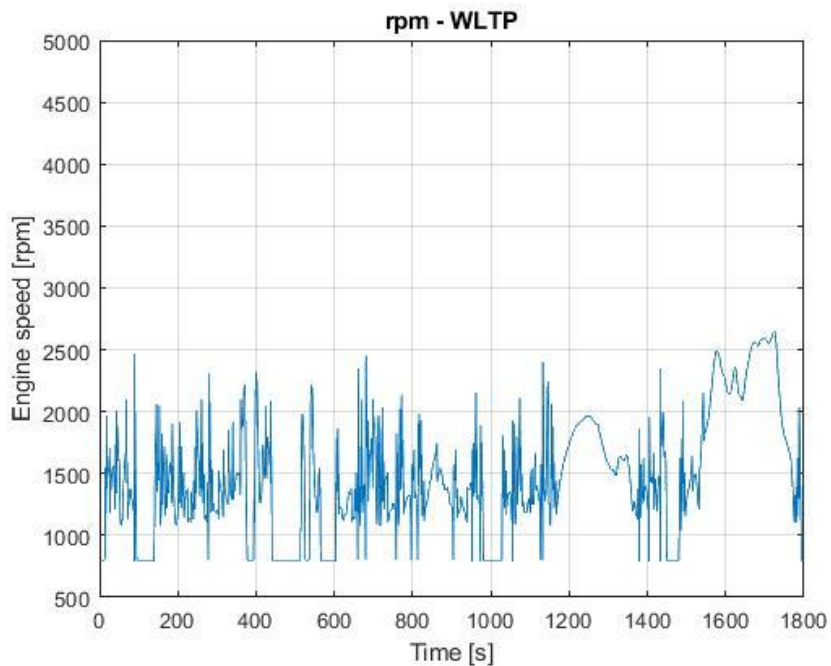


FIGURA 4.3 – ANDAMENTO REGIME MOTORE

Durante l'esecuzione del ciclo vi sono delle fasi in cui la velocità del veicolo è nulla e, in tal caso, il regime del motore coincide con quello minimo, di conseguenza, laddove i valori di regime calcolati risultassero inferiori al numero di giri minimo, è stato necessario imporli pari al valore di regime minimo.

4.2.1.2 Calcolo della pressione media effettiva

Per quanto riguarda la pressione media effettiva (nel seguito pme o $bmeP$) è stato necessario valutare la potenza utile richiesta al veicolo in funzione delle forze dissipative che agiscono sul sistema, la cilindrata e la velocità angolare del motore. Si è calcolata la forza resistente in ogni istante di tempo:

$$F_{res} = F_0 + F_1 \cdot v + F_2 \cdot v^2 \quad (4.2)$$

in cui con F_0 , F_1 ed F_2 si indicano i tre *coefficienti di coastdown* e con v la velocità del veicolo.

Si passa dunque al calcolo della potenza utile richiesta al motore P_u , la quale è ottenuta dal rapporto tra la potenza necessaria richiesta all'avanzamento del veicolo e le perdite legate alla trasmissione che sono tenute in considerazione mediante il rendimento di trasmissione η_T (assunto costante) come riportato dalla relazione seguente:

$$P_u = \frac{F_{res} \cdot v + m_{tras} \cdot \frac{dv}{dt} \cdot v}{\eta_T} \quad (4.3)$$

Osservando il numeratore, si ha che m_{tras} rappresenta il valore delle masse traslanti, per il cui calcolo si è applicato la seguente formula (ottenuta dall'equilibrio dell'energia cinetica dove è stato trascurato il contributo delle inerzie relative al cambio e al semiasse) che coinvolge la massa del veicolo $m_{veicolo}$, il momento d'inerzia delle ruote J_{ruota} , di raggio R_0 e il momento d'inerzia del motore J_{motore} :

$$m_{tras} \cong m_{veicolo} + J_{ruote} \cdot \frac{1}{R_0^2} + J_{motore} \cdot \frac{\tau_{marcia}^2 \cdot \tau_p^2}{R_0^2} \quad (4.4)$$

Nota la potenza utile richiesta al motore P_u , i regimi rpm del motore e la cilindrata V , si è passati al calcolo della pme , mediante la relazione seguente:

$$pme = 1.2 \cdot \frac{P_u}{rpm \cdot V} \quad (4.5)$$

In figura 4.3 è riportato l'andamento della pme (indicata con bme_p) in funzione del tempo.

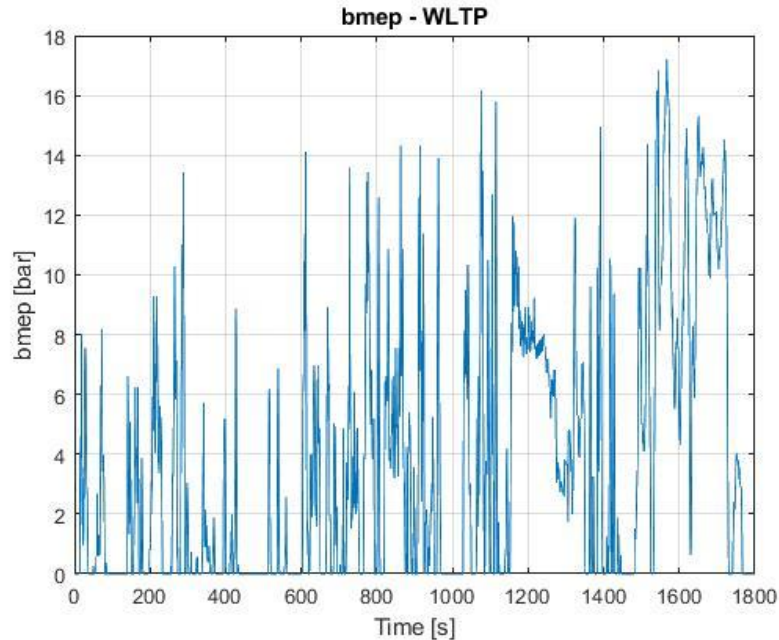


FIGURA 4.4 – ANDAMENTO PRESSIONE MEDIA EFFETTIVA CASO BASE

Facendo riferimento al profilo delle velocità, potrebbero sussistere delle situazioni in cui, durante le manovre di decelerazione, la potenza richiesta dal guidatore risulti negativa e, di conseguenza, si otterrà una pme negativa e ciò non alcun senso fisico. In tali situazioni, quindi, è stata imposta una pme nulla come risulta dai relativi grafici.

Noti gli andamenti della velocità angolare del motore e della pressione media effettiva, è possibile creare, istante per istante, la condizione operativa del motore durante la prova di omologazione. In figura 4.4 è riportato il piano quotato relativamente al caso base (ovvero il caso in cui non è presente nessuna delle tecnologie e modifiche di cui si è discusso all'inizio del capitolo in esame) con i punti operativi relativi alla procedura *WLTP*.

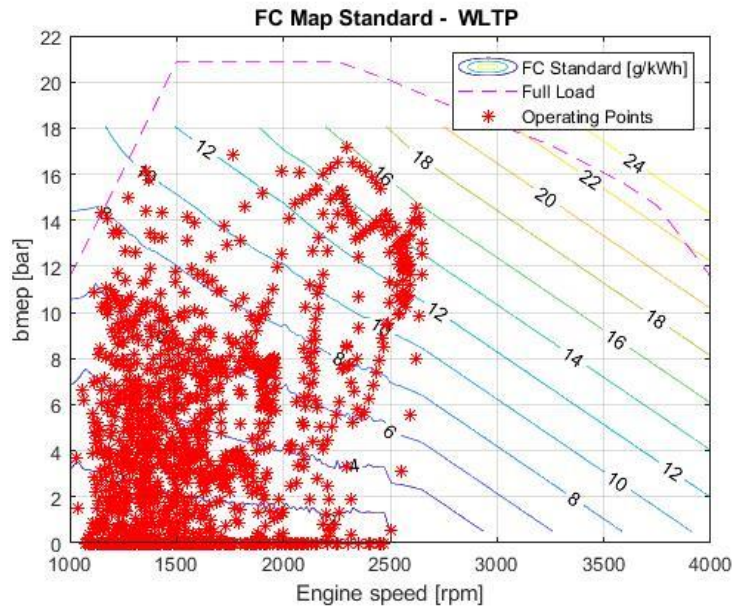


FIGURA 4.5 – PIANO QUOTATO: CASO BASE

Per ottenere tale grafico è stato necessario limitare la pme rispetto alla curva di pieno carico (*Full Load*) in quanto, durante l'esecuzione del ciclo, sono stati individuati dei punti di funzionamento ben al di sopra della *FL*; naturalmente, si tratta di condizioni non sostenibili dal motore, dal momento che richiederebbero una potenza erogata maggiore di quella che il motore è effettivamente in grado di rendere disponibile.

4.2.2 Calcolo dei consumi (caso Base)

Si passa adesso al calcolo del consumo di combustibile nell'unità di tempo. I dati di partenza messi a disposizione sono relativi alle prove eseguite al banco le quali forniscono tre vettori colonna: *regime di rotazione*, *pressione media effettiva* e *consumo istantaneo di combustibile*. Dovendo calcolare il consumo del motore nell'unità di tempo, passando dai valori ottenuti al banco ai valori relativi al ciclo omologativo, è necessario creare una mappa di consumo costituita da una superficie di punti continua e regolare. In questo modo, avendo a disposizione una mappa di consumo, è possibile, entrando con i valori di *regime di rotazione* e di pme , per ogni punto operativo, eventualmente interpolando linearmente, ricavare per ogni istante il consumo del motore nell'unità di tempo.

La "trasformazione" dal vettore colonna relativo ai consumi (in funzione del regime di rotazione e della pme) fornito dalle prove al banco alla mappa che identifica la superficie

di punti continua e regolare, è stata resa possibile mediante l'utilizzo di una funzione molto potente offerta dal software Matlab definita "scatteredInterpolant", la quale appunto permette l'interpolazione su un set di dati sparsi 2D o 3D. Ottenuta dunque la mappa contenente i valori istantanei è possibile integrare questi per tutto il tempo della simulazione, risalendo di conseguenza ai consumi totali. Si osservi che la mappa fornita non prevedeva il consumo di combustibile riferito alle condizioni aventi $p_{me} < 0.48bar$ e $regime\ motore < 1000\ rpm$. I valori di consumo relativi a questo campo sono stati assunti pari al valore minimo che è di 0.649 kg/h. In figura 4.5 si riporta l'andamento della portata istantanea di combustibile relativamente ai punti di funzionamento.

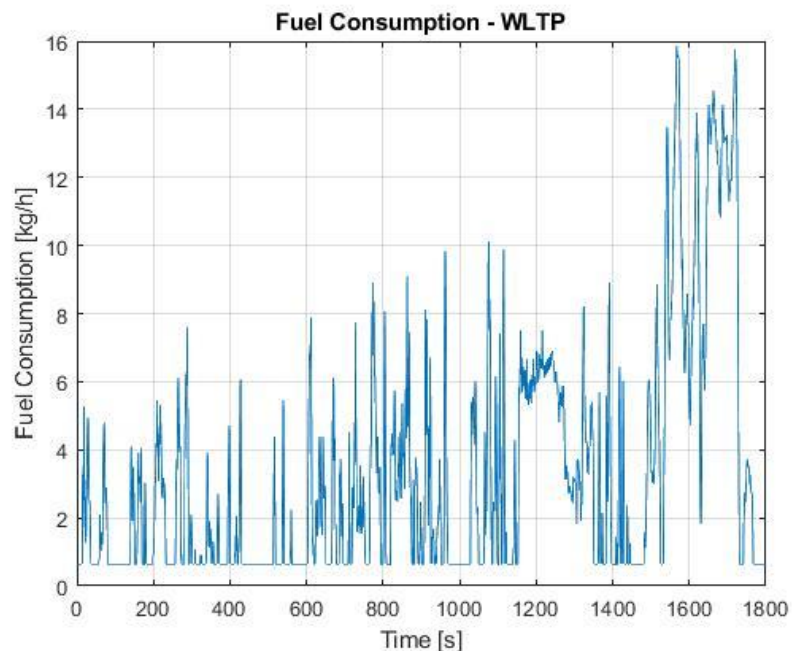


FIGURA 4.6 – CONSUMO DI COMBUSTIBILE CASO BASE

4.2.3 Calcolo delle emissioni di CO₂ (caso Base)

Per il calcolo delle emissioni di CO₂ si è usato un modello che correla linearmente il consumo di combustibile alle emissioni al chilometro di anidride carbonica. È possibile adottare questa semplificazione se si considera che la produzione di CO₂, per questi processi di combustione, è diversi ordini di grandezza superiore a quella degli altri prodotti (CO, HC, ecc.). Per il calcolo è stata applicata la relazione seguente:

$$m_{CO_2} \left[\frac{g}{km} \right] = \frac{\rho_{fuel}}{0.0315} \cdot V \quad (4.6)$$

in cui ρ_{fuel} è la densità del combustibile espressa in $[kg/dm^3]$, V è il volume di combustibile consumato su 100km, espresso dunque in $[l/100km]$ (ovvero coincidente con la cumulata finale del consumo), calcolato integrando, mediante metodo dei trapezi, la portata istantanea di combustibile consumato $[kg/h]$, infine, 0.0315 indica un fattore derivante dalle semplificazioni attuate in tale modello.

4.2.4 Strategie di controllo

Sono state analizzate diverse strategie di controllo, quali *stop-start*, *disattivazione cilindri* e un *offset del consumo di combustibile*. Di seguito si riporta una breve descrizione delle strategie suddette.

4.2.4.1 Stop-Start

La tecnologia di *Stop-Start* prevede lo spegnimento del motore nelle situazioni di stazionamento in folle al regime minimo di rotazione. Questo sistema ha trovato ampia diffusione soprattutto a causa dei lunghi periodi in cui il veicolo è fermo che caratterizzano il ciclo *NEDC*; in questo modo, è possibile ridurre sensibilmente le emissioni e i consumi durante il test omologativo.

In aggiunta a questo, nella procedura di calcolo, è stato considerato anche il *cut-off*, il quale non prevede una modifica strutturale del veicolo bensì una modifica del software di controllo; in particolare, il *cut-off* consiste nell'interruzione della mandata di combustibile nelle situazioni in cui il motore viene trascinato dal veicolo.

Per quanto riguarda l'implementazione, partendo dal *cut-off*, si è importato il vettore dei consumi ottenuto nel caso base, nel nuovo vettore di consumo che tiene conto di tale variazione: con una condizione logica si annullano i valori di consumo del vettore in questione quando la potenza richiesta è negativa (ovvero quando il veicolo sta frenando) e il regime del motore è maggiore di 1000 rpm (ovviamente, qualora tale condizione non fosse verificata, l'iniezione del combustibile non viene interrotta in quanto si verificherebbero degli stazionamenti che porterebbero le ruote ad essere frenate eccessivamente e ciò, ovviamente, risulta sgradevole per il guidatore). Passando adesso allo *stop-start*, l'implementazione è simile a quella effettuata per il *cut-off*, eccetto che per le condizioni per cui si annulla il valore di consumo di combustibile: in questo caso,

infatti, i valori vengono posti pari a zero quando si verificano le condizioni per le quali il veicolo ha velocità nulla e non è innestata alcuna marcia.

E' importante sottolineare come la strategia dello *stop-start*, per essere attuata dalla centralina, richiede al motore di avere raggiunto le condizioni di regime termico o, in altri termini richiede il raggiungimento della temperatura di light-off del catalizzatore; in caso contrario, come ad esempio nella prima fase del ciclo dove è prevista la partenza da fermo, lo stop-start non viene attuato.

Con i nuovi valori ottenuti sono stati valutati il consumo al km del veicolo ed i litri necessari a percorrere 100 km. A questo punto, applicando la relazione (4.6) si calcola il valore delle emissioni di CO₂.

4.2.4.2 Disattivazione cilindri

La pratica della disattivazione dei cilindri ha lo scopo di ridurre il consumo di combustibile migliorando l'efficienza del motore durante le situazioni di funzionamento a basso carico; in particolare, in queste condizioni, si mantengono attivi meno cilindri ma a pieno carico. Come è noto, differentemente dai motori ad accensione comandata dove la regolazione del carico avviene regolando sia il quantitativo di combustibile che la quantità di aria aspirata in modo da mantenere la dosatura nell'intorno dello stechiometrico, nei motori ad accensione per compressione la parzializzazione del carico avviene semplicemente gestendo la quantità di combustibile iniettato in quanto viene meno la necessità di mantenere una dosatura stechiometrica. L'applicazione della disattivazione dei cilindri è realizzabile anche nei motori ad accensione per compressione, in quanto, la presenza di un gruppo di sovralimentazione consente di amplificare l'effetto dell'aumento di pressione, di aumentare la quantità di aria introdotta nel cilindro, di ridurre ulteriormente le perdite per pompaggio e di incrementare il carico elaborato dal singolo cilindro per la mancanza del limite dovuto alla detonazione (fenomeno che invece risulta essere presente nei motori ad accensione comandata che utilizzano combustibili con ritardi di accensione relativamente elevati, ovvero bassa reattività, come benzina, gas naturale, GPL). Tuttavia bisogna tenere in considerazione la presenza sia del circuito di EGR (dove con questo termine si intende l'introduzione, all'interno della camera di combustione, di un certo quantitativo di gas

combusti ricircolati) che del gruppo turbocompressore i quali complicano notevolmente la calibrazione del sistema, per cui il beneficio che si può ottenere dalla disattivazione dei cilindri è fortemente correlato alla regolazione di tali parametri durante le nuove condizioni di funzionamento con i cilindri disattivati. La sequenza degli interventi seguiti durante la disattivazione dei cilindri è la seguente.

- sospensione dell'iniezione di combustibile
- chiusura delle valvole di scarico
- chiusura delle valvole di aspirazione

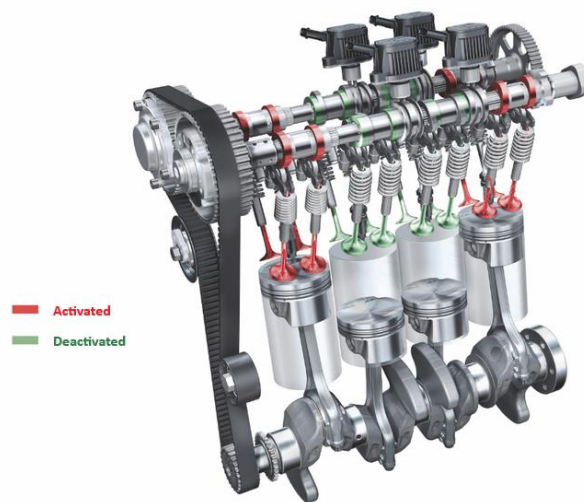


FIGURA 4.7 - ESEMPIO DI DISATTIVAZIONE CILINDRI PER UN MOTORE AVENTE QUATTRO CILINDRI IN LINEA CON I DUE PIÙ INTERNI DISATTIVATI E I RESTANTI ATTIVI

La disattivazione cilindri impatta sul piano quotato, deformandolo nella zona in cui questa agisce; in particolare, per la sua implementazione sul software Matlab, è stata seguita la seguente procedura:

- identificazione della zona sulla quale interviene tale tecnologia; in particolare, è noto che tale tecnologia ha un impatto nella zona compresa tra 1500 rpm e 3000 rpm per quanto riguarda i regimi di rotazione, mentre, relativamente alla pressione media effettiva, tra i valori di 1.5 bar e 5 bar
- da analisi precedenti è noto l'effetto di tale tecnologia, in termini di consumo di combustibile, solamente su alcuni punti; in particolare, questi sono rappresentati nella figura 4.7 in verde scuro. Si evince come sia noto il consumo di combustibile, limitatamente alle condizioni di pme pari a 1.5 bar e 5 bar, solo in

corrispondenza dei valori di regime rispettivamente 1500, 2000 e 3500 rpm. Più specificatamente, la disattivazione cilindri trova il suo effetto massimo in prossimità del valore di 1.5 bar mentre il suo contributo risulta nullo laddove si raggiunge il valore di 5 bar dove appunto il piano quotato risulta analogo alla condizione base in cui, cioè, non si ha tale tecnologia

- successivamente, noti questi punti, si è scelto di costruire una mappa che contenga tutti i coefficienti moltiplicativi sia per la zona in cui la disattivazione cilindri ha un impatto, sia laddove non si ha nessun contributo di tale strategia e, conseguentemente, il piano quotato, in questa precisa zona, risulterà essere analogo al caso base
- la mappa da realizzare deve contenere, per ogni punto (in termini di regimi di rotazione e pressione media effettiva) della porzione considerata, il relativo coefficiente moltiplicativo affinché venga generato il nuovo piano quotato; avendo a disposizione solo sei coefficienti, si è scelto di simulare l'effetto della disattivazione cilindri, seguendo lo stesso metodo utilizzato per il calcolo del consumo nel caso base, ovvero utilizzando la funzione *"scatteredInterpolant"* dove questa volta i parametri di input sono relativi alla pressione media effettiva, ai regimi di rotazione ed ai punti noti per cui si conosce il coefficiente moltiplicativo
- i coefficienti moltiplicativi della mappa suddetta assumeranno il valore 1 in corrispondenza della zona in cui l'effetto della disattivazione cilindri è nullo (in particolare, i valori rispettivamente pari a 5 bar e 3000 rpm fanno da discriminante per questa zona) in quanto non si ha un risparmio in termini di consumo di combustibile, mentre nella zona designata appartenente alla disattivazione cilindri, tali coefficienti moltiplicativi assumeranno un valore minore dell'unità, manifestandone dunque la riduzione del consumo di combustibile
- ottenuta la mappa contenente i coefficienti moltiplicativi, si può ottenere il piano quotato relativo alla disattivazione dei cilindri il quale fornirà le informazioni in termini di regimi motore, pressione media effettiva e consumo di combustibile; quest'ultimo, ovviamente, è ottenuto moltiplicando la mappa dei consumi relativa al caso base e la mappa contenente i coefficienti moltiplicativi calcolati

Di seguito si riporta il piano quotato relativamente alla disattivazione cilindri.

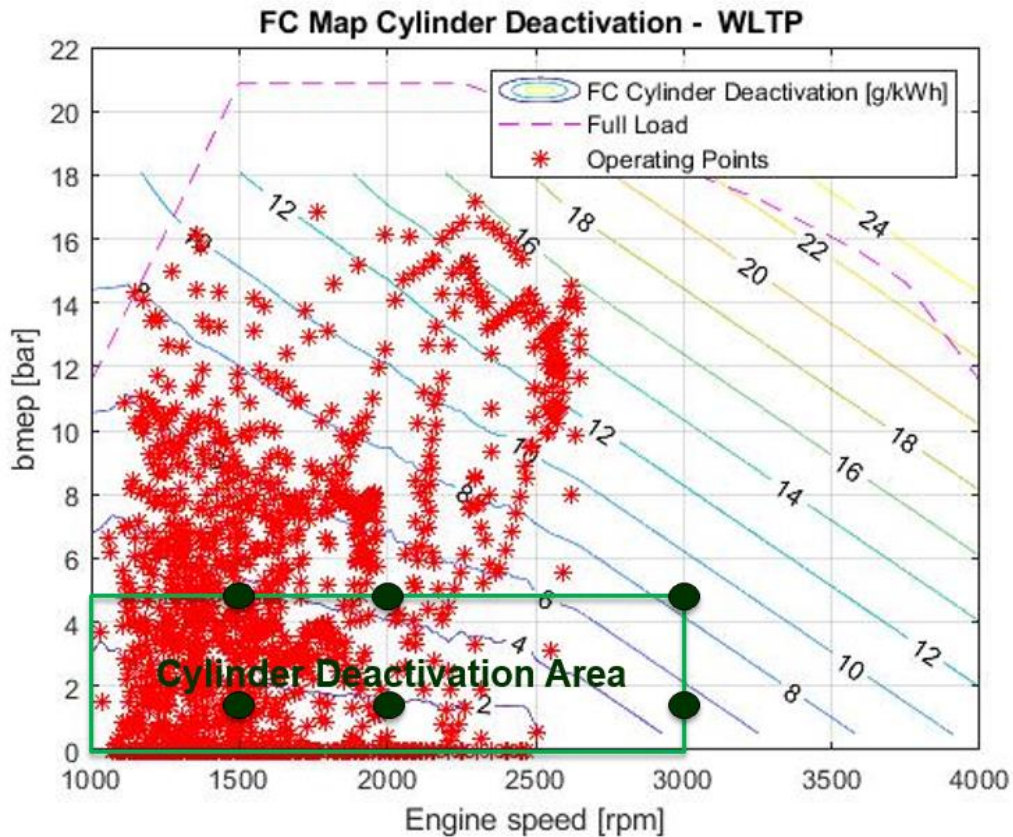


FIGURA 4.8 – PIANO QUOTATO: DISATTIVAZIONE CILINDRI

4.2.4.3 Offset consumo di combustibile

In aggiunta alla strategie precedenti, è possibile implementare anche un'ulteriore modifica, definita "modifica custom" che però non è tenuta in considerazione per l'ottenimento della configurazione "DS optimized". Questa modifica, infatti, nasce per soddisfare un'eventuale richiesta dell'utente che sceglie di implementarla; in particolare, qualora si volesse conoscere l'impatto sulle emissioni di CO₂ di un determinato *offset* del consumo di combustibile sul piano quotato (valore selezionabile dall'utente), ottenibile secondo una tecnologia presente o futura, è possibile, attraverso questa opzione, rispondere a tale esigenza. Il procedimento utilizzato per questa tecnica, è del tutto simile a quello per la disattivazione cilindri, infatti, una volta selezionato l'offset, si avvale di opportune funzione logiche che consentono di ottenere il piano quotato conseguente alla modifica apportata.

Per lo studio in esame, si è scelto di valutare l'impatto che ha un offset del 3% sui consumi e dunque sulle emissioni. Il codice, in seguito a tale modifica, genera un nuovo piano quotato contenente le informazioni volute.

4.2.5 *Variazione caratteristiche veicolo*

4.2.5.1 Alleggerimento della massa

Come è noto, la massa del veicolo impatta pesantemente sui consumi di combustibile in quanto, a parità di avanzamento, un veicolo avente massa maggiore necessita di un maggiore assorbimento di potenza a fronte della medesima manovra. Come si è visto, sin dall'inizio della stesura del presente elaborato, il limite imposto sulle emissioni di CO₂ non è costante ma è funzione lineare della massa del veicolo stesso; in tal modo infatti, il valor medio della flotta europea, avendo dipendenza lineare, deve essere minore o al più uguale al target imposto. Relativamente ai veicoli commerciali leggeri, è importante sottolineare come sia presente un naturale trend che comporta una riduzione del consumo di combustibile, in quanto l'utente punta ad acquistare veicoli con un ridotto consumo poiché, come già accennato, il costo di utilizzo risulta quasi preponderante. Si è scelto di valutare una riduzione del 5% della massa in ordine di marcia.

4.2.5.2 Riduzione del coefficiente di resistenza aerodinamica

Il coefficiente di resistenza aerodinamica (noto anche semplicemente con il simbolo C_x) è un coefficiente adimensionale che misura la resistenza aerodinamica di un corpo in moto in un fluido. Dipende dalla forma del corpo ed è indipendente dalla sezione o dalla velocità cui viene effettuato il moto. La resistenza aerodinamica riduce la velocità del corpo in moto e impone una dissipazione energetica. Il coefficiente di resistenza aerodinamica è così definito:

$$C_x = \frac{R_{aerodinamica}}{\frac{1}{2} \rho v^2 A_f}$$

in cui $R_{aerodinamica}$ rappresenta la resistenza aerodinamica, ρ indica la densità dell'aria, v è il modulo della velocità con cui il veicolo si muove, A_f rappresenta l'area frontale di riferimento.

Nel caso in esame, si è scelto di considerare l'impatto relativo ad una riduzione del 10% del coefficiente di resistenza aerodinamica.

4.2.5.3 Riduzione del coefficiente di resistenza a rotolamento

La resistenza al rotolamento è il risultato di tutte le perdite energetiche che si verificano durante il rotolamento di uno pneumatico. Riferendosi al solo pneumatico e non alla superficie del terreno, queste perdite sono da ricercare fondamentalmente in:

- *isteresi* dovuta alla natura viscoelastica della gomma che costituisce lo pneumatico
- *attrito* generato negli slittamenti tra pneumatico e suolo
- *resistenze* di tipo aerodinamico causate dall'aria, sia interna, sia esterna allo pneumatico

Dei tre fenomeni di cui sopra, quello che fornisce il contributo preponderante è sicuramente il primo. Le perdite per isteresi, infatti, danno un apporto compreso tra l'80 ed il 95% alla resistenza al rotolamento, mentre solo una parte compresa tra il 20 ed il 5% è adducibile agli altri fenomeni. Come è noto, l'isteresi elastica, è quel fenomeno che si verifica quando l'energia impiegata per deformare un corpo non viene restituita integralmente. Durante il rotolamento di uno pneumatico le perdite per isteresi elastica derivano dai continui cicli deformativi a cui è soggetta la struttura dello pneumatico e si verificano per il 70% in corrispondenza del battistrada, per il 15% a livello del fianco e per il rimanente 15% sul tallone. I parametri che influenzano il coefficiente di rotolamento sono svariati, a seconda delle condizioni di impiego; in particolare, si ha: la pressione di gonfiaggio, la temperatura, la velocità di rotazione della ruota, la tipologia di pneumatico, le coppie frenanti o traenti applicate, lo stato di usura del battistrada, le caratteristiche del suolo.

Ad esempio, la dipendenza dalla velocità cambia a seconda della tipologia di pneumatico. I radiali, rispetto agli pneumatici a tele incrociate, oltre ad avere coefficienti di rotolamento più bassi, presentano anche minori aumenti di questi ultimi al crescere della velocità.

Un incremento della pressione di gonfiaggio riduce il coefficiente di rotolamento su terreni compatti poiché dà luogo a minore deformabilità e quindi a minore isteresi elastica. D'altro canto, su suoli cedevoli, maggiori pressioni di gonfiaggio comportano

pressioni di contatto più elevate e quindi maggiori affondamenti con conseguente maggior resistenza all'avanzamento.

L'aumento della temperatura dello pneumatico riduce il coefficiente di rotolamento in due modi: da un lato, scalda l'aria all'interno della carcassa aumentando la pressione di gonfiaggio; dall'altro, riduce l'isteresi della gomma.

Come si può immaginare, così come l'irregolarità della superficie del terreno influenza il coefficiente di rotolamento, anche la tipologia di battistrada ha un certo peso sul suo valore.

Queste sono soltanto alcune delle numerose e complesse interazioni che possono, a seconda delle condizioni operative, influire sul coefficiente di rotolamento in maniera più o meno accentuata. Anche in questo caso, si è scelto di simulare una riduzione del 10%, passando dunque dal valore 0.008 al 0.007.

4.2.6 Diesel Optimized: Calcolo dei consumi e delle emissioni di CO₂

Analogamente al caso *base*, è stata seguita la medesima procedura (riportata ai punti 4.2.2 e 4.2.3) per calcolare i consumi di combustibile e le emissioni di CO₂ relativamente alle strategie ed alle modifiche di cui si è discusso ai punti 4.2.4 e 4.2.5.

Si è scelto di condensare i risultati ottenuti nella tabella 4.2 la quale riporta i benefici di CO₂ ottenuti dalla simulazione delle soluzioni tecnologiche suddette, evitando dunque la ripetizione del metodo utilizzato in quanto risulta essere esattamente analogo al caso *base*.

Technological Solutions	WLTP - CO ₂ Benefit [%]
Cylinder Deactivation	2%
Stop Start System	3%
Reduction Rolling Resistance Coefficient (-10%)	4.6%
Reduction Drag Coefficient (-10%)	2.1%
Lightening Mass (-5%)	1.9%

TABELLA 4.2 – SOLUZIONI TECNOLOGICHE: BENEFIT DI CO₂ SUL CICLO WLTC

I risultati della simulazione mostrano come l'applicazione della disattivazione cilindri permetta di ottenere un beneficio di CO₂ pari al 2% (rispetto al caso *base*); il sistema stop-start incide consentendo una riduzione di queste rispettivamente pari del 3% mentre, per quanto riguarda le variazioni considerate relativamente alle caratteristiche del veicolo, queste permettono di ottenere globalmente una riduzione delle emissioni di CO₂ pari al 8.6%. Il grafico di figura 4.8, illustra una porzione dell'andamento del consumo istantaneo di combustibile relativamente ai casi *Base* e *Cylinder Deactivation* al fine di visualizzare l'impatto di quest'ultima. In particolare, in blu è rappresentato il caso relativo al piano quotato *Base* mentre in rosso è raffigurato l'andamento della *Disattivazione Cilindri*. Si può osservare il risparmio di combustibile ottenibile in alcuni tratti che risultano essere identificativi di una condizione di carico parziale.

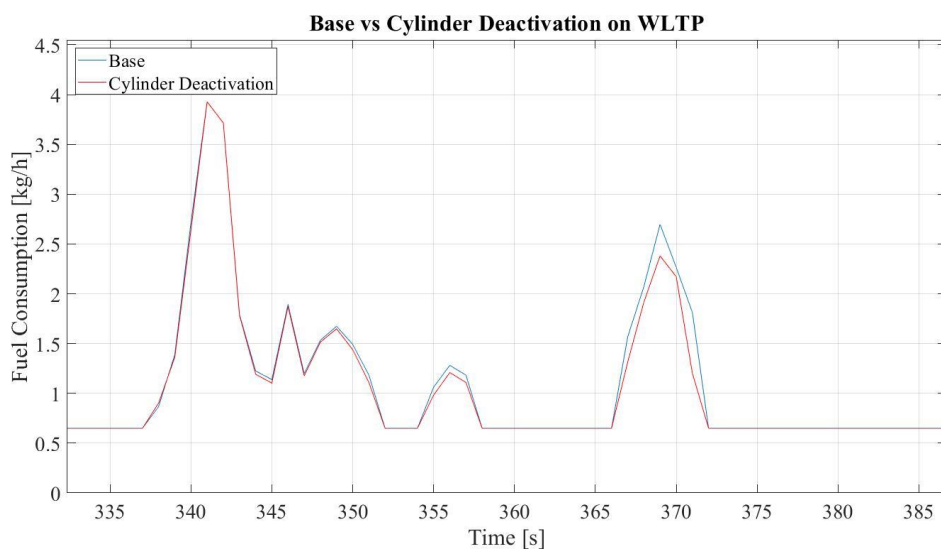


FIGURA 4.9 – CONSUMO DI COMBUSTIBILE: BASE VS DISATTIVAZIONE CILINDRI

5. Analisi di sensibilità del TCO (Total Cost of Ownership)

Per comprendere l'importanza della prospettiva del cliente, si è scelto di affrontare la tematica relativa al costo globale di un veicolo commerciale leggero durante tutto il suo ciclo di vita (*Total Cost of Ownership, TCO*). Si è scelto di osservare questo indicatore in modo da conoscere l'approccio utilizzato dal cliente che si attinge ad acquistare questo particolare segmento di veicoli. Differentemente dalle automobili, dove l'aspetto decisionale al momento dell'acquisto è spesso influenzato da un contributo di natura emozionale abbastanza rilevante, nel caso dei veicoli commerciali leggeri tale contributo tende ad essere trascurabile in quanto, lo stimolo all'acquisto, è limitato ai soli fini commerciali e dunque tale utente tende tipicamente a ricercare la soluzione che minimizza i consumi poiché, tutto ciò che risparmia, in termini di combustibile, lo guadagna sotto il punto di vista del proprio fatturato.

Pertanto, conoscere il costo di esercizio per un veicolo commerciale è tanto importante quanto conoscerne il prezzo d'acquisto e le relative caratteristiche tecniche.

Si è scelto di riportare dapprima la procedura adottata per il calcolo del *TCO* e, successivamente, un esempio in cui è stato comparato il *TCO* relativamente alle seguenti tipologie di architetture degli LCV, scelte come riferimento:

- Powertrain tradizionale con alimentazione *Diesel* nella versione *ottimizzata* (mediante le soluzioni tecnologiche di cui si è discusso precedentemente)
- Powertrain ibrido plug-in (*PHEV*) avente parte termica alimentata a benzina
- Powertrain puro elettrico (*BEV*)

È doveroso puntualizzare che la procedura seguita tiene in considerazione i parametri minimi necessari al calcolo del *TCO* e, di conseguenza, questa può essere adottata come base di riferimento per analisi aventi un maggior livello di dettaglio e accuratezza nei valori ricercati.

5.1 Procedura di calcolo

I parametri minimi necessari al calcolo del *TCO* dipendono, ovviamente, dalla tipologia di powertrain esaminato; di seguito si riporta il metodo utilizzato.

Partendo dall'obiettivo, la formula che permette di ottenere il *TCO* è data da:

$$TCO = PA + PV_{tot} - VR \quad (6.1)$$

in cui:

- TCO , espresso in €, rappresenta appunto il valore stimato del Total Cost of Ownership relativamente all'intero periodo di utilizzo del veicolo che percorre una certa distanza
- PA , espresso in €, rappresenta il prezzo medio di acquisto al momento della prima immatricolazione
- PV_{tot} , espresso in €, rappresenta il prezzo medio del vettore energetico che, nel caso in esame, si traduce nel combustibile utilizzato, per i powertrain tradizionali ed ibridi, e nell'energia elettrica necessaria per alimentare i powertrain puri elettrici ed ibridi
- VR , espresso in €, indica il valore residuo che identifica la percentuale del prezzo di listino del veicolo che, dopo un certo lasso di tempo e di utilizzo del bene, rimane in essere e determina, di conseguenza, il valore del veicolo stesso sul mercato dell'usato

E' importante sottolineare come il valore residuo rappresenti la componente fondamentale che determina il canone mensile di renting e, di conseguenza, si riverbera anche sul portafogli del Fleet Manager (e del privato che sceglie il noleggio): più il VR è alto, più il canone sarà conveniente, più il VR è basso, più le rate risulteranno maggiori.

Per quanto riguarda il prezzo di acquisto, nello studio in esame si è considerato un prezzo medio in cui non si tiene conto dell'IVA e dei costi di messa su strada; in particolare, per la versione Diesel è stato assunto un valore di riferimento pari a 24'900 € (fonte: *quattroruote*), per la versione ibrida è stato stimato un incremento di 12'000 € rispetto alla versione precedente ed infine, per la versione ibrida, è stato impiegato un incremento pari a 20'000 €.

Focalizzando adesso l'attenzione sul valore residuo, si ha che questo viene calcolato mediante la relazione seguente:

$$VR = PA \cdot [1 - (Periodo \cdot Aliquota \text{ di Ammortamento})] \quad (6.2)$$

Dove:

- *Aliquota di Ammortamento*, espressa in $\frac{\%}{\text{anno}}$, rappresenta la quota parte del prezzo di acquisto che viene persa ogni anno per l'utilizzo del veicolo
- *Periodo*, espresso in *anni*, rappresenta il numero di anni di vita utile del veicolo

Si passa adesso ad analizzare l'ultimo contributo necessario al calcolo del TCO, ovvero il prezzo medio del vettore energetico su tutto il periodo. In particolare, si ha:

$$PV_{tot} = Periodo \cdot PV_{annuo} \quad (6.3)$$

in cui:

- PV_{tot} , espresso in €, come accennato precedentemente, indica il prezzo medio del vettore energetico lungo tutto il numero di anni di utilizzo del veicolo. Questo, in generale, è dato dalla somma di due contributi: uno legato al combustibile necessario alla parte termica (che si ricorda essere un motore *SI* o *CI*) ed un altro legato all'energia elettrica necessaria per alimentare i propulsori elettrici. In particolare, in funzione del powertrain esaminato, si ha:

- Powertrain Convenzionale:

$$PV_{tot} \equiv PC_{tot} = Periodo \cdot PC_{annuo}$$

dove PC_{tot} , espresso in €, indica il prezzo medio del combustibile utilizzato (Diesel o Benzina) lungo tutto il numero di anni di utilizzo del veicolo

- Powertrain Elettrico puro: $PV_{tot} \equiv PE_{tot} = Periodo \cdot PE_{annuo}$

dove PE_{tot} , espresso in €, indica il prezzo medio dell'energia elettrica impiegata per il numero di anni di utilizzo del veicolo

- Powertrain Ibrido: $PV_{tot} = Periodo \cdot (PC_{annuo} + PE_{annuo})$

- PV_{annuo} (ed i relativi PC_{annuo} e PE_{annuo}), espresso in $\frac{\text{€}}{\text{Anno}}$, indica il prezzo annuo legato al vettore energetico

Per quanto concerne i parametri di PC_{annuo} e PE_{annuo} , si ha:

- $PC_{annuo} = FC_{annuo} \cdot PC_{litro} \quad (6.4)$

in cui:

- FC_{annuo} , espresso in $\frac{l}{\text{anno}}$, rappresenta il consumo di combustibile che si calcola come segue:

$$FC_{annuo} = \frac{DP_{term} \cdot FC_{100km}}{100}$$

dove: DP_{term} , espressa in $\frac{km}{anno}$, rappresenta la distanza percorsa tramite il powertrain termico; FC_{100km} , espresso in $\frac{l}{100km}$, indica il consumo di combustibile per un tragitto di 100 km, quale quello di solito usato per confrontare i consumi ed infine il valore 100 è necessario per ottenere il valore unitario

➤ PC_{litro} , espresso in $\frac{€}{l}$, rappresenta il prezzo medio del combustibile (nel caso in esame, Diesel o Benzina)

$$- PE_{annuo} = EC_{annuo} \cdot PE_{litro} \quad (6.5)$$

in cui:

➤ EC_{annua} , espresso in $\frac{kW \cdot h}{anno}$, rappresenta l'energia elettrica necessaria in un anno di vita utile del veicolo la quale è calcolata come segue:

$$EC_{annua} = DP_{elettr} \cdot EC$$

dove DP_{elettr} , espressa in $\frac{km}{anno}$, rappresenta la distanza percorsa mediante il powertrain elettrico, EC , espresso in $\frac{kW \cdot h}{km}$, indica l'energia elettrica necessaria per un tragitto di 100 km, quale quello di solito usato per confrontare i consumi

➤ $PE_{kW \cdot h}$, espresso in $\frac{€}{kW \cdot h}$, rappresenta il prezzo medio dell'energia elettrica

5.2 Esempi di calcolo del TCO

Si riporta di seguito un esempio di calcolo del TCO relativamente alle tre architetture scelte come riferimento. Osservando la tabella 6.1, si evince l'assunzione fatta sul "costo base di riferimento", relativa al caso base, pari a 15'000 €. Il prezzo di acquisto non tiene conto dell'IVA e delle spese di "messa su strada". Il parametro "Fatturato" viene ricavato mediante la differenza tra il prezzo di acquisto al momento della prima immatricolazione ed il costo di produzione. Seguendo la procedura precedentemente descritta, è possibile popolare la tabella per ognuna delle architetture considerate sino ad ottenere il TCO. Con il simbolo " Δ " si intende la differenza di TCO che sussiste tra l'architettura ibrida (o elettrica) ed il powertrain convenzionale ottimizzato (DS opt).

Powertrain		DS opt (reference)	PHEV	BEV
Prezzo Acquisto (PA)	[€]	24900	36900	44900
PC_{litro}	$\left[\frac{€}{l}\right]$	1.5	1.5	1.5
$PE_{kW \cdot h}$	$\left[\frac{€}{kW \cdot h}\right]$	0.25	0.25	0.25
FC_{100km}	$\left[\frac{l}{100 km}\right]$	6.9	11	8
EC	$\left[\frac{kW \cdot h}{km}\right]$	0.25	0.25	0.25
DP_{totale}	$\left[\frac{km}{anno}\right]$	15000	15000	15000
DP_{term}	$\left[\frac{km}{anno}\right]$	15000	7500	0
DP_{elettr}	$\left[\frac{km}{anno}\right]$	0	7500	15000
FC_{annuo}	$\left[\frac{l}{anno}\right]$	1042	824	0
PC_{annuo}	$\left[\frac{€}{anno}\right]$	1563	1236	0
EC_{annua}	$\left[\frac{kWh}{anno}\right]$	0	1875	3750
PE_{annuo}	$\left[\frac{€}{anno}\right]$	0	469	938
PV_{annuo}	$\left[\frac{€}{anno}\right]$	1563	1705	938

<i>Periodo</i>	[anno]	3	3	3
PV_{tot}	[€]	4688	5115	2813
<i>Aliquota di Ammortamento</i>	$\left[\frac{\%}{\text{anno}}\right]$	10%	10%	10%
<i>VR</i>	[€]	17430	25830	31430
<i>TCO</i>	[€]	12158	16185	16283
Δ vs reference	[€]	-	4027	4125

TABELLA 5.1 – ESEMPIO DI CALCOLO DEL TCO

In tal modo è possibile tenere in considerazione l’approccio che segue il cliente durante il momento dell’acquisto di questo particolare segmento di veicolo.

L’esempio sopra riportato è puramente indicativo e, come accennato precedentemente, costituisce una base di riferimento che può essere approfondita e complicata in funzione del livello di accuratezza ricercata. Nel caso in esame è stato considerato un periodo di utilità del veicolo pari a 3 anni, sono inoltre stati assunti costanti i parametri di carattere economico, quali il prezzo dell’energia elettrica e del combustibile, il prezzo di acquisto ed il costo di produzione che comportano un impatto significativo sul risultato finale.

Al fine di acquisire un po’ di sensibilità con il TCO, nelle tabelle 5.2 e 5.3 sono riportati due esempi; in particolare, nella tabella 5.2, è stato calcolato il TCO assumendo che il prezzo di vendita fosse uguale per i tutti i powertrain considerati mentre, nella tabella 5.3, sono riportati i prezzi di vendita affinché si ottenga lo stesso TCO.

Powertrain	DS optimized	PHEV Petrol	BEV
Price [€]	25'000	25'000	25'000
Period [year]	3	3	3
Energy Carrier Cost [€]	8'100	7'860	6'000
Depreciation [%/year]	10%	10%	10 %
Residual Value [€]	-17'500	-17'500	-17'500
TCO [€]	15'600	15'360	13'500
Δ vs Reference [€]	Reference	-240	-2.100

TABELLA 5.2 – CALCOLO DEL TCO A PARITÀ DI PREZZO

Powertrain	DS optimized	PHEV Petrol	BEV
Price [€]	25'000	25'800	32'000
Period [year]	3	3	3
Energy Carrier Cost [€]	8'100	7'860	6'000
Depreciation [%/year]	10%	10%	10 %
Residual Value [€]	-17'500	-18'060	-22'400
TCO [€]	15'600	15'600	15'600
Δ vs Reference [€]	Reference	0	0

TABELLA 5.3 – CALCOLO DEL PREZZO A PARITÀ DI TCO

6. Analisi di sostenibilità tecnico-economica: scenari alternativi

Il capitolo in esame ha l'obiettivo, mediante i modelli matematici sviluppati, di definire, esaminare e classificare degli scenari alternativi per il raggiungimento dei target di compliance di CO₂. I parametri che governano l'analisi tecnico – economica in questione, una volta scelti i motopropulsori nei differenti scenari, sono di seguito elencati:

- MRO (necessaria al periodo 2020-2024) e TM (necessaria al periodo 2025-2030)
- CO₂ NEDC (utilizzata solo per la compliance del 2020 e necessaria al calcolo del Target per il 2021)
- CO₂ WLTP (necessaria nel 2020 per il calcolo del target del 2021 e utilizzata per la compliance dal 2021)
- CO₂ Target (rappresenta l'obiettivo di riferimento per le emissioni)
- Gap (indica lo scarto tra il valore di emissione ed il relativo target)
- Gross Margin/Losses (indica il margine lordo /perdita che si ha qualora non fosse presente la compliance)
- Penalty (-) /Credit (+) (se negativo, indica la sanzione da pagare per le emissioni in eccesso; se positivo, indica i crediti ottenibili)
- Gross Margin/Losses with compliance (indica il margine lordo/perdita nella situazione reale con la compliance)

Si ritiene doveroso sottolineare come i parametri sopracitati siano riferiti ai cosiddetti “valori di flotta” in quanto, come indicato precedentemente, è da essi che dipende l'adempimento o meno della compliance.

Per ogni scenario analizzato, si è scelto di considerare gli anni più significativi dal punto di vista legislativo; in particolare, il 2020 (in quanto rappresenta l'anno determinante per ottenere i target del 2021, e conseguentemente, del 2025 e 2030), il 2021 (poiché entra in vigore a pieno regime la compliance secondo la procedura WLTP), il 2025 ed infine il 2030 (in quanto con essi cambiano le modalità per il calcolo della compliance) come spiegato durante la panoramica fatta sulla normativa, di cui al capitolo 2.

Partendo dallo scenario 1 (tabella 6.1) denominato “Business As Usual (BAU)” in quanto rappresenta lo scenario 2020-2030 qualora si decidesse di continuare a seguire la

medesima linea di produzione attuale ed assumendo un mix dei volumi di vendita analogo a quello corrente lungo tutto il periodo osservato. Facendo riferimento ai dati di vendita attuali, tale contesto vede come powertrain protagonisti, le versioni convenzionali aventi motore C.I. (denominata “DS base”) per il 98.5% delle immatricolazioni e S.I. (alimentato mediante CNG) per la restante quota.

Scenario 1 – BAU*	Compliance			
	2020	2021	2025	2030
DS base	98.5%	98.5%	98.5%	98.5%
DS optimized	-	-	-	-
CNG	1.5%	1.5%	1.5%	1.5%
BEV	-	-	-	-
PHEV – Petrol	-	-	-	-
REEV – Petrol	-	-	-	-
MHEV – Petrol	-	-	-	-
MRO / TM [kg]	2001	2001	2001	2001
CO ₂ _{NEDC} [g/km]	185.7	-	-	-
CO ₂ _{WLTP} [g/km]	260.5	260.5	260.5	260.5
CO ₂ Target [g/km]	169.5	232.1	189.6	153.9
Gap [g/km]	16.2	28.4	70.9	106.6
Gross Margin/Losses [M€]	150	150	150	150
Penalty (-) / Credit (+) [M€]	- 77	- 135	- 337	- 506
Gross Margin/Losses with compliance [M€]	73	15	- 187	- 356

TABELLA 6.1 – SCENARIO 1: BUSINESS AS USUAL

Le righe relative al Gross Margin/Losses hanno lo scopo di manifestare l’effetto della compliance. Si può osservare come, negli anni 2020-2021, nonostante non venga rispettata la compliance (si noti il gap che risulta essere maggiore di zero), si riesca comunque ad ottenere un margine lordo positivo; mentre, con l’entrata in vigore del Regolamento relativo al periodo 2025-2030, si osserva un progressivo crollo di tale parametro che si traduce nell’avere delle perdite consistenti. Questo è dettato dal discostamento presente tra i powertrain (attuali) scelti ed i vincoli normativi che comporta un naturale innalzamento del gap dovuto al progressivo inasprimento dei target imposti dal legislatore. Questo scenario, dunque, costituisce una base di partenza per la selezione degli scenari futuri.

Si passa adesso ad analizzare lo scenario 2 (denominato “DyVE”), mostrato in tabella 6.2, nel quale è stata apportata, come unica modifica rispetto al caso precedente, la

sostituzione della versione “DS base” con la configurazione ottimizzata mediante il modello DyVE, denominata “DS optimized”. Questa configurazione tiene in considerazione le migliorie dovute alle soluzioni tecnologiche precedentemente trattate (ovvero la disattivazione cilindri, il sistema stop-start, un alleggerimento della massa (-5%) ed una riduzione dei coefficienti di resistenza a rotolamento ed aerodinamica (-10%)). Rispetto allo scenario precedente, focalizzando l’attenzione agli anni 2020 – 2021, si può osservare come la modifica apportata consente di ottenere un incremento dei margini lordi consistente; ciò è giustificato dal raggiungimento dei target di compliance (si osservi il gap che risulta essere negativo). Questo, però, non risulta avere gli stessi riscontri nel periodo 2025 – 2030 dove, il gap presente, comporta delle sanzioni importanti che si traducono nell’avere delle perdite ingenti.

Scenario 2 – DyVE	Compliance			
	2020	2021	2025	2030
DS base	-	-	-	-
DS optimized	98.5%	98.5%	98.5%	98.5%
CNG	1.5%	1.5%	1.5%	1.5%
BEV	-	-	-	-
PHEV – Petrol	-	-	-	-
REEV – Petrol	-	-	-	-
MHEV – Petrol	-	-	-	-
MRO / TM [kg]	1902	1902	1902	1902
CO ₂ _{NEDC} [g/km]	154.6	-	-	-
CO ₂ _{WLTP} [g/km]	241.0	241.0	241.0	241.0
CO ₂ Target [g/km]	160.0	243.9	201.1	163.3
Gap [g/km]	- 5.5	- 2.9	39.9	77.8
Gross Margin/Losses [M€]	94	94	94	94
Penalty (-) / Credit (+) [M€]	26	14	- 189	- 369
Gross Margin/Losses with compliance [M€]	94	94	- 95	- 274

TABELLA 6.2 – SCENARIO 2 (DYVE): DIESEL OPTIMEZED - CNG

E’ importante sottolineare il significato che si intende dare con il colore verde attribuito ai valori negativi del parametro “Penalty/Credit”. Questo, infatti, ha doppia valenza in quanto, da una parte permette al costruttore di immatricolare un numero maggiore di modelli che hanno un emissione di CO₂ che eccede il limite consentito e che allo stesso tempo hanno una elevata redditività; mentre, dall’altra parte il singolo costruttore può valutarne l’utilizzo come “crediti”, qualora decidesse di costituire un pool con terzi.

Negli scenari seguenti, l'anno 2020 è stato assunto esattamente uguale al contesto appena esaminato in quanto, essendo già raggiunta la compliance, si è ritenuta non necessaria la generazione di ulteriori crediti.

Il criterio utilizzato per la distribuzione dei volumi di vendita fra le diverse architetture di powertrain, prevede la convergenza del gap al valore nullo al fine dell'adempimento della compliance.

Lo scenario 3 (tabella 6.3) ha una spartizione dei mix di powertrain che prevede, a partire dal 2021, l'introduzione del BEV come opzione alternativa alla versione ottimizzata del Diesel. Per il 2021, si è scelto di attribuire lo 0.5% delle immatricolazioni al powertrain elettrico in modo da tenere presente l'aspetto legato all'accettazione del cliente riguardo la mobilità elettrica. Per il raggiungimento della compliance nel 2025, la selezione di questi powertrain necessita di avere una distribuzione dei volumi di vendita costituita per il 15.7% (valore minimo) da veicoli puri elettrici e dalla versione DS optimized per la rimanente. Analogamente per il 2030 dove si ha un incremento dell'elettrificazione. Si può constatare come questo scenario preveda una progressiva riduzione dei margini lordi i quali, passando dal 2020 al 2030, si riducono di circa un terzo.

Scenario 3 – BEV	Compliance			
	2020	2021	2025	2030
DS base	-	-	-	-
DS optimized	98.5%	99.5%	84.3%	68.7%
CNG	1.5%	-	-	-
BEV	-	0.5%	15.7%	31.3%
PHEV – Petrol	-	-	-	-
REEV – Petrol	-	-	-	-
MHEV – Petrol	-	-	-	-
MRO / TM [kg]	1902	1897	1966	2036
CO _{2,NEDC} [g/km]	154.6	-	-	-
CO _{2,WLTP} [g/km]	241.0	238.5	202.1	164.7
CO ₂ Target [g/km]	160.0	243.5	201.1	165.1
Gap [g/km]	- 5.5	- 4.9	- 0.1	- 0.4
Gross Margin/Losses [M€]	94	88	58	28
Penalty (-) / Credit (+) [M€]	26	24	0	1.9
Gross Margin/Losses with compliance [M€]	94	88	58	28

TABELLA 6.3 – SCENARIO 3: DS OPTIMIZED - BEV

Lo scenario 4, riportato in tabella 6.4, descrive il caso in cui il costruttore decida di avere una flotta costituita dal powertrain PHEV – benzina, dal puro elettrico e di mantenere il DS optimized. Tale distribuzione permette di rispettare abbondantemente la compliance del 2021, tanto da raggiungere un gap ampiamente negativo. Spostando l’attenzione al 2025-2030, la flotta prevede un incremento dell’elettrificazione che comporta un aumento della massa di riferimento; tale parametro, come si è visto, impatta sul target normativo il quale è soggetto ad una differente pendenza, a seconda del posizionamento della massa media del costruttore/pool, rispetto al valore di riferimento.

Scenario 4 – BEV/PHEV	Compliance			
	2020	2021	2025	2030
DS base	-	-	-	-
DS optimized	98.5%	98.5%	76%	54%
CNG	1.5%	-	-	-
BEV	-	0.5%	8%	16%
PHEV – Petrol	-	1%	16%	30%
REEV – Petrol	-	-	-	-
MHEV – Petrol	-	-	-	-
MRO / TM [kg]	1902	1899	1971	2042
CO _{2,NEDC} [g/km]	154.6	-	-	-
CO _{2,WLTP} [g/km]	241.0	237.1	200.1	163.1
CO ₂ Target [g/km]	160.0	243.7	200.9	163.1
Gap [g/km]	- 5.5	- 6.6	- 0.8	0
Gross Margin/Losses [M€]	94	87	66	45
Penalty (-) / Credit (+) [M€]	26	31	4	0
Gross Margin/Losses with compliance [M€]	94	87	66	45

TABELLA 6.4 – SCENARIO 4: DS OPTIMIZED - BEV - PHEV PETROL

È da evidenziare come tale scenario comporti una riduzione meno marcata dei ricavi rispetto allo scenario 3.

Lo scenario 5 (tabella 6.5) diversamente dal precedente, valuta l’introduzione dell’architettura elettrica con range extender in sostituzione al plug-in, mantenendo inalterate le scelte sui restanti powertrain. Comparando tale scenario con il precedente, limitatamente all’anno 2021, è possibile constatare come l’architettura plug-in comporti delle emissioni maggiori rispetto alla soluzione REEV. Inoltre, osservando i volumi di vendita, si deduce come, ai fini della compliance, sia necessaria una minore elettrificazione che comporterebbe in aggiunta un aumento dei margini.

Scenario 5 – BEV/REEV	Compliance			
	2020	2021	2025	2030
DS base	-	-	-	-
DS optimized	98.5%	98.5%	80.5%	63%
CNG	1.5%	-	-	-
BEV	-	0.5%	7%	18%
PHEV – Petrol	-	-	-	-
REEV – Petrol	-	1%	12.5%	19%
MHEV – Petrol	-	-	-	-
MRO / TM [kg]	1902	1900	1958	2024
CO ₂ _{NEDC} [g/km]	154.6	-	-	-
CO ₂ _{WLTP} [g/km]	241.0	236.6	200.2	162.1
CO ₂ Target [g/km]	160.0	243.7	200.9	163.1
Gap [g/km]	- 5.5	- 7.1	- 0.7	- 1
Gross Margin/Losses [M€]	94	87	74	52
Penalty (-) / Credit (+) [M€]	26	34	3	5
Gross Margin/Losses with compliance [M€]	94	87	74	52

TABELLA 6.5 – SCENARIO 5: DS OPTIMIZED - BEV - REEV PETROL

La tabella 6.6, riassume i risultati ottenuti relativamente allo Scenario 6 denominato “Green” in quanto prevede il solo utilizzo di motopropulsori elettrificati. Tale contesto descrive, a partire dal 2021, l’eliminazione delle architetture tradizionali per dare spazio a quelle ibride benzina (PHEV-Petrol e MHEV-Petrol) ed al puro elettrico. Scegliendo le architetture MHEV- Petrol, PHEV- Petrol e BEV con un progressivo potenziamento dell’elettrificazione lungo il periodo esaminato, si desume come, ai fini della compliance, sia necessaria una (minima) distribuzione dei volumi riportato in tabella. L’elettrificazione consente di rispettare i target normativi ma, allo stesso tempo, comporta una riduzione dei margini dovuta ai maggiori costi di produzione.

Scenario 6 – GREEN	Compliance			
	2020	2021	2025	2030
DS base	-	-	-	-
DS optimized	98.5%	-	-	-
CNG	1.5%	-	-	-
BEV	-	1%	11%	22%
PHEV – Petrol	-	3%	15%	22%
REEV – Petrol	-	-	-	-
MHEV – Petrol	-	96%	74%	56%
MRO / TM [kg]	1902	2051	2093	2133
CO ₂ _{NEDC} [g/km]	154.6	-	-	-
CO ₂ _{WLTP} [g/km]	241.0	257.0	212.7	172.9
CO ₂ Target [g/km]	160.0	258.2	213.3	173.1
Gap [g/km]	- 5.5	- 1.2	- 0.6	- 0.2
Gross Margin/Losses [M€]	94	123	90	58
Penalty (-) / Credit (+) [M€]	26	6	3	1
Gross Margin/Losses with compliance [M€]	94	123	90	58

TABELLA 6.6 – SCENARIO 6 (GREEN): BEV - PHEV PETROL - MHEV PETROL

Infine, lo scenario 7 prevede la presenza delle sole architetture ibride benzina MHEV e REEV. Analogamente ai precedenti scenari, è stato tenuto in considerazione il contributo legato all'accettazione del cliente in termini di e-mobility, promuovendo dunque l'avvento dell'elettrificazione in modo graduale lungo il periodo osservato. Ai fini del rispetto della compliance, il miglior compromesso da un punto di vista tecnico-economico, è mostrato nella tabella 6.7.

Scenario 7 – REEV/MHEV	Compliance			
	2020	2021	2025	2030
DS base	98.5%	-	-	-
DS optimized	-	-	-	-
CNG	1.5%	-	-	-
BEV	-	-	-	-
PHEV – Petrol	-	-	-	-
REEV – Petrol	-	3.5%	25%	44.5%
MHEV – Petrol	-	96.5%	75%	55.5%
MRO / TM [kg]	1902	2049	2070	2090
CO2 _{NEDC} [g/km]	154.6	-	-	-
CO2 _{WLTP} [g/km]	241.0	257.3	213.1	172.8
CO2 Target [g/km]	160.0	258.0	213.1	173
Gap [g/km]	- 5.5	- 0.7	0	- 0.2
Gross Margin/Losses [M€]	94	126	115	105
Penalty (-) / Credit (+) [M€]	26	3	0	1
Gross Margin/Losses with compliance [M€]	94	126	115	105

TABELLA 6.7 – SCENARIO 7: REEV PETROL - MHEV PETROL

Per facilitare la comparazione tra gli scenari esaminati, in tabella 6.8 è presente un quadro riassuntivo con i relativi margini/perdite (lordi/e) ottenuti; in particolare, la colonna *Total* riporta, per ogni scenario, il valore totale di margine/perdita (lordo/a) nel periodo 2020-2030 dove, per il periodo compreso tra il 2022 ed il 2024, è stato assunto il valore di margine/perdita del 2021 mentre, per il periodo 2026-2029 è stato assunto il valore del 2025.

Scenarios	2020 [M€]	2021 [M€]	2025 [M€]	2030 [M€]	Total [M€]
1. BAU	73	15	- 187	- 356	- 1158
2. DyVE	94	94	- 95	- 274	- 279
3. BEV	94	88	58	28	764
4. BEV/ PHEV	94	87	66	45	817
5. BEV/REEV	94	87	74	52	864
6. Green	94	123	90	58	1094
7. REEV/MHEV	94	126	115	105	1278

TABELLA 6.8 – CONFRONTO SCENARI: MARGINI/PERDITE (LORDO)

7. Conclusioni

È stata svolta un'analisi di sostenibilità tecnico-economica per il raggiungimento dei target di compliance nel periodo 2020-2030 in Europa con un approccio basato su modelli matematici aventi diversi gradi di complessità. Lo studio si focalizza sul segmento "medium-large" che è risultato essere il più rilevante a seguito dell'analisi di mercato del 2018 per gli LCV.

Un modello matematico in ambiente Matlab, appositamente adattato, ha permesso la valutazione dei benefici ottenibili, in termini di emissioni di CO₂, sul ciclo WLTC di alcune soluzioni tecnologiche: sistema stop-start (3%), disattivazione dei cilindri (2%), il miglioramento delle caratteristiche del veicolo, quali la riduzione del 5% della massa (1.8%) ed una riduzione del 10% dei coefficienti di resistenza aerodinamica e di rotolamento (6.6%).

È stato valutato l'impatto sulle emissioni di CO₂ dei sistemi di propulsione più significativi: motopropulsori convenzionali (DS base, DS optimized e CNG), ibridi (MHEV- REEV- PHEV) e puramente elettrici (BEV).

L'analisi effettuata ha permesso di classificare, in termini di sostenibilità economica, gli scenari tecnicamente realizzabili. In particolare, si evince che sino al 2024 è possibile, anche con i soli motopropulsori convenzionali, assicurare la compliance con i target di CO₂ in modo sostenibile; tuttavia, la disponibilità di un motopropulsore elettrificato aumenta la sostenibilità economica. A partire dal 2025, l'ulteriore inasprimento dei vincoli legislativi, penalizza, in modo non economicamente sostenibile, una flotta di soli motopropulsori convenzionali, obbligando dunque ad avere volumi crescenti di veicoli elettrificati (15.7% e 31.3 %, quote di volumi minime rispettivamente per il 2025 e 2030).

A fronte delle assunzioni fatte, lo scenario più promettente, in termini di sostenibilità tecnico-economica, risulta essere una soluzione costituita da motopropulsori ibridi benzina (MHEV Petrol) abbinati a motopropulsori elettrici dotati di range extender (REEV Petrol).

Il metodo adottato ed i risultati conseguiti si sono dimostrati efficaci per definire le linee guida tecnico-economiche per affrontare le sfide poste dalla normativa sulle emissioni di CO₂ in Europa. Una maggiore granularità potrà essere ottenuta evolvendo sia il modello matematico Matlab, implementando dunque ulteriori soluzioni tecnologiche e di “energy management”, sia il modello economico, introducendo una funzione di elasticità del prezzo che sia correlata alle caratteristiche tecniche di progettazione determinanti per il cliente, al fine di valutare l’impatto sui volumi di vendita e, dunque, sullo scenario competitivo.

8. Appendice

Le tabelle di seguito, riportano i principali competitor rispettivamente dei segmenti small-compact (tabella 8.1), medium (tabella 8.2) e large (tabella 8.3). In particolare, per ogni competitor, si riporta la tipologia di alimentazione (benzina, diesel o CNG), le immatricolazioni relative all'anno 2018, la MRO e le emissioni di CO₂ in termini di NEDC.

OEM	Model	Fuel type	Registrations [u]	MRO [kg]	CO2 NEDC [g/km]
Fiat Professional	Fiorino/Qubo	Petrol	4576	1120	170.3
Fiat Professional	Fiorino/Qubo	Diesel	8956	1176	117
Ford	Transit Courier	Petrol	3008	1265	123.3
Ford	Transit Courier	Diesel	12461	1306	108.5
Mercedes	Citan	Petrol	623	1365	142.8
Mercedes	Citan	Diesel	15374	1433	115.4
Renault (Dacia)	Dokker	Petrol	6375	1220	142.7
Renault (Dacia)	Dokker	Diesel	12942	1285	108
Nissan	NV200	Petrol	545	1286	166
Nissan	NV201	Diesel	5961	1365	130.7

TABELLA 8.1 - SEGMENTO SMALL

OEM	Model	Fuel type	Registrations [u]	MRO [kg]	CO2 NEDC [g/km]
Fiat Professional	Doblò	Petrol	4549	1378	169.3
Fiat Professional	Doblò	Diesel	34151	1454	135.4
Ford	Transit Connect	Petrol	2078	1513	135
Ford	Transit Connect	Diesel	40476	1594	124.3
Renault	Kangoo	Petrol	3316	1326	141
Renault	Kangoo	Diesel	63527	1390	115.3
Volkswagen	Caddy	Petrol	6591	1379	133.1
Volkswagen	Caddy	Diesel	47240	1512	128.6
Citroen	Berlingo	Petrol	2824	1357	149.8
Citroen	Berlingo	Diesel	63184	1415	111.5

Opel	Combo	Petrol	2098	1418	169
Opel	Combo	Diesel	11638	1431	128.1
Peugeot	Partner	Petrol	3775	1356	143.3
Peugeot	Partner	Diesel	62217	1416	111.6

TABELLA 8.2 - SEGMENTO COMPACT

OEM	Model	Fuel type	Registrations [u]	MRO [kg]	CO2 NEDC [g/km]
Fiat Professional	Talento	Petrol	0	0	0
Fiat Professional	Talento	Diesel	13249	1883	167.4
Mercedes	Vito	Petrol	3	2093	250.7
Mercedes	Vito	Diesel	45930	2034	169.3
Peugeot	Expert	Petrol	2	1914	173.0
Peugeot	Expert	Diesel	46890	1694	142.4
Renault	Trafic	Petrol	0	0	0.0
Renault	Trafic	Diesel	55848	1847	165.5
Ford	Transit Custom	Petrol	0	0	0.0
Ford	Transit Custom	Diesel	110192	2072	170.2
Volkswagen	Transporter	Petrol	1948	1971	211.0
Volkswagen	Transporter	Diesel	73794	1983	162.9
Hyundai	H-1	Petrol	0	0	0.0
Hyundai	H-1	Diesel	251	2094	207.8
Citroen	Jumpy	Petrol	0	0	0.0
Citroen	Jumpy	Diesel	29483	1686	141.7
Opel	Vivaro	Petrol	0	0	0.0
Opel	Vivaro	Diesel	40278	1837	165.9
Nissan	NV 300	Petrol	0	0	0.0
Nissan	NV 300	Diesel	4580	1841	165.8
Toyota	PROACE	Petrol	0	0	0.0
Toyota	PROACE	Diesel	13882	1709	141.5

TABELLA 8.3 - SEGMENTO MID-SIZE

OEM	Model	Fuel type	Registrations [u]	MRO [kg]	CO2 NEDC [g/km]
Fiat Professional	Ducato	CNG	742	2441	233.6
Fiat Professional	Ducato	Diesel	49810	2118	168.4
Mercedes	Sprinter	CNG	167	2492	229.3
Mercedes	Sprinter	Diesel	79619	2386	215.4
Renault	Master	CNG	0	0	0.0
Renault	Master	Diesel	71854	2195	200.1
Volkswagen	Crafter	CNG	0	0	0.0
Volkswagen	Crafter	Diesel	44701	2209	200.4
Ford	Transit	CNG	0	0	0.0
Ford	Transit	Diesel	82291	2248	188.7
Iveco	Daily	CNG	1	2903	219.0
Iveco	Daily	Diesel	1938	2522	201.8
Hyundai	H350	CNG	0	0	0.0
Hyundai	H350	Diesel	1822	2367	216.4
Citroen	Jumper	CNG	0	0	0.0
Citroen	Jumper	Diesel	33820	2077	163.7
Opel	Movano	CNG	0	0	0.0
Opel	Movano	Diesel	17316	2225	202.0
Peugeot	Boxer	CNG	0	0	0.0
Peugeot	Boxer	Diesel	50365	2079	163.9
Nissan	NV400	CNG	0	0	0.0
Nissan	NV400	Diesel	5055	2148	199.4

TABELLA 8.4 - SEGMENTO LARGE

9. Bibliografia

G. Ferrari, "Motori a Combustione Interna," Il Capitello, 2006

Gazzetta ufficiale dell'Unione europea "Regolamento (UE) 2019/631 del Parlamento Europeo e del Consiglio del 17 aprile 2019" <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019R0631&from=EN>, accesso 26 Settembre 2019

European Environment Agency, Monitoring of CO2 emissions from vans <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/vans-12>, accesso 27 Settembre 2019

International Council on Clean Transportation (ICCT) "European vehicle market statistics", https://theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_Pocketbook_2018_Final_20181205.pdf, accesso 27 Settembre 2019

Pavlovic, J., Tansini, A., Fontaras, G., Ciuffo, B. et al., "The Impact of WLTP on the Official Fuel Consumption and Electric Range of Plug-in Hybrid Electric Vehicles in Europe," SAE Technical Paper 2017-24-0133, 2017, doi:10.4271/2017-24-0133.

Tsiakmakis, S., Fontaras, G., Cubito, C., Pavlovic, J., Anagnostopoulos, K., Ciuffo B., "From NEDC to WLTP: effect on the type-approval CO2 emissions of light-duty vehicles," JRC, 2017

F. Nemry, G. Leduc, A. Muñoz, "Plug-in Hybrid and Battery-Electric Vehicles: State of the research and development and comparative analysis of energy and cost efficiency" JRC Technical Note, January 2009

Ricardo Energy & Environment, "Assessing the impacts of selected options for regulating CO2 emissions from new passenger cars and vans after 2020" 34.0201/2017/762189/SER/CLIMA.C.4

Meszler, D., German, J., Mock, P., Bandivadekar, A., "CO2 reduction technologies for the European car and van fleet, a 2025-2030 assessment," Ricardo Energy & Environment, November 2016

Dan Meszler, John German, Peter Mock, and Anup Bandivadekar, "CO2 reduction technologies for the European car and van fleet, a 2025-2030 assessment," White Paper, ICCT, November 2016

Listino Veicoli Commerciali Leggeri, <https://www.quattroruote.it/vcl/>, accesso 27 Settembre 2019

Kratzsch, M., Wukisiewitsch, W., Sens, M., Brauer, M. "The path to CO2-neutral mobility in 2050", 40. Internationales Wiener Motorensymposium 2019, IAV GmbH, Berlin -

Vallebona, A., "Analisi della disattivazione cilindri su motori diesel per autovetture," Tesi di Laurea, Politecnico di Torino, 2018.