

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BRESCIA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E INDUSTRIALE

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica



Tesi di Laurea

ANALISI ENERGETICA DI CICLI GUIDA PER VEICOLI COMMERCIALI
PESANTI DOTATI DI PROPULSORI A BASSO IMPATTO AMBIENTALE

Relatore:

Prof. Paolo Giulio Iora

Correlatore:

Dott.ssa Laura Tribioli

Laureando:

Alessio Taglietti

86969

Anno accademico 2016-2017

A mia nonna Maria.

Indice

Introduzione.....	3
1. Stato dell'arte.....	6
1.1. Contesto attuale.....	6
1.2. La sfida del futuro.....	9
1.2.1. Propulsione elettrica.....	16
1.2.2. L'idrogeno per la propulsione.....	18
1.2.3. Biocarburanti.....	19
2. Architettura drivetrain.....	21
2.1. Configurazione tradizionale.....	23
2.2. Configurazione elettrica.....	25
2.3. Configurazione ibrida: idrogeno-elettrico.....	27
3. Modello di simulatore.....	31
3.1. Potenza richiesta dalle ruote.....	33
3.2. Flussi energetici all'interno della Driveline.....	37
3.2.1. Drivetrain tradizionale.....	37
3.2.2. Propulsione elettrica.....	39
3.2.3. Propulsione ibrida.....	42
3.3. Simulazione del dimensionamento dei sistemi di accumulo.....	47
4. Simulazioni e risultati.....	51
4.1. Ciclo-guida CARB-HHDDT.....	52
4.2. Ciclo-guida HD-UDDS.....	57
4.3. Dimensionamenti.....	59
4.3.1. Dimensionamento veicoli elettrici.....	59
4.3.2. Dimensionamento veicoli ibridi.....	65
4.4. Flussi di potenza.....	72
4.4.1. Flussi nell'architettura elettrica.....	73
4.4.2. Flussi nell'architettura ibrida.....	76
5. Analisi Well to Wheel.....	81
5.1. Analisi Well to Tank.....	83
5.1.1. Produzione di Gasolio.....	85
5.1.2. Produzione di Energia Elettrica.....	90
5.1.3. Produzione di Idrogeno.....	93
5.1.4. Risultati Analisi Well to Tank.....	95

5.2	Analisi Tank to Wheel.....	99
5.2.1	Consumo energetico nell'analisi Tank to Wheel.....	99
5.2.2	Emissione di GHG nell'analisi Tank to Wheel.....	103
5.3	Risultati analisi Well to Wheel	106
5.3.1	Energia totale consumata	107
5.3.2	Consumo di fonti fossili.....	111
5.3.3	Emissioni di GHG	114
6.	Conclusioni	117
	Bibliografia	120
	Indice Figure.....	121
	Indice tabelle.....	123

Introduzione

In un contesto energetico estremamente caotico, ho deciso di svolgere questo lavoro di tesi ritenendo fondamentale avvicinarsi alla risoluzione di problematiche riguardanti l'aumento dei consumi energetici, l'esaurimento delle scorte di fonti fossili e primo tra tutti l'aumento di emissioni nocive per l'ambiente e gli esseri viventi. L'aumento della popolazione mondiale, l'aumento del tenore di vita rispetto alla fine del XX secolo e lo sviluppo economico di molti paesi considerati fino ad ora sottosviluppati, ha causato un significativo incremento dei consumi di energia. Il maggiore utilizzo di fonti fossili ha inoltre causato un aumento di emissioni di gas serra, con conseguente innalzamento della temperatura atmosferica e manifestarsi di fenomeni climatici distruttivi.

Le stime parlano chiaro, la richiesta energetica del pianeta aumenterà del 40% tra l'anno 2012 ed il 2040 [1], richiedendo immediati interventi in materia di risparmio energetico ed incremento dell'efficienza di veicoli, edifici ed impianti industriali. In Europa, per esempio, soprattutto nelle aree settentrionali caratterizzate da un clima più rigido, da alcuni anni sono state emanate normative per favorire l'incremento di efficienza energetica degli edifici residenziali. Inoltre, le case automobilistiche proseguono da circa due decenni un processo di innovazione dei sistemi di propulsione, con l'obiettivo di aumentarne l'efficienza energetica e ridurre le emissioni nocive.

Per quanto riguarda il surriscaldamento globale, esistono dei trattati internazionali, come la Convenzione Quadro delle Nazioni Unite sui Cambiamenti Climatici (United Nations Framework Convention on Climate Change), che assieme al Protocollo di Kyoto mirano ad una diminuzione delle emissioni di gas serra.

Il drammatico tema dell'inquinamento, riguarda sia la presenza di sostanze nocive alla salute, sia l'emissione di anidride carbonica e a tale proposito è importante considerare due diverse tipologie di inquinamento:

- *L'inquinamento locale* si genera a causa dell'emissione di sostanze nocive da parte di apparecchiature che consumano prevalentemente carburanti fossili. Nel settore veicolare, per esempio, si tratta delle sostanze emesse dai tubi di scarico dei veicoli alimentati con carburanti tradizionali. Il problema è "localizzato" in quanto si manifesta esclusivamente dove avviene l'emissione.
- *L'inquinamento globale* si riferisce alle emissioni di gas serra indipendentemente dal luogo in cui esse avvengono. Esso è causato sia dalle emissioni di apparecchiature funzionanti tramite combustione, sia dai gas emessi durante le fasi di produzione di vettori energetici come il petrolio o l'energia elettrica.

Il sistema dei trasporti incide per il 20% sui consumi di energia primaria (tesi beretta) e per il 17% sulle emissioni di CO₂ del pianeta, rappresentando assieme all'industria, ai consumi residenziali e di attività commerciali, uno dei principali settori con necessità di intervento [1].

Per intervenire su queste problematiche, mai così attuali, già da diversi anni sono state avviate politiche di riduzione delle emissioni da parte di veicoli tradizionali e campagne di sensibilizzazione all'acquisto di veicoli stradali elettrici ed ibridi. In questa tesi si vuole infatti indagare su vantaggi e svantaggi che si avrebbero convertendo l'attuale tecnologia propulsiva di veicoli commerciali in materia di mobilità sostenibile, tramite analisi energetiche che tengano in considerazione l'intera filiera di produzione dei vettori energetici. Infatti, la volontà di ridurre le emissioni della propulsione veicolare mediante una variazione dei vettori energetici, deve prendere in considerazione tutti i processi di produzione e consumo, e per

questo è stata implementata un'approfondita analisi "Well to Wheel". Inoltre, mediante simulazioni numeriche verranno eseguiti i dimensionamenti di sistemi di accumulo alternativi installabili su veicoli commerciali, con lo scopo di garantirne l'evoluzione verso una mobilità sostenibile.

1. Stato dell'arte

1.1. Contesto attuale

Il settore dei trasporti, per la movimentazione di merce e passeggeri tramite veicoli di terra, aeromobili e veicoli navali, rappresenta poco meno del 20% della richiesta energetica globale.

Il grafico riportato in *figura 1.1*, mostra le percentuali di richiesta energetica per ogni tipologia di sistema di trasporto. I veicoli commerciali occupano circa il 23% delle richieste energetiche del settore, corrispondente a circa il 4% della richiesta globale di energia primaria [1].

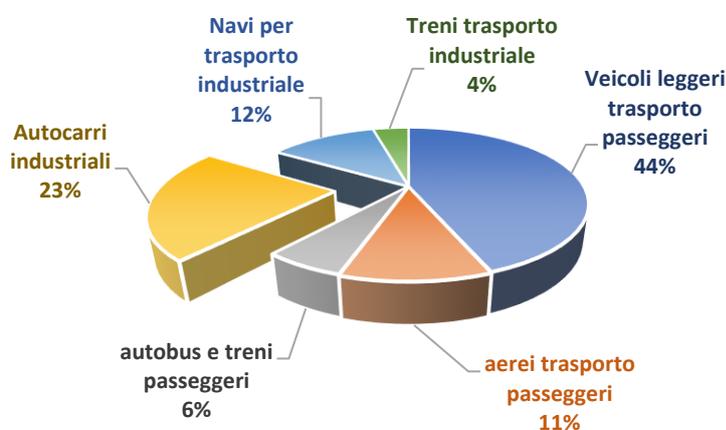


Figura 1.1 - Consumo energetico nelle aree del settore dei trasporti [1]

In *tabella 1.1* sono indicati i numeri caratterizzanti il parco veicolare circolante sulle strade italiane negli anni 2014 e 2015 [2].

	al 31.12.2015	al 31.12.2014	var. %
Autovetture	37,351,233	37,080,753	0.73
Autocarri trasporto merci	3,943,964	3,930,858	0.33
Autoveicoli Speciali	694,888	686,309	1.25
Motrici e trattori	153,858	150,086	2.51
Autobus	97,991	97,914	0.08
Rimorchi e semirimorchi	354,457	348,007	1.85
Motocicli	6,543,612	6,505,620	0.58
Motocarri e quadricicli	348,461	350,892	-0.69
Totale	49,488,464	49,150,439	6.65

Tabella 1.1 - Parco veicoli circolanti in Italia negli anni 2014 e 2015 [2]

Da *tabella 1.1* si nota che in Italia, le autovetture circolanti risultano essere pari a circa dieci volte il numero di autocarri per trasporto merci, ma osservando *figura 1.1* si può notare che il quantitativo di energia che le autovetture richiedono risulta pari a nemmeno il doppio di quello degli autocarri (44% dell'energia richiesta dai trasporti per le automobili e 21% per gli autocarri). Questo significa che, nonostante sia minore il numero di autocarri circolanti, questi influiscono pesantemente sulle richieste energetiche e quindi anche sulle emissioni.

A differenza dei veicoli leggeri, come per esempio le autovetture che viaggiano prevalentemente su strade interne ai centri urbani, gli autocarri, specialmente quelli di dimensioni elevate, viaggiano soprattutto all'esterno dei centri urbani. Questa riflessione consente di affermare che i veicoli commerciali per il trasporto di merce, influiscono maggiormente sul fattore di inquinamento globale piuttosto che localmente alle aree urbane. Ritengo però doveroso considerare che, il giorno d'oggi, le principali città europee sono congestionate anche a causa della forte presenza di autocarri leggeri per trasporto di merci, come i classici furgoni da 3,5 tonnellate. Nelle città più industrializzate, inoltre, una causa di congestione del traffico è spesso la presenza di autoarticolati pesanti.

Inoltre, le strade extra-urbane e le autostrade, ovvero le principali sedi di passaggio per veicoli commerciali, sono spesso situate in prossimità dei centri urbani. Si osservi a tal proposito la mappa mostrata in *figura 1.2* della città di Brescia e del suo hinterland, in cui sono stati evidenziati i tratti stradali caratterizzati da elevato numero di veicoli commerciali pesanti. Le autostrade e le tangenziali sfiorano e spesso attraversano alcuni centri abitati, mentre le strade urbane sono immerse nelle zone residenziali della città, comportando una forte influenza anche sull'inquinamento locale.

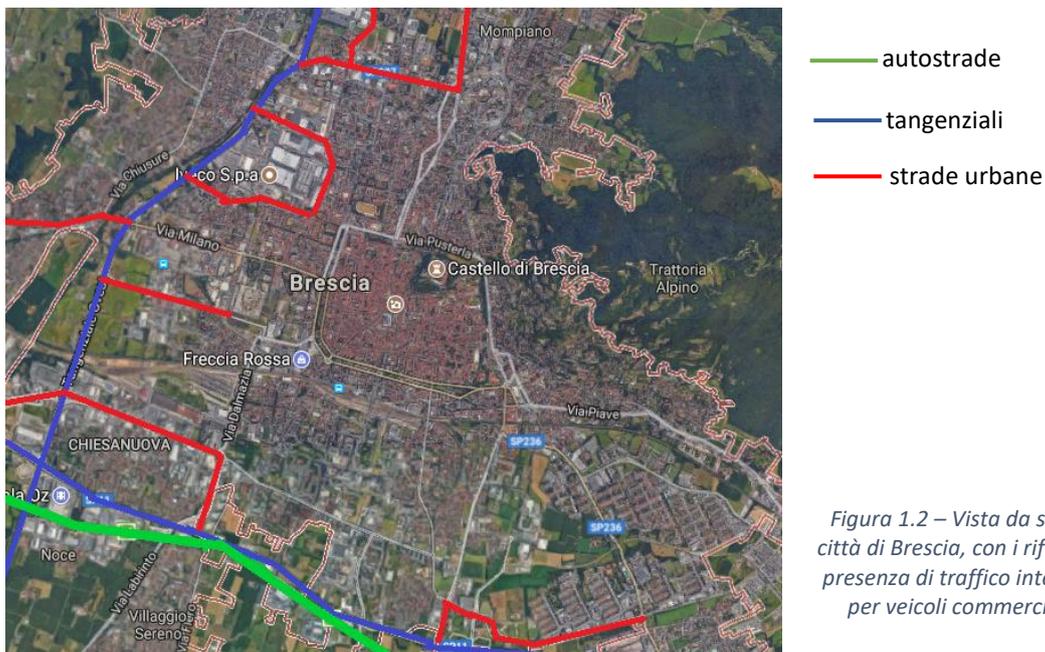


Figura 1.2 – Vista da satellite della città di Brescia, con i riferimenti della presenza di traffico intenso abituale per veicoli commerciali pesanti

Nei grandi centri urbani, vengono emesse ogni giorno quantità molto elevate di sostanze nocive che generano problemi di salubrità degli ambienti ed aumentano il rischio di malattie. Per questo motivo, alcune autorità locali, emettono periodicamente mandati di limitazioni della circolazione sulle strade più vicine ai centri cittadini.

L'attuale parco di veicoli circolanti sia in Italia che nel resto delle città europee, non consente di limitare drasticamente la quantità di emissioni locali, in quanto la tecnologia propulsiva in assoluto più diffusa è il motore a combustione interna. Si tratta di veicoli alimentati a gasolio o benzina, che emettono dai tubi di scarico una serie di sostanze che non fanno che peggiorare una situazione già al limite del controllo.

1.2. La sfida del futuro

Attualmente, l'approvvigionamento energetico globale di energia primaria, si basa su una richiesta di fonti fossili (petrolio, gas naturale e carbone) pari a 85% [3]. Le cause di una tanto elevata percentuale, risiedono principalmente nella crescita del fabbisogno energetico globale, nell'aumento della popolazione e nell'industrializzazione di paesi in via di sviluppo (paesi non-OCSE). *Figura 1.3* indica le percentuali di approvvigionamento da fonti di energia primaria per alcune aree geografiche e si può osservare che il petrolio, il carbone ed il gas naturale si contendono le posizioni al vertice della classifica. Questo fatto non contribuisce al risparmio delle scorte di fonti fossili e nemmeno all'abbassamento dei livelli di anidride carbonica in atmosfera.

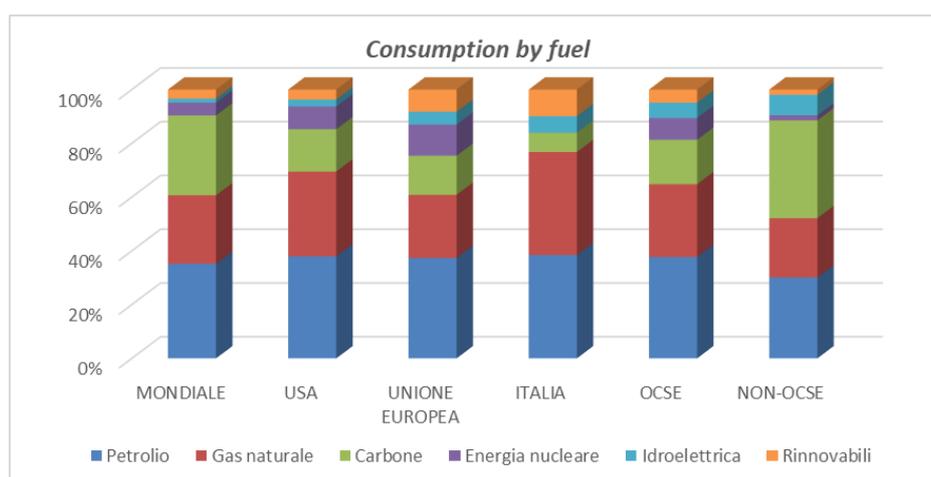


Figura 1.3 – Percentuali di approvvigionamento di energia primaria globale, negli Stati Uniti, in Unione Europea, in Italia, nei paesi OCSE e non-OCSE [3]

	<i>Petrolio</i>	<i>Gas naturale</i>	<i>Carbone</i>	<i>Energia nucleare</i>	<i>Idroelettrica</i>	<i>Rinnovabili</i>	<i>Totale</i>
<i>Mondiale</i>	4418.2	3204.1	3732.0	592.1	910.3	419.6	13276.3
	33.3%	24.1%	28.1%	4.5%	6.9%	3.2%	100.0%
<i>Stati Uniti</i>	863.1	716.3	358.4	191.8	59.2	83.8	2272.7
	38.0%	31.5%	15.8%	8.4%	2.6%	3.7%	100.0%
<i>Unione Europea</i>	613.3	385.9	238.4	190.0	78.7	135.6	1642.0
	37.3%	23.5%	14.5%	11.6%	4.8%	8.3%	100.0%
<i>Italia</i>	58.1	58.1	10.9	-	9.3	15.0	151.3
	38.4%	38.4%	7.2%	0.0%	6.1%	9.9%	100.0%
<i>Paesi OCSE</i>	2086.8	1495.2	913.3	446.8	316.8	270.1	5529.1
	37.7%	27.0%	16.5%	8.1%	5.7%	4.9%	100.0%
<i>Paesi non-OCSE</i>	2331.4	1708.9	2818.7	145.2	593.4	149.5	7747.2
	30.1%	22.1%	36.4%	1.9%	7.7%	1.9%	100.0%

Tabella 1.2 – Percentuali di approvvigionamento di energia primaria, in alcune aree geografiche di riferimento [3]

Tabella 1.2 riporta le percentuali esatte di approvvigionamento di energia primaria all'anno 2016 e si può individuare come i paesi in via di sviluppo occupino una posizione estremamente rilevante:

- I paesi in via di sviluppo presentano maggiore richiesta di energia primaria derivante da fonti fossili e di energia idro-elettrica.
- Le richieste di energia primaria da fonte nucleare, sono invece inferiori rispetto ai paesi OCSE in quanto richiedono livello tecnologico ed investimenti economici superiori.
- L'approvvigionamento da fonti rinnovabili è a favore dei paesi OCSE in quanto la spinta verso lo sfruttamento delle energie rinnovabili si sta verificando prevalentemente tra alcuni paesi membri di comitati internazionali.

I paesi non-OCSE, come visto, hanno grande rilevanza sul quadro globale delle forniture di energia primaria, per questo la loro grande richiesta di approvvigionamento da fonti fossili parallelamente alla scarsa competitività nell'utilizzo di fonti rinnovabili, genera un contributo negativo sulle stime di emissioni di CO₂ e sul surriscaldamento globale.

La richiesta energetica globale è in continuo aumento, specialmente per i paesi in via di sviluppo, mentre i paesi OCSE risultano essersi stabilizzati, probabilmente grazie alle politiche di sensibilizzazione al risparmio energetico e per effetto della crisi economica globale che ha colpito Unione Europea e Stati Uniti. In *figura 1.4* si possono verificare i valori di consumo di energia primaria dal 1965 al 2016 che sono aumentati globalmente del 355%, del 209% per i paesi OCSE e del 711% per i paesi in via di sviluppo [3].

I paesi non-OCSE inoltre, per sopperire all'aumento di richiesta di energia, hanno adottato negli ultimi cinquant'anni politiche di consumo di fonti fossili: basti osservare *figura 1.5* che mostra l'aumento di consumo di petrolio dal 1965 [3].

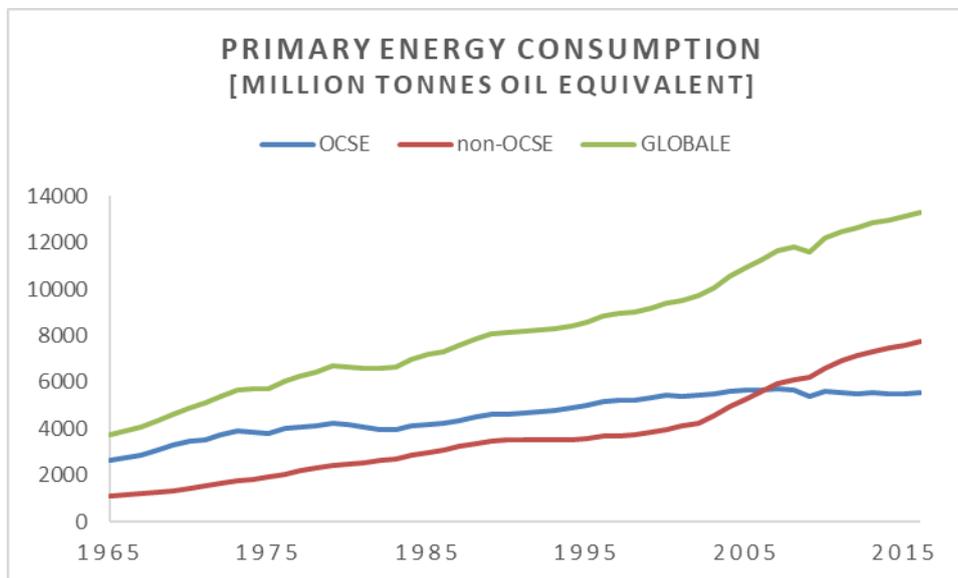


Figura 1.4 – Consumo di energia primaria globale e nei paesi OCSE e non-OCSE dal 1965 al 2015 [3]

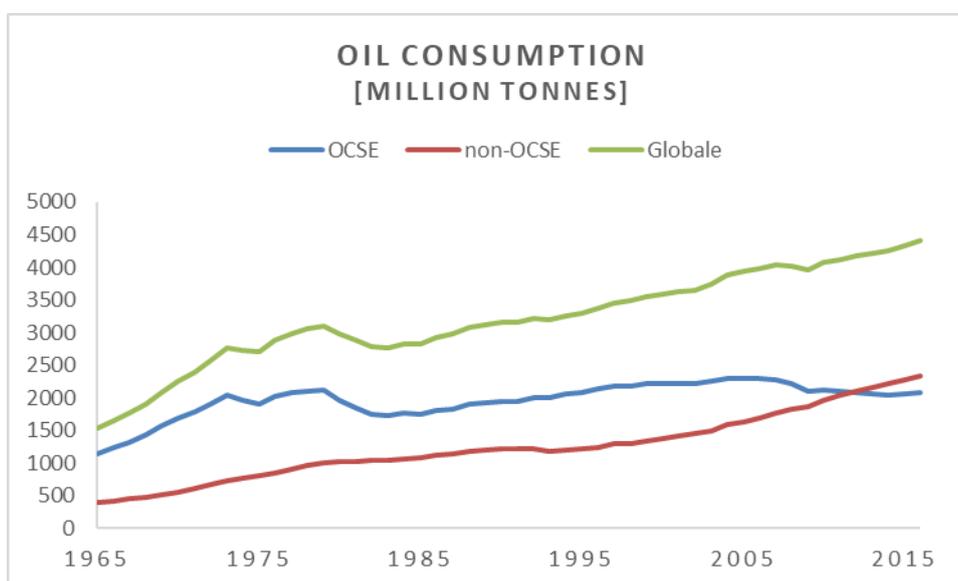


Figura 1.5 – Consumo di petrolio globale e nei paesi OCSE e non-OCSE dal 1965 al 2015 [3]

È fondamentale valutare la tendenza futura di questi grafici in modo da rendersi conto di quale contributo peggiorativo si riceverà ogni anno da paesi apparentemente non ancora in grado di affrontare un dibattito economico, politico e sociale rivolto al risparmio energetico.

Region	Total Energy consumption [quadrillion Btu]						Average annual percent change, 2012-40	
	2012	2020	2025	2030	2035	2040		
OECD	238	254	261	267	274	282		0.6
Americas	118	126	128	131	134	138		0.6
Europe	81	85	87	90	93	96		0.6
Asia	39	43	45	46	47	48		0.8
Non-OECD	311	375	413	451	491	533		1.9
Europe/Eurasia	51	52	55	56	58	58		0.5
Asia	176	223	246	270	295	322		2.2
Middle East	32	41	45	51	57	62		2.4
Africa	22	26	30	34	38	44		2.6
Americas	31	33	37	40	43	47		1.5
Total World	549	629	674	718	766	815		1.4

Tabella 1.3 – Previsioni dei consumi di energia primaria fino al 2040 in alcune regioni del mondo [1]

Tabella 1.3 riporta le previsioni future fino al 2040 del consumo di energia primaria per paesi OECD (anche detti OCSE) e per quelli in via di sviluppo non-OECD (o non OCSE). Per entrambe le categorie si ha una crescita della domanda di energia primaria, ma prevale nettamente quella dei paesi in via di sviluppo, per i quali si ha una crescita media del 1,9% all'anno [1].

Come visibile da tabella 1.4, per i paesi non-OCSE è previsto un incremento del consumo di energia da fonti petrolifere pari al 1,9% annuo, mentre tale richiesta di approvvigionamento diminuirà per i paesi economicamente più sviluppati del continente asiatico e rimarrà circa costante per quelli europei e statunitensi [1].

Region	Petroleum and other liquid fuels [million barrels per day]						Average annual percent change	
	1990	2000	2012	2020	2030	2040	1990-2012	2012-2040
OECD	42.2	48.7	45.5	45.8	45.5	46.1	0.3	0.0
Americas	20.6	24.3	23.2	24.4	24.3	24.6	0.5	0.2
Europe	14.0	15.6	14.1	13.7	13.7	14.0	0.0	0.0
Asia	7.6	8.8	8.2	7.7	7.5	7.5	0.4	-0.3
Non-OECD	25.0	29.0	44.8	54.5	63.6	74.8	2.7	1.9
Europe and Eurasia	9.3	4.4	5.3	5.8	6.2	6.1	-2.5	0.5
Asia	6.6	12.5	21.5	26.7	32.2	38.9	5.5	2.1
Middle East	3.3	4.5	7.7	10.0	11.3	13.2	3.9	2.0
Africa	2.1	2.5	3.6	4.5	5.5	6.9	2.6	2.4
Americas	3.8	5.0	6.7	7.5	8.5	9.6	2.7	1.3
Total world	67.2	77.7	90.3	100.3	109.1	120.9	1.4	1.0

Tabella 1.4 – Previsione dei consumi giornalieri di barili di petrolio fino al 2040 in alcune regioni del mondo [1]

Il consumo di energia primaria, specialmente quando esso deriva da fonti fossili, genera emissioni di anidride carbonica sia durante i processi di combustione che durante i processi di produzione del carburante fossile. Se all'anno 2012 i paesi non-OCSE producevano emissioni superiori per il 52% rispetto ai paesi OCSE, a causa dell'aumento del loro fabbisogno energetico, la percentuale è destinata a crescere fino al 213%. Infatti se le emissioni di CO2 aumenteranno del 7% per i paesi OCSE, per quelli in via di sviluppo l'aumento sarà del 150% [1].

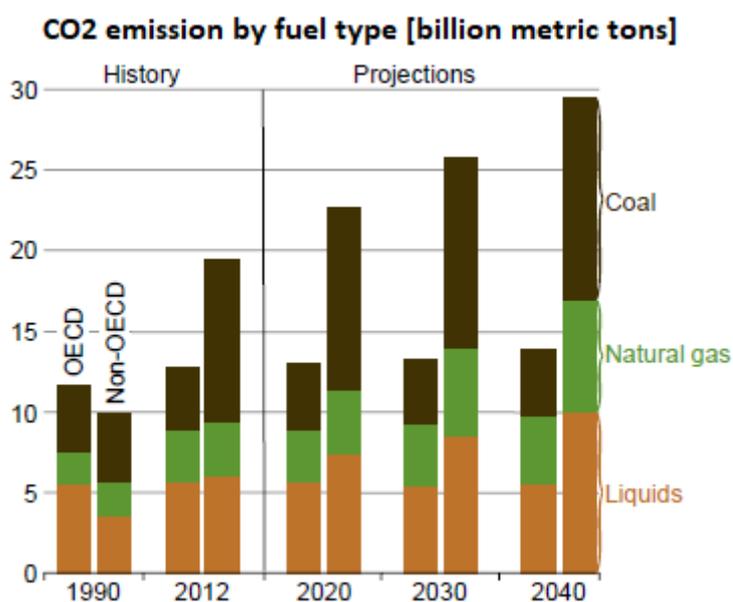


Figura 1.6 –Previsione di emissioni di CO2 per tipologia di fonte fossile (carbone, gas naturale e petrolio) [1]

I forti incrementi di richiesta energetica ed emissioni di anidride carbonica in atmosfera, soprattutto da parte di paesi in via di sviluppo, comportano un'accelerazione dell'esaurimento delle scorte di fonti fossili e contemporaneamente un innalzamento della temperatura globale. Il problema dell'esaurimento delle scorte è estremamente complesso e delicato, in quanto oltre a dipendere dall'equilibrio tra domanda ed offerta, coinvolge anche aspetti politici. Per quanto riguarda invece il surriscaldamento globale, esistono diversi pareri all'interno della comunità scientifica, ma la ragione condivisa che spiega l'incremento della

temperatura sul pianeta ricade sul livello di emissioni di CO₂ e di gas serra in generale. In *figura 1.7* è mostrata una stima del surriscaldamento globale, effettuata secondo differenti metodi di simulazione ed identifica un innalzamento della temperatura media compreso tra 2 e 5 °C fino al 2100.

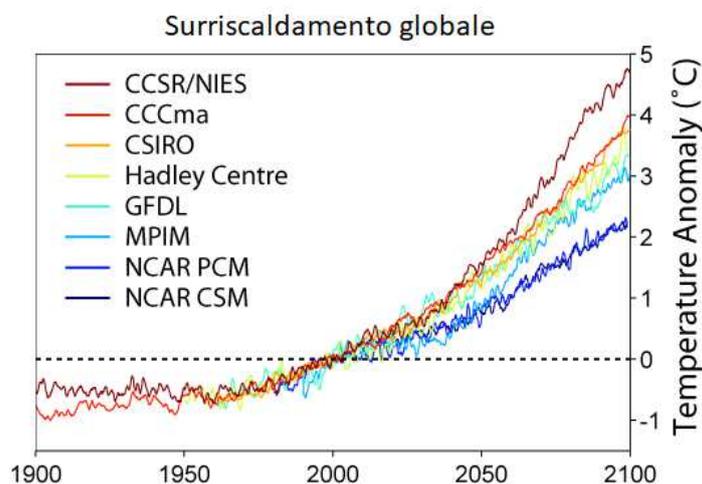


Figura 1.7 – Stima dell’aumento medio di temperatura globale fino al 2100 [8]

L’aumento della temperatura all’interno dell’atmosfera provoca una serie di eventi che rendono più critica la vita sulla terra. Oltre allo scioglimento dei ghiacciai con conseguente innalzamento del livello delle acque marine e diminuzione delle terre emerse, l’aumento della temperatura corrisponde ad un aumento di energia all’interno dell’atmosfera, il quale comporta il manifestarsi di fenomeni meteorologici estremi come episodi di siccità, onde di calore, nubifragi e trombe d’aria [4]. Inoltre, un aumento della temperatura, soprattutto per elevate latitudini, comporta la facilità di importazione di patologia tropicali, agendo significativamente anche sul benessere e sulla salute degli esseri umani.

Risulta evidente la necessità di intervenire radicalmente sulle abitudini energetiche anche nel settore industriale dei trasporti, per il quale si possono individuare due possibilità:

- Incremento dell'efficienza energetica dei veicoli circolanti;
- Introduzione di tecnologie e vettori energetici innovativi;

L'incremento di efficienza dei veicoli rappresenta una soluzione valida nel breve e medio termine, in quanto può risultare efficace per limitare inquinamento ed esaurimento delle scorte di fonti fossili durante il consolidamento di tecnologie innovative, come per esempio l'utilizzo di nuovi vettori energetici. Per incrementare l'efficienza energetica dei veicoli, può rivelarsi interessante sviluppare sistemi di recupero dell'energia per veicoli tradizionali: si consideri, per esempio, che i veicoli con motore a combustione interna sono caratterizzati da grandi perdite energetiche, come per esempio lo smaltimento di calore dalla testata del motore e l'energia contenuta nei fumi di scarico. Un'altra possibilità sfruttata nel medio periodo, è la produzione di veicoli ibridi, i quali consentono di sfruttare sia i vantaggi del motore a combustione interna, sia il recupero di energia del motore elettrico. Inoltre, la tecnologia ibrida, consente di suddividere la richiesta energetica tra due diverse fonti di energia primaria.

Le soluzioni di lungo periodo invece, richiedono una decarbonizzazione del settore dei trasporti, avviabile sostituendo ai carburanti tradizionali vettori energetici innovativi che consentano di contenere le emissioni di CO₂ e di preservare le scorte di fonti fossili. I veicoli elettrici sono una soluzione possibile che sta iniziando a prendere piede in alcune aree dell'Unione Europea e negli Stati Uniti. Per limitare a 2°C l'aumento di temperatura nel 2050, lo scenario 2DS della International Energy Agency indica che il contributo del settore dei trasporti nella riduzione delle emissioni di anidride carbonica dev'essere pari al 21%, come indica *figura 1.8*. Per garantire tale quota, entro il 2050 è necessario che i tre quarti dei veicoli privati e commerciali sia dotato di propulsione alterativa [5].

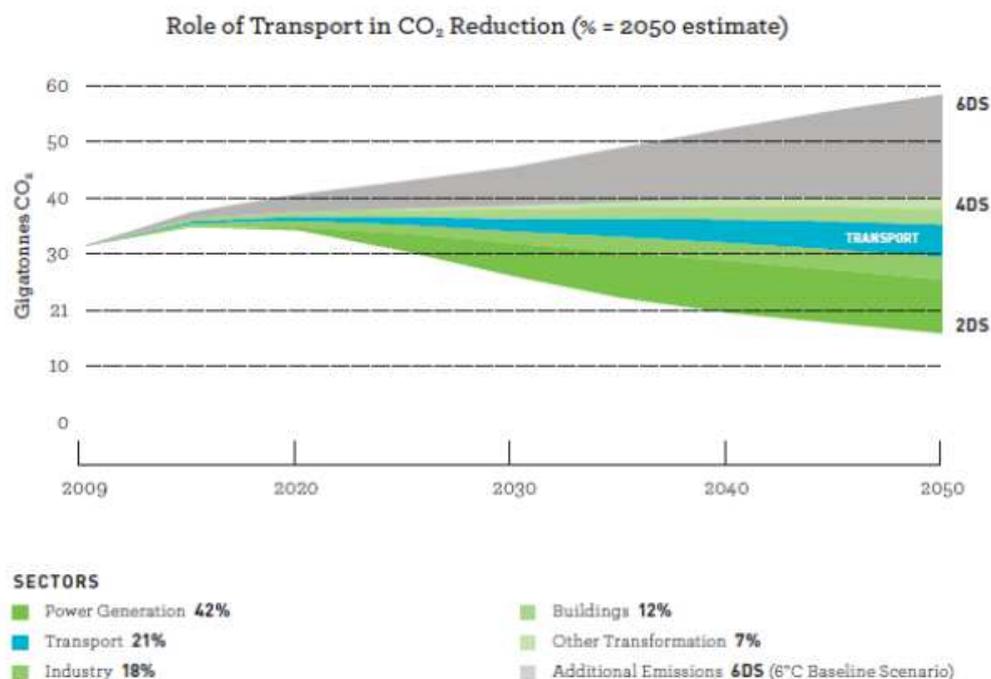


Figura 1.8 – Contributo alla riduzione delle emissioni di anidride carbonica da parte del settore industriale, residenziale e commerciale [5]

1.2.1. Propulsione elettrica

Il giorno d'oggi, gli unici veicoli alternativi ad aver riscosso un minimo successo commerciale, sono i veicoli elettrici a batterie. Questi sono però caratterizzati da limiti che non ne consentono una rapida ed effettiva diffusione:

- Elevato prezzo di acquisto a causa del costo degli accumulatori agli ioni di Litio.
- Limiti di autonomia legati alla tecnologia dei sistemi di accumulo.
- Tempi di rifornimento eccessivi e non paragonabili ai veicoli tradizionali.

Per risolvere il problema del prezzo di acquisto, molte case costruttrici hanno iniziato a vendere i veicoli elettrici escludendo le batterie dal prezzo di acquisto, prevedendo per esse dei contratti di noleggio. Il costo di tali contratti spesso si mantiene elevato e vicino a quello di acquisto del carburante tradizionale, privando i veicoli elettrici del vantaggio di essere economicamente più vantaggiosi in fase di utilizzo. Le vendite di veicoli elettrici sono ancora

molto basse in tutte le regioni del mondo, ad eccezione di alcuni stati, dove comunque i veicoli a propulsione tradizionale continuano ad occupare le maggiori fette del mercato. In Italia, come si può osservare in *tabella 1.5*, il numero di veicoli elettrici ed ibridi nel 2016 risultava pari a circa lo 0,3% dell'intero parco circolante e la percentuale scende allo 0,1% per autocarri adibiti a trasporto di merce [6].

	Benzina	Benzina e GPL	Benzina e metano	Gasolio	Elettrico e ibrido	Altro	Totale	% veicoli elettrici
Autobus	483	339	4,101	92,377	464	12	97,776	0.5%
Autocarri per trasporto merci	206,082	41,287	85,390	3,681,177	4,065	29	4,018,030	0.1%
Autoveicoli speciali	20,772	6,742	4,052	674,920	674	5	707,165	0.1%
Autovetture	18,360,105	2,211,368	911,246	16,260,625	126,508	479	37,870,331	0.3%
Motocarri e tricicli trasporto merci	146,043	12	223	54,494	967	62,682	264,421	0.4%
Motocicli	6,080,451	26	604	692	2,356	522,060	6,606,189	0.0%
Motoveicoli speciali	74,473	1		1,259	5,810	1,483	83,026	7.0%
Trattori stradali o motrici	154	35	191	161,576	21	1	161,978	0.0%
TOTALE	24,888,563	2,259,810	1,005,807	20,927,120	140,865	586,751	49,808,916	0.3%

Tabella 1.5 – Parco circolante in Italia nell'anno 2016, suddiviso per tipologia di veicolo e per tecnologia di propulsione [6]

Una diffusione più rapida di veicoli elettrici e di tecnologie alternative per la mobilità, richiede attualmente una forte evoluzione tecnologica che gli consenta di competere con i veicoli tradizionali in termini di autonomia, di tempi di ricarica e di prezzo all'acquisto. I prossimi anni sono da ritenersi fondamentali per uno sviluppo efficace della mobilità sostenibile, in modo che le vendite di veicoli elettrici sul mercato possano aumentare significativamente.

La produzione di energia elettrica nei paesi europei, richiede l'utilizzo di fonti fossili, perciò la propulsione elettrica, nonostante consenta l'eliminazione di emissioni di CO₂ dai fumi di scarico, presenta un problema di emissioni nella filiera produttiva del vettore energetico. Infatti, la produzione di energia elettrica, a parte quella ottenuta da fonti rinnovabili, richiede l'utilizzo in larga scala di fonti fossili. Le analisi effettuate in questo lavoro di tesi, consentono infatti di indagare sugli effettivi vantaggi e svantaggi legati all'utilizzo di vettori energetici alternativi.

1.2.2. L'idrogeno per la propulsione

L'idrogeno è una delle sostanze più presenti in natura, ma ciò nonostante non è di facile reperimento, in quanto è quasi sempre combinato con altri elementi. L'utilizzo dell'idrogeno richiede quindi un processo di estrazione da altre sostanze e ciò può avvenire dall'acqua, mediante processo di elettrolisi sfruttando energia elettrica, oppure da combustibili fossili. Il primo metodo è usato per produzioni su bassa scala, mentre per i grandi approvvigionamenti viene ricavato dal metano.

L'idrogeno per la propulsione veicolare, può essere utilizzato con due modalità molto differenti tra loro:

- L'idrogeno può essere immagazzinato in un serbatoio e usato per alimentare un motore a combustione interna. Questa tecnologia è stata proposta senza grandi successi commerciali da alcune case automobilistiche in passato, ed è soggetta a rendimenti piuttosto scarsi a causa di una combinazione tra rendimento del motore a combustione interna e rendimento della produzione dell'idrogeno da metano.

A causa della combustione, in uscita dal motore termico si generano ossidi di azoto che devono essere filtrati in quanto sostanze inquinanti. Dunque, anche dal punto di vista dell'impatto ambientale, questa soluzione non pare convincente.

- L'idrogeno può essere utilizzato per alimentare una cella a combustibile che, tramite un processo elettro-chimico, produce energia elettrica che a sua volta viene usata per alimentare un motore elettrico. Questa soluzione è l'unica proposta al giorno d'oggi, in quanto consente di ottenere efficienze paragonabili o superiori a quelle di motori tradizionali. All'interno della cella a combustibile non è necessaria combustione e le

massime temperature raggiunte sono nell'ordine dei 70-80°C, evitando la fuoriuscita di sostanze dannose dal tubo di scarico.

Le celle a combustibile sono componenti molto costosi che condizionano fortemente il prezzo di listino dei veicoli ad idrogeno. Questo, in effetti, risulta essere il limite principale di questa tecnologia, tale da non renderla veramente competitiva con le propulsioni tradizionali ed elettrica. I vantaggi dell'idrogeno per la propulsione, oltre all'azzeramento delle emissioni dal tubo di scappamento, sono i tempi di rifornimento e l'autonomia, che a differenza delle soluzioni elettriche a batteria, sono confrontabili con la tecnologia tradizionale.

La tecnologia dell'idrogeno è caratterizzata da uno spostamento delle emissioni dalla propulsione alla filiera produttiva del vettore energetico, infatti, per rifornire il veicolo, sono necessarie la produzione di metano liquido e successivamente la sua elaborazione (detta *reforming*) per la generazione delle molecole di idrogeno.

1.2.3. Biocarburanti

Nel settore dei carburanti liquidi, le alternative ai combustibili fossili che consentono l'utilizzo di comuni motori a combustione interna sono i biocarburanti: il *biodiesel* ed il *bioetanolo*. Si tratta di due carburanti caratterizzati da una filiera produttiva ben consolidata, la quale consente ad essi di guadagnarsi il 5% del mercato dei veicoli a livello mondiale [7]. Biodiesel e bioetanolo sono entrambi carburanti di origine vegetale, ma richiedono dei processi produttivi differenti.

Il biodiesel viene prodotto da oli di colza, girasole e soia che, a causa della loro elevata viscosità, richiedono un trattamento chimico di transesterificazione. Biodiesel può essere utilizzato da solo oppure in miscela con diesel in percentuali fino al 5-20%, consentendo di

ridurre sensibilmente le emissioni rispetto alla soluzione a gasolio tradizionale. Il bioetanolo, invece, prevede un processo di fermentazione alcolica di prodotti agricoli ricchi di zucchero oppure amido. Questo carburante possiede delle caratteristiche chimico-fisiche molto simili alla benzina e ciò ne consente l'utilizzo anche in miscela con percentuali fino al 20%.

Questi carburanti generano emissioni di gas serra solamente durante le fasi di coltivazione, raccolta e trattamento delle colture, infatti le emissioni durante la combustione possono essere ignorate, in quanto esattamente pari alla quantità di anidride carbonica assorbita durante la vita della coltura stessa. Oltre alla convenienza ambientale, i biocarburanti non richiedono modifiche significative agli apparati propulsivi ed alle infrastrutture di distribuzione e garantiscono prestazioni paragonabili a quelle di benzina e gasolio, presentandosi come ottima alternativa ai carburanti tradizionali nel breve periodo. Una fondamentale limitazione è che lo sviluppo di colture per la produzione di carburanti, potrebbe mettere in competizione le coltivazioni utilizzate per l'alimentazione umana ed animale, generando un rischio di monoculture energetiche. Attualmente, molte ricerche sono orientate ai biocarburanti di seconda generazione come l'etanolo, i quali nascono dall'esigenza di limitare i conflitti sul mercato alimentare e sono caratterizzati da bilanci energetici molto più vantaggiosi.

Per tutelare le esigenze del mercato alimentare, i biocarburanti da soli non sono in grado di sostituire interamente benzina e gasolio, ma possono comunque continuare ad occupare una fetta di mercato rilevante. Per la stesura della tesi, è stato ritenuto non rilevante indagare in questa direzione, preferendo soluzioni più adatte alla distribuzione su larga scala.

2. Architettura drivetrain

Il lavoro di tesi si focalizza su veicoli commerciali pesanti e nello specifico su diverse tipologie di apparato propulsivo, proposte come alternative alla configurazione tradizionale con motore a combustione interna. In questa sezione si vuole approfondire la descrizione dell'architettura del drivetrain, ovvero di tutto l'apparato propulsivo che consente di generare potenza e trasmetterla alle ruote. A seconda del vettore energetico adottato per la propulsione, variano i componenti che costituiscono il drivetrain e di conseguenza anche le logiche di dimensionamento degli stessi.

Come anticipato, la quasi totalità di veicoli pesanti commerciali, è dotata di propulsori tradizionali che presentano numerose problematiche correlate al consumo di combustibili fossili. Le tecnologie alternative per la mobilità sostenibile presenti al giorno d'oggi sul mercato, si concentrano principalmente su autoveicoli leggeri, ma possiamo considerarle estese all'intero parco circolante su gomma:

- I *"micro-hybrid vehicle"* sono veicoli molto simili a quelli tradizionali, ma a differenza di questi ultimi, possiedono il dispositivo *"Start&Stop"* che consente di spegnere e riaccendere il veicolo durante le brevi soste ai semafori ed agli stop. Per questo scopo sono dotati di una batteria con maggiore capacità energetica, solitamente con tecnologia piombo acido [11].
- Gli *"hybrid vehicle"* sono veicoli dotati sia di un motore tradizionale che di un motore elettrico alimentato da una batteria. Consentendo di suddividere la potenza richiesta dalla propulsione tra i due sistemi propulsivi e possono funzionare in modalità elettrica solamente per pochi chilometri.

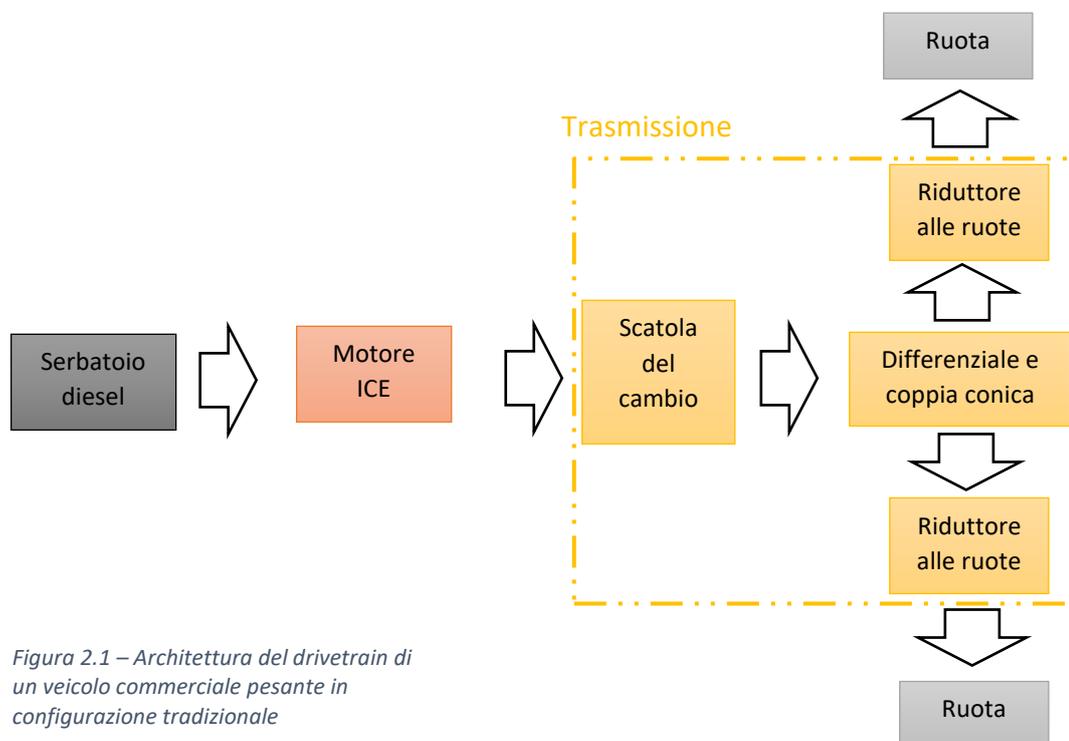
- Gli *“hybrid plug-in vehicle”* sono molto simili ai precedenti, ma caratterizzati da una batteria con capacità di accumulo molto maggiore, la quale consente percorrenze in modalità elettrica superiori.
- I *“battery electric vehicle”* sono i classici veicoli elettrici. Essi sono movimentati da un solo motore elettrico, alimentato tipicamente da una batteria agli Ioni di Litio che garantisce percorrenze nel range dei 100-300 km e comunque molto superiori rispetto ai veicoli tradizionali.
- I *“fuel-cell electric vehicle”* sono veicoli molto meno diffusi e sono caratterizzati da un motore elettrico alimentato da una cella a combustibile (in inglese fuel cell). Questo particolare componente, come vedremo poi, consente di produrre energia elettrica a bordo della vettura, mediante l'utilizzo di idrogeno immagazzinato in bombole di stoccaggio.

Altre tecnologie come il gpl ed il metano, non vengono considerate in questa analisi per la mobilità sostenibile, perché prevedono ancora una forte dipendenza da fonti fossili. In realtà, lo stesso discorso vale per la soluzione *“micro hybrid vehicle”* che si dimostra estremamente simile alla propulsione tradizionale, mentre le soluzioni ibride sono interessanti solamente nel breve-medio termine, per dare tempo alle soluzioni più innovative di raggiungere maggiore maturità tecnologica.

I *“battery electric vehicle”* ed i *“fuel-cell electric vehicle”*, possono essere realizzati con svariate architetture dell'apparato propulsivo, a seconda delle prestazioni che vogliono essere garantite dal veicolo. In seguito ne viene descritta l'architettura per la soluzione tradizionale con motore a combustione interna e per le soluzioni innovative dotate di batterie e celle a combustibile.

2.1. Configurazione tradizionale

La configurazione tradizionale è la soluzione in assoluto più adottata, specialmente su veicoli commerciali pesanti. In *figura 2.1* si osserva uno schema che sintetizza l'architettura di tutta la linea di trazione per un veicolo pesante tradizionale.



Il motore a combustione interna, nel caso di configurazione tradizionale, viene alimentato esclusivamente con carburante diesel immagazzinato in un serbatoio ed è caratterizzato da un rendimento che varia con la velocità di rotazione e con la pressione effettiva. Per avere informazioni più dettagliate sul rendimento di un motore termico a ciclo diesel, si può osservare *figura 2.2* che mostra un esempio di grafico di iso-consumo. Quel che si osserva, è che in corrispondenza di determinati valori di pressione effettiva e di velocità di rotazione del motore, si ottiene un certo consumo specifico e quindi un certo rendimento, che comunque non assume mai valori superiori al 35%.

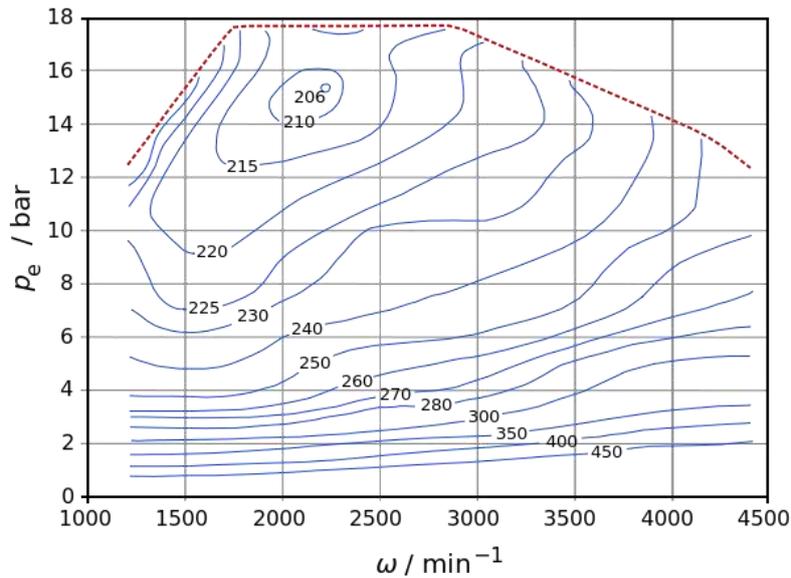


Figura 2.2 – Esempio di consumo specifico di carburante [g/Wh] per motore a 3 cilindri a ciclo guida

La curva tratteggiata di colore rosso, indica la pressione effettiva massima, che essendo funzione della coppia motrice, ne assume la medesima forma, che per un motore diesel presenta un plateau in prossimità della metà della velocità massima di rotazione. In corrispondenza del plateau si ottengono i consumi specifici minori per quel motore, il che ne indica le condizioni ottimali di funzionamento. Per questo motivo, i massimi valori di rendimento per il motore termico, sono raggiungibili solamente facendo lavorare il motore in determinate condizioni di funzionamento vicine alla coppia massima. I motori diesel che equipaggiano veicoli commerciali pesanti con tonnellaggi molto superiori a 3.5 tonnellate, sono solitamente caratterizzati da un campo di lavoro molto più ristretto, con velocità di rotazione limitata a 2500-3000 rpm, contro i 4500-5000 rpm dei motori diesel per autovetture [12].

Per distribuire la potenza nell'intero campo di velocità utile alla propulsione veicolare, viene sempre predisposto il cambio a valle del motore termico, ed esso è caratterizzato da un numero di ingranaggi dipendente dalla tipologia di cambio adottato e dal numero dei rapporti. Per modificare i rapporti di velocità si adottano delle coppie di ingranaggi, le quali sono però

caratterizzate da attriti e quindi da un rendimento intrinseco, detto “rendimento di trasmissione” della coppia dentata. In funzione della marcia ingranata dal guidatore, varia il numero di ruote dentate in presa e dunque anche l’efficienza energetica del cambio. Per trasmettere la coppia al semiasse, si adotta un dispositivo differenziale che consente di ripartire la coppia correttamente tra le ruote di sinistra e destra, ed anch’essa è caratterizzata da un rendimento di trasmissione. Talvolta, per agevolare le operazioni di partenza del veicolo in condizioni di aderenza particolari, vengono predisposti dei dispositivi dissipativi che consentono di “bloccare” il differenziale impedendo il pattinamento delle ruote, determinando però l’insorgenza di un ulteriore rendimento di trasmissione. In *figura 2.2* è indicata la presenza di riduttori alle ruote, costituiti da ingranaggi epicicloidali che consentono di diminuire le dimensioni della scatola del ponte al cui interno è disposto il differenziale. Anch’essi sono costituiti da dissipazioni energetiche per attrito e sono dunque caratterizzati da rendimenti che si sommano a quelli del cambio e del differenziale. L’insieme di tutti questi elementi, determina un unico rendimento di trasmissione, comunque molto maggiore rispetto al rendimento del motore termico.

2.2. Configurazione elettrica

Come anticipato, i veicoli con alimentazione puramente elettrica non hanno ancora riscosso un successo decisivo sul mercato, mentre le soluzioni ibride, sono state in grado di coniugare i vantaggi della propulsione elettrica con i vantaggi di quella tradizionale, e ad oggi ricoprono un’importante ruolo nel mercato veicolare. La soluzione a lungo termine rimane tuttavia quella elettrica, in quanto consente in primo luogo di slegare i sistemi di trasporto dal consumo di combustibili fossili, generando una serie di vantaggi intrinseci:

- Non sono presenti gas di scarico nocivi per la salute e nemmeno emissioni di anidride carbonica che contribuirebbero al surriscaldamento del globo.
- Le curve caratteristiche di coppia e potenza per un motore elettrico, si adattano al meglio alla propulsione veicolare.
- Il rendimento del motore elettrico è sempre di gran lunga superiore a quello di un motore termico.
- Il motore elettrico è una macchina reversibile e può anche trasferire flussi di potenza dalle ruote alle batterie, in modo da ricaricare queste ultime mediante la “frenata dissipativa”.

In *figura 2.3* è stato riportato uno schema che sintetizza il funzionamento dell’architettura elettrica per un veicolo pesante, con l’ipotesi di utilizzo dei medesimi dispositivi di trasmissione della configurazione tradizionale.

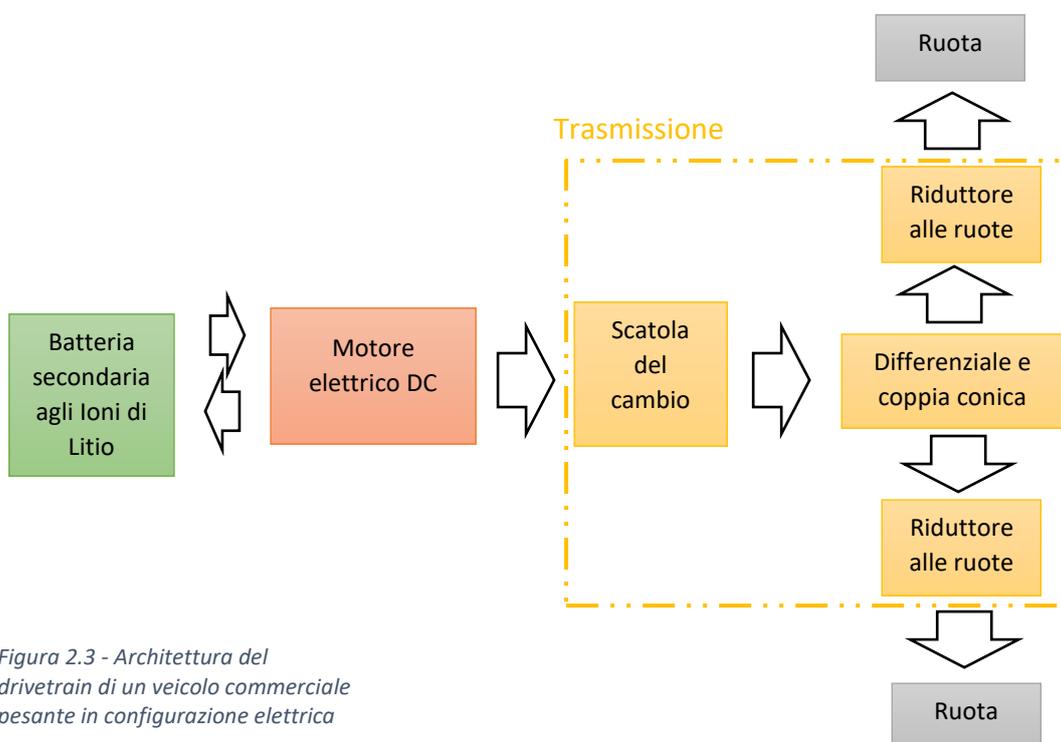


Figura 2.3 - Architettura del drivetrain di un veicolo commerciale pesante in configurazione elettrica

Per questo tipo di configurazione, il sistema di accumulo dell'energia non è più di tipo fisico, in quanto l'energia elettrica immagazzinata nella batteria non è quantificabile tramite massa e volume. Questo fa sì che la batteria agli ioni di Litio sia caratterizzata da un rendimento elettrico di carica e da un rendimento elettrico di scarica, condizionati dall'intensità di corrente circolante e dalla temperatura [10]. Le condizioni ambientali di funzionamento ottimale, vengono solitamente fornite dal costruttore ed indicano un range di temperatura al quale corrisponde un rendimento prossimo al 100%.

Un importante svantaggio di questa configurazione è dato dal peso delle batterie, che se confrontate con i serbatoi di carburante tradizionale, causano un aumento dei consumi ed una forte diminuzione del carico utile per rispettare la massa complessiva a terra. Inoltre, non essendo possibile un rifornimento di tipo fisico, l'operazione di ricarica delle batterie è condizionata da tempi lunghi, in modo da incrementare l'efficienza dei sistemi di accumulo.

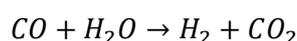
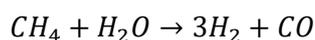
2.3. Configurazione ibrida: idrogeno-elettrico

L'idrogeno per la propulsione, può essere immagazzinato in forma liquida, in forma gassosa o in forma chimica, ma in tutte e tre le possibilità, viene utilizzato per alimentare una cella a combustibile che ha il compito di alimentare il motore elettrico. Nonostante questa soluzione utilizzi ancora energia elettrica, la fuel cell non è una macchina reversibile e dunque non consente un processo inverso di ricarica. Questa limitazione ha spinto allo studio di una soluzione ibrida che comprenda anche una batteria, consentendo un aumento di efficienza grazie al recupero in frenata e diminuendo le dimensioni della cella a combustibile, ottenendo un vantaggio economico. Infatti, come anticipato, l'elevato costo di acquisto rappresenta il

primario limite della tecnologia dell'idrogeno, dunque una soluzione ibrida potrebbe consentirne una più rapida espansione sul mercato.

Le tecniche di stoccaggio dell'idrogeno a bordo dei veicoli sono descrivibili come segue:

- Lo *stoccaggio allo stato gassoso* consiste nell'utilizzo di un serbatoio in pressione in grado di immagazzinare un quantitativo di idrogeno sufficiente al raggiungimento di autonomie ragionevoli. Tuttavia, l'idrogeno sotto forma gassosa possiede una scarsa energia per unità di volume e richiede dunque pressioni di immagazzinamento elevate nell'ordine dei 700 bar, con bombole di dimensioni adatte all'installazione a bordo di veicoli. [13]
- Un'alternativa è lo *stoccaggio allo stato liquido*, che richiede l'utilizzo di serbatoi criogenici per lo stoccaggio a 20 K (corrispondenti a -252 °C). In questo caso, il dispendio energetico necessario per il mantenimento di questa tecnologia, rischia di ledere in maniera eccessiva i vantaggi di questa propulsione alternativa ed è pertanto inutilizzato per la propulsione veicolare.
- Un'alternativa è lo *stoccaggio in stato chimico*, che significa immagazzinare altre sostanze contenenti idrogeno all'interno di un serbatoio e, mediante dispositivi installati a bordo del veicolo, effettuare un processo di "reforming on board". Una possibilità è quella di immagazzinare metano e di estrarne l'idrogeno allo stato atmosferico mediante le seguenti reazioni chimiche:



La prima reazione, oltre all'idrogeno, produce monossido di carbonio che essendo tossico richiede una seconda reazione per il suo smaltimento. Infatti il secondo processo ne comporta una reazione con acqua per la formazione di anidride carbonica

ed ulteriore idrogeno. Questa soluzione però non consente di rendere la propulsione indipendente dallo sfruttamento delle fonti fossili e dalle conseguenti problematiche, in quanto richiede l'accumulo di gas metano.

Visti gli aspetti appena elencati, si è ritenuto ideale considerare un sistema di accumulo dell'idrogeno allo stato gassoso, prevedendo l'installazione di serbatoi ad alta pressione, come d'altronde avviene sui veicoli ad idrogeno attualmente in produzione [13]. *Figura 2.4* mostra lo schema riassuntivo dell'architettura della configurazione ibrida, evidenziando la presenza dei due sistemi di accumulo (batteria e fuel cell).

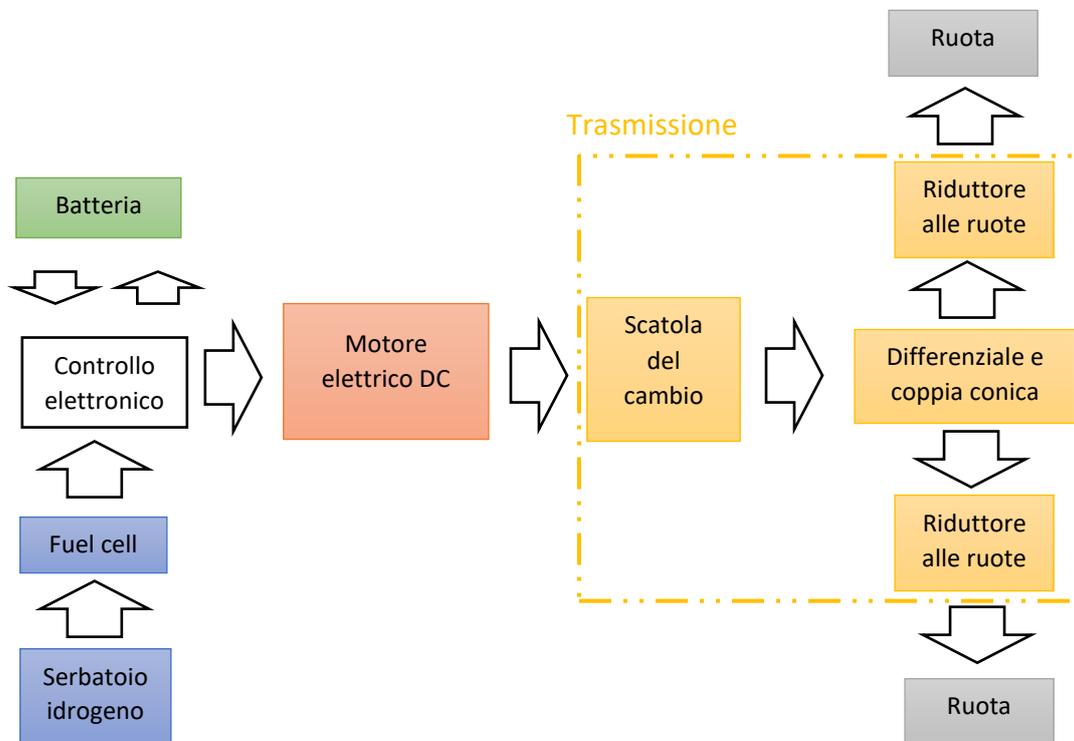


Figura 2.4 - Architettura del drivetrain di un veicolo commerciale pesante in configurazione ibrida

Il rendimento di trasmissione, motore elettrico e batteria è il medesimo della configurazione elettrica già approfondita alla sezione 2.2. La cella a combustibile presenta invece un'efficienza che può essere considerata pari al 50% circa ed è caratterizzata dalla totale

assenza di recupero in frenata. Infatti, come anticipato, l'impossibilità di realizzare un flusso di potenza inverso, comporta perdite energetiche che richiedono l'utilizzo di una batteria integrativa per essere recuperate. L'utilizzo di due differenti sistemi di accumulo però, richiede la presenza di un dispositivo elettronico di controllo, il quale ha il compito di selezionare quale dei due sistemi di accumulo deve lavorare istante per istante. Il lavoro di tesi, come si vedrà nelle sezioni successive, si concentra anche sulla definizione di una logica di funzionamento che sia in grado di ridurre il più possibile il consumo energetico per questa tipologia di veicoli.

3. Modello di simulatore

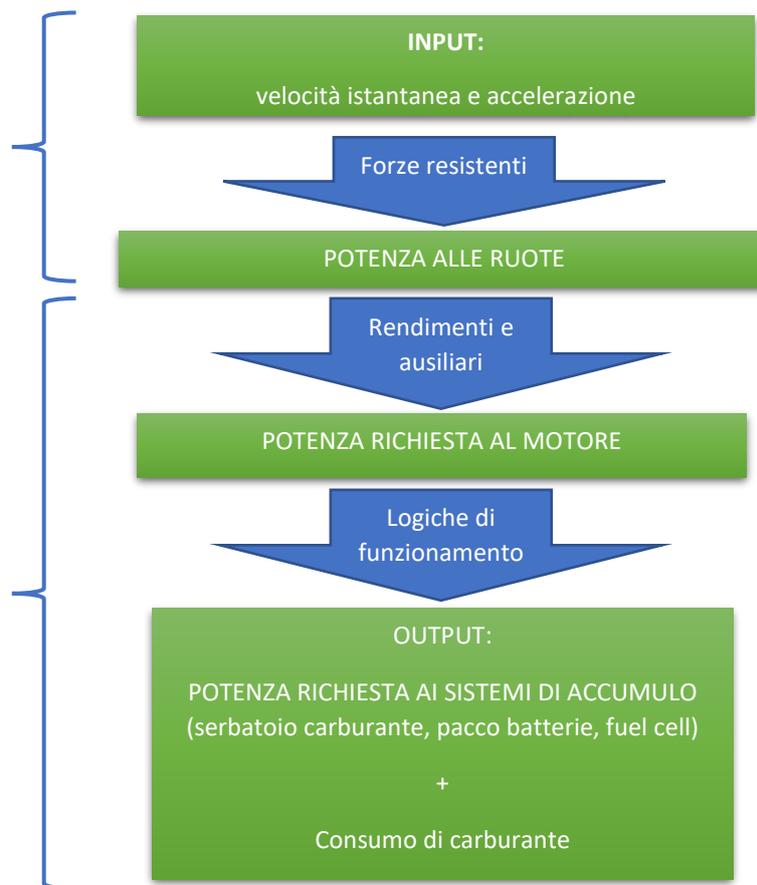
Per dimensionare i componenti di accumulo dell'energia all'interno della drive-line del veicolo e per determinare i consumi di energia e di carburante, è stato implementato un modello di simulatore operante tramite una serie di macro sviluppate con software "Visual Basic", ed il contributo che ha motivato la stesura di questa tesi è stato il perfezionamento dei metodi di calcolo. Indipendentemente dal tipo di vettore energetico utilizzato (carburante diesel, energia elettrica o idrogeno), il compito del simulatore è quello di riprodurre i flussi di energia interni all'architettura del veicolo durante la percorrenza di un determinato ciclo-guida. Per "ciclo-guida" si intende un profilo di velocità variabile nel tempo, la cui descrizione viene rimandata al capitolo successivo.

Il simulatore è in grado di rappresentare adeguatamente la reale percorrenza stradale di veicoli con differenti sistemi di propulsione:

- Propulsore tradizionale = alimentato con combustibile diesel.
- Propulsore elettrico = alimentato tramite sistema di accumulo a batterie.
- Propulsore ibrido = dotato di duplice sistema di accumulo, composto da una batteria ed una cella a combustibile (fuel cell).

La discretizzazione del tempo è fondamentale ed è realizzata con una frequenza di 1 Hz, ovvero, ad ogni secondo il software riceve come input il valore della velocità che il veicolo possiede ed il valore di accelerazione che deve mantenere fino al secondo successivo al fine di raggiungere la velocità desiderata un secondo più tardi. Quindi si assume che all'interno di ogni intervallo di tempo della durata di un secondo, il veicolo si muova secondo moto uniformemente accelerato. Un infittimento degli intervalli di tempo consentirebbe una stima

più precisa dei valori di output, ma allo stesso tempo incrementerebbe il peso computazionale rendendo il lavoro del simulatore difficile da gestire con semplici calcolatori. Inoltre, allo stato attuale, tutti i cicli-guida vengono tarati con la frequenza di 1 Hz, quindi non sarebbe stato produttivo infittire la discretizzazione del tempo con frequenze maggiori. Allo stesso tempo il simulatore, ad ogni acquisizione di input, fornisce in output il valore di energia che il motore richiede al combustibile al fine di seguire il profilo di velocità. Lo schema adottato è quello mostrato nel diagramma a blocchi seguente, all'interno del quale si può distinguere una prima parte, riferita al calcolo della potenza richiesta alle ruote che è legata solamente alle richieste del ciclo-guida e dunque è comune a tutte le tipologie di drivetrain, ed una seconda parte riferita ai trasferimenti di potenza dal carburante fino all'albero motore che invece dipende dalla tipologia di propulsione considerata.



Per descrivere al meglio la logica di calcolo utilizzata dal simulatore è necessario analizzare separatamente i singoli passaggi indicati nello schema a blocchi, facendo una distinzione tra le diverse tecnologie di propulsione.

3.1. Potenza richiesta dalle ruote

Per determinare la potenza che le ruote devono garantire al fine di mantenere il profilo di velocità imposto dal ciclo-guida, è necessario applicare il bilancio di forze seguente:

$$\text{Potenza alle ruote} = V * F_{\text{forza resistente}} = V(F_{\text{inerzia}} + F_{\text{rotolamento}} + F_{\text{aerodinamica}})$$

Una volta noto il profilo della velocità, il software deve calcolare adeguatamente le forze resistenti, le quali sono funzione della velocità, dell'accelerazione e di altri parametri tecnici. Come risulta intuibile, la potenza che un veicolo richiede al suo apparato propulsore, deve vincere tre tipologie di resistenze: la forza di inerzia che si genera quando il veicolo decide di accelerare, la resistenza al rotolamento che è la prima causa di consumo energetico alle basse velocità urbane e la resistenza aerodinamica nota anche con il nome inglese di "drag".

1. Forza di inerzia

La forza di inerzia è presente soltanto quando il veicolo accelera ed è pari al prodotto tra l'accelerazione longitudinale e la massa del veicolo:

$$F_{\text{inerzia}} = M * Acc$$

Nel caso di veicoli pesanti, dotati di massa molto elevata, la forza d'inerzia acquista un'importanza fondamentale, determinando grandi spese di potenza in fase di accelerazione e limitando fortemente le prestazioni del veicolo in direzione longitudinale. Allo stesso tempo però, questa condizione determina anche la

possibilità di avere grande potenza negativa in fase di frenata, rendendo appetibili soluzioni alternative con sistemi di recupero dell'energia in frenata.

2. Resistenza al rotolamento

La resistenza al rotolamento delle ruote è la principale causa di consumo di carburante alle basse velocità, sia per veicoli leggeri che per veicoli pesanti. Gli pneumatici non sono perfettamente rigidi e comunque risultano essere sempre più cedevoli rispetto all'asfalto, quindi essi si deformano generando una superficie di contatto col terreno non puntiforme. Durante il moto, la distribuzione delle pressioni a terra non risulta mai essere perfettamente costante, ma risulta distribuita per la maggior parte nella zona anteriore dell'impronta. Per questo motivo la risultante delle pressioni a terra risulta posizionata anteriormente rispetto al centro ruota, generando un momento che si oppone al rotolamento. Tale fenomeno è legato alle proprietà visco-elastiche dello pneumatico, il quale dissipa energia deformando la sua struttura radiale. Anche i fenomeni di isteresi legati agli strisciamenti ed alle compressioni degli elementi di battistrada contribuiscono alla deformazione del profilo di pressioni a terra tra pneumatico e fondo stradale. In seguito è riportata una formula comunemente utilizzata per il calcolo della resistenza al rotolamento per un veicolo dotato di pneumatici:

$$R_{\text{rotolamento}} = Mg * (k + k_2 V^2)$$

$$\text{con } k = 3.80 * 10^{-3} \quad k_2 = 1.80 * 10^{-6} \text{ per veicolo 44ton}$$

I parametri k e k_2 dipendono dalle proprietà visco-elastiche dello pneumatico e dalla pressione di gonfiaggio [15]. A differenza della forza d'inerzia, la resistenza al

rotolamento è dipendente dalla velocità, ma a causa del basso ordine di grandezza dei parametri k e k_2 , la velocità influisce molto limitatamente.

3. Resistenza aerodinamica

La resistenza aerodinamica si genera quando il veicolo penetra una massa di fluido (aria in questo caso) ed è costretto a spostarne le particelle che la compongono, le quali a loro volta sono dotate di una certa massa e di una certa inerzia. Vediamo in seguito la formula utilizzata per la sua determinazione:

$$F_{aerodinamica} = \frac{1}{2} \rho C_x A V^2$$

Il termine ρ rappresenta la densità del mezzo in cui il veicolo viaggia, ovvero l'aria, e si è assunta una densità pari a $1,2 \text{ kg/m}^3$. Il termine C_x rappresenta il coefficiente di forma ed il suo valore varia da $0,46$ per furgoni da $3,5$ tonnellate, fino a circa $0,79$ per autocarri da 44 tonnellate. Il termine A indica l'area frontale del veicolo ed infine si può notare la presenza della potenza quadrata della velocità. A differenza della resistenza al rotolamento, la resistenza aerodinamica è fortemente dipendente dalla velocità ed allo stesso tempo è indipendente dalla massa del veicolo. A sfavore dei veicoli pesanti però, vi è il coefficiente di forma: è infatti risaputo che la forma maggiormente squadrata di un autocarro è meno penetrante rispetto ad una forma più affusolata di un autoveicolo tradizionale.

Per valutare la rilevanza delle tre forze resistenti descritte, consideriamo un veicolo pesante di massa pari a 44 tonnellate con un'area frontale di $9,33 \text{ mq}$ ed un coefficiente di forma pari a $0,79$. I valori della resistenza a rotolamento e della resistenza aerodinamica sono riportati, in funzione della velocità in *figura 3.1*. Risulta evidente che fino a velocità urbane (circa 55

km/h) la resistenza a rotolamento assume un ruolo preponderante, mentre per velocità più sostenute prevale la forza di resistenza aerodinamica. Per quanto riguarda invece la forza di inerzia, essa dipende esclusivamente dal valore di accelerazione, dunque non viene considerata nel grafico. Queste considerazioni sono importanti in quanto un veicolo pesante è caratterizzato da velocità di percorrenza inferiori rispetto ad un'automobile, infatti non superano velocità di 80-100 km/h, contenendo dunque il contributo del drag.

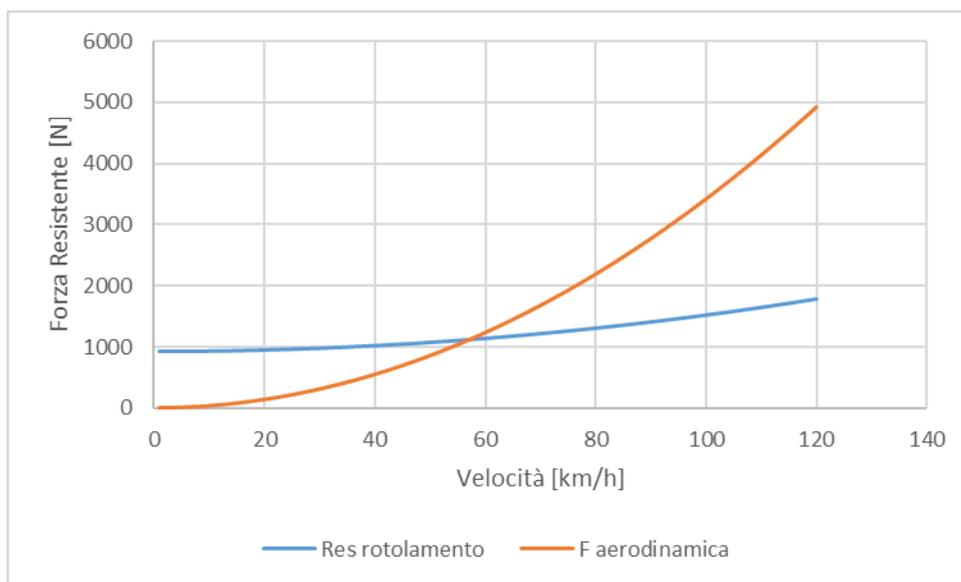


Figura 3.1 – Resistenza aerodinamica e resistenza al rotolamento in funzione della velocità di percorrenza per veicolo commerciale con massa complessiva a terra di 44 tonnellate

Moltiplicando infine la sommatoria delle forze resistenti per la velocità, il simulatore fornisce la forza richiesta dalle ruote per mantenersi coerente al profilo di velocità imposto dal ciclo-guida. Questa serie di algoritmi di calcolo vengono eseguiti senza differenziazione tra le tecnologie di propulsione, perché come abbiamo visto, riguarda soltanto l'interazione tra il veicolo e la sua missione.

3.2 Flussi energetici all'interno della Driveline

Per determinare il consumo di energia richiesto dal motore, ovvero il consumo di carburante qualsiasi esso sia, è necessario fare una diversificazione tra le diverse tecnologie di propulsione, sia perché esse sono caratterizzate da architetture differenti, sia perché esse funzionano secondo logiche di funzionamento differenti ed è proprio su questo punto che la mia tesi ha contribuito all'implementazione del modello di simulatore.

3.2.1 Drivetrain tradizionale

La drivetrain tradizionale per veicoli pesanti viene alimentata esclusivamente da un motore a combustione interna a ciclo diesel. Come tale non viene considerato nessun sistema di recupero dell'energia e la logica di simulazione risulta piuttosto semplice. Una volta nota la potenza richiesta dalle ruote, si può calcolare la potenza richiesta al motore, ovvero la potenza esercitata sull'albero di uscita dal motore stesso, la quale deve tenere conto del rendimento di tutto il sistema di trasmissione che è posto a valle del motore. Come visto precedentemente infatti, prima di raggiungere le ruote, il flusso di potenza passa attraverso il cambio, attraverso il differenziale ed ai sistemi di riduzione alle ruote. Tutti questi elementi che costituiscono il sistema di trasmissione, generano delle perdite di potenza a causa di attriti interni, quindi determinano un rendimento della trasmissione che fa sì che il motore sviluppi una potenza superiore rispetto a quella che le ruote richiedono. Inoltre, per un veicolo tradizionale, tutti i dispositivi di funzionamento ausiliari (impianto di condizionamento, impianto di illuminazione della cabina, fanaleria, ecc) sottraggono potenza all'albero.

Si può riassumere come segue l'espressione della potenza in uscita dal motore:

$$P_{motore} = \frac{P_{ruote}}{\eta_{trasmissione}} + P_{ausiliari}$$

Siccome tale valore viene rilevato per ogni secondo di percorrenza, basta moltiplicarlo per un secondo per ottenere l'energia fornita dal motore in quell'intervallo di tempo. Sommando l'energia fornita dal motore durante tutti gli intervalli di tempo del ciclo-guida, si ottiene l'energia totale fornita dal motore durante la percorrenza dell'intero ciclo-guida.

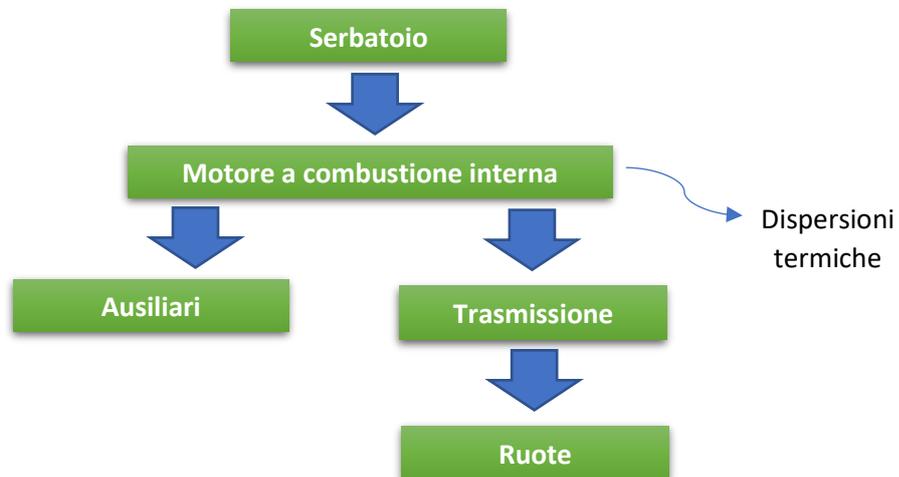
L'ultimo lavoro che il simulatore deve svolgere è il calcolo dell'energia di carburante richiesta per determinare, in seguito, il consumo di gasolio. Per ottenere un calcolo più approfondito, sarebbe necessario considerare una mappa di iso-consumo del motore, ovvero una mappa in grado di determinare il consumo di carburante in funzione del numero di giri del motore e della pressione di aspirazione. Questo richiederebbe, oltre alla mappa di iso-consumo, anche una simulazione dei cambi marcia ed un continuo monitoraggio dei giri del motore e della pressione di aspirazione. Per semplificare questo procedimento, il simulatore implementato considera un rendimento macchina medio pari al 39%. Quindi si può calcolare l'energia fornita dal gasolio durante la percorrenza del ciclo-guida:

$$E_{gasolio} = \frac{E_{motore}}{\eta_{motore}} = \frac{\sum P_{motore} \Delta t}{\eta_{motore}}$$

Una volta determinata la quantità di energia che deve fornire il carburante, facendo riferimento al potere calorifico inferiore del gasolio pari a 13,64 kWh/kg, il simulatore calcola facilmente la quantità di gasolio consumata:

$$\frac{E_{gasolio} \text{ [kWh]}}{PCI \text{ [kWh/kg]}} = M_{gasolio} \text{ [kg]}$$

A questo punto il simulatore può determinare il consumo chilometrico, ed il consumo di carburante in funzione del payload. Si può riassumere il funzionamento della drive-line tradizionale secondo lo schema a blocchi seguente.



3.2.2 Propulsione elettrica

Nel caso di drivetrain elettrico, la presenza di un accumulatore a batteria che alimenta il motore elettrico, consente di generare anche un flusso inverso, ovvero un flusso di potenza che ricarica le batterie in caso di frenata. Questo fatto rende più complicata la logica di funzionamento del drivetrain e quindi anche la sua simulazione.

Una volta nota la potenza richiesta dalle ruote, così come nel caso di propulsione tradizionale, si può calcolare la potenza che deve essere fornita dal motore all'albero di trasmissione, tenendo in considerazione che è sempre presente la trasmissione e dunque anche la relativa efficienza η .

$$P_{albero\ motore, scarica} = \frac{P_{ruote}}{\eta_{trasmissione}}$$

$$P_{albero\ motore, ricarica} = P_{ruote} * \eta_{trasmissione}$$

A differenza rispetto al drivetrain tradizionale, bisogna considerare sia il flusso di potenza verso le ruote, sia quello verso la batteria durante la frenata rigenerativa. Inoltre è evidente che il termine legato alla potenza degli ausiliari non è più presente, in quanto essi vengono alimentati direttamente dalla batteria. Per questo motivo, introduco il concetto di potenza elettrica richiesta al funzionamento di motore e degli apparecchi elettrici ausiliari. Anche in questo caso va fatta distinzione tra la potenza elettrica richiesta in fase di scarica e la potenza in fase di ricarica in frenata.

$$P_{elettrica,scarica} = \frac{P_{richiesta\ dal\ motore}}{\eta_{motore\ elettrico}} + P_{ausiliari}$$

$$P_{elettrica,ricarica} = P_{richiesta\ dal\ motore} * \eta_{motore\ elettrico} - P_{ausiliari}$$

Per determinare infine la potenza e dunque l'energia che le batterie forniscono, è necessario introdurre il rendimento che le caratterizza. In generale il rendimento delle batterie è funzione di molti parametri, tra cui le condizioni ambientali, lo stato di carica e la velocità con cui la batteria viene scaricata. Per semplicità computazionale, il simulatore adotta un solo valore di efficienza media per la fase di scarica ed uno per la fase di ricarica della batteria. L'espressione per la determinazione della potenza fornita dalla batteria è la seguente:

$$P_{batteria,scarica} = \frac{P_{elettrica,scarica}}{\eta_{batteria,scarica}}$$

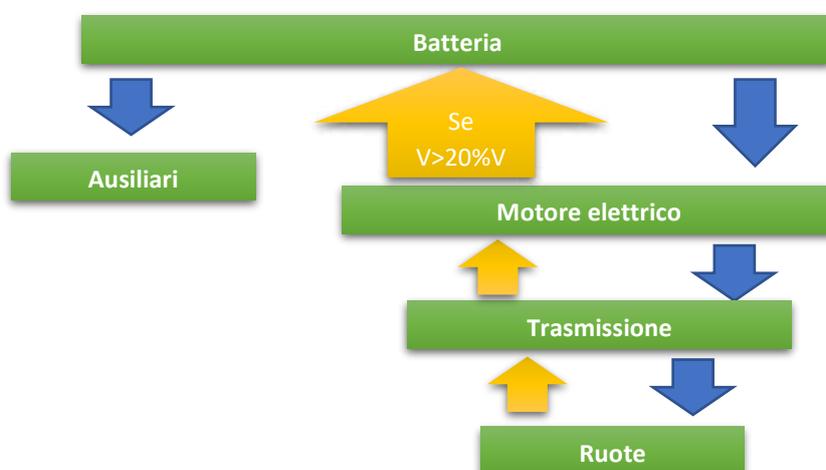
$$P_{batteria,ricarica} = \frac{P_{elettrica,ricarica}}{\eta_{batteria,ricarica}}$$

Moltiplicando la potenza per 1 secondo, si ottiene l'energia prelevata dalla batteria in quell'intervallo di tempo e mediante l'espressione seguente, si ottiene lo stato di carica istantaneo della batteria "State of Charge":

$$SoC = \frac{E_{iniziale\ batteria} - \Sigma P_{batteria,scarica} \Delta t + \Sigma P_{batteria,ricarica} \Delta t}{E_{iniziale\ batteria}}$$

La logica di funzionamento vista fino ad ora non risulta eccessivamente complessa e per quanto riguarda il recupero di energia in frenata è stato sufficiente vedere che, nel caso in cui la potenza richiesta dalle ruote sia negativa (ovvero in caso si decelerino), il flusso di potenza va verso la batteria incrementando lo stato di carica, tenendo conto del rendimento di ricarica. Tale rendimento in realtà dipende dalla velocità del veicolo e dall'entità della frenata, ma il simulatore lo considera costante, ponendo due vincoli:

- Se la velocità è inferiore ad un determinato valore, assunto dal simulatore pari al 20% della velocità massima imposta dal ciclo-guida, il recupero di energia non avviene. Questo è abbastanza realistico, in quanto a velocità molto basse il rendimento di ricarica della batteria tende ad annullarsi.
- Se la frenata genera un flusso di potenza superiore alla potenza del motore elettrico, la parte recuperabile sarà pari alla sola potenza del motore.

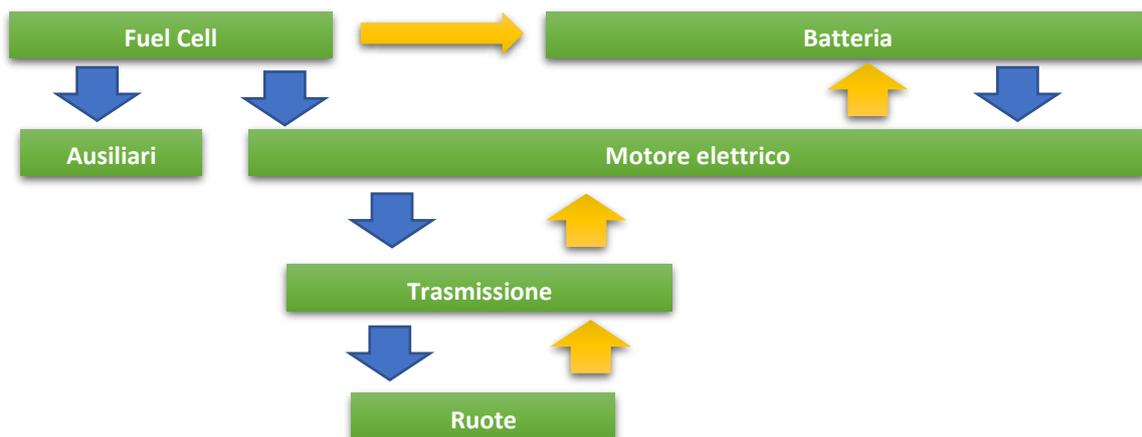


Il diagramma mostra la logica di funzionamento del ciclo durante le fasi di scarica (freccie di colore blu) e durante le fasi di ricarica (freccie di colore giallo). L'utilità del ciclo di ricarica è quella di allungare l'autonomia del veicolo, ovvero di ridurre il consumo di energia nell'eventualità che il veicolo debba rallentare ricaricando la batteria.

3.2.3 Propulsione ibrida

Per propulsione ibrida si intende, come già descritto nelle sezioni precedenti, l'utilizzo di un motore elettrico alimentato contemporaneamente da una batteria e da una fuel cell. La presenza della batteria consente di garantire ancora il recupero di energia in fase di frenata e come vedremo poi, consente di coprire le esigenze della missione veicolare in termini di potenza e percorrenza.

La logica di funzionamento è più complessa rispetto ai casi precedenti ed è stata ottimizzata per la stesura della presente tesi di laurea. Prima di descrivere tale logica si osservi lo schema a blocchi seguente.

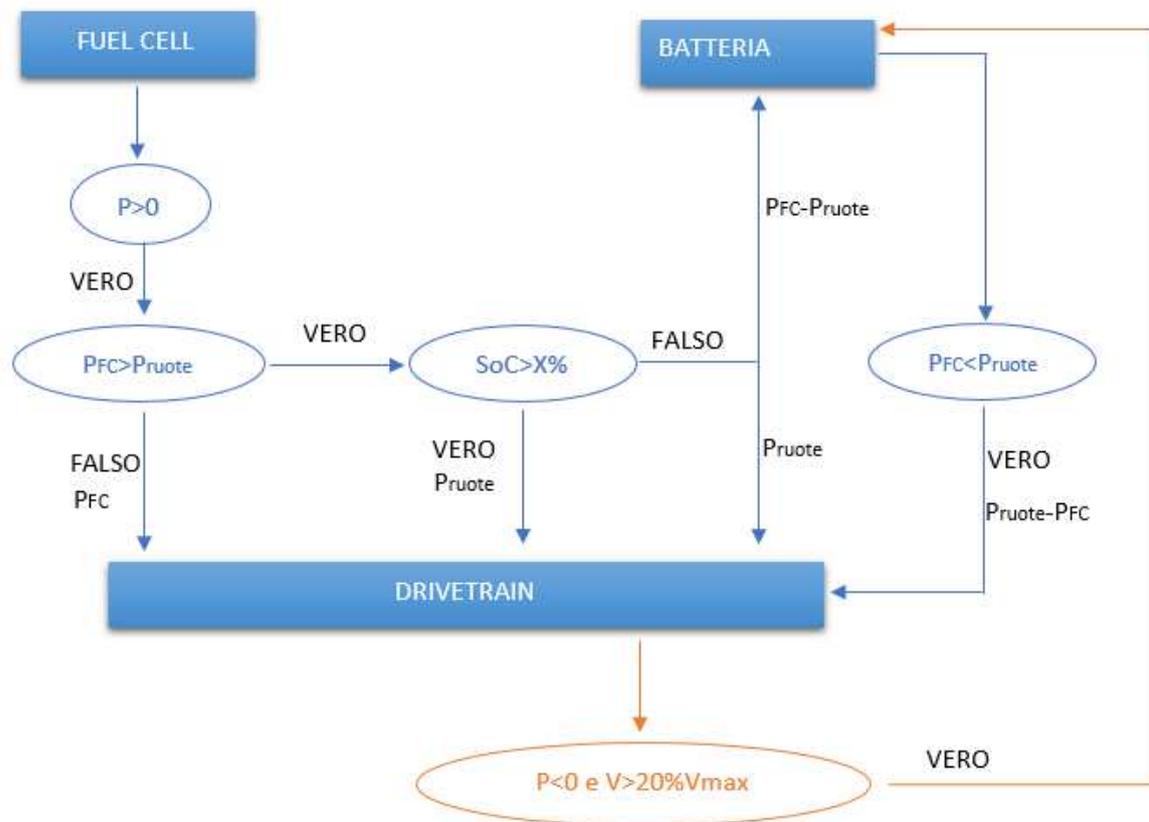


Come ben evidenziato dallo schema, la potenza necessaria al veicolo per seguire il ciclo-guida, viene fornita sia dalla batteria che dalla cella fuel cell, ma ciò deve avvenire secondo una logica ben precisa. Si è deciso di stabilire un valore di SoC iniziale per la batteria pari al 90%, in modo da garantire eventuali recuperi di energia in frenata anche negli istanti iniziali del ciclo-guida. In condizioni normali, la potenza richiesta dalle ruote viene interamente fornita dalla cella a combustibile, mentre la batteria svolge solamente un ruolo di copertura dei picchi di potenza. Oltre alla frenata rigenerativa è previsto un flusso energetico che va dalla fuel cell alla batteria,

in modo da incrementare la durata di quest'ultima. Il simulatore però, per attivare questo flusso deve seguire un algoritmo decisionale:

- Se lo stato di carica della batteria è superiore ad un certo valore che indichiamo con X%, la cella a combustibile eroga una potenza pari a quella richiesta dalle ruote, senza generare alcun flusso di potenza diretto verso le batterie. Questo consente di evitare la saturazione della batteria che comporterebbe l'impossibilità di recuperare altra energia in frenata. Infatti, una volta che la batteria ha raggiunto il suo massimo stato di carica, non è più possibile fornirle energia.
- Se lo stato di carica della batteria è inferiore a X% invece, la fuel cell eroga sempre la massima potenza ed alle ruote viene destinata solamente la potenza richiesta per seguire il profilo di velocità imposto dal ciclo-guida. La potenza restante viene destinata alla batteria, che attraverso il suo rendimento di ricarica aumenta lo SoC.

Vista la complessità della logica di funzionamento dei sistemi di accumulo, sintetizzo il tutto in un diagramma a blocchi che mostra l'andamento dei flussi in fase di scarica e di ricarica (la fase di scarica è identificata da potenza positiva, mentre la fase di ricarica da potenza negativa).



Per tutti i processi entranti ed uscenti dai sistemi di accumulo, il simulatore impone dei vincoli, ovvero analizza che vi siano i requisiti perché avvengano i trasferimenti di potenza e successivamente valuta che ogni flusso in uscita ed in entrata da batteria e fuel cell non superi la potenza massima di codesti sistemi di accumulo. Analizziamo i singoli flussi di energia che collegano gli elementi costituenti l'architettura del veicolo:

1. *Processo di scarica della fuel cell*: Quando le ruote e quindi il drivetrain richiedono potenza, la cella a combustibile fornisce un valore di potenza che è il minore tra la potenza elettrica richiesta e la sua potenza massima, ma nel caso in cui lo SoC della batteria sia inferiore a X% alla fuel cell viene richiesta la sua massima potenza:

$$P_{fuel\ cell} = \min \begin{cases} P_{drivetrain} \\ P_{MAX, fuel\ cell} \end{cases} \quad se\ SoC > X\%$$

$$P_{fuel\ cell} = P_{MAX, fuel\ cell} \quad se\ SoC < X\%$$

Nel secondo caso, se la potenza così fornita dalla fuel cell risulta superiore a quella richiesta dalle ruote, la parte in esubero viene adoperata per ricaricare la batteria.

2. *Processo di scarica della batteria:* Quando la potenza della cella non è in grado di sopperire interamente alle richieste del drivetrain, la batteria fornisce una potenza che è la minore tra il margine di potenza mancante per fronteggiare le richieste del drivetrain, la potenza massima della batteria e la potenza fornibile sulla base dello stato di carica attuale.

Lo stato di carica della batteria (SoC) è determinante per il funzionamento della stessa, sia perché quando il livello di carica è superiore a X% non avviene la ricarica da parte della fuel cell, sia perché un certo livello di carica corrisponde ad un certo livello di energia disponibile e di conseguenza impone dei limiti di potenza erogabili in un certo intervallo temporale. Dunque, la potenza esprimibile dalla batteria è la seguente:

$$P_{batteria} = \min \left\{ \begin{array}{l} P_{drivetrain} - P_{fuel\ cell} \\ P_{MAX,batteria} \\ \frac{E_{disponibile,batteria}}{\Delta t} \end{array} \right.$$

3. *Processo di carica della batteria:* La ricarica della batteria può avvenire sia tramite la frenata rigenerativa da parte del drivetrain, sia da parte della FC. Quest'ultima possibilità, come già evidenziato, è valida solamente nel caso in cui lo stato di carica della batteria sia inferiore ad una certa percentuale. Inoltre, il simulatore tiene conto dello stato di carica della batteria, infatti quando essa risulta già completamente carica, non è più possibile immagazzinare energia al suo interno e quindi i flussi di potenza vengono interrotti. Il flusso di potenza atto a ricaricare la batteria è sintetizzabile con le seguenti equazioni:

$$se P_{drivetrain} < 0 \quad \rightarrow \quad P_{batteria,ricarica} = \min \left\{ \begin{array}{l} P_{drivetrain} \\ P_{MAX,batteria} \\ \frac{E_{MAX,batteria} - E_{disponibile,batteria}}{\Delta t} \end{array} \right.$$

$$se P_{drivetrain} > 0 \text{ e } SoC < X\% \quad \rightarrow \quad P_{batteria,ricarica} = \min \left\{ \begin{array}{l} P_{fuel\ cell} - P_{drivetrain} \\ P_{MAX,batteria} \\ \frac{E_{MAX,batteria} - E_{dispo}}{\Delta t} \end{array} \right.$$

La determinazione della potenza e dell'energia entrante o uscente dai sistemi di accumulo e dalle ruote, tiene conto anche dei rendimenti della batteria, del motore elettrico e della cella a combustibile, con le stesse modalità viste anche per la propulsione puramente elettrica. Per la determinazione del consumo di idrogeno nella cella a combustibile, così come già visto per la determinazione del consumo di gasolio nella propulsione tradizionale, il simulatore adotta il potere calorifico inferiore dell'idrogeno, pari a 33,33Wh/kg.

La propulsione può derivare da due vettori energetici differenti (idrogeno per la fuel cell ed energia elettrica per la batteria), quindi la simulazione è divenuta più complessa, ed il simulatore richiede all'operatore il settaggio di un parametro esclusivo per la definizione della logica di funzionamento di batteria e cella, ovvero la percentuale X% di carica della batteria al di sopra della quale non avviene la ricarica da parte della fuel cell.

3.3 Simulazione del dimensionamento dei sistemi di accumulo

Per determinare le dimensioni dei sistemi di accumulo, è necessario conoscere il quantitativo energetico e la potenza che questi devono erogare. Tali valori sono però relazionati alle esigenze che il veicolo deve rispettare, ovvero la sua missione, definibile mediante un profilo di velocità in funzione del tempo e dei chilometri percorsi che è detto “ciclo-guida”.

Una funzionalità del simulatore è quella di poter inserire manualmente cicli-guida all'interno di un database, mediante una “macro” appositamente creata con Visual Basic. Questa funzionalità consente di gestire differenti cicli-guida e anche di crearne di nuovi, garantendo elevata versatilità al simulatore. Per creare un nuovo ciclo-guida è sufficiente generare un file contenente le combinazioni di tempo e velocità desiderate, identificando il profilo di velocità del ciclo, ed importare il file all'interno del simulatore. I cicli guida hanno lunghezza e durata piuttosto contenuta rispetto all'autonomia di un veicolo, infatti variano da una lunghezza di 5 km fino a circa 50 km. Durante la simulazione, il software calcola il consumo energetico solamente per la lunghezza del tracciato indicato dal ciclo-guida e successivamente calcola il valore di consumo per unità di distanza, ovvero il consumo chilometrico. Una volta noto il consumo chilometrico e l'energia massima immagazzinata nei sistemi di accumulo è facile valutare l'autonomia del veicolo.

Il simulatore funziona richiedendo all'utente un valore di autonomia espresso in chilometri che il veicolo deve poter garantire. A questo punto un sistema di calcolo riporta i consumi energetici chilometrici su un numero di cicli sufficiente per coprire l'autonomia impostata. Nel caso di carburanti quantificabili tramite la loro massa, ovvero nel caso di idrogeno e di gasolio, il simulatore calcola automaticamente la quantità di carburante necessario per garantire l'autonomia richiesta tramite il potere calorifico inferiore, mentre la batteria viene

dimensionata in modo da avere dimensioni in grado da garantire l'energia necessaria al raggiungimento dell'autonomia desiderata. Inoltre, sia la batteria che la cella a combustibile richiedono un dimensionamento che rispetti le esigenze di potenza massima richieste dal ciclo-guida. Si consideri che è compito dell'operatore inserire, come dati di input, i parametri di dimensionamento di batteria e fuel cell:

- Per il veicolo elettrico: *Peso della batteria e SoC iniziale*
- Per il veicolo ibrido: *Peso della batteria, SoC iniziale e Potenza della cella a combustibile*

Automaticamente il simulatore, sfruttando valori medi di potenza specifica ed energia specifica per batterie agli ioni di Litio, calcola:

- Potenza massima batteria $P_{MAX,batteria} = M_{batteria} * 500 \frac{W}{kg}$
- Energia nella batteria $E_{MAX,batteria} = M_{batteria} * 140 \frac{Wh}{kg}$

Una volta noti i parametri di batteria e fuel cell, il simulatore verifica che la missione sia garantita, ovvero che i valori di potenza e di energia erogabili dai sistemi di accumulo siano sufficienti per affrontare il ciclo-guida e per raggiungere l'autonomia preimpostata. Come già detto, il quantitativo di gasolio e di idrogeno necessari al raggiungimento degli obiettivi vengono stimati in maniera automatica dal simulatore, mentre l'energia presente nella batteria dipende fondamentalmente dalle dimensioni che l'operatore le ha attribuito.

Se il simulatore indica che l'autonomia chilometrica non è garantita a causa di una scarsità di energia elettrica o a causa di una potenza troppo bassa, è necessario ampliare le dimensioni della batteria. Al fine di accelerare questa procedura, nel codice esistente è presente una macro che automaticamente ricavava le dimensioni minime della batteria identificando la quantità minima di energia e di potenza che essa deve erogare.

Il dimensionamento dei sistemi di accumulo, parallelamente alla determinazione da parte del simulatore delle quantità di gasolio (per la propulsione tradizionale) e di idrogeno (per la propulsione ibrida), consente al simulatore di calcolare il massimo peso trasportabile dal veicolo, anche detto payload. Per fare questo, è però necessario passare attraverso un database integrato nel simulatore, all'interno del quale possono essere importate le specifiche dei veicoli da simulare in configurazione tradizionale. In *tabella 3.1* è riportata l'interfaccia del database con le caratteristiche tecniche indicate.

Nominal weight	Front area			Coefficients			Auxiliaries					Masses			η gearbox	Nominal power	Vehicle (tare)	Net tare
	H	E	A	k2	k	Cx	V	I	Paux	Paux,mech	Fuel+Tank	Motor	Gearbox	Other				
ton	m	m	m2	-	-	-	V	A	kW	kW	kg	kg	kg	kg		kW	kg	kg
3.5	2.285	1.996	4.56086	1.80E-06	0.0022	0.4556	14	110	1.68	1.85	82.40	211.00	50.60		98%	78	2122.00	1778.00
5.2	2.28	2.13	4.8564	1.80E-06	0.0025	0.5297	14	110	1.68	1.85	114.10	276.70	69.50		98%	134	2269.00	1808.70
18	3.258	2.2	7.1676	1.80E-06	0.0033	0.6887	28	70	1.96	2.15	253.70	352.80	87.00		98%	160	3812.00	3118.50
44	3.662	2.55	9.3381	1.80E-06	0.0038	0.7946	28	90	2.52	2.77	688.50	927.70	200.70		98%	309	8438.00	6621.10

Tabella 3.1 – Interfaccia del simulatore riportante dimensioni frontali, coefficienti di penetrazione aerodinamica, potenze ausiliari e caratteristiche del drivetrain per veicoli commerciali con massa complessiva a terra di 3.5, 5.2, 18 e 44 tonnellate

A partire da sinistra si trovano le masse totali a terra espresse in tonnellate, le dimensioni geometriche principali dell'area frontale del veicolo, i coefficienti per la determinazione della resistenza al rotolamento ed il coefficiente di forma aerodinamica, le caratteristiche elettriche dei dispositivi ausiliari, il peso del serbatoio e del carburante, il peso del motore, il peso della scatola del cambio, il rendimento della trasmissione, la potenza del motore termico, la tara del veicolo ed il peso netto.

La tara del veicolo rappresenta il peso a vuoto e sottraendo ad esso il peso di tutti i componenti si ottiene il peso netto:

$$Peso\ netto = Tara - M_{serbatoio} - M_{gasolio} - M_{motore\ ICE} - M_{gearbox}$$

A questo punto si può ricalcolare la tara del veicolo nei casi in cui esso sia alimentato da batterie o da una soluzione ibrida di batterie e fuel cell:

$$Tara_{soluzione\ elettrica} = Peso\ netto + M_{batteria} + M_{motore\ elettrico}$$

$$Tara_{soluzione\ ibrida} = Peso\ netto + M_{batteria} + M_{motore\ elettrico} + M_{fuel\ cell} + M_{idrogeno}$$

Considerando infine il peso a pieno carico omologato per il veicolo, il simulatore determina il payload, ovvero la capacità massima di carico:

$$Payload\ massimo\ consentito = M_{pieno\ carico} - Tara$$

Il simulatore a questo punto è in grado di calcolare il consumo specifico di carburante, qualunque esso sia, per unità di payload. Infatti, per un veicolo la cui missione è quella di trasportare materiale spesso superiore rispetto alla tara del veicolo, diviene estremamente importante valutarne il consumo per unità di carico utile. Il simulatore quindi indica come risultato di output principale, oltre alle dimensioni di batteria e fuel cell minime per l'ottenimento di una data autonomia, tale valore di consumo.

4. Simulazioni e risultati

Il compito primario di questa analisi è stabilire una serie di veicoli pesanti equipaggiati di motore a combustione interna e trasformarli in veicoli dotati di propulsione alternativa elettrica ed ibrida. In questo capitolo si vogliono riassumere i criteri adoperati al dimensionamento dell'architettura del drivetrain, attraverso il simulatore già esposto e calcolare il consumo per ogni vettore energetico utilizzato. Essendo la tesi improntata sullo studio di veicoli pesanti per il trasporto di merce industriale, si è scelto di sviluppare il ragionamento su una serie di veicoli caratterizzati da diversi tonnellaggi, a partire da un leggero furgone da lavoro, fino ad un autoarticolato di grandi dimensioni: 3,5 ton - 5,2 ton - 18 ton - 44 ton. A seconda della massa complessiva a pieno carico, ogni veicolo in configurazione tradizionale è dotato di un motore a combustione interna che può erogare una certa potenza massima. La *tabella 4.1* riassume tutte le principali caratteristiche tecniche dei quattro veicoli in esame:

<i>Codice veicolo</i>	<i>M</i>	<i>Afront</i>	<i>k2</i>	<i>k</i>	<i>Cx</i>	<i>Paux</i>	<i>Fuel+Tank</i>	<i>Motor</i>	<i>Gearbox</i>	<i>Rendimento trasmissione</i>	<i>P nominale</i>	<i>Tara</i>	<i>Peso Netto</i>
	<i>ton</i>	<i>m2</i>	-	-	-	<i>kW</i>	<i>kg</i>	<i>kg</i>	<i>kg</i>		<i>kW</i>	<i>kg</i>	<i>kg</i>
35 C 11	3.5	4.56	1.80E-06	0.0022	0.4556	1.68	82.40	211.0	50.6	98%	78	2122.00	1778.00
50 C 15 L	5.2	4.86	1.80E-06	0.0025	0.5297	1.68	114.10	276.7	69.5	98%	134	2269.00	1808.70
ML 110 EL 18/P	18	7.17	1.80E-06	0.0033	0.6887	1.96	253.70	352.8	87.0	98%	160	3812.00	3118.50
AS 260 S42 Y / FS-GV	44	9.34	1.80E-06	0.0038	0.7946	2.52	688.50	927.7	200.7	98%	309	8438.00	6621.10

Tabella 4.1 – Principali caratteristiche tecniche dei quattro veicoli commerciali in esame

Per ottenere delle simulazioni più coerenti possibile con la realtà, è necessario adottare dei cicli-guida che ben rappresentino le percorrenze reali di veicoli pesanti. A tale scopo, mi sono concentrato nella ricerca di cicli-guida più coerenti possibile con la missione e con la stazza dei veicoli in esame. Una soluzione spesso usata è quella di considerare un unico ciclo-guida per

ogni tipologia di veicolo stradale ed adottare un moltiplicatore per i valori di velocità al variare del veicolo. In questo modo è possibile ottenere profili di velocità coerenti tra ogni veicolo, ma quando si simula il ciclo-guida con un veicolo leggero si impongono velocità ed accelerazioni superiori rispetto a quando si simula la percorrenza di un veicolo più pesante. Per le simulazioni in esame, invece, ho preferito scegliere due differenti cicli-guida.

4.1 Ciclo-guida CARB-HHDDT

Il CARB-HHDDT è un ciclo-guida per veicoli pesanti (heavy-duty trucks) sviluppato da California Air Resources Board (da cui la sigla “CARB”) in collaborazione con l’università della Virginia negli Stati Uniti d’America [14]. Questo ciclo-guida risulta uno dei più utilizzati sui veicoli pesanti in USA ed è stato implementato sulla base di percorrenze reali. In seguito sono indicati i dati principali relativi al ciclo:

- Nome: CARB-HHDDT
- Lunghezza: 41,3 km
- Durata: 60 minuti
- Punti: 3605 (un punto al secondo – frequenza 1Hz)
- Velocità massima: 95 km/h
- Velocità media: 41,3 km/h

Come si vede dal profilo di velocità, mostrato in *figura 4.1*, e dalla velocità massima, si può osservare che il ciclo pare adatto a veicoli industriali pesanti. Per stabilire se il ciclo si adatti effettivamente a simulare una percorrenza reale per i veicoli in esame, è necessario simularne la percorrenza determinando la potenza massima che il ciclo-guida richiederebbe al motore a

combustione interna. Se la potenza richiesta al motore a combustione interna è confrontabile con quella di cui i veicoli sono equipaggiati allora il ciclo-guida è adatto allo scopo.

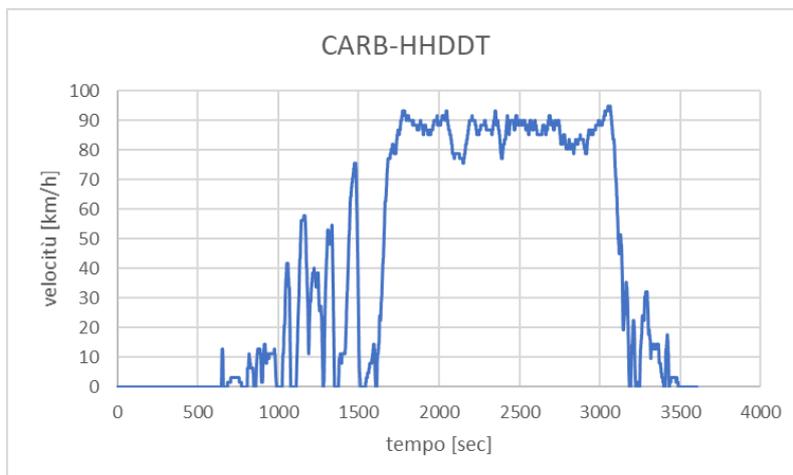


Figura 4.1 – Ciclo-guida CARB-HHDDT

Vediamo dunque in *tabella 4.2* il riassunto delle simulazioni in termini di potenza richiesta all’albero di uscita del motore per garantire la percorrenza del ciclo-guida CARB-HHDDT:

<i>Codice veicolo</i>	<i>M</i>	<i>Potenza installata</i>	<i>P max richiesta da CARB-HHDDT</i>	<i>P media richiesta da CARB-HHDDT</i>	<i>95-esimo percentile potenza</i>	
	<i>ton</i>	<i>kW</i>	<i>kW</i>	<i>kW</i>	<i>kW</i>	
35 C 11	3.5	78	69.3	17.8	39.5	OK
50 C 15 L	5.2	134	96.9	23.3	56.6	OK
ML 110 EL 18/P	18	160	298.3	41.0	181.0	NO
AS 260 S42 Y / FS-GV	44	309	717.7	83.6	427.3	NO

Tabella 4.2 – Potenza richiesta ai veicoli in esame per la percorrenza del ciclo-guida CARB-HHDDT

Il ciclo-guida CARB-HHDDT risulta richiedere ai primi due veicoli delle potenze massime e medie inferiori rispetto alla potenza massima installata, risultando dunque idoneo a rappresentare adeguatamente il reale utilizzo per veicoli da 3,5 a 5,2 tonnellate. Il novantacinquesimo percentile indica che nel 5% del tempo di percorrenza, la potenza richiesta dal ciclo-guida risulta superiore a 40 kW per il veicolo da 3,5 ton e superiore a 57 kW per quello da 5,2 ton. Anche questi valori sono rappresentativi della realtà, in quanto su un tragitto di oltre 40 km ed un’ora di percorrenza (41,3km è la lunghezza del ciclo-guida CARB-HHDDT e 60

minuti il tempo di percorrenza), solamente per tre minuti vengono richieste al veicolo delle potenze significative.

Per quanto riguarda i veicoli più pesanti, ovvero quelli da 18 e 44 tonnellate, il ciclo guida richiede delle potenze massime nettamente superiori rispetto a quelle realmente installate. La potenza media, in realtà, sembrerebbe più che adeguata, ma osservando invece il 95° percentile, si può verificare che per oltre il 5% della percorrenza, la potenza richiesta è nettamente superiore a quella installata.

Prima di indagare sul perché la potenza richiesta aumenti rispetto a quella installata solamente nei casi di 18 e 44 tonnellate, ovvero prima di indagare su quale contributo sia maggiore tra resistenza a rotolamento, resistenza aerodinamica e forza di inerzia, si osservino le figure seguenti che riportano il profilo della potenza richiesta dal ciclo-guida su tutti i veicoli.

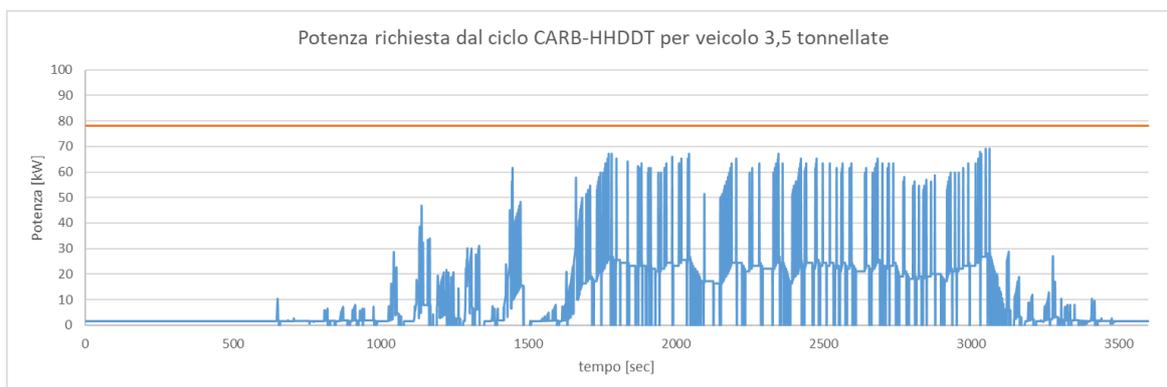


Figura 4.2 – Potenza richiesta a un veicolo commerciale di 3.5 tonnellate per la percorrenza del ciclo-guida CARB-HHDDT

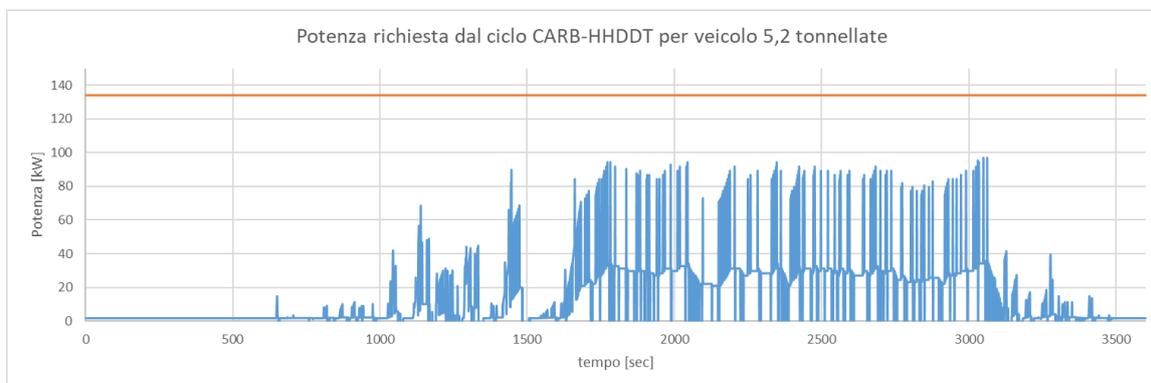


Figura 4.3 - Potenza richiesta a un veicolo commerciale di 5.2 tonnellate per la percorrenza del ciclo-guida CARB-HHDDT

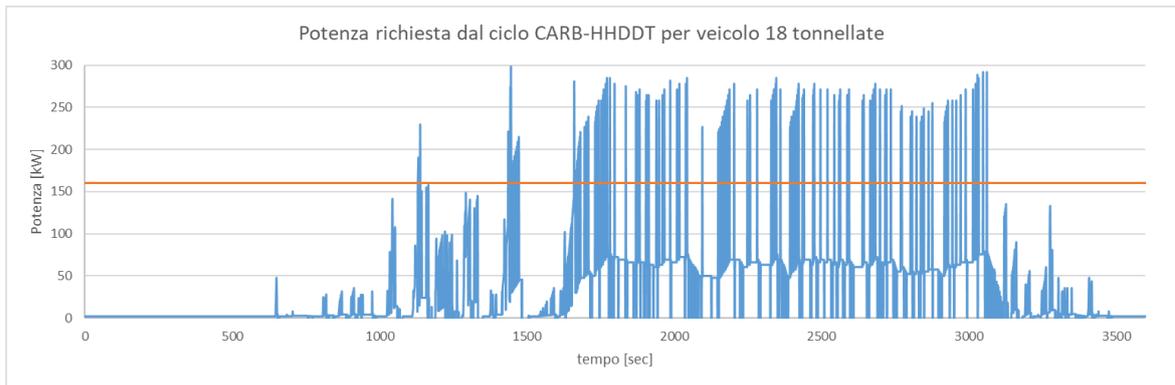


Figura 4.5 - Potenza richiesta a un veicolo commerciale di 18 tonnellate per la percorrenza del ciclo-guida CARB-HHDDT

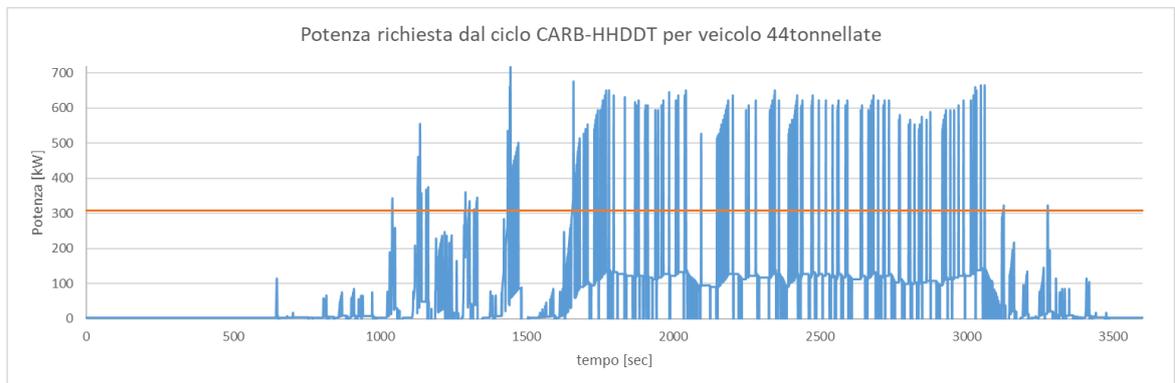


Figura 4.4 - Potenza richiesta a un veicolo commerciale di 44 tonnellate per la percorrenza del ciclo-guida CARB-HHDDT

È evidente quanto anticipato, circa il fatto che il ciclo-guida CARB-HHDDT rappresenti adeguatamente le reali percorrenze solamente per i veicoli da 3,5 e 5,2 tonnellate e risulti eccessivamente gravoso per quelli da 18 e 44 tonnellate.

Per comprenderne le cause, analizziamo i rapporti potenza/peso dei veicoli in esame tramite

la *tabella 4.3*:

	M	P nominale	Potenza/Peso
	<i>ton</i>	<i>kW</i>	<i>kW/ton</i>
35 C 11	3.5	78	22.3
50 C 15 L	5.2	134	25.8
ML 110 EL 18/P	18	160	8.9
AS 260 S42 Y/FS-GV	44	309	7.0

Tabella 4.3 – Rapporti peso/potenza dei veicoli in esame

Si può immediatamente intuire che il rapporto potenza/pero risulta molto maggiore nel caso di veicoli da 3,5 e 5,2 tonnellate rispetto ai più pesanti autocarri. I primi, infatti, sono più simili ad automobili piuttosto che a camion, mentre quelli da 18 e 44 tonnellate sono veri e propri autocarri e risultano sotto-motorizzati rispetto ai precedenti.

Analizzando in *figura 4.6* l'andamento delle forze di resistenza aerodinamica e di resistenza al rotolamento sui vari veicoli, si nota effettivamente una certa proporzionalità rispetto alla massa del veicolo (nonostante qualche differenza tra i coefficienti di resistenza a rotolamento, area frontale e coefficiente di forma), e così avviene senz'altro anche per la forza di inerzia, la quale è infatti data dal prodotto tra massa ed accelerazione. Il motivo per cui i veicoli pesanti non sono ben rappresentati dal CARB-HHDT è dunque la sotto-motorizzazione. È dunque necessario definire un secondo profilo di velocità che rappresenti il reale utilizzo stradale per i veicoli più pesanti della gamma.



Figura 4.6 – Resistenza aerodinamica e resistenza al rotolamento per i veicoli pesanti in esame durante la percorrenza del ciclo-guida CARB-HHDT

4.2 Ciclo-guida HD-UDDS

Un ciclo-guida più adatto a veicoli industriali con tonnellaggi molto elevati (18 e 44 tonnellate) risulta essere lo HD-UDDS (Heavy Duty-Urban Dynamometer Driving Schedule), sviluppato da Environmental Protection Agency's per la stima dei consumi e delle emissioni su veicoli pesanti negli Stati Uniti [14]. Il ciclo-guida è caratterizzato dai seguenti dati:

- Nome: HD-UDDS
- Lunghezza: 8,94 km
- Durata: 18 minuti
- Punti: 1061 (un punto al secondo – frequenza 1Hz)
- Velocità massima: 94 km/h
- Velocità media: 29,5 km/h

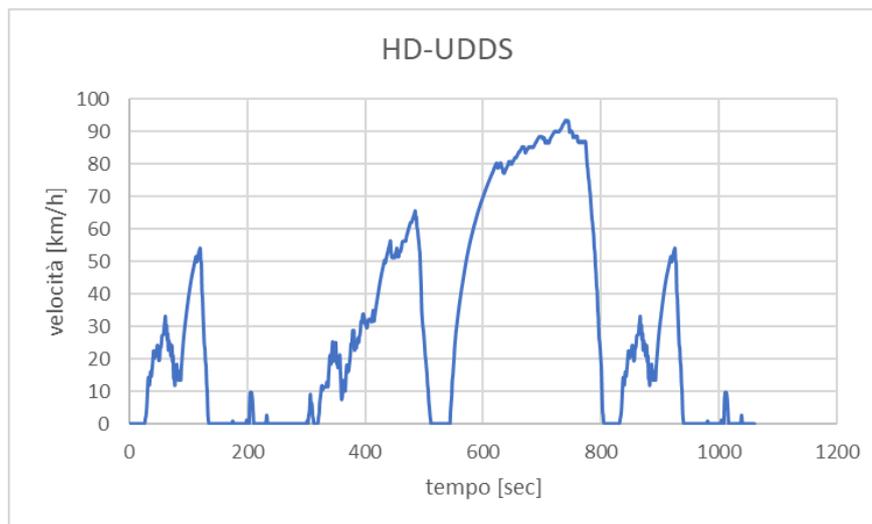


Figura 4.7 – Ciclo-guida HD-UDDS

Verifichiamo che il ciclo-guida sia adatto a simulare la percorrenza reale di veicoli da 18 e 44 tonnellate, simulandone le potenze richieste dal ciclo, così come fatto nel caso del ciclo CARB-HHDDT. Le *figura 4.8* e *4.9*, mostrano in modo chiaro che la potenza richiesta dal ciclo HD-UDDS rispetta le capacità del motore a combustione interna già installato a bordo dei veicoli.

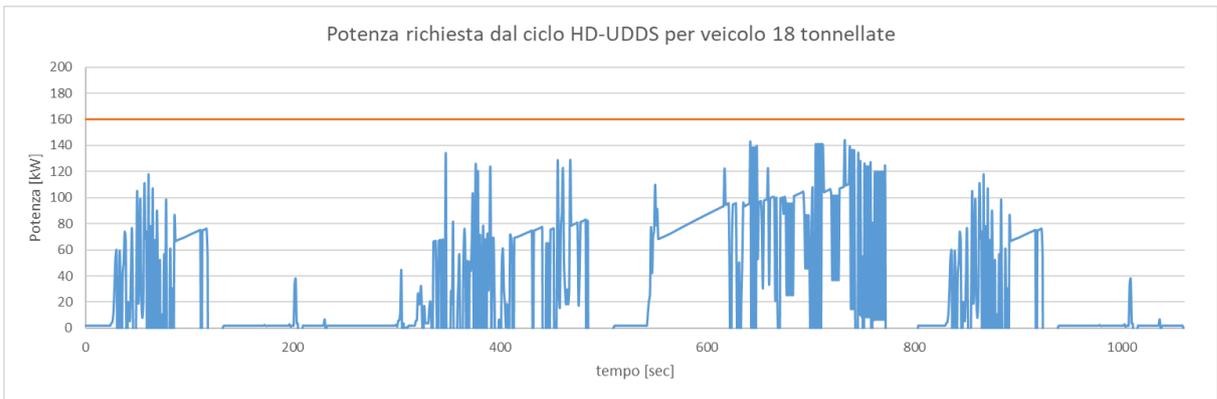


Figura 4.8 - Potenza richiesta a un veicolo commerciale di 18 tonnellate per la percorrenza del ciclo-guida HD-UDDS

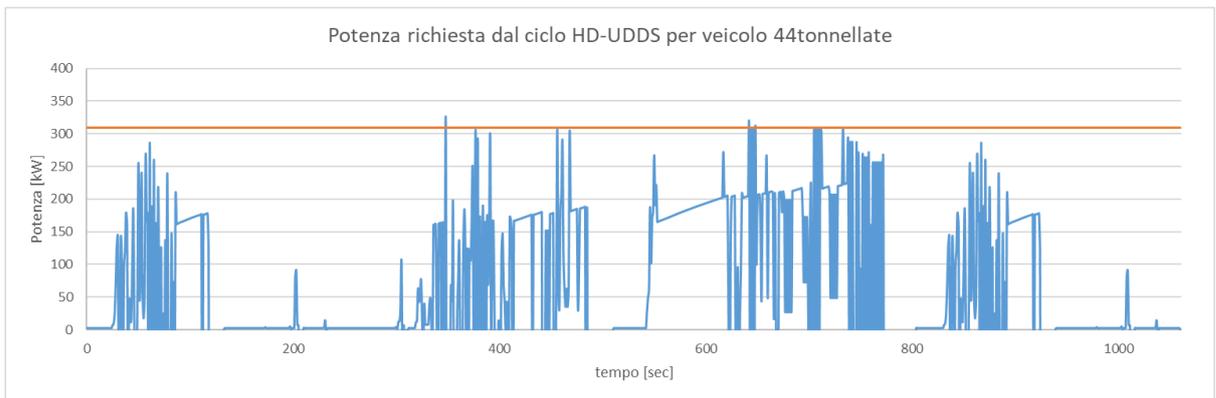


Figura 4.9 - Potenza richiesta a un veicolo commerciale di 44 tonnellate per la percorrenza del ciclo-guida HD-UDDS

Effettivamente la potenza massima installata a bordo del veicolo da 44 tonnellate risulta spesso leggermente insufficiente a garantire la percorrenza del ciclo, ma ciò può essere ritenuto accettabile, in quanto significa che il veicolo essendo molto pesante, richiede spesso al suo motore la potenza massima. Quindi ritengo che il profilo di velocità rappresentato dal ciclo HD-UDDS sia congruo alla reale percorrenza stradale di veicoli industriali da 18 e 44 tonnellate.

4.3 Dimensionamenti

Uno dei principali scopi di questa tesi di laurea, è il dimensionamento dei sistemi di accumulo dell'energia per veicoli pesanti alimentati mediante l'utilizzo delle tecnologie alternative già descritte in precedenza. Vale a dire il dimensionamento di batterie per le versioni elettriche ed il dimensionamento di celle a combustibile per l'immagazzinamento dell'idrogeno e di batterie di supporto per le versioni ibride. Le logiche di funzionamento dei sistemi di accumulo sono quelle descritte nella *sezione 3.2*, mentre questo capitolo si occupa di analizzare i criteri di dimensionamento.

Come già detto, il simulatore è in grado di gestire il dimensionamento dei sistemi di accumulo, mediante la scelta di un valore di autonomia chilometrica garantita, ed infatti si è scelto di svolgere i dimensionamenti per un'autonomia di 250 km. Tale valore, dà origine ad un dimensionamento adatto a veicoli con medie percorrenze, che per esempio si muovono su tratti sub-urbani o extra-urbani nel limite dei 250 km giornalieri. Le normative del *Regolamento europeo del 20 dicembre 1985 n°3820* sanzionate dal codice della strada, per i conducenti di veicoli pesanti (oltre le 3,5 tonnellate di peso a pieno carico) vige l'obbligo di interrompere l'attività di guida per almeno 45 minuti ogni massimo 4 ore, oppure per tempi inferiori ma totalizzando sempre un'interruzione totale minima dalla guida di 45 minuti ogni 4 ore. Per questo motivo si può ritenere accettabile un'autonomia di 250 km anche per veicoli autostradali, i quali sono infatti costretti a limitare le proprie percorrenze.

4.3.1 Dimensionamento veicoli elettrici

Per simulare con veicoli elettrici percorrenze di 250 km mediante i cicli-guida descritti (i cicli-guida sono caratterizzati da lunghezze molto inferiori), il simulatore adotta un criterio

moltiplicativo. Ovvero il simulatore calcola i flussi di potenza ed energia di un singolo ciclo-guida e successivamente li moltiplica con lo scopo di ottenere una percorrenza totale pari all'autonomia richiesta. Indicando con la lettera N il numero di cicli necessario a raggiungere l'autonomia richiesta, si consideri *tabella 4.4* riassuntiva di quanto detto:

	Lunghezza ciclo	Autonomia richiesta	N
	[km]	[km]	
CARB-HHDDT	41.3	250	6.1
HD-UDDS	8.94	250	28.0

Tabella 4.4 – Lunghezza dei cicli-guida CARB-HHDDT e HD-UDDS e numero di cicli necessario al raggiungimento di 250 km di autonomia

L'unico sistema di accumulo dell'energia previsto per le versioni puramente elettriche è la batteria, il cui dimensionamento risente della semplicità nella logica di funzionamento precedentemente descritta. Innanzitutto si consideri che i valori di autonomia imposti per il dimensionamento, nel caso di un veicolo elettrico condizionano significativamente la dimensione della batteria, in quanto essendo l'unico sistema di accumulo di energia, deve garantire autonomamente una quantità di energia sufficiente a svolgere la missione richiesta. Per prima cosa, si consideri che prima di avviare la simulazione, l'operatore deve stabilire due valori di State of Charge entro i quali operare, ovvero lo stato di carica iniziale e lo stato di carica minimo, al di sotto del quale la batteria non si considera utilizzabile.

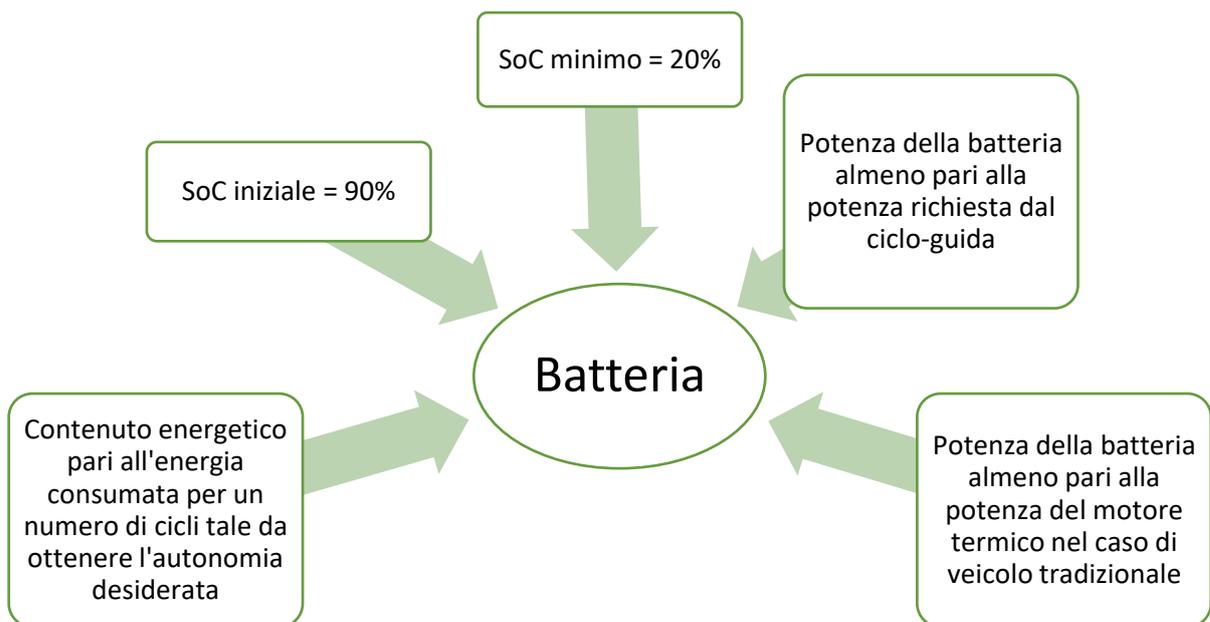
A tale proposito si è stabilito quanto segue:

- SoC iniziale = 90%, ovvero le simulazioni vengono effettuate considerando la batteria inizialmente non completamente carica.
- SoC minimo = 20%, ovvero non si accetta che la batteria raggiunga una percentuale di carica inferiore al 20% di quella massima. Ciò rappresenta una garanzia anche in

termini di ciclo di vita della batteria, in quanto consente di evitare cicli di scarica eccessivi che andrebbero a ledere le capacità di accumulo della stessa.

Il simulatore inoltre, tiene conto, come spiegato in seguito, del fatto che, durante la percorrenza del singolo ciclo, la batteria non consuma un quantitativo di energia che è dato dalla differenza tra quella inizialmente contenuta e quella contenuta alla fine del ciclo, in quanto grazie al sistema di recupero dell'energia in frenata, può succedere che durante il ciclo, lo stato di carica sia inferiore rispetto a quello ottenuto a ciclo concluso.

Nello schema seguente, si riassumono i criteri adottati per il dimensionamento della batteria prima di descriverli approfonditamente:



Il dimensionamento della batteria, consiste nello stabilire la sua massa complessiva, in quanto, come già detto, il simulatore adotta dei parametri medi, stabilendo sulla base dei sistemi in commercio l'energia specifica e la potenza specifica contenute nell'accumulatore. Assumendo

dunque un sistema di accumulo agli Ioni di Litio, si stabilisce un'energia specifica per unità di peso pari a 140 Wh/kg ed una potenza specifica di 500 W/kg. Per quanto riguarda il rendimento elettrico dei processi di carica e scarica del dispositivo, si è scelto un valore costante pari al 96% per entrambi, con la consapevolezza che esso sia ottenibile solamente in condizioni ambientali ideali.

Un'operazione preliminare fondamentale per la simulazione, è quella di impostare una prima stima del dimensionamento della batteria. Così facendo infatti, il simulatore è in grado di stabilire la quantità minima di energia stoccata (come già detto è pari al 20% dell'energia totale immagazzinabile) e quindi è in grado di stabilire se tutti gli altri requisiti sono soddisfatti, decretando se è possibile o meno diminuire la taglia della batteria. In sostanza, si tratta di un simulatore che opera per confronto ed aggiornamento dei risultati, ovvero calcola sulla base di una stima se essa non soddisfa le esigenze di autonomia, se le soddisfa correttamente o se la dimensione della batteria è stata sovra-stimata. Aggiornando manualmente il dimensionamento della batteria fino a quando il simulatore indica che questa non può più essere diminuita, si ottiene il dimensionamento definitivo.

Vediamo dunque il calcolo che svolge il simulatore per la determinazione della massa della batteria, una volta noti i flussi di potenza ed energia durante la simulazione dei cicli-guida:

$$M_{batteria} = \max \left\{ \begin{array}{l} \frac{E_{min,batteria}}{140 \frac{Wh}{kg}} \\ \frac{\max(P_{max,ciclo-guida}; P_{versione tradizionale})}{500 \frac{W}{kg}} \end{array} \right.$$

dove l'energia minima richiesta alla batteria indica l'energia necessaria per il raggiungimento dell'autonomia chilometrica prestabilita:

$$E_{min,batteria} = E_{consumata\ N-1\ cicli} + E_{max\ scarica\ 1\ ciclo} + 20\% * M_{batteria\ ipotizzata} * \frac{140Wh}{kg}$$

Considerando che N indica il numero di cicli-guida necessari al raggiungimento dell'autonomia desiderata, il primo termine indica l'energia consumata nei primi N-1 cicli-guida, considerata come la differenza tra l'energia inizialmente contenuta e quella rimanente alla fine dei cicli. Il secondo termine invece indica il quantitativo massimo di energia spesa nell'ultimo ciclo: se infatti accade che durante l'ultimo ciclo la batteria raggiunge un livello di carica inferiore al 20% (minimo imposto) e poi grazie alla frenata rigenerativa torna ad un valore accettabile, si genererebbe usura degli elettrodi. Dunque il secondo termine argina questo problema, richiedendo $SoC_{minimo}=20\%$ durante tutta la percorrenza. Il terzo termine, infine, richiede che nella batteria sia sempre presente il minimo livello di carica di cui si è appena discusso. A tale proposito è interessante analizzare l'andamento dello stato di carica durante la percorrenza dei cicli guida CARB-HHDDT e HD-UDDS.

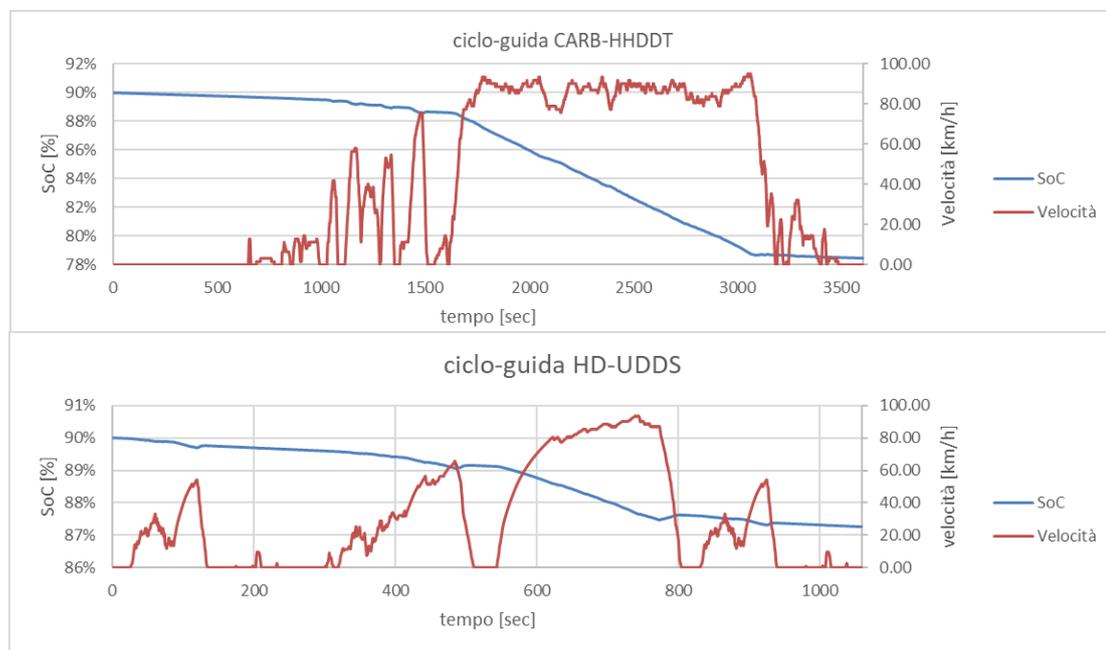


Figure 4.10 – State of Charge della batteria durante la percorrenza dei cicli-guida CARB-HHDDT e HD-UDDS da parte del veicolo da 3.5 tonnellate in configurazione elettrica

Figura 4.10, mostra oltre al profilo di velocità dei due cicli-guida scelti, l'andamento dello stato di carica durante la loro percorrenza da parte di un veicolo da 3,5 tonnellate preso come campione. Si può osservare con facilità, soprattutto nel ciclo HD-UDDS che durante le frenate avviene la rigenerazione di energia con conseguente ricarica della batteria. Per questo motivo è fondamentale considerare che durante l'autonomia complessiva di 250 km lo SoC non debba risultare mai inferiore al 20%.

A questo punto, al fine di riassumere tutto quello che è stato analizzato, riporto in *tabella 4.5* il risultato dei dimensionamenti sui quattro veicoli preposti.

VEICOLI ELETTRICI A BATTERIE										
Vehicle	cycle	range	Battery weight	Battery power	Battery energy	payload	Consumption EL	SoC in	SoC fin	Total Consumption
		[km]	[kg]	[kW]	[kWh]	[kg]	[Wh/km]			[Wh/km*kg]
3.5 ton	CARB-HHDT	250	764	382	106.96	884	299.25	90%	20%	0.339
5.2 ton	CARB-HHDT	250	969	484.5	135.66	2295	379.73	90%	20%	0.165
18 ton	HD-UDDS	250	2165	1082.5	303.1	12565	848.69	90%	20%	0.068
44 ton	HD-UDDS	250	4510	2255	631.4	32575	1767.98	90%	20%	0.054

Tabella 4.5 – Dimensionamento dei sistemi di accumulo a batteria per i veicoli in configurazione elettrica

Osservando i valori di energia e di potenza erogabili dalla batteria, si può facilmente affermare che la potenza sia sovra-stimata, quindi il dimensionamento è stato senza ombra di dubbio condizionato da una necessità di energia per affrontare l'autonomia richiesta. Il peso della batteria risulta particolarmente gravoso sull'architettura complessiva del veicolo, e di conseguenza comporta una forte diminuzione delle capacità di carico del veicolo, fino ad ottenere il payload indicato in *tabella 4.5*. In realtà, il valore di payload calcolato, tiene conto solamente dell'aggiunta della batteria, senza considerare eventuali rinforzi e supporti aggiunti al telaio per consentirne l'installazione. È però ragionevole trascurare codesti apporti, in quanto risulterebbero molto meno rilevanti rispetto al peso stesso della batteria.

Per quel che riguarda la potenza massima della batteria, si consideri che essa non è completamente sfruttabile, in quanto la potenza effettivamente trasferibile al drivetrain è quella erogata dal motore elettrico. Per questo motivo, è necessario che il motore elettrico abbia potenza adeguata al ciclo-guida considerato.

Un altro importante aspetto da considerare è la quantità di energia elettrica consumata per coprire l'intera autonomia e per veicoli da trasporto di merce (come i veicoli industriali pesanti in esame) è preferibile indicarla rapportata ai chilometri percorsi ed al carico utile del veicolo. Questo aspetto verrà illustrato più approfonditamente nelle sezioni successive e per il momento è bastato individuare un dimensionamento per veicoli pesanti riequipaggiati con drivetrain elettrica.

4.3.2 Dimensionamento veicoli ibridi

Come già descritto, i veicoli pesanti in versione ibrida sono caratterizzati da due sistemi di accumulo dell'energia: un pacco batterie agli Ioni di Litio ed una cella a combustibile, le cui logiche di funzionamento sono già state introdotte alla *sezione 3.2*. A differenza del caso di veicolo elettrico, la complessità nell'effettuare il dimensionamento è molto superiore, in quanto i singoli sistemi di accumulo non seguono costantemente le richieste del ciclo-guida.

Come nel caso di equipaggiamento elettrico, anche nel caso ibrido lo stato di carica iniziale della batteria viene considerato pari al 90%, mentre il minimo raggiungibile sempre pari al 20% per garantire integrità agli elettrodi. Per quanto invece riguarda la cella a combustibile, si considera un quantitativo di carburante (idrogeno) necessario a coprire l'autonomia richiesta, ovvero necessario a garantire le richieste energetiche del ciclo-guida. Tali richieste

energetiche sono però condizionate da due fattori fondamentali legati alla logica di funzionamento, i quali devono essere definiti preliminarmente alla simulazione:

- Potenza della fuel cell = Stabilisce quando è necessario l'intervento della batteria per la generazione di potenza.
- Percentuale di SoC al di sotto del quale la fuel cell lavora costantemente alla massima potenza per ricaricare la batteria.

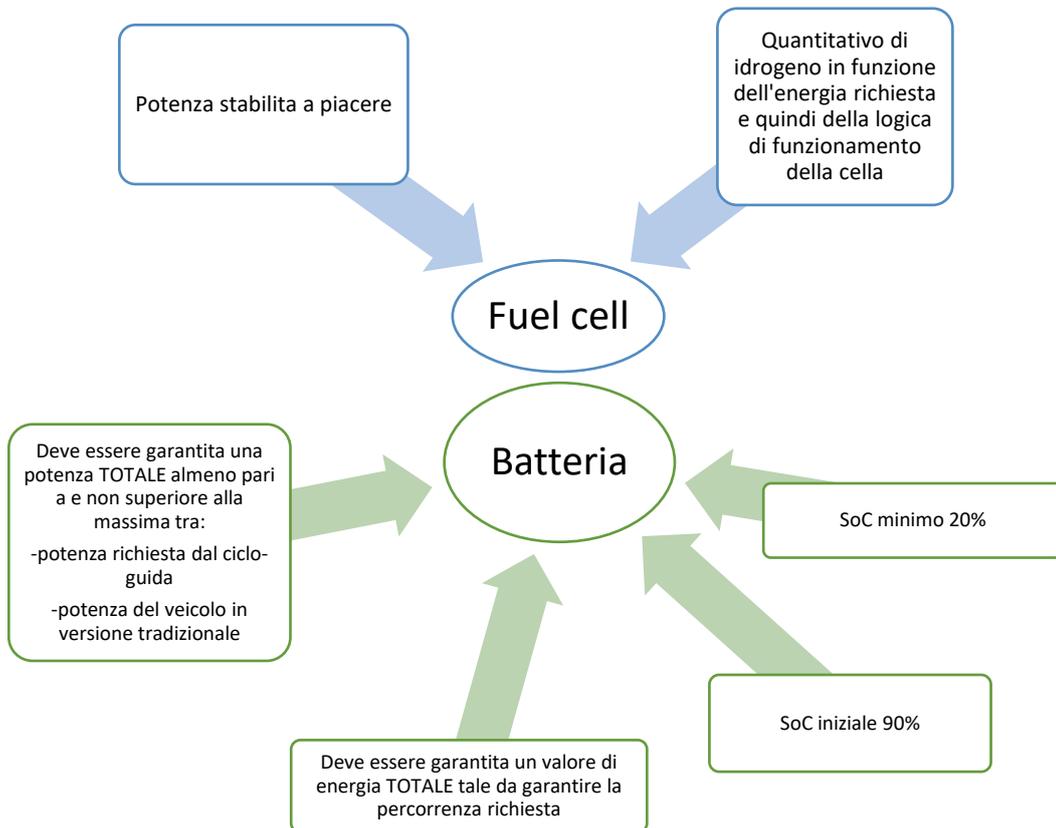
Come vedremo poco più avanti, questi due criteri sono fondamentali in quanto condizionano fortemente il quantitativo di energia consumata durante il ciclo. Ovvero, un loro scorretto settaggio potrebbe compromettere gli effetti benefici della trasformazione della drivetrain tradizionale in una drivetrain alternativa con consumi energetici eccessivi.

A causa della copresenza di due sistemi di accumulo, in teoria sarebbero possibili differenti combinazioni dei due al fine di soddisfare le esigenze di potenza ed energia richieste dai cicli-guida. Stabilendo un obiettivo desiderato, si ottiene il dimensionamento ottimale ed in questo caso si stabilisce l'intenzione di ottimizzare il consumo energetico specifico. Ovvero, il criterio di dimensionamento adottato è quello che riduce al minimo il consumo di energia complessiva per unità di payload e per unità di percorrenza, definibile come "consumo di trasporto":

$$C_{trasporto} = \frac{Consumo}{250 \text{ km} * Payload} = \left(\frac{Wh}{km * kg} \right)$$

Per ottenere la minimizzazione del consumo di trasporto, è necessario intervenire sui valori dei due parametri precedentemente indicati: potenza della fuel cell e valore di SoC al di sopra del quale si interrompe il flusso di potenza che ricarica la batteria da parte della cella a combustibile.

Nel frattempo, osservando lo schema a blocchi, è facile comprendere il criterio di dimensionamento dei due sistemi di accumulo, per rispettare le esigenze energetiche e di potenza richieste dai cicli-guida.



Vista la complessità di funzionamento, è necessario ad ogni intervallo temporale in cui si fraziona il ciclo-guida, verificare lo stato di carica della batteria e di conseguenza stabilire la ripartizione di potenza tra cella e batteria. Inoltre il simulatore deve stabilire se il flusso di energia tra fuel cell e batteria debba avvenire sulla base dello stato di carica di quest'ultima. Per questo motivo la simulazione non funziona più in maniera moltiplicativa come avveniva

per i veicoli in configurazione elettrica, bensì sono stati creati dei nuovi cicli-guida della lunghezza di 250 km, costruiti come composizione dei cicli-guida CARB-HHDDT e HD-UDDS.

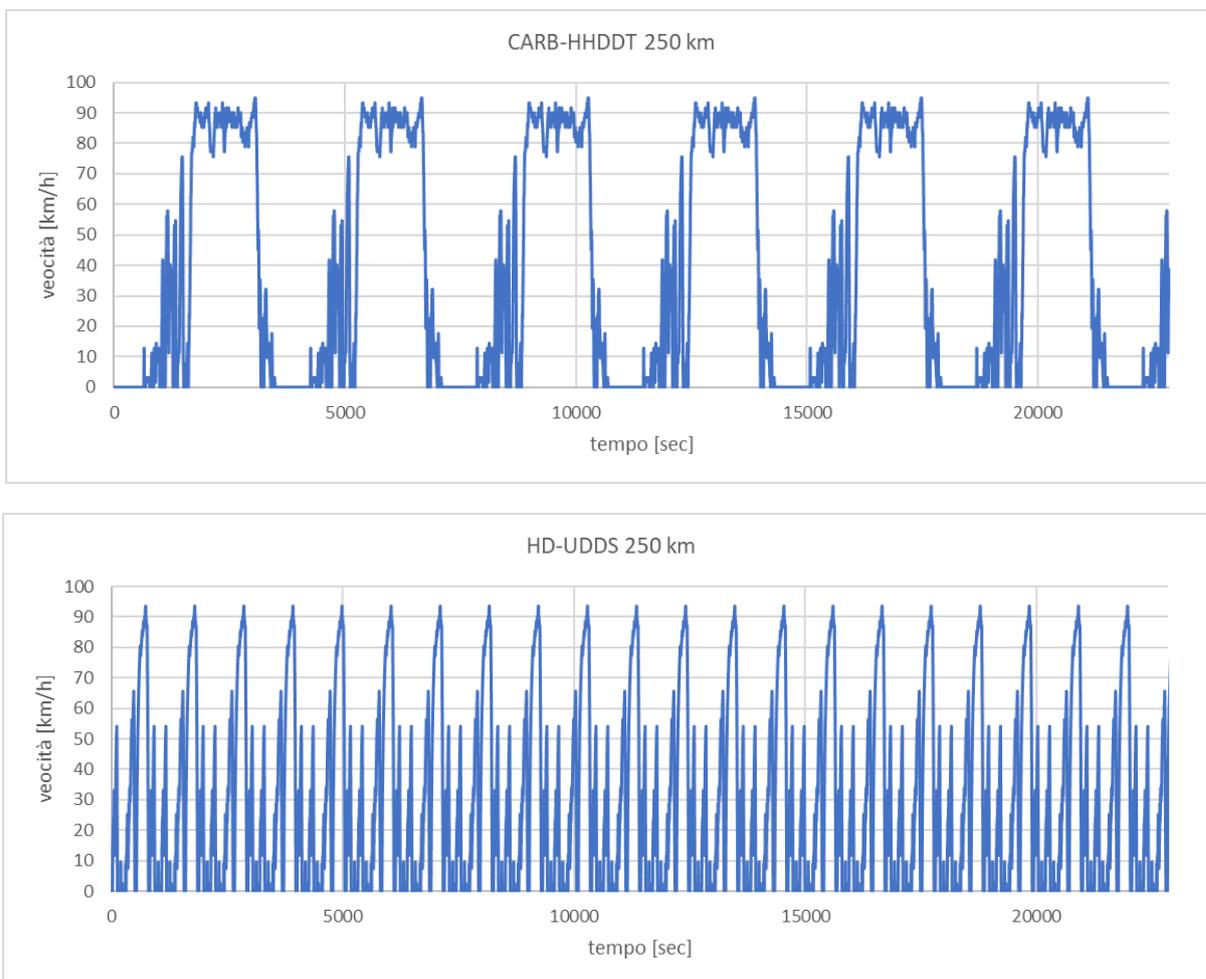


Figura 4.11 – Cicli guida composti per il raggiungimento dell'autonomia di 250 km

Per chiarezza si osservino in *figura 4.11* i grafici che identificano i nuovi cicli-guida denominati come i precedenti con l'aggiunta di un suffisso indicante l'autonomia richiesta di 250 km.

Come già avveniva per la simulazione dei veicoli in versione elettrica, anche per il caso ibrido è necessaria l'operazione di stima preliminare delle dimensioni della batteria. Infatti, con le stesse modalità già descritte, una volta stabilita la potenza da attribuire alla fuel cell e la percentuale di carica della batteria necessaria per attivare il flusso di potenza tra essa e cella

a combustibile, sarà il simulatore a determinare se la stima della batteria sia stata corretta o no. Vediamo il calcolo che svolge il simulatore per la determinazione della massa necessaria alla batteria per soddisfare le esigenze del ciclo-guida durante la percorrenza di 250 km:

$$M_{batteria} = \max \left\{ \begin{array}{l} \frac{E_{min,batteria}}{140 \frac{Wh}{kg}} \\ \frac{\max(P_{max,ciclo}; P_{versione\ tradizionale}) - P_{fuel\ cell}}{500 \frac{W}{kg}} \end{array} \right.$$

dove l'energia minima richiesta alla batteria indica l'energia necessaria per il raggiungimento dell'autonomia chilometrica prestabilita:

$$E_{min,batteria} = E_{consumata\ 250\ km} - E_{consumata, idrogeno} + 20\% * M_{batteria\ ipotizzata} * \frac{140Wh}{kg}$$

L'energia contenuta nell'idrogeno consumato, viene calcolata in funzione della logica di funzionamento e del potere calorifico inferiore dell'idrogeno, così come analizzato nella sezione 3.

Come affermato più volte, è indispensabile stabilire la potenza della cella a combustibile e lo stato di carica della batteria al di sotto del quale la cella funziona sempre alla massima potenza, utilizzando l'energia in eccesso per ricaricare la batteria. Al fine di determinare il valore di questi due parametri in grado di minimizzare il "consumo di trasporto", sono state svolte numerose simulazioni. Vediamo in *tabella 4.6* una serie di dimensionamenti effettuati sul veicolo da 18 tonnellate per determinati valori di potenza della cella e di stato di carica limite per l'attivazione della rigenerazione di energia dalla cella a combustibile.

SoC per rigenerazione da FC	Massa Veicolo	Ciclo-guida	Range	M batteria	Potenza batteria	Potenza Fuel Cell	Total Power	H2 stored	payload	Consumo elettrico batteria	Consumo idrogeno	SoC in	SoC fin	SoC min	Consumo totale	Consumo di trasporto
[%]			[km]	[kg]	[kW]	[kW]	[kW]	[kg]	[kg]	[Wh/km]	[Wh/km]	[%]	[%]	[%]	[Wh/km]	[Wh/km kg]
80%	18	HUDDS-L	250	175	87.5	74	162	13.97	14249	11.8	1825.2	90%	78%	78%	1837.0	0.1289
80%	18	HUDDS-L	250	195	97.5	64	162	13.76	14256	16.8	1798.3	90%	75%	74%	1815.0	0.1273
80%	18	HUDDS-L	250	211	105.5	56	162	13.82	14261	20.0	1781.1	90%	73%	72%	1801.1	0.1263
80%	18	HUDDS-L	250	227	113.5	48	162	13.52	14266	22.8	1766.6	90%	72%	72%	1789.5	0.1254
80%	18	HUDDS-L	250	247	123.5	38	162	13.4	14272	26.0	1751.2	90%	71%	70%	1777.2	0.1245
80%	18	HUDDS-L	250	255	127.5	34	162	12.77	14279	68.4	1668.1	90%	42%	42%	1736.5	0.1216
80%	18	HUDDS-L	250	346	173	30	203	11.21	14211	131.9	1465.4	90%	22%	22%	1597.3	0.1124
60%	18	HUDDS-L	250	175	87.5	74	162	13.69	14251	31.3	1788.3	90%	58%	58%	1819.6	0.1277
60%	18	HUDDS-L	250	198	99	64	163	13.4	14256	39.1	1751.2	90%	55%	55%	1790.3	0.1256
60%	18	HUDDS-L	250	212	106	56	162	13.27	14263	43.7	1734.6	90%	53%	53%	1778.3	0.1247
60%	18	HUDDS-L	250	227	113.5	48	162	13.15	14269	48.2	1718.5	90%	52%	52%	1766.7	0.1238
60%	18	HUDDS-L	250	250	125	38	163	12.96	14272	54.1	1693.9	90%	51%	51%	1748.1	0.1225
60%	18	HUDDS-L	250	255	127.5	34	162	12.4	14282	94.0	1619.6	90%	24%	24%	1713.6	0.1200
60%	18	HUDDS-L	250	395	197.5	30	228	10.67	14166	154.3	1394.5	90%	20%	20%	1548.8	0.1093
30%	18	HUDDS-L	250	175	87.5	74	162	13.52	14253	42.6	1766.9	90%	47%	47%	1809.5	0.1270
30%	18	HUDDS-L	250	198	99	64	163	12.92	14260	72.4	1688.2	90%	25%	25%	1760.6	0.1235
30%	18	HUDDS-L	250	212	106	56	162	12.76	14267	79.4	1667.1	90%	23%	23%	1746.5	0.1224
30%	18	HUDDS-L	250	227	113.5	48	162	12.6	14273	86.4	1646.3	90%	22%	22%	1732.6	0.1214
30%	18	HUDDS-L	250	250	125	38	163	12.36	14277	96.1	1614.4	90%	21%	21%	1710.5	0.1198
30%	18	HUDDS-L	250	322	161	34	195	11.4	14223	125.0	1489.6	90%	21%	20%	1614.6	0.1135

Tabella 4.6 - dimensionamenti di batteria e fuel cell per veicolo da 18 tonnellate in configurazione ibrida, per determinati valori di potenza della cella e di stato di carica limite per l'attivazione della rigenerazione di energia dalla cella a combustibile

Nel riassunto della precedentemente tabella, in colore rosso sono indicati i parametri da stabilire prima della simulazione, mentre in grassetto la potenza complessiva della cella combustibile ed il "consumo di trasporto". Ognuna delle sezioni colorate si conclude con una soluzione che vede aumentare significativamente la potenza complessiva del veicolo e pertanto, viene esclusa, per una questione legata al contenimento dei costi dei sistemi di accumulo e del motore elettrico. Analizziamo i risultati sperimentalmente ottenuti variando i due parametri:

- All'interno di ogni sezione colorata sono proposte diverse soluzioni con diversi valori di potenza della cella a combustibile. Ridurre la potenza della cella, significa ridurre il quantitativo di energia da lei generato durante il ciclo-guida ed incrementare quello

generato dalla batteria. Per capire se sia più conveniente aumentare l'uso della fuel cell oppure quello della batteria, è indispensabile considerare i loro rendimenti, privilegiando l'uso del sistema di accumulo con rendimento maggiore:

$$\eta_{fuel\ cell} = 55\% \quad \eta_{batteria} = 96\%$$

Il valore 96% del rendimento della batteria rischia di essere sovrastimato in condizioni climatiche non ottimali, ma in ogni caso risulta sempre superiore a quello della cella a combustibile, la quale possiede rendimenti più vicini a quelli di un motore diesel tradizionale. Per questo motivo è più conveniente sfruttare la batteria piuttosto che la cella e dunque una diminuzione della potenza della fuel cell consente di diminuire il consumo di trasporto, così come indicato in tabella.

Abbassando in maniera eccessiva il dimensionamento della cella a combustibile, l'energia che il ciclo richiede, dovendo essere integrata dalla batteria, richiede un aumento della taglia della batteria stessa. In questo modo accade che le dimensioni della batteria non vengano più definite per esigenze di potenza, bensì per esigenze di energia, esattamente come accadeva per il dimensionamento dei veicoli in versione elettrica. Quindi la potenza della batteria, essendo proporzionale alla sua massa, aumenta in maniera eccessiva, dotando il veicolo di un sistema di accumulo sovradimensionato.

- Tra un settore colorato e l'altro, è stata variata la percentuale massima dello stato di carica della batteria, fino al quale avviene la rigenerazione da parte della fuel cell. All'aumentare di tale valore, è evidente che la batteria rimane quasi sempre carica, in quanto la fuel cell continua a trasferirle energia. Oltre a non sfruttare la reale capacità della batteria, ciò comporta uno svantaggio in termini di consumo energetico, in quanto significa continuare a far lavorare la cella combustibile al massimo. I vantaggi

che questo procedimento avrebbe sono legati sostanzialmente all'autonomia, la quale aumenterebbe semplicemente incrementando la quantità di carburante (idrogeno) a bordo.

Utilizzare un sistema di questo tipo consentirebbe di avere una batteria quasi sempre carica, senza la necessità di ricaricarla ad ogni raggiungimento dei 250 km di autonomia. Siccome però il criterio di dimensionamento adottato richiede una minimizzazione della batteria, non è in alcun modo conveniente mantenere sempre attivo il reintegro di energia della batteria da parte della fuel cell.

Dunque, per quanto riguarda il valore di codesti due indici, sono state effettuate numerose prove, diminuendo di volta in volta la potenza della cella a combustibile e variando la percentuale di stato di carica tanto discussa. I dimensionamenti ufficiali che consentono di minimizzare l'energia complessiva consumata sono riportati in *tabella 4.7*.

Vehi- cle	cycle	Range	% limite ricarica	Battery weight	Battery power	FC power	Total Power	H2 stored	payloa- d	Consum- ption EL	Consum- ption H2	SoC in	SoC fin	SoC min	Consumo di trasporto
		[km]	FC-Bat	[kg]	[kW]	[kW]	[kW]	[kg]	[kg]	[Wh/km]	[Wh/km]				[Wh/km*kg]
3.5	CARB-HHDT	250	30%	110	55	23	78	3.53	1445	36.4	461.4	90%	31%	28%	0.3445
5.2	CARB-HHDT	250	30%	216	108	26	134	4.14	2943	72.1	540.6	90%	30%	26%	0.2082
18	HD-UDDS	250	30%	251	125.5	36	161.5	12.36	14281	97.1	1615.1	90%	21%	20%	0.1199
44	HD-UDDS	250	30%	533	266.5	82	348.5	27.33	36117	206.1	3571.6	90%	21%	20%	0.1046

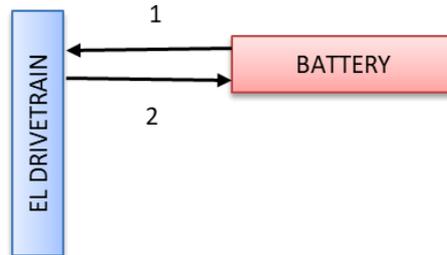
Tabella 4.7 – dimensionamenti di fuel cell e batteria per i veicoli in configurazione ibrida

4.4 Flussi di potenza

Per completare l'analisi eseguita fino ad ora, è interessante dare una rappresentazione grafica dei flussi di potenza tra le varie componenti che compongono il drivetrain nelle due soluzioni elettrica ed ibrida. Analizzando i flussi, infatti, si ha una migliore comprensione della dinamica interna dei sistemi di accumulo e si riesce ad intuire meglio l'utilità di soluzioni come la ricarica della batteria da parte della fuel cell o la rigenerazione di energia in frenata.

4.4.1 Flussi nell'architettura elettrica

I flussi di potenza coinvolti nella propulsione puramente elettrica sono due, ovvero uno che va dalle batterie verso il drivetrain ed uno che ha il verso opposto, come indicato nello schema.



Il flusso 1 risente del rendimento di scarica della batteria, dunque risulta superiore alla potenza effettivamente richiesta dal drivetrain, mentre il flusso 2, che rappresenta la rigenerazione durante la frenata, è caratterizzato da una potenza inferiore rispetto a quella erogata dal drivetrain, a causa del rendimento di ricarica della batteria. Entrambi i flussi energetici risentono della potenza richiesta agli ausiliari ed essa viene aggiunta a quella richiesta dal drivetrain per ottenere il flusso 1 e viene sottratta per ottenere il flusso 2, concedendo un minore recupero di energia.

Precedentemente, avevano deciso di effettuare i dimensionamenti dei veicoli in configurazione elettrica, mediante una moltiplicazione dei risultati dei cicli-guida con lo scopo di raggiungere l'autonomia richiesta di 250 km. Per questo motivo, si può ritenere sufficientemente esaustivo analizzare dei grafici che mostrino i flussi di potenza durante il primo ciclo, senza per forza analizzare l'intera percorrenza di 250 km. In effetti, anche sommando i cicli-guida per ottenere tale autonomia, per ognuno di essi i flussi di potenza rimangono invariati, diversamente da quanto accade nel caso di propulsione ibrida. I grafici da *figura 4.12* a *figura 4.15* mostrano l'andamento dei flussi di potenza e dell'energia recuperata in frenata durante un solo ciclo-guida.

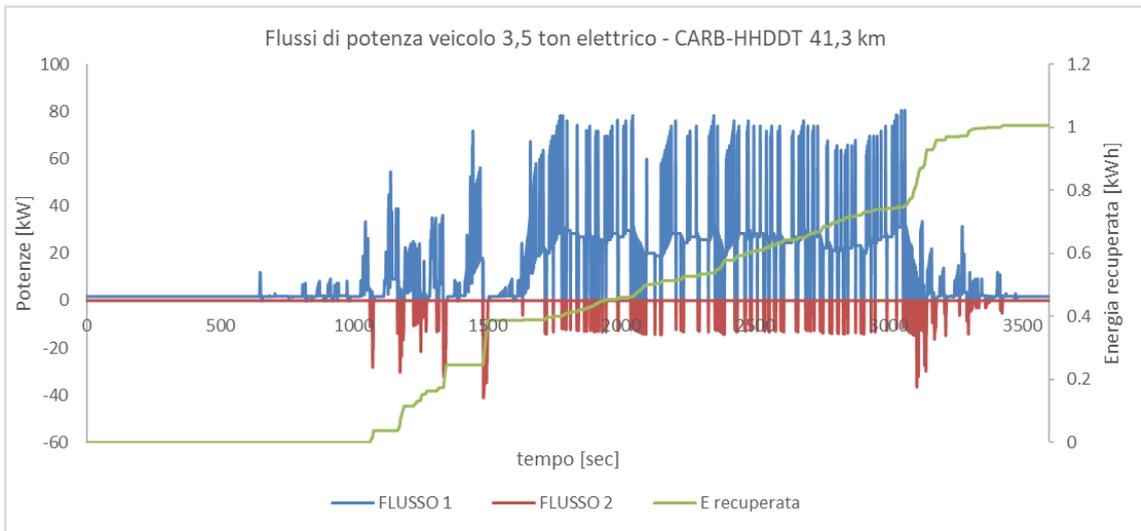


Figura 4.12 – Flussi di potenza per il veicolo da 3.5 tonnellate in configurazione elettrica durante la percorrenza del ciclo-guida CARB-HHDDT

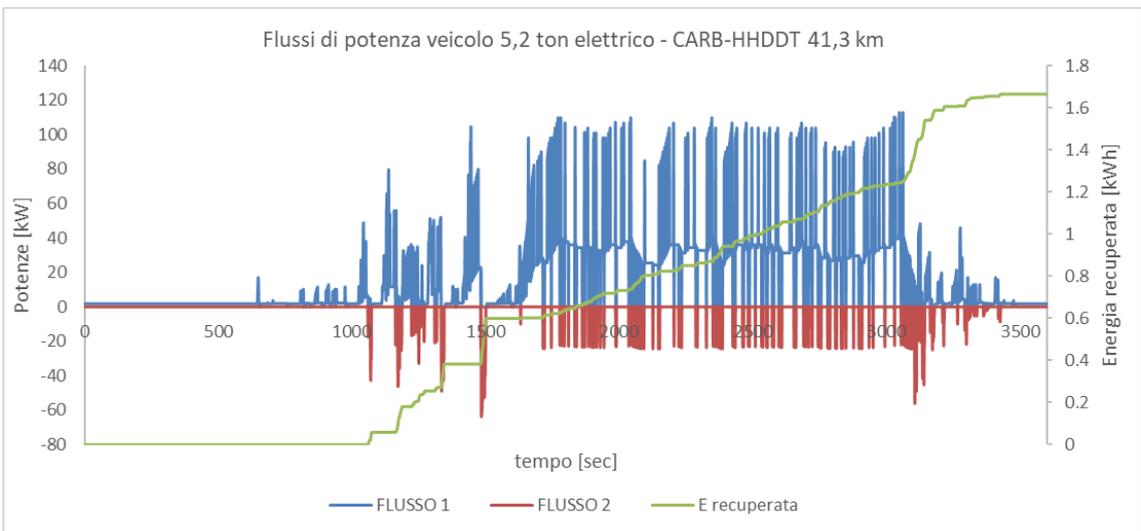


Figura 4.13 - Flussi di potenza per il veicolo da 5.2 tonnellate in configurazione elettrica durante la percorrenza del ciclo-guida CARB-HHDDT

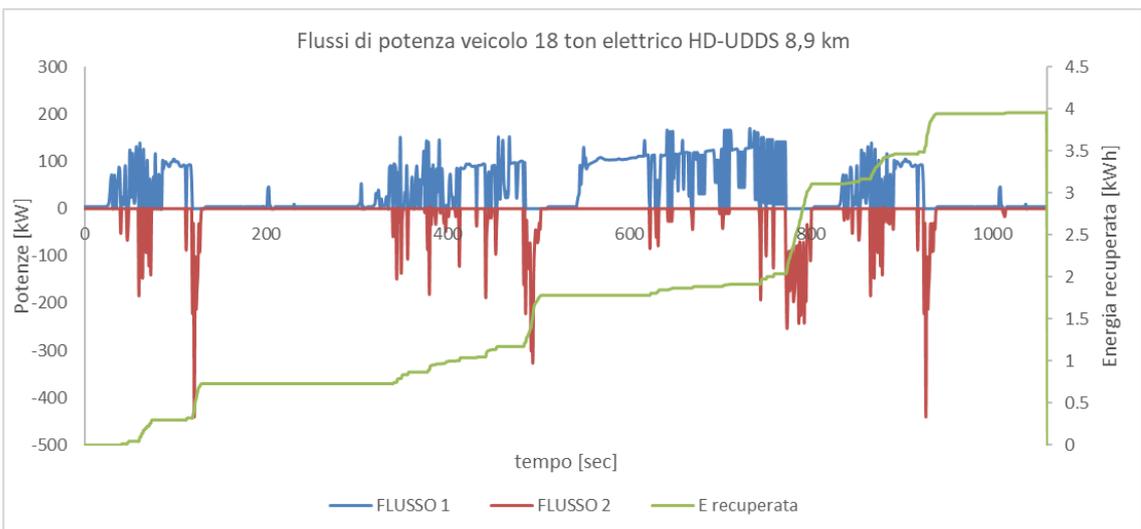


Figura 4.14 - Flussi di potenza per il veicolo da 18 tonnellate in configurazione elettrica durante la percorrenza del ciclo-guida HD-UDDS

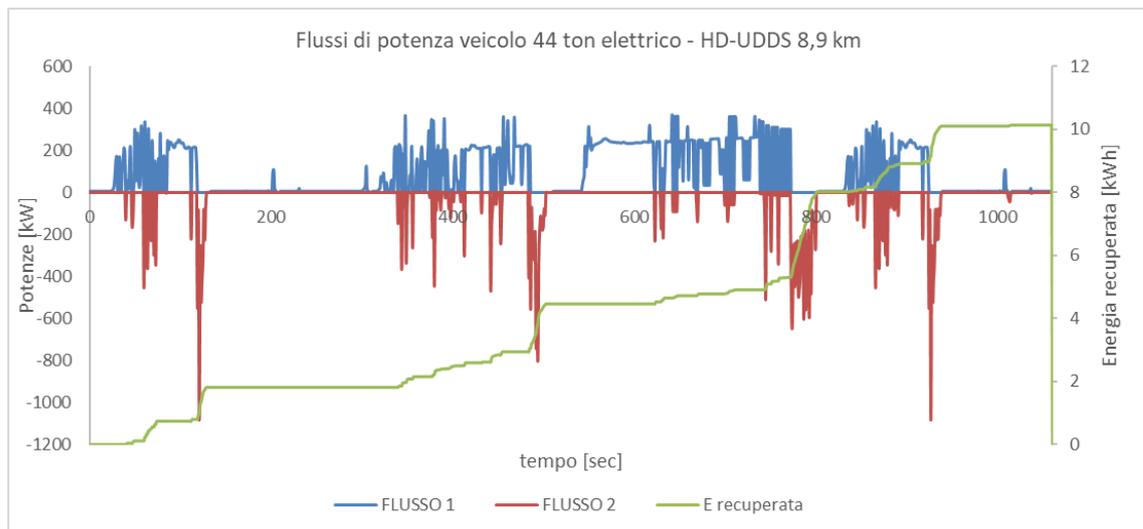


Figura 4.15 - Flussi di potenza per il veicolo da 44 tonnellate in configurazione elettrica durante la percorrenza del ciclo-guida HD-UDDS

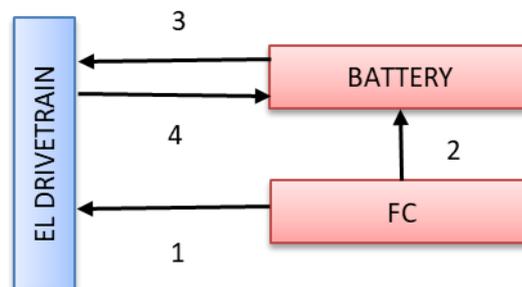
Si può osservare che il ciclo-guida CARB-HHDDT è caratterizzato da flussi di potenza superiori in fase di scarica, ovvero la potenza che la batteria eroga per avanzare raggiunge valori assoluti superiori rispetto a quella che riceve per ricaricarsi durante le frenate rigenerative. Nel caso invece di ciclo-guida HD-UDDS avviene l'esatto opposto, ovvero la potenza che la batteria riceve per caricarsi raggiunge valori superiori rispetto a quella di scarica, nonostante entrambe siano vincolate dalla potenza massima della batteria. In precedenza però, avevamo accennato che per i veicoli in versione elettrica, la batteria viene dimensionata soprattutto rispettando esigenze energetiche, dunque i valori di potenza erano molto elevati. Questo rappresenta un grosso vantaggio perché consente di ricaricare la batteria con una potenza molto maggiore rispetto a quella di scarica.

Il fatto per cui la potenza di ricarica della batteria in fase di frenata rigenerativa sia superiore rispetto alla potenza di scarica nel caso di veicoli da 18 e 44 tonnellate, risulta estremamente coerente con la realtà, infatti veicoli molto pesanti consentono di sviluppare accelerazioni fortemente più limitate rispetto a veicoli da 3,5 e 5,2 tonnellate. Mentre la decelerazione, nonostante risulti sempre a favore dei veicoli più leggeri, è caratterizzata da prestazioni più

simili. Il motivo di ciò è già stato spiegato alla sezione 4.1 e riguarda sostanzialmente il rapporto peso/potenza, che per i veicoli più pesanti (da 18 e 44 tonnellate), risulta fortemente minore rispetto ai comuni furgoni industriali.

4.4.2 Flussi nell'architettura ibrida

I veicoli in configurazione ibrida sono caratterizzati da una logica di funzionamento molto più complessa a causa dell'elevato numero di flussi di potenza in gioco e dai requisiti che caratterizzano l'attivazione o la disattivazione di essi. Il principale di questi requisiti è dato dallo stato di carica necessario per il trasferimento di energia dalla fuel cell alla batteria. Lo schema seguente sintetizza quattro possibili flussi di potenza che circolano nell'architettura ibrida dei veicoli.



Il flusso 1 rappresenta la potenza che la fuel cell trasferisce al drivetrain, comprendente la potenza degli ausiliari e quella richiesta per l'avanzamento. Il flusso 2 invece rappresenta la potenza trasferita alla batteria da parte della cella a combustibile, ma tale flusso può essere attivato solamente quando lo stato di carica della batteria risulta inferiore al 30%. Il flusso 3 rappresenta il trasferimento di potenza dalla batteria al drivetrain ed esso avviene per sopperire alle mancanze della cella a combustibile, mentre il flusso 4 rappresenta la frenata rigenerativa che consente di ricaricare la batteria tenendo in considerazione il rendimento di quest'ultima. Il flusso 2 è il più complesso, in quanto per essere attivato richiede una specificità

della batteria che richiede di essere monitorata continuamente, rendendo di fatto inesatto studiare l'intera autonomia mediante una somma di cicli-guida più brevi.

La strategia adottata in fase di simulazione fu la creazione di due nuovi cicli guida, corrispondenti rispettivamente al ciclo CARB-HHDDT e HD-UDDS costruiti sommando i cicli originali fino al raggiungimento di 250 km. Oltre a problematiche legate alla difficoltà computazionale da parte del calcolatore, visto l'eccessivo numero di dati simulati, diviene complesso analizzare i flussi di potenza durante tutta la percorrenza. Considerando infatti una frequenza di campionamento pari ad 1 Hz, su una distanza di 250 km a velocità medie di 40 e 30 km/h, si ottengono un'infinità di valori numerici da computare.

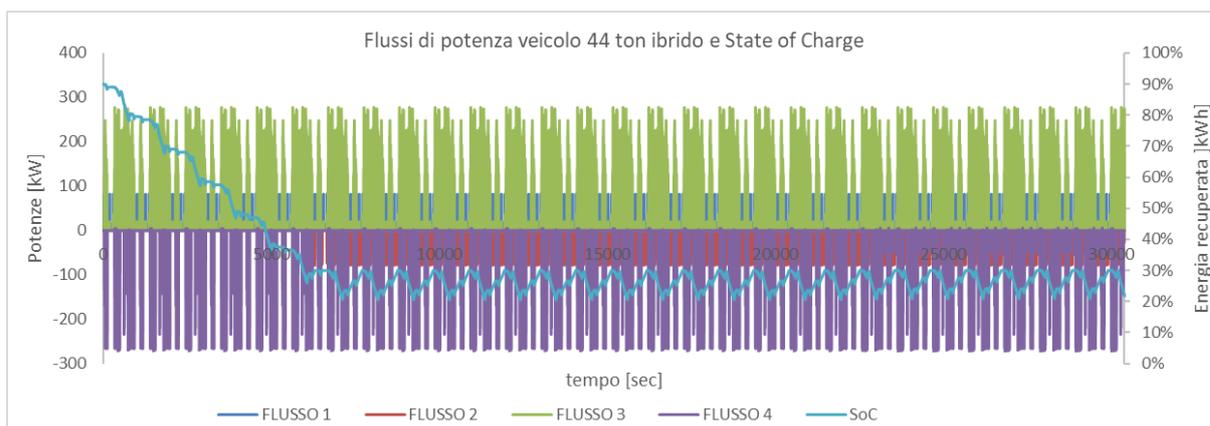


Figura 4.16 – Flussi di potenza e State of Charge per il veicolo da 44 tonnellate in configurazione ibrida durante la percorrenza del ciclo-guida HD-UDDS

Figura 4.16, mostra i flussi di potenza all'interno del drivetrain ibrido per il veicolo più pesante tra quelli in esame (44 tonnellate). Come anticipato, l'autonomia totale viene raggiunta sommando tra loro molti cicli-guida di tipo HD-UDDS, ma questo rende il grafico eccessivamente fitto e poco comprensibile. L'unica cosa visibile e molto interessante è il flusso 2, identificabile nella linea di colore rosso: esso indica il trasferimento di potenza (e dunque di energia) dalla fuel cell alla batteria ed è presente solamente dopo una serie di cicli HD-UDDS, proprio in corrispondenza di un valore di State of Charge del 30%. Questo dimostra che, nel

caso di configurazione ibrida, la rappresentazione e la simulazione di un singolo ciclo-guida della durata di pochi chilometri non è in grado di descrivere in maniera corretta una percorrenza superiore alla durata del ciclo stesso.

Di seguito sono riportati i flussi di potenza per i vari veicoli durante la percorrenza del primo ciclo-guida originale, dunque non sarà mostrato il flusso 2 in quanto assente, a causa dello stato di carica della batteria ancora troppo elevato.

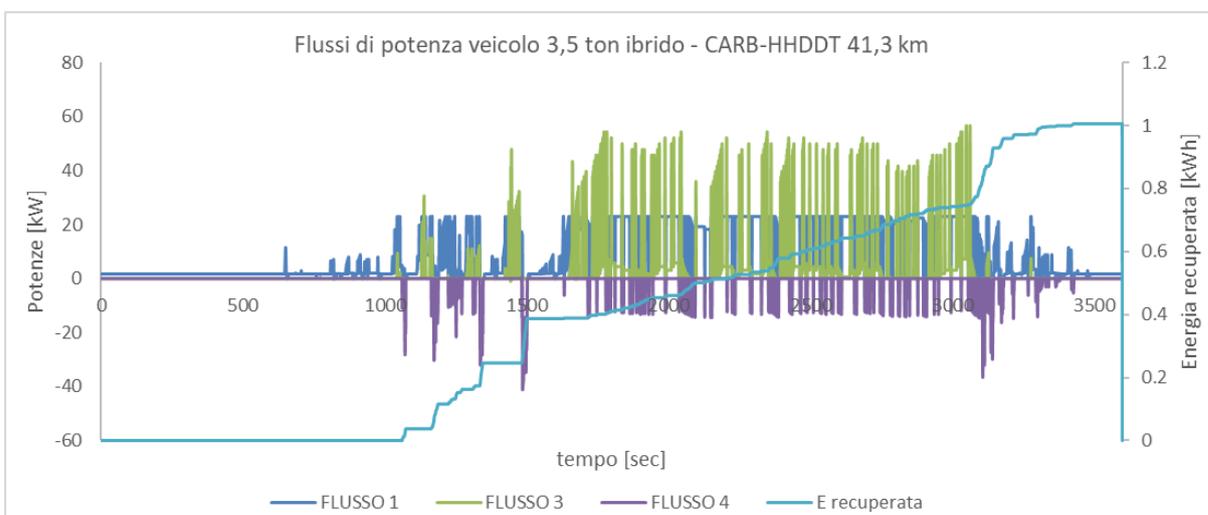


Figura 1.17 - Flussi di potenza per il veicolo da 3.5 tonnellate in configurazione ibrida durante la percorrenza del ciclo-guida CARB-HHDDT

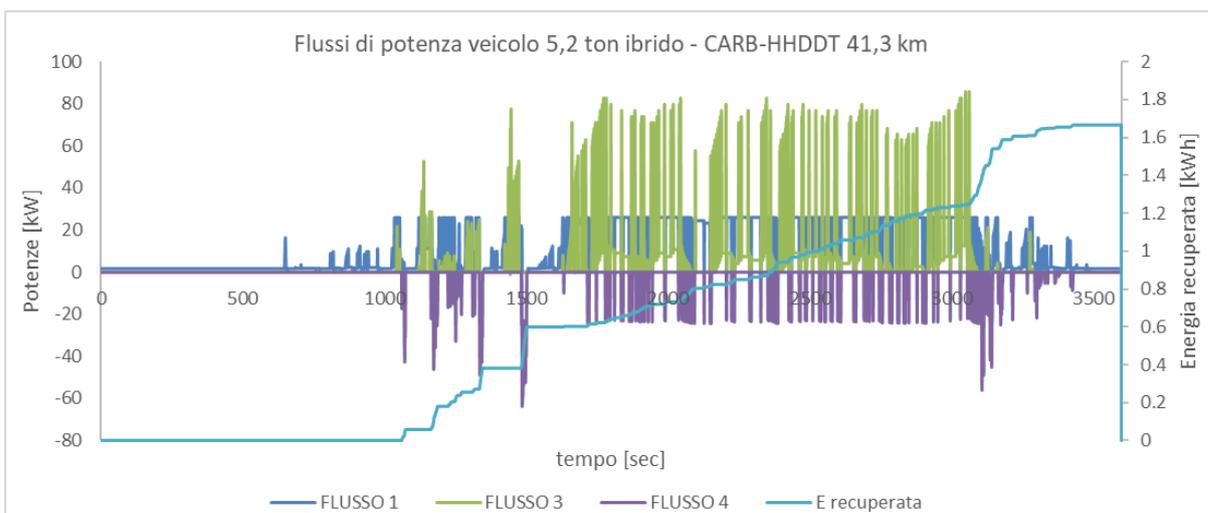


Figura 4.18 - Flussi di potenza per il veicolo da 5.2 tonnellate in configurazione ibrida durante la percorrenza del ciclo-guida CARB-HHDDT

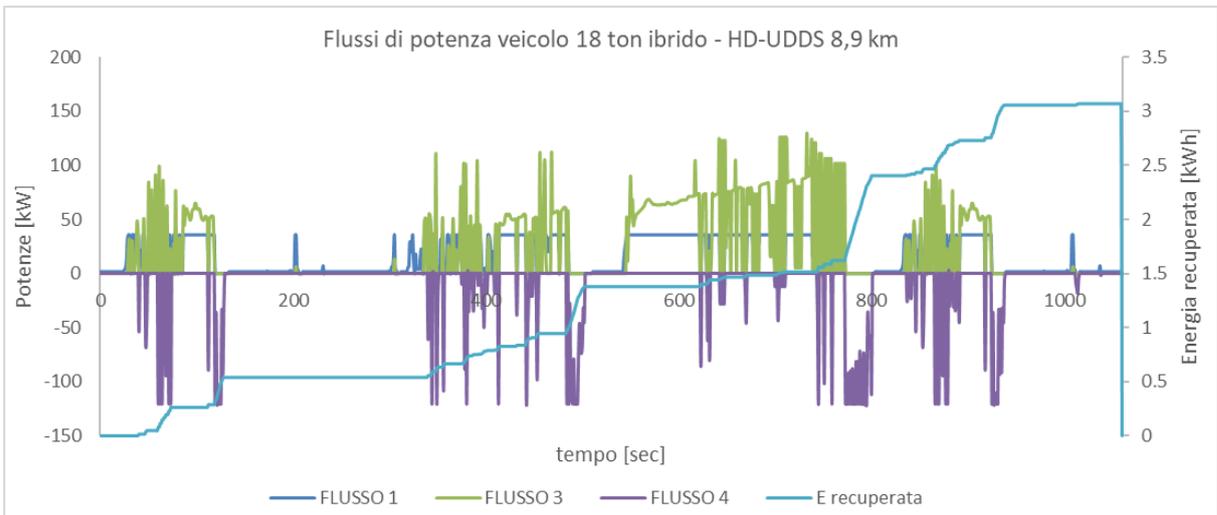


Figura 4.19 - Flussi di potenza per il veicolo da 18 tonnellate in configurazione ibrida durante la percorrenza del ciclo-guida HD-UDDS

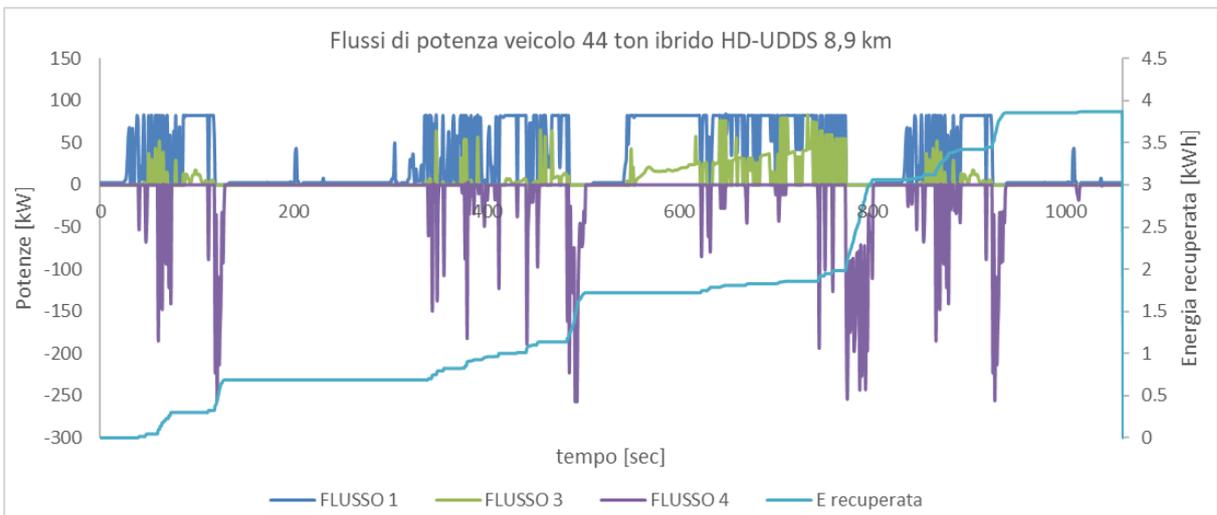


Figura 4.20 - Flussi di potenza per il veicolo da 44 tonnellate in configurazione ibrida durante la percorrenza del ciclo-guida HD-UDDS

Come visto anche pe le versioni elettriche, i veicoli più pesanti da 18 e 44 tonnellate sono soggetti a recuperi di energia in frenata superiori grazie ai diversi profili di velocità da loro percorsi. In più, per le configurazioni ibride, è presente un flusso di potenza che consente alla fuel cell di ricaricare la batteria, anche se questo non può considerarsi facente parte della categoria “energia recuperata”, in quanto tale energia potrebbe essere risparmiata semplicemente imponendo alla cella a combustibile di seguire le sole richieste del drivetrain.

In queste configurazioni ibride, la potenza del flusso 4 risulta spesso superiore rispetto a quella del flusso 2, a testimonianza del fatto che la batteria risulta svolgere solamente un supporto in fase di fornitura della potenza alle ruote, con la capacità di recuperare energia che altrimenti andrebbe persa. La fuel cell, infatti, non è in grado da sola di recuperare energia.

5. Analisi Well to Wheel

L'analisi Well to Wheel (tradotto "analisi dal pozzo alla ruota"), abbreviabile con la sigla WtW, indica un'analisi energetica comprendente tutti i processi, dalla produzione al consumo, che caratterizzano il ciclo di vita di un determinato vettore energetico. L'analisi Well to Wheel si suddivide in due parti:

- Analisi Well to Tank "WtT" = letteralmente significa "dal pozzo al serbatoio" ed identifica la fase di produzione e distribuzione del vettore energetico.
- Analisi Tank to Wheel "TtW" = significa "dal serbatoio alla ruota" ed identifica la fase di consumo del vettore energetico a bordo di un veicolo.

I consumi di gasolio, energia elettrica ed idrogeno visti fino ad ora, condizionano le abitudini degli automobilisti e degli autotrasportatori, portando ad ignorare la presenza di consumi energetici ed emissioni legati agli impianti di produzione dei vettori energetici. Per rendersi conto di quanto venga sottostimata l'importanza di questa analisi nell'opinione pubblica, è sufficiente pensare a quante volte si sente parlare di veicoli elettrici come veicoli ad "emissioni zero", quando invece, anch'essi sono caratterizzati da consumi di energia e relative emissioni a causa dei processi di produzione.

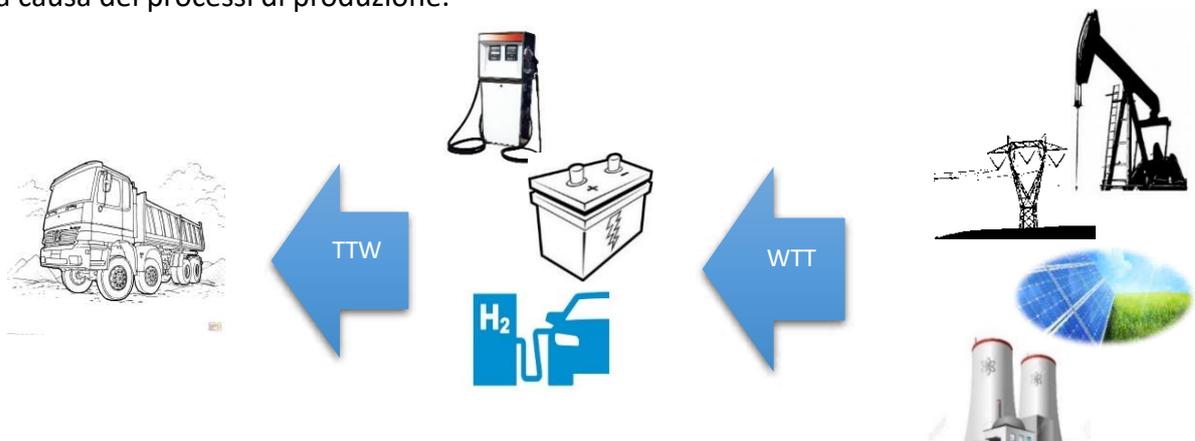


Figura 5.1 – Animazione dell'analisi Well to Wheel per la produzione ed il consumo di carburante per la propulsione

Nel caso di propulsione veicolistica, ci si può spingere oltre ad una semplice valutazione legata alla quantità di energia consumata, in quanto sono interessanti anche aspetti legati al consumo di fonti fossili ed all'impatto ambientale. Infatti, lo scopo di questo lavoro di tesi è quello di indagare relativamente alle possibilità esistenti di realizzare sistemi propulsivi alternativi per veicoli pesanti con ridotti impatti sull'ambiente.

Innanzitutto è fondamentale fare una distinzione tra inquinamento localizzato ed inquinamento globalizzato, i quali, se confusi, non consentono di fare valutazioni precise sulle diverse tecnologie di propulsione analizzate.

- Inquinamento localizzato = si tratta di un fattore presente solamente a livello locale, ovvero dove avviene l'utilizzo dei veicoli. Esso dipende dalle emissioni inquinanti e di emissioni nocive al corpo umano che vengono emesse dal tubo di scappamento dei veicoli.
- Inquinamento globalizzato = si riferisce all'emissione di sostanze che condizionano fortemente il clima del pianeta a livello globale. Tali sostanze sono dette "gas serra" e vengono identificate come le maggiori colpevoli dell'innalzamento della temperatura all'interno dell'atmosfera.

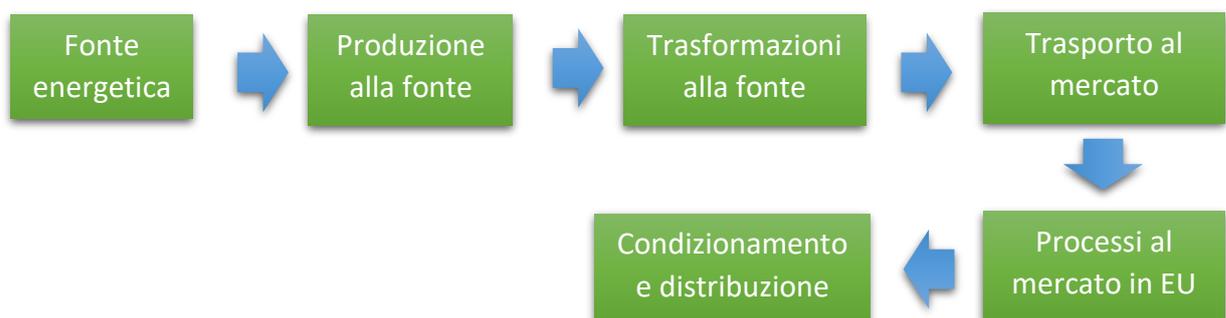
Le emissioni di sostanze nocive non sono di facile monitoraggio durante la propulsione e nemmeno durante la produzione dei vettori energetici, in quanto non rappresentano una quantità proporzionale all'energia prodotta. I gas responsabili dell'effetto serra, invece, sono più facilmente quantizzabili sia in fase di produzione dei vettori energetici che durante la propulsione veicolare, in quanto sono presenti in quantità stechiometrica all'interno delle reazioni chimiche in gioco. I gas responsabili dell'effetto serra vengono denominati "Greenhouse Gas" (abbreviati con GHG) e la loro quantità viene indicata come

grammi di anidride carbonica equivalente. Ovvero, la quantità di ognuno dei gas serra prodotti, viene moltiplicata per un fattore che consente di trovare quanta anidride carbonica equivalente ne causerebbe il medesimo effetto.

Prima di procedere è giusto sottolineare che l'analisi Well to Tank, è fortemente condizionata da scelte strategico-politiche delle autorità nazionali e dunque sono difficili previsioni future.

5.1 Analisi Well to Tank

Il processo di produzione di un vettore energetico, può essere sintetizzato con la dicitura "Well to Tank", e sintetizza l'insieme di consumi energetici e le emissioni di gas serra durante i processi di produzione e distribuzione, fino alla vendita sul mercato. In questa tesi ci occupiamo di indagare sui processi produttivi di carburante diesel, energia elettrica ed idrogeno. Per tutti i vettori energetici, il processo Well to Tank può essere sintetizzato come segue:



I vettori energetici in esame, sono destinati al mercato dell'Unione Europea (UE), ma spesso le fonti a cui si attinge per ottenerli, sono localizzate in luoghi differenti rispetto a dove poi vengono distribuiti, o persino da luoghi esterni dai confini fisici dell'UE. Quindi si identifica con

il nome “mercato” l’area geografica prossima alla distribuzione del vettore energetico e con “fonte” l’area geografica in cui avviene l’estrazione della fonte energetica. I processi indicati nel diagramma sono i seguenti:

- La produzione alla fonte energetica, indica l’insieme di tutte le operazioni necessarie per l’estrazione e per l’immagazzinamento del vettore energetico. Essa comprende anche alcuni pretrattamenti necessari per renderlo trasportabile al mercato ed economicamente appetibile.
- Per trasformazioni alla fonte si intendono le lavorazioni meccaniche e chimiche indispensabili prima del trasporto al mercato.
- Il trasporto al mercato può essere caratterizzato da distanze più o meno lunghe e talvolta esterne all’Unione Europea. Dipendentemente dal percorso di produzione, il trasporto può avvenire direttamente al mercato, ma anche fino ad impianti presso i quali avvengono ulteriori lavorazioni.
- I processi al mercato rappresentano ulteriori lavorazioni e trasformazioni del prodotto necessarie per l’ottenimento del vettore energetico vendibile. Per esempio, si considerino le raffinerie petrolifere nelle quali avvengono trasformazioni del prodotto petrolifero prima che esso venga distribuito alle stazioni di servizio. Si parla di processi “al mercato” quando questi avvengono distanti dal luogo presso il quale si è estratto il vettore e vicino ai luoghi in cui verrà poi distribuito.
- La distribuzione ed i condizionamenti finali rappresentano l’insieme dei processi che servono per rendere vendibile il vettore energetico ottenuto, una volta giunto al mercato.

Quando si parla di estrazione dalla fonte energetica, in realtà non si intende obbligatoriamente un processo di estrazione fisica come quello di tipo minerario, bensì l'ottenimento del vettore energetico in forma grezza, dallo stato di natura in cui si trovava. Per esempio, la produzione di energia elettrica tramite la tecnologia eolica, richiede un'estrazione di energia elettrica privando l'aria di tale quantitativo di energia cinetica, ma non richiede un processo fisicamente estrattivo.

Tutti i processi indicati, condizionano fortemente i consumi di energia e le emissioni di gas serra necessarie per l'ottenimento di una certa quantità di vettore energetico. In seguito, dunque, indichiamo sinteticamente i principali numeri che caratterizzano i processi di produzione di carburante diesel, energia elettrica ed idrogeno secondo le tecnologie adottate all'interno dell'Unione Europea. I dati utilizzati per questa analisi, provengono da un'indagine della Commissione Europea e si riferiscono alla produzione ed alla distribuzione dei vettori energetici destinati all'EU-27 all'anno 2009. Con la sigla EU-27 si intendono 27 stati sovrani dell'Unione Europea dell'anno 2009: Austria, Belgio, Bulgaria, Cipro, Repubblica Ceca, Danimarca, Estonia, Finlandia, Francia, Germania, Grecia, Ungheria, Irlanda, Italia, Lettonia, Lituania, Lussemburgo, Malta, Olanda, Polonia, Portogallo, Romania, Repubblica Slovacca, Slovenia, Spagna, Svezia e Regno Unito.

5.1.1 Produzione di Gasolio

La produzione del gasolio per la propulsione veicolare, richiede estrazione di petrolio, il quale per la fornitura del mercato europeo, arriva da diverse aree geografiche: Mare del Nord, Africa, Medio Oriente, Russia, Mar Caspio ed altri piccoli centri di estrazione. Ognuna di queste aree geografiche è caratterizzata dalla presenza di qualità di petrolio differenti, che richiedono

dunque differenti processi e quindi richiedono consumo di energia ed emissioni di gas serra diversi.

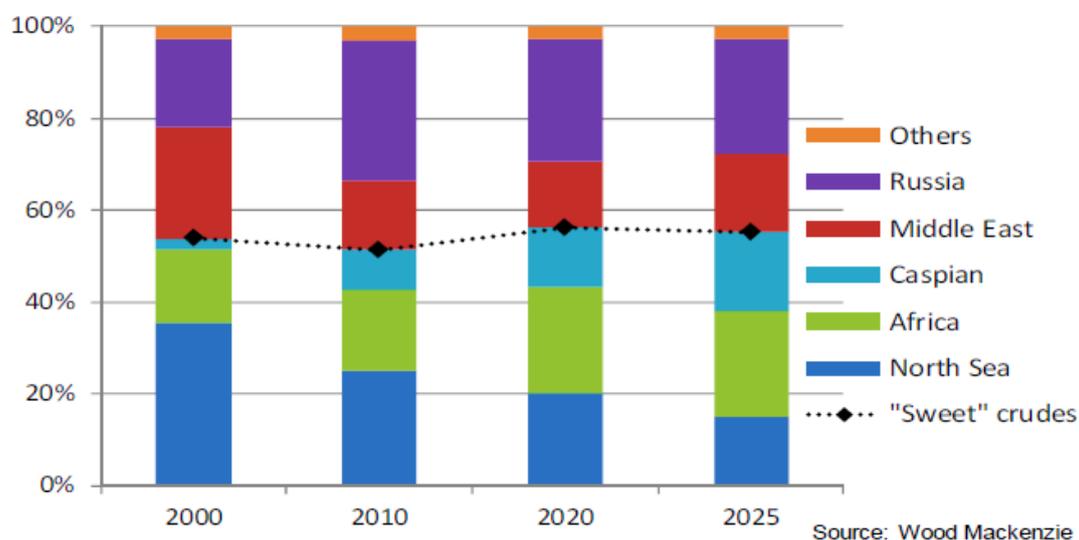


Figura 5.2 – Provenienza geografica del petrolio importato all'interno dell'Unione Europea

Figura 5.2 indica che sul territorio europeo arrivano svariate tipologie di petrolio ed ognuna di esse dipende soprattutto dall'area geografica di estrazione. Le previsioni future risultano inoltre invariate rispetto allo stato attuale, testimoniando che i produttori rimarranno invariati e probabilmente anche le tecnologie estrattive. L'International Association of Oil Producers, nota anche con la sigla OGP, indica il principale gruppo di produttori di petrolio, il quale però fornisce solamente il 48% del grezzo importato in EU-27. Nonostante ciò, i soli dati disponibili per la produzione di petrolio in UE, sono quelli derivanti da OGP, dunque i dati numerici rappresentano correttamente solo il 48% del petrolio prodotto o importato all'interno dei territori dell'Unione.

Si osservi lo schema a blocchi seguente che sintetizza i principali processi per la produzione e la distribuzione del grezzo all'interno dell'Unione Europea.



La fase di estrazione è caratterizzata da una serie di processi, i quali richiedono un certo consumo di energia ed una certa quantità di gas serra emessi. L'energia emessa in questa fase corrisponde a circa $0.065 \text{ MJ/MJ}_{\text{final fuel}}$, mentre la quantità di gas serra è circa pari a $4.3\text{-}4.7 \text{ gCO}_2\text{eq/MJ}_{\text{final fuel}}$. Ovvero, per produrre una quantità di petrolio in grado di fornire 1MJ di energia, si consumano 0,065MJ aggiuntivi di energia e si emette una quantità di anidride carbonica equivalente di circa 4,3 grammi. L'estrazione è caratterizzata da utilizzo di energia elettrica per la produzione, ma anche da combustioni e da sfiati di idrocarburi, così come indicato nella *tabella 5.1*.

	GHG emissione	Energy
	<i>gCO₂eq/MJ crude</i>	<i>MJ/MJ crude</i>
Energia usata in produzione	1.5	0.027
Fiamme da combustione	2.4	0.037
Sfiato di idrocarburi volatili	0.4	0.001
TOTALE	4.3	0.065

Tabella 5.1 – Consumi energetici ed emissioni di CO₂ durante le fasi di estrazione del petrolio

È interessante notare che, in corrispondenza dell'energia usata per la produzione è associato anche un valore di emissione pari a 1.5 grammi di GHG per ogni MJ di grezzo prodotto. Significa che questa analisi tiene conto non solo dell'energia necessaria per l'ottenimento del vettore energetico, ma anche di quanto gas serra è stato emesso per ottenere quella data energia.

Successivamente all'estrazione, deve avvenire il trasporto del grezzo estratto fino alle raffinerie, le quali sono più vicine al mercato. Il trasporto avviene solitamente via mare, mediante l'utilizzo di navi più o meno capienti, oppure via condutture, anche se quest'ultima soluzione è meno frequente. Il metodo di trasporto, così come la capienza delle eventuali navi e quindi il consumo di energia associato, dipende fortemente dalla zona geografica, dalla quantità di grezzo da spostare e dalla posizione delle raffinerie. Nonostante sia usuale posizionare le raffinerie lungo la costa affacciandosi ai bacini di prelievo del grezzo, rifornendole facilmente con navi petroliere, un'altra soluzione abbastanza usata è quella di posizionare le raffinerie all'interno del territorio continentale, rendendo indispensabile un sistema di trasporto dotato di condutture. Questa soluzione è usata per esempio in alcune raffinerie posizionate in Germania, Francia e Paesi Bassi. I dati medi di fornitura per il mercato europeo indicano un consumo di energia pari a $0.01 \text{ MJ/MJ}_{\text{final fuel}}$ ed emissioni di GHG (gas serra) pari a $1.0 \text{ gCO}_2\text{eq/MJ}_{\text{final fuel}}$.

Questi dati si riferiscono alla produzione ed alla distribuzione fino alle raffinerie per petrolio grezzo sul mercato europeo, mentre per la distribuzione di carburante possono variare lievemente, distinguendo i processi per l'ottenimento di carburante benzina oppure diesel.

Una volta giunto alle raffinerie, il grezzo richiede alcune trasformazioni per renderlo appetibile al mercato ed esse si differenziano a seconda della tipologia di prodotto finale che si vuole ottenere. In sintesi, le operazioni che le raffinerie devono svolgere sono:

- Separazione fisica di componenti grezzi presenti all'interno del prodotto da raffinare
- Trattamenti per la rimozione di zolfo ed altri elementi indesiderati
- Conversione di molecole pesanti in molecole più leggere

L'insieme di questi processi all'interno delle raffinerie, causano i consumi energetici e le emissioni di GHG indicate in *tabella 5.2*.

	GHG emissione	Energy
	<i>gCO₂eq/MJ crude</i>	<i>MJ/MJ crude</i>
Diesel	8.60	0.10
Benzina	7.00	0.08

Tabella 5.2 – Consumi energetici ed emissioni di CO₂ durante i processi di raffinazione per carburante benzina e diesel

Questa fase della produzione, è svantaggiosa nel caso di produzione di diesel rispetto alla produzione di benzina, infatti il primo richiede energia superiore e provoca una quantità maggiore di emissioni di gas serra.

Infine, per trasportare il carburante dalle raffinerie fino alle stazioni di rifornimento, si possono utilizzare veicoli auto-botte, dotati di cisterne per il trasporto di materiali infiammabili, oppure, a seconda dei territori in cui si effettua il trasporto, veicoli ferroviari, condutture o chiatte. Mediamente, questo processo richiede consumi energetici di 0.02MJ/MJ_{final fuel} ed emissioni di 1.1 gCO₂eq/MJ_{final fuel}.

Riassumendo l'intero processo di produzione del gasolio destinato al mercato del EU-27, e ricordando che i valori numerici indicati inizialmente erano riferiti a prodotti petroliferi generici e non esclusivamente al gasolio e dunque possono variare lievemente, si ottiene quanto indicato in *tabella 5.3*:

Energy expended (MJ/MJ final fuel)										WTT GHG emitted (g CO ₂ eq/MJ final fuel)								
Total	Fossil	Nuclear	Renewable	Fract renew	Production & conditioning at source	Transformation at source	Transportation to market	Transformation near market	Conditioning & distribution	Range	Total	Production & conditioning at source	Transformation at source	Transportation to market	Transformation near market	Conditioning & distribution	Range	Total GHG inc. combustion
0.20	0.20	0.01	0.00	0.7%	0.07		0.01	0.10	0.02	0.18 0.23	15.4	4.7		1.0	8.6	1.1	13.8 17.0	88.6

Tabella 5.3 – Risultati dell'analisi Well to Tank per carburante diesel durante tutte le fasi di estrazione, lavorazione e distribuzione

Quello che si osserva è che per produrre un quantitativo di gasolio in grado di fornire una quantità di energia pari a 1MJ, sono necessari altri 0,2 MJ di energia ed avviene l'emissione di atmosfera di una quantità di gas serra pari a 15,4 grammi di GHG. La tabella in realtà propone dei range che dipendono dalla tecnologia e dal percorso di produzione adottato, ma per semplicità viene scelto il valore medio indicato con "total". Questi valori sono stati ottenuti sommando i contributi dati da ogni fase del processo produttivo.

La tabella inoltre è in grado di dirci che l'energia necessaria a produrre 1MJ di gasolio, è quasi interamente derivante da fonti fossili, mentre una piccolissima parte dal nucleare. Questo è molto utile per monitorare, per esempio, il consumo di energia derivante da fonti fossili, in relazione al problema dell'esaurimento delle scorte petrolifere.

Sommando ai consumi appena visti, relativi alla fase di produzione del gasolio, il consumo di un veicolo pesante durante il movimento, si ottiene una stima di quello che è l'impatto energetico complessivo. Facendo lo stesso per le emissioni di GHG, si ottengono invece le emissioni totali di un veicolo, prendendo in considerazione non solo l'emissione dal tubo di scappamento del veicolo, ma anche le emissioni intrinseche per la produzione del carburante.

5.1.2 Produzione di Energia Elettrica

L'energia elettrica, a differenza del diesel, può essere utilizzata sia come fonte energetica per il funzionamento di apparecchiature, sia per impianti industriali in cui si effettuano processi elettrolitici per la produzione di altri vettori energetici. Fatta questa premessa, ci occupiamo di analizzare sinteticamente i numeri che caratterizzano l'analisi Well to Tank di produzione di energia elettrica, con lo scopo di inserirla in un quadro più completo inerente le propulsioni alternative per veicoli pesanti.

La produzione di energia elettrica non è, a differenza della produzione di gasolio, descrivibile mediante una serie di processi legati tra loro, in quanto dipende dalla tecnologia adoperata per produrla. Allo stato attuale l'energia elettrica viene prodotta in centrali che sfruttano energie rinnovabili, l'energia nucleare e fonti fossili. Quindi si adoperano altre fonti di energia primaria, come il carbone, il gas naturale, talvolta il petrolio, l'energia nucleare, biogas e fonti rinnovabili come l'energia eolica, l'energia solare e quella idrica per centrali idro-elettriche. *Tabella 5.4* mostra l'attuale mix energetico all'interno del gruppo EU-27, dimostrando una forte inferiorità delle fonti rinnovabili rispetto a quelle fossili.

Primary Energy Source	% Share
Nuclear	33.0%
Coal	31.0%
Natural Gas	20.8%
Oil	3.5%
Hydro	4.4%
Wind	1.6%
Waste	1.8%
Other renewables	3.9%

Tabella 5.4 – Mix energetico all'interno del gruppo EU-27

Il fatto che la produzione di energia elettrica dipenda da un mix energetico composto da fonti di energia primaria così numerosi. Rende difficoltoso descriverne un processo di produzione. Per questo motivo si può ritenere sufficiente, visto lo scopo riassuntivo della tesi, indicare solo i valori numerici medi per il mix europeo, facente riferimento a dati dell'anno 2009. Però, viste le attuali tecnologie e l'inerzia al cambiamento in questo settore, si possono con facilità ritenere validi questi dati almeno fino al 2020.

Description	Energy expended (MJ/MJ final fuel)									Range		
	Total	Fossil	Nuclear	Renewable	Fract renew	Production & conditioning at source	Transformation at source	Transportation to market	Transformation near market			Conditioning & distribution
EU-mix high	1.95	0.57	1.09	0.30	15.6%				1.94	0.02	1.95	1.95
EU-mix medium	2.07	0.62	1.13	0.32	15.3%				2.01	0.05	2.07	2.07
EU-mix low	2.26	0.73	1.20	0.34	14.8%				2.14	0.12	2.26	2.26

Description	WTT GHG emitted (g CO ₂ eq/MJ final fuel)						Range	
	Total	Production & conditioning at source	Transformation at source	Transportation to market	Transformation near market	Conditioning & distribution		
EU-mix high	136.0				136.0	0.0	136.0	136.0
EU-mix medium	141.1				141.1	0.0	141.1	141.1
EU-mix low	150.1				150.1	0.0	150.1	150.1

Tabella 5.5 – Risultato dell'analisi Well to Tank per la produzione di energia elettrica in UE-27

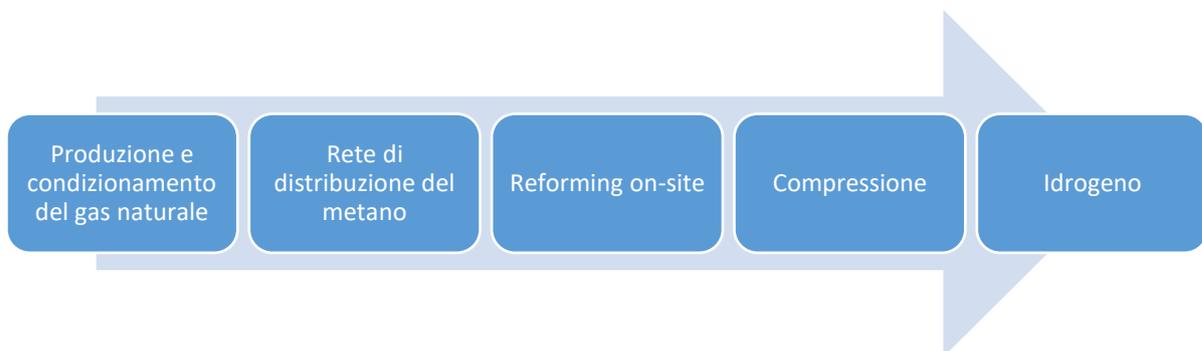
Tabella 5.5 fa distinzione tra l'energia elettrica prodotta e distribuita in alta, media e bassa tensione, in quanto la distribuzione in alta tensione fa sì che la corrente sia minore e dunque anche le relative perdite, mentre la corrente distribuita in bassa tensione sia soggetta a perdite più elevate e dunque a minore efficienza. Per non commettere errori eccessivi, si è deciso di considerare il mix energetico a media tensione, il quale è caratterizzato, per ogni MJ di energia elettrica prodotta, da un consumo di 2,07MJ di energia, di cui 0.62 derivanti da fonti fossili, 1.13 dal nucleare e 0.32 da fonti rinnovabili e da un'emissione media di 141.1 grammi di GHG. Un limite di questa analisi è quello di trascurare l'energia spesa e le conseguenti emissioni in fase di costruzione degli impianti di produzione dell'energia, come per esempio le centrali termo-elettriche o le pale eoliche. Tuttavia, potendo ritenere questo limite comune anche all'analisi WTT degli altri vettori energetici, il metodo utilizzato si presta molto bene per un confronto.

5.1.3 Produzione di Idrogeno

L'idrogeno, in linea di principio, può essere prodotto da qualsiasi fonte di energia primaria, e questo lo rende estremamente attraente. Inoltre, essendo il gas più presente all'interno dell'atmosfera terrestre, parrebbe essere anche il più facile da produrre, ma in realtà risulta molto difficoltoso e richiede anche un elevato dispendio energetico. La sua produzione, può richiedere due diverse tipologie di processi:

- Trasformazione chimica, a partire da un idrocarburo, come per esempio il metano.
- Elettrolisi mediante energia elettrica

Entrambe le tecnologie, possono essere gestite su grandi impianti, oppure su piccoli impianti vicini alle stazioni di rifornimento dell'idrogeno. Tuttavia, la produzione di idrogeno da elettrolisi, è caratterizzata da rendimenti piuttosto scarsi nel caso di volumi elevati, per questo motivo la produzione di idrogeno su larga scala avviene quasi esclusivamente a partire da combustibili fossili. Pertanto, per l'analisi Well to Tank, si considera solamente tale tecnologia ed i correlati valori di consumo energetico ed emissione di GHG.



La tecnologia che consideriamo è quella di ottenimento dell'idrogeno dal gas naturale (Metano) mediante la catena di processi brevemente sintetizzata dallo schema a blocchi. La tecnologia si concentra attorno al cosiddetto "steam reforming", corrispondente ad una serie di reazioni chimiche atte a separare le molecole di idrogeno dai gruppi carboniosi presenti nel gas naturale.

Come si evince dallo schema, successivamente alla produzione del gas naturale, avviene la distribuzione, la quale è caratterizzata solitamente da una rete di condutture che collegano le aree di estrazione al mercato europeo. Una volta giunto vicino a dove il vettore verrà commercializzato, mediante impianti specializzati, viene svolta la pratica del reforming che consente di ottenere l'idrogeno. Questo deve essere compresso e poi messo sul mercato. La rete di distribuzione è antecedente al processo di reforming, ovvero significa che le operazioni di trasporto della fonte energetica avvengono quando essa non è idrogeno, bensì metano. Si potrebbe anche ipotizzare di trasportare idrogeno liquido, ma questo richiede una serie di problematiche legate al controllo dei livelli di pressione e temperatura che renderebbe tale processo sconveniente sia da un punto di vista energetico che da un punto di vista dell'impatto ambientale a causa di elevate emissioni di gas serra. I numeri caratterizzanti l'analisi Well to Tank della produzione dell'idrogeno tramite la decarbonizzazione del metano sono indicati in *tabella 5.6*:

Description	Energy expended (MJ/MJ final fuel)										
	Total	Fossil	Nuclear	Renewable	Fract. renew	Production & conditioning at source	Transformation at source	Transportation to market	Transformation near market	Conditioning & distribution	Range
C-H2: EU-mix, O/S Ref	0.99	0.81	0.14	0.04	4.0%	0.04		0.10	0.53	0.32	0.95 - 1.04

Description	WTT GHG emitted (g CO ₂ eq/MJ final fuel)						Range	
	Total	Production & conditioning at source	Transformation at source	Transportation to market	Transformation near market	Conditioning & distribution		
C-H2: EU-mix, O/S Ref	115.2	5.9		8.4	87.1	13.8	113.1	118.4

Tabella 5.6 – Risultato dell'analisi Well to Tank per la produzione di idrogeno in UE-27

Dunque si può riassumere, dicendo che per la sola produzione di 1MJ di idrogeno, è necessario un dispendio energetico di energia primaria pari a 0.99MJ di cui 0.81 derivanti da fonti fossili,

0.14 dal nucleare e solamente 0.04 da fonti rinnovabili. Inoltre avviene l'emissione di 115.2 grammi di GHG, la maggior parte dei quali a causa del processo di trasformazione al mercato, ovvero di reforming ed una buona parte (8.4 grammi) a causa del trasporto del gas naturale fino agli impianti di reforming.

5.1.4 Risultati Analisi Well to Tank

Considerando i consumi energetici calcolati al simulatore per tutte le configurazioni ed i tonnellaggi dei veicoli in esame, si è in grado ora di calcolare quanta energia è stata spesa per produrre e rendere disponibile al mercato i vettori energetici utilizzati come carburanti. Considerando per esempio il consumo energetico di un veicolo e moltiplicandolo per i valori ottenuti nell'analisi Well to Tank, diviene rapido ottenere i risultati. *Tabella 5.7* indica i valori di consumo energetico, suddivisi tra gasolio, corrente elettrica ed idrogeno, per ognuno dei veicoli adottati.

Vehicle	Cicle	Range	HYBRID				ELECTRIC		TRAD	
			Specific consumption H2	Specific consumption H2 per payload	Specific consumption EL	Specific consumption EL per payload	Specific consumption EL	Specific consumption per payload	Specific consumption fuel	Specific consumption per payload
			[Wh/km]	[Wh/kg]	[Wh/km]	[Wh/kg]	[Wh/km]	[Wh/kg]	[Wh/km]	[Wh/kg]
3.5 ton	CARB-HHDT	250	461.4	79.8	36.4	6.3	299.3	84.6	730.5	124.1
5.2 ton	CARB-HHDT	250	540.6	45.9	72.1	6.1	379.7	41.4	942.3	79.4
18 ton	HD-UDDS	250	1615.1	28.3	97.1	1.7	848.7	16.9	2841.6	49.5
44 ton	HD-UDDS	250	3571.6	24.7	206.1	1.4	1768.0	13.6	6333.4	43.6

Tabella 5.7 – Riassunto dei consumi energetici necessari al raggiungimento di 250km di autonomia da parte dei veicoli

Vettore	Energy expended (MJ/MJ final fuel)				GHG	
	total	Nuclear	fossil	Renewable	g/MJ	g/Wh
Diesel	0.2	0.01	0.2	0	15.4	0.0554
EL [EU-mix]	2.07	1.13	0.62	0.32	141	0.5076
H2 [EU-mix]	0.99	0.14	0.81	0.04	115.2	0.4147

Tabella 5.8 – Consumi energetici ed emissioni di CO₂ per l'analisi Well to Tank di carburante diesel, energia elettrica ed idrogeno

I coefficienti numerici dell'analisi Well to Wheel inoltre sono riassunti in *tabella 5.8*, in modo da rendere più intuitiva l'analisi.

Per valutare l'energia consumata e la quantità di gas serra emesso ai fini della sola produzione del vettore energetico, è sufficiente moltiplicare il consumo di carburante, di idrogeno o di energia elettrica per il coefficiente indicato in *tabella 5.8*. Si consideri l'esempio seguente riferito al veicolo da 3,5 tonnellate in cui si indicano i calcoli per ottenere i risultati dell'analisi Well to Tank. Non sono stati inseriti dati inerenti al consumo di energia da fonti fossili, in quanto poco pertinente senza il contributo Tank to Wheel.

Configurazione tradizionale:

$$C_{energia\ WtT\ diesel} = 730,5 \frac{Wh}{km} * 0,2 \frac{Wh}{Wh} = 146 \frac{Wh}{km}$$

$$Emissioni\ GHG_{WtT\ diesel} = 730,5 \frac{Wh}{km} * 0,0554 \frac{g}{Wh} = 40,5 \frac{g}{km}$$

Configurazione elettrica:

$$C_{energia\ WtT\ energia\ elettrica} = 299,3 \frac{Wh}{km} * 2,07 \frac{Wh}{Wh} = 619 \frac{Wh}{km}$$

$$Emissioni\ GHG_{WtT\ energia\ elettrica} = 299,3 \frac{Wh}{km} * 0,5076 \frac{g}{Wh} = 152 \frac{g}{km}$$

Configurazione ibrida:

$$C_{energia\ WtT\ energia\ elettrica} = 36,4 \frac{Wh}{km} * 2,07 \frac{Wh}{Wh} = 75 \frac{Wh}{km}$$

$$Emissioni\ GHG_{WtT\ energia\ elettrica} = 36,4 \frac{Wh}{km} * 0,5076 \frac{g}{Wh} = 18 \frac{g}{km}$$

$$C_{energia\ WtT\ idrogeno} = 461,4 \frac{Wh}{km} * 0,99 \frac{Wh}{Wh} = 457 \frac{Wh}{km}$$

$$Emissioni\ GHG_{WtT\ idrogeno} = 461,4 \frac{Wh}{km} * 0,4147 \frac{g}{Wh} = 191 \frac{g}{km}$$

$$C_{energia\ WtT\ TOTALE} = (75 + 457) \frac{Wh}{km} = 532 \frac{Wh}{km}$$

$$Emissioni\ GHG_{WtT\ energia\ elettrica} = (18 + 191) \frac{g}{km} = 209 \frac{g}{km}$$

Riportando i risultati all'interno di grafici, in modo da rendere il risultato più intuitivo, si ottengono i dati di figura 5.3 e 5.4:

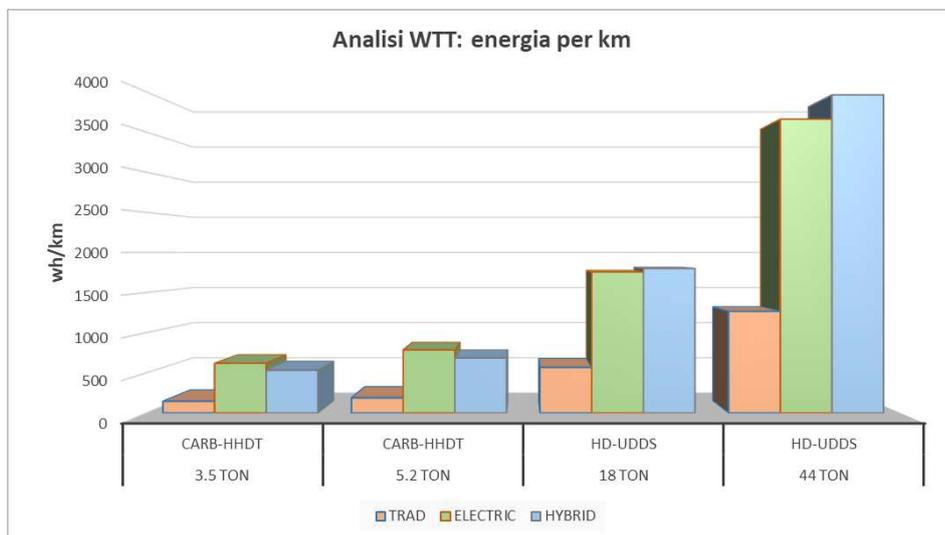


Figura 5.3 – Consumo energetico per unità di spazio percorso, in riferimento all'analisi Well to Tank

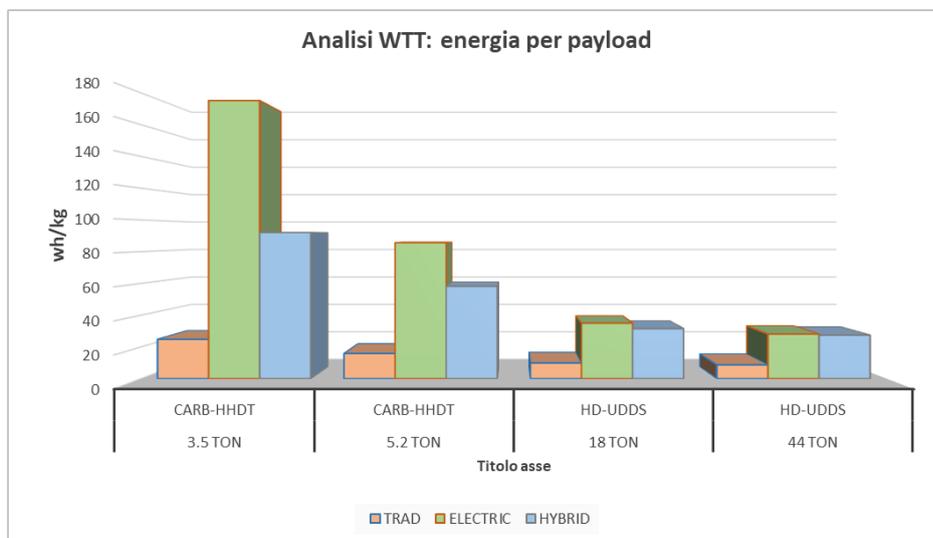


Figura 5.4 - Consumo energetico per unità di payload, in riferimento all'analisi Well to Tank

Un dato molto interessante è l'emissione di gas serra per la sola produzione dei vettori energetici, in quanto questa determina l'effettivo impatto ambientale per le soluzioni alternative come quelle elettrica ed ibrida, le quali nel contesto popolare sono considerate erroneamente "ad emissioni zero".

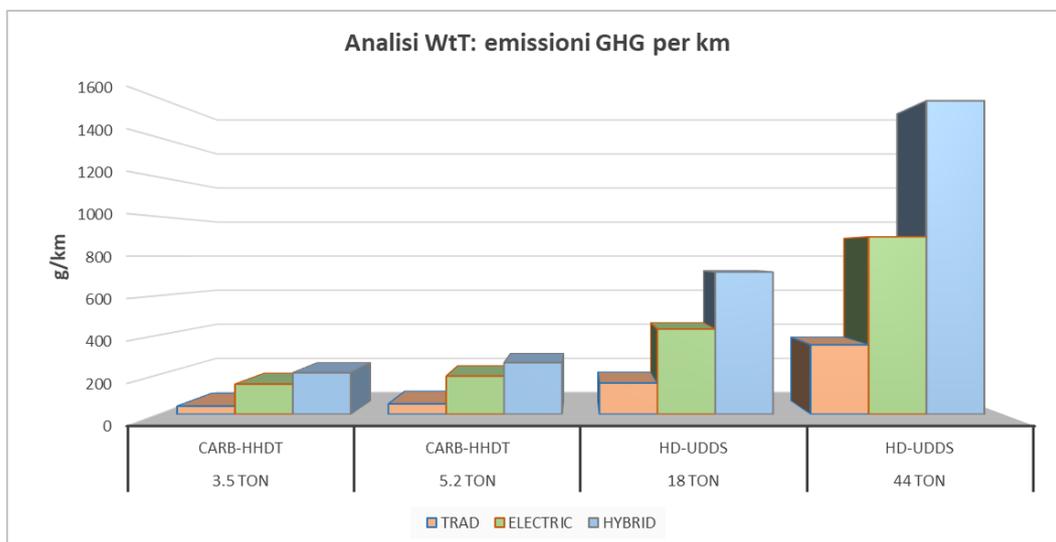


Figura 5.5 – Emissioni di gas serra per unità di spazio percorso, in riferimento all'analisi Well to Tank

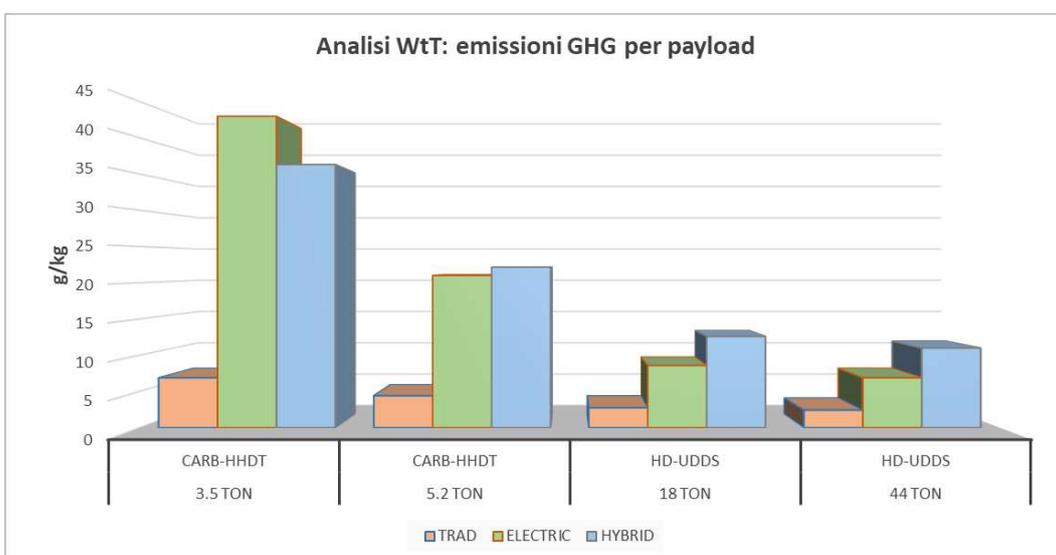


Figura 5.6 – Emissioni di gas serra per unità di payload, in riferimento all'analisi Well to Tank

Quel che si osserva, è che la produzione del gasolio risulta essere estremamente meno inquinante dal punto di vista dell'emissione di GHG rispetto all'energia elettrica ed all'idrogeno.

5.2 Analisi Tank to Wheel

L'analisi Tank to Wheel è indispensabile per completare quanto appena detto all'interno dello scenario che vede il veicolo compiere un certo tragitto e richiedere una quantità di energia data dalla somma tra quella richiesta per l'avanzamento e quella necessaria alla produzione del carburante, qualunque esso sia. Tank to Wheel indica il percorso dal serbatoio fino alle ruote, ovvero identifica il consumo energetico e le emissioni causate dall'avanzamento del veicolo durante il ciclo-guida.

5.2.1 Consumo energetico nell'analisi Tank to Wheel

Il calcolo dell'energia necessaria all'avanzamento è già stato completato nella *sezione 4* per i veicoli in versione elettrica ed ibrida. Infatti, mediante una serie di simulazioni con opportuni cicli-guida, oltre al dimensionamento dei sistemi di accumulo erano stati ricavati i valori di "Consumo di trasporto" mostrati in *tabella 5.9*.

Vehicle	cycle	range	payload	Consumption EL	Consumption H2	Consumption diesel	Consumo di trasporto	
		[km]	[kg]	[Wh/km]	[Wh/km]	[Wh/km]	[Wh/km*kg]	
3.5 ton	CARB-HHDT	250	1472	0.0	0.0	730.5	0.496	<i>traditional vehicle</i>
5.2 ton	CARB-HHDT	250	2968	0.0	0.0	942.3	0.317	
18 ton	HD-UDDS	250	14338	0.0	0.0	2841.6	0.198	
44 ton	HD-UDDS	250	36311	0.0	0.0	6333.4	0.174	
3.5 ton	CARB-HHDT	250	884	299.3	0.0	0.0	0.339	<i>battery electric vehicle</i>
5.2 ton	CARB-HHDT	250	2295	379.7	0.0	0.0	0.165	
18 ton	HD-UDDS	250	12565	848.7	0.0	0.0	0.068	
44 ton	HD-UDDS	250	32575	1768.0	0.0	0.0	0.054	
3.5 ton	CARB-HHDT	250	1445	36.4	461.4	0.0	0.345	<i>hybrid vehicle</i>
5.2 ton	CARB-HHDT	250	2943	72.1	540.6	0.0	0.208	
18 ton	HD-UDDS	250	14281	97.1	1615.1	0.0	0.120	
44 ton	HD-UDDS	250	36117	206.1	3571.6	0.0	0.105	

Tabella 5.9 – Consumi energetici e "consumo di trasporto" per i veicoli studiati nelle varie configurazioni

L'analisi Tank to Wheel richiede di prendere in considerazione l'intero consumo di energia da parte dei sistemi di accumulo, indipendentemente dal vettore energetico, infatti i consumi indicati in *tabella 5.9* sono dati da una somma dei consumi dei singoli vettori energetici. Per esempio, per il veicolo ibrido, vengono sommati i consumi di idrogeno e di energia elettrica e dividendo il risultato per i chilometri percorsi e per il payload, si ottiene il consumo di trasporto. Non è importante in questa fase differenziare i diversi vettori energetici, in quanto successivamente si integrerà questa analisi con la precedente Well to Tank, in modo da prendere in considerazione anche la produzione dei singoli vettori energetici.

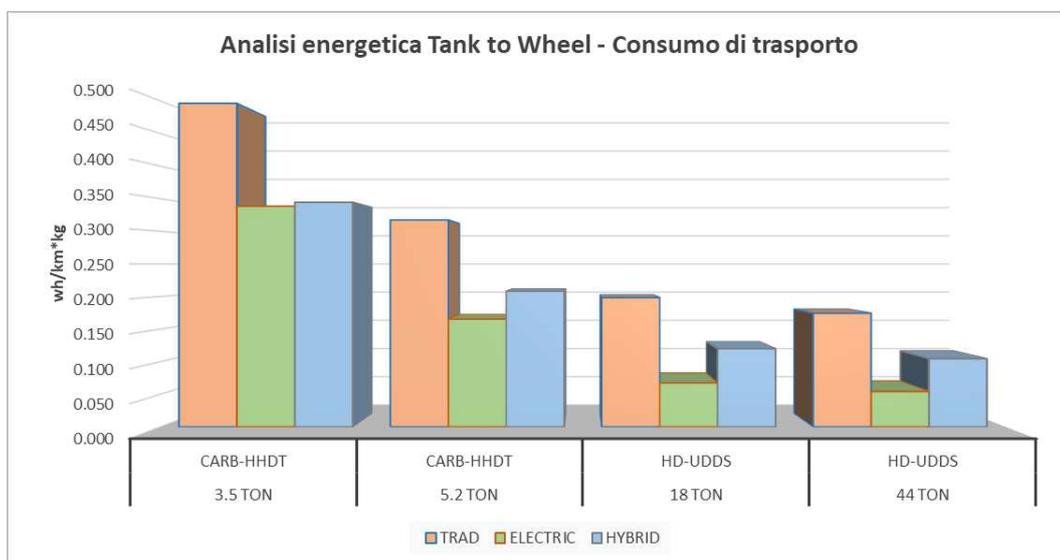


Figura 5.7 - Consumo di trasporto, in riferimento all'analisi Tank to Wheel

Figura 5.7 dimostra l'evidente svantaggio dei veicoli con propulsione tradizionale, ove i consumi energetici sono sempre nettamente superiori rispetto alle soluzioni elettrica ed ibrida. La soluzione elettrica è quella più vantaggiosa, anche se per il veicolo da 3,5 tonnellate il consumo energetico è praticamente identico al caso ibrido. La motivazione che rende meno efficiente il motore diesel è sostanzialmente il rendimento termodinamico del motopropulsore termico: ad esso infatti è stato assegnato un rendimento medio pari al 39%, contro il 55% del rendimento delle fuel cell ed al 96% per le batterie. Come già detto il

rendimento attribuito alle batterie probabilmente risulta sovrastimato e sarebbe interessante indagare in questa direzione, ma anche il rendimento del motore diesel difficilmente si mantiene attorno al 39%, quindi i dati analizzati sono comunque interessanti per un confronto. Inoltre, più il veicolo è pesante, più i consumi di trasporto decrescono, e ciò è spiegabile col fatto che si sta tenendo conto del payload, la cui incidenza sulla massa complessiva a terra è tanto maggiore quanto la taglia del veicolo cresce.

Il grafico in *figura 5.7*, genera una perplessità: contrariamente agli altri veicoli, per quello da 3,5 tonnellate, la configurazione elettrica non risulta più vantaggiosa rispetto a quella ibrida. Per spiegare questo fatto analizziamo separatamente l'andamento dei consumi energetici per unità di payload ed i consumi energetici chilometrici.

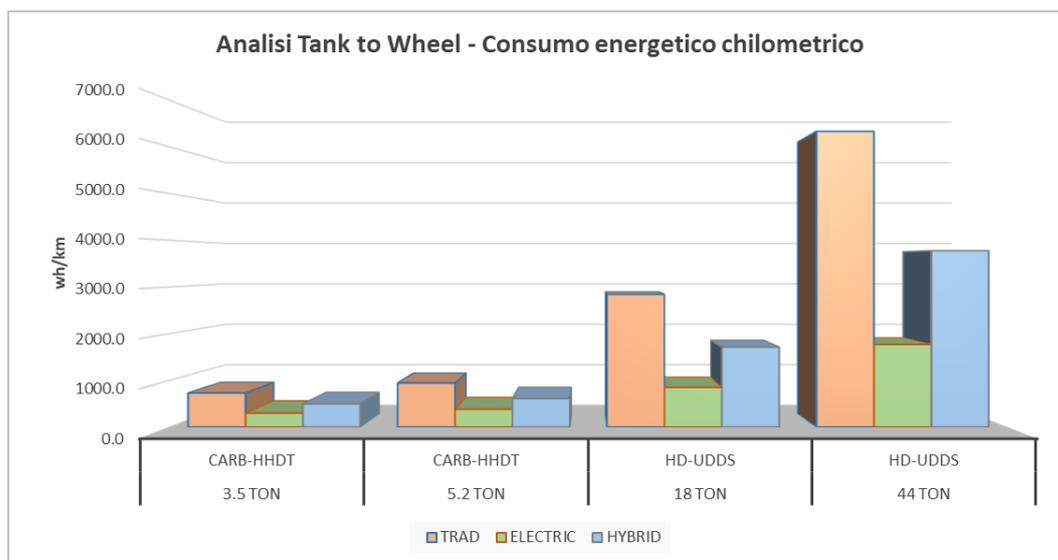


Figura 5.8 - Consumo energetico per unità di spazio percorso, in riferimento all'analisi Tank to Wheel

Il consumo chilometrico di *figura 5.8*, rispecchia quanto visto fino ad ora, ovvero la configurazione elettrica risulta la più vantaggiosa, seguita da quella ibrida e per ultima quella tradizionale. In questo caso l'unico fatto ad influenzare l'analisi è il rendimento della drive-line ed infatti non sono presenti anomalie tra i risultati. Inoltre, aumentando il peso complessivo

del veicolo, aumentano anche i consumi, in quanto è ovvio che per percorrere una data distanza, più è elevata la massa del veicolo e maggiore sarà il suo consumo energetico.

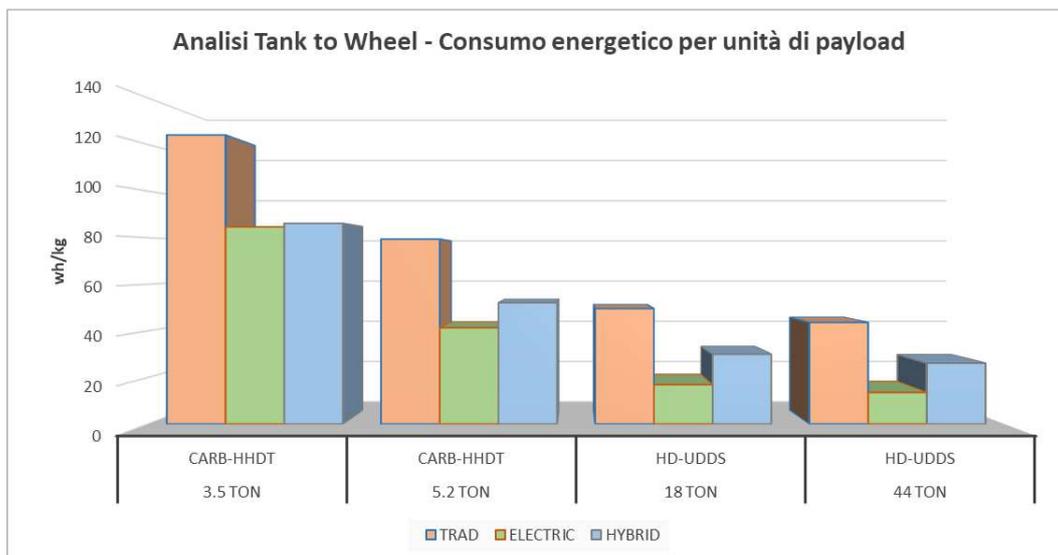


Figura 5.9 - Consumo energetico per unità di payload, in riferimento all'analisi Tank to Wheel

Nel caso invece di consumo per unità di payload mostrato in *figura 5.9*, si manifesta nuovamente l'anomalia per cui il consumo da parte del veicolo elettrico subisce un peggioramento nel caso di tonnellaggio pari a 3,5. Per spiegare questo fenomeno è sufficiente osservare i valori di payload che caratterizzano ogni veicolo a propulsione elettrica e dividerli per il payload del veicolo corrispondente in versione tradizionale. Per il veicolo da 3,5 tonnellate, la versione elettrica garantisce un payload pari solamente al 60% di quello garantito dalla versione tradizionale, nel caso invece di veicoli più pesanti, la percentuale diventa pari al 77% per il veicolo da 5,2 tonnellate, 88% per quello da 18 tonnellate e 90% per quello da 44, così come indicato in *tabella 5.10*. Per quanto riguarda invece il veicolo in versione ibrida, il payload garantito è sempre confrontabile con quello della versione tradizionale.

Vehicle	cycle	range	payload	Consumo chilometrico	Consumo per Payload	Percentuale di payload rispetto alla versione tradizionale	
		[km]	[kg]	[Wh/km]	[Wh/kg]		
3.5 ton	CARB-HHDT	250	1472	730.5	124.1	100%	traditional vehicle
5.2 ton	CARB-HHDT	250	2968	942.3	79.4	100%	
18 ton	HD-UDDS	250	14338	2841.6	49.5	100%	
44 ton	HD-UDDS	250	36311	6333.4	43.6	100%	
3.5 ton	CARB-HHDT	250	884	299.3	84.6	60%	battery electric vehicle
5.2 ton	CARB-HHDT	250	2295	379.7	41.4	77%	
18 ton	HD-UDDS	250	12565	848.7	16.9	88%	
44 ton	HD-UDDS	250	32575	1768.0	13.6	90%	
3.5 ton	CARB-HHDT	250	1445	497.9	86.1	98%	hybrid vehicle
5.2 ton	CARB-HHDT	250	2943	612.7	52.0	99%	
18 ton	HD-UDDS	250	14281	1712.2	30.0	100%	
44 ton	HD-UDDS	250	36117	3777.6	26.1	99%	

Tabella 5.10 – Confronto del payload tra le varie configurazioni di drivetrain

5.2.2 Emissione di GHG nell'analisi Tank to Wheel

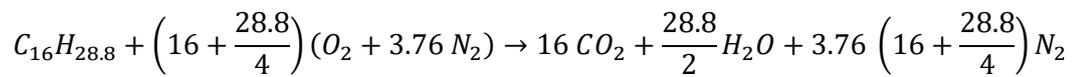
A differenza del consumo energetico, le emissioni di gas serra dipendono dal vettore energetico adottato, in quanto a seconda del processo coinvolto, vengono prodotte sostanze allo stato gassoso che possono contribuire al surriscaldamento del pianeta per effetto serra. Secondo il protocollo di Kyoto [9] stilato dalle nazioni unite, i gas serra, denominati anche Greenhouse Gases sono i seguenti:

- Biossido di carbonio o Anidride carbonica CO₂
- Metano CH₄
- Ossido di azoto N₂O
- Composti Idro-fluoro-carburi HFC_s
- Composti Perfluorinati PFC
- Esafluoruro di Zolfo SF₆

Come già anticipato, l'effetto serra di questi gas viene moltiplicato per un fattore (unitario per il biossido di carbonio) che consente di equipararli all'Anidride carbonica, parlando appunto di CO₂ equivalente.

I veicoli in configurazione elettrica ed ibrida non causano emissioni di GHG durante il loro funzionamento, in quanto dal tubo di scappamento non fuoriesce nulla per la configurazione elettrica e fuoriesce solamente vapore acqueo nel caso di versione ibrida. Naturalmente, questo è valido limitatamente all'analisi Tank to Wheel, perché come già visto, durante la produzione dei vettori energetici, anche l'energia elettrica e l'idrogeno risentono dell'emissione di gas serra.

Per quanto riguarda invece il funzionamento di un veicolo dotato di motore a combustione interna, la reazione chimica che avviene a seguito della combustione, genera la formazione di anidride carbonica, in quantità proporzionali al combustibile bruciato. Considerando la molecola media di gasolio definita come $C_{16}H_{28.8}$, la reazione chimica che ne caratterizza il processo di combustione è la seguente:



Nella parte di sinistra i reagenti, oltre al combustibile diesel, sono azoto ed ossigeno allo stato atmosferico, mentre nella parte di destra, la quantità di anidride carbonica prodotta è in quantità stechiometrica rispetto alla quantità di combustibile diesel bruciato.

La massa di una mole di carburante consumato durante la combustione è pari alla seguente:

$$m_{fuel} = 16 M_{molare,carbonio} + 28.8 M_{molare,idrogeno} = 220.8 \frac{g}{mol}$$

Invece, la massa di una mole di anidride carbonica consumata è pari a:

$$m_{CO_2} = 16 * (M_{molare,carbonio} + 2 M_{molare,ossigeno}) = 704 \frac{g}{mol}$$

A questo punto si può facilmente calcolare il rapporto stechiometrico tra la massa di anidride carbonica emessa e la massa di carburante consumato:

$$\frac{m_{CO_2}}{m_{fuel}} = \frac{16 M_{molare,carbonio} + 28.8 M_{molare,idrogeno}}{16 * (M_{molare,carbonio} + 2 M_{molare,ossigeno})} \rightarrow m_{CO_2} = 3.188 m_{fuel}$$

Considerando la massa volumica del carburante diesel pari a 0,85 kg/litro, si può calcolare un valore di emissione di GHG pari a:

$$m_{CO_2} = 3.188 \frac{kg_{CO_2}}{kg_{fuel}} * 0.85 \frac{kg_{fuel}}{Litro_{fuel}} = 2.71 \frac{kg}{Litro_{fuel}}$$

Quindi, per ogni litro di carburante bruciato, si emettono in atmosfera 2,71 kg di GHG. Nelle simulazioni, oltre all'energia richiesta dal carburante, viene fornita anche la massa del carburante stesso ed il suo volume in litri, i quali vengono calcolati attraverso il potere calorifico inferiore del gasolio, che è pari a 49,1 MJ/kg. In *tabella 5.11* sono riassunte le emissioni di gas serra durante il funzionamento dei veicoli.

Vehicle	cycle	range	payload	Consumption diesel	Consumo di trasporto	Consumption diesel [kg/km]	GHG emission	
		[km]	[kg]	[Wh/km]	[Wh/km*kg]	[kg/km]	[gGHG/km]	
3.5 ton	CARB-HHDT	250	1472	730.5	0.496	0.0536	170.7	traditional vehicle
5.2 ton	CARB-HHDT	250	2968	942.3	0.317	0.0691	220.2	
18 ton	HD-UDDS	250	14338	2841.6	0.198	0.2083	664.2	
44 ton	HD-UDDS	250	36311	6333.4	0.174	0.4643	1480.3	
3.5 ton	CARB-HHDT	250	884	0.0	0.339	0.0	0.0	battery electric vehicle
5.2 ton	CARB-HHDT	250	2295	0.0	0.165	0.0	0.0	
18 ton	HD-UDDS	250	12565	0.0	0.068	0.0	0.0	
44 ton	HD-UDDS	250	32575	0.0	0.054	0.0	0.0	
3.5 ton	CARB-HHDT	250	1445	0.0	0.345	0.0	0.0	hybrid vehicle
5.2 ton	CARB-HHDT	250	2943	0.0	0.208	0.0	0.0	
18 ton	HD-UDDS	250	14281	0.0	0.120	0.0	0.0	
44 ton	HD-UDDS	250	36117	0.0	0.105	0.0	0.0	

Tabella 5.11 – Riassunto delle emissioni di gas serra in riferimento all'analisi Tank to Wheel

Le emissioni di anidride carbonica equivalente aumentano all'aumentare della taglia del veicolo, in quanto un aumento della massa complessiva genera un aumento dei consumi e quindi anche un aumento delle emissioni, essendo queste ultime in rapporto stechiometrico con la quantità di carburante consumata.

I veicoli equipaggiati con drivetrain alternativa, sia essa elettrica oppure ibrida, godono del vantaggio di non emettere gas serra dal tubo di scappamento, eliminando le possibilità di inquinamento da GHG nelle sole aree di utilizzo del veicolo. Questo è illustrato in modo chiaro in *figura 5.10*.

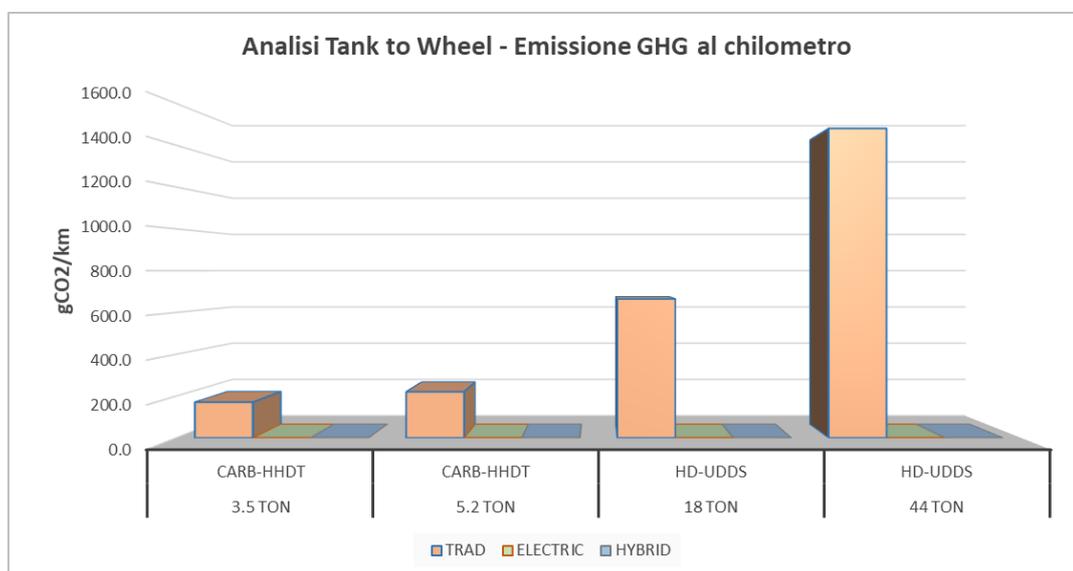


Figura 5.10 – Emissioni di gas serra per unità di spazio percorso in riferimento all’analisi Tank to Wheel

5.3 Risultati analisi Well to Wheel

Una volta analizzati separatamente i cicli di produzione dei vettori energetici (Analisi Well to Tank) ed il loro utilizzo (Analisi Tank to Wheel), è fondamentale analizzarne l’intero ciclo di produzione e consumo, in modo da associare alla propulsione veicolare il consumo energetico e le emissioni di GHG complessive. Se è vero che per l’automobilista o l’autotrasportatore il consumo energetico per muovere il veicolo è dato dall’energia fornita dal carburante consumato, è altrettanto vero che per produrlo è stata consumata energia. Lo stesso avviene per le emissioni, le quali non sono solamente quelle causate dalla combustione, ma anche quelle avvenute precedentemente per la produzione del carburante.

L'analisi Well to Wheel svolta in questa tesi predilige l'osservazione dei seguenti parametri:

- Energia totale consumata
- Energia totale fornita da fonti fossili
- Emissioni totali di GHG

5.3.1 Energia totale consumata

I dimensionamenti dei drivetrain elettrico ed ibrido descritti alla *sezione 4*, erano finalizzati alla riduzione del consumo energetico durante la propulsione vera e propria, ovvero durante l'analisi Tank to Wheel. Infatti, la riduzione di energia spesa è un obiettivo importante che consente di abbassare i costi, i quali sono sempre legati al rapporto tra domanda ed offerta del mercato. Da questo punto di vista però, è difficile fare un confronto tra i diversi vettori energetici, in quanto esistono questioni economiche e politiche molto complesse.

Per l'analisi Well to Wheel, il consumo totale di energia, rappresenta un indice di inefficacia dell'apparato propulsivo. Per dimostrare questo, definiamo in modo semplice l'efficienza del veicolo come rapporto tra l'energia sfruttata dalle ruote per seguire il profilo di velocità imposto e l'energia contenuta nel carburante consumato:

$$\eta_{veicolo} = \frac{E_{ruote}}{E_{carburante}}$$

Si può inoltre definire l'efficienza del processo di produzione del carburante, che è pari al rapporto tra l'energia contenuta nel prodotto finale e quella consumata per la produzione:

$$\eta_{produzione} = \frac{E_{carburante}}{E_{per\ la\ produzione}}$$

Ricavando dalla seconda l'energia contenuta nel carburante, si ottiene:

$$E_{\text{carburante}} = \eta_{\text{produzione}} * E_{\text{per la produzione}} \rightarrow \eta_{\text{veicolo}} = \frac{E_{\text{ruote}}}{\eta_{\text{produzione}} * E_{\text{per la produzione}}}$$

Quindi, per ricavare il rendimento complessivo, che tenga conto sia della produzione industriale del carburante, sia del consumo per l'uso veicolare, si ottiene:

$$\eta_{\text{TOTALE}} = \eta_{\text{veicolo}} \eta_{\text{produzione}} = \frac{E_{\text{ruote}}}{E_{\text{per la produzione}}}$$

L'energia sfruttata dalle ruote non cambia al variare della configurazione propulsiva adottata (tradizionale, elettrica oppure ibrida), in quanto dipende esclusivamente dal profilo di velocità imposto, ovvero dal ciclo-guida. Quindi, il numeratore della frazione si può considerare fisso, mentre il denominatore rappresenta l'unico parametro variabile. Un incremento dell'energia utilizzata per la produzione, causa una diminuzione del rendimento complessivo dei processi, mentre una sua diminuzione, ne genera un aumento. Il quantitativo di energia consumata in fase di produzione dell'energia, rappresenta quindi la inefficacia dell'intera analisi Well to Wheel, comprendendo al suo interno sia il rendimento del veicolo, sia quello della sola produzione del carburante.

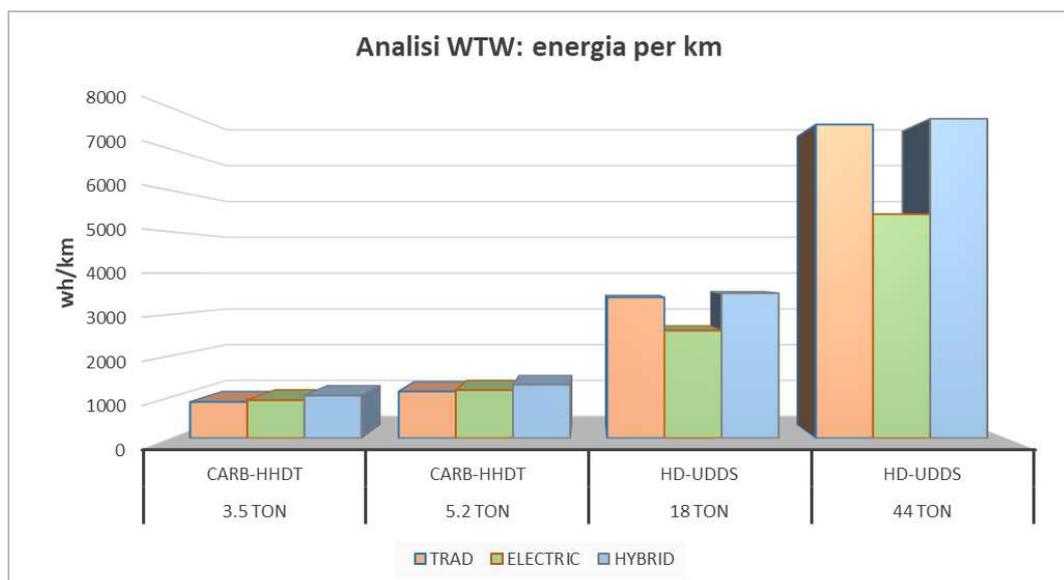


Figura 5.11 – Consumo energetico per unità di spazio percorso in riferimento all'analisi Well to Wheel

Analizzando i consumi energetici per chilometro di percorrenza riportati in *figura 5.11*, si osserva che nel caso di veicoli da 3.5 e 5.2 tonnellate, le tre tipologie di propulsione si equivalgono, mentre per i veicoli più pesanti da 18 e 44 tonnellate, la soluzione elettrica si classifica come la più vantaggiosa, riducendo i consumi chilometrici di circa il 25% rispetto alle soluzioni tradizionale ed ibrida. Questa differenza è spiegabile analizzando l'energia recuperata in frenata dai veicoli. Innanzitutto si consideri che i veicoli più leggeri sono sottoposti al ciclo-guida CARB-HHDDT, mentre quelli più pesanti al ciclo HD-UDDS, quindi variando i profili di velocità varia anche il recupero di energia in fase di frenata, infatti da questo punto di vista, il ciclo per i veicoli più pesanti consente di recuperare molta più energia. Questo però dipende anche dal dimensionamento delle componenti ed in particolare dal dimensionamento della batteria: infatti il recupero in frenata è possibile fino a un valore di potenza inferiore o al limite pari alla potenza nominale della batteria. I veicoli in configurazione elettrica, come precedentemente analizzato, sono costituiti da batterie molto potenti, mentre i veicoli in configurazione ibrida, essendo alimentati anche da celle a combustibile, sono dotati di batterie più piccole ed in grado di assorbire potenze inferiori. Infatti, successivamente ad accurate analisi, si è ottenuto che il ciclo-guida HD-UDDS consente di recuperare il 90% di energia rispetto al ciclo-guida CARB-HHDDT quando il veicolo è in configurazione elettrica e solamente il 30% in più quando è in configurazione ibrida. Questo spiega come mai, per tonnellaggi elevati, i veicoli industriali risultano consumare molta meno energia in configurazione elettrica.

Studiando veicoli pesanti per il trasporto industriale di merce, risulta più rappresentativo studiare il consumo energetico per unità di carico utile (*payload*). *Figura 5.12*, mostra i risultati di questo tipo di analisi.

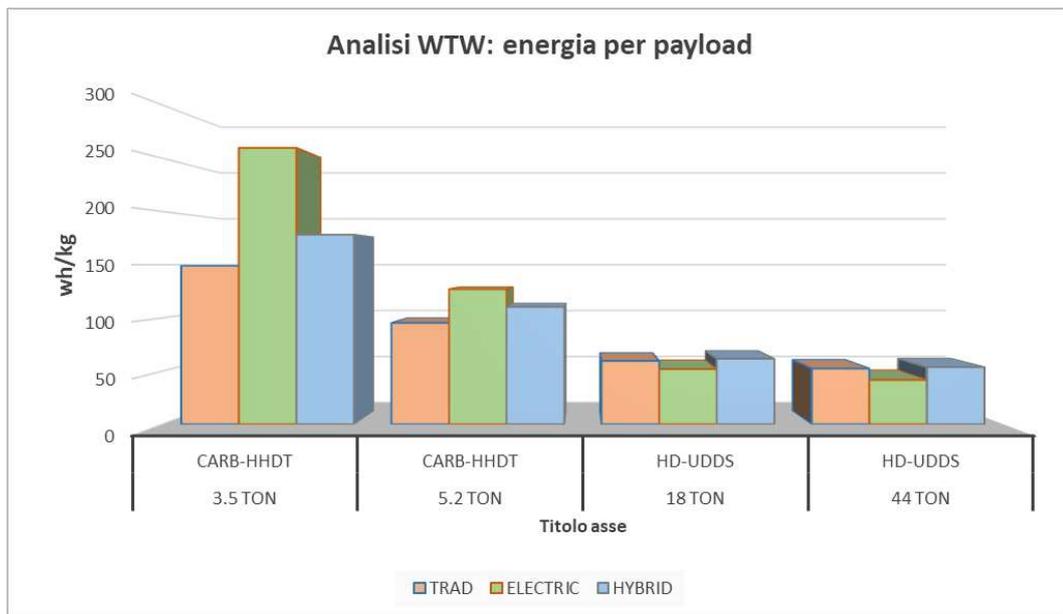


Figura 5.12 – Consumo energetico per unità di payload in riferimento all'analisi Well to Wheel

Rispetto a *figura 5.11*, che mostra il consumo chilometrico, l'unico parametro aggiuntivo da tenere in considerazione per *figura 5.12* è il carico utile del veicolo. Questo, come testimonia *tabella 5.10*, risulta circa equivalente per le configurazioni tradizionale ed ibrida e risulta nettamente a sfavore della configurazione elettrica che risente delle dimensioni della batteria. Essendo equivalente il carico utile per le configurazioni tradizionale ed ibrida, il rapporto tra i consumi di codeste configurazioni risulta costante passando dalla valutazione per unità di percorso (*figura 5.11*) alla valutazione per unità di payload (*figura 5.12*).

Per quanto riguarda invece la configurazione elettrica, *tabella 5.10* mette in evidenza una forte carenza di carico utile, comportando un peggioramento dei consumi se essi vengono valutati in funzione del payload.

In conclusione si osserva da *figura 5.12* che per i veicoli più leggeri, essendo minore il recupero dell'energia in frenata, la configurazione elettrica risulta la più dispendiosa, mentre quella tradizionale la più efficiente. Nel caso invece di veicoli più pesanti, tutte le tre soluzioni consentono di ottenere efficienze simili, ma quella elettrica risulta la più favorevole. In *tabella 5.13* sono riassunti i risultati di questo tipo di analisi.

WTW al km					WTW per payload				
Diesel	EL EU mix	H2 EU mix	EL EU mix	tot	Diesel	EL EU mix	H2 EU mix	EL EU mix	tot
[Wh/km]	[Wh/km]	[Wh/km]	[Wh/km]	[Wh/km]	[Wh/kg]	[Wh/kg]	[Wh/kg]	[Wh/km]	[Wh/km]
877	919	918	112	1030	149	260	159	19	178
1131	1166	1076	221	1297	95	127	91	19	110
3410	2605	3214	298	3512	59	52	56	5	61
7600	5428	7107	633	7740	52	42	49	4	54

Tabella 5.12 – Riassunto consumi energetici per unità di spazio percorso e per unità di payload in riferimento all'analisi Well to Wheel

5.3.2 Consumo di fonti fossili

Uno dei temi più discussi dell'ultimo decennio a riguardo dell'importanza delle energie alternative, è l'esaurimento delle scorte petrolifere ed in generale delle scorte di fonti fossili. Per valutare il consumo di fonti fossili da parte delle tecnologie di propulsione, è necessario considerare il contributo di tali fonti per la produzione di energia utilizzata nei processi di produzione del carburante. Per capire meglio questo aspetto, si può immaginare di voler produrre una certa quantità di vettore energetico e tutti i processi necessari alla sua produzione, trasformazione e distribuzione richiedono una certa quantità di energia. Tale energia viene prodotta in parte da fonti rinnovabili, per esempio con impianti fotovoltaici o

impianti eolici, in parte da energia nucleare ed in parte da fonti fossili, per esempio mediante impianti termo-elettrici.

Il consumo di energia da fonti fossili, inoltre, può derivare direttamente anche dalla propulsione vera e propria:

- I sistemi di propulsione tradizionali che sfruttano carburante diesel, consumano solamente energia proveniente da fonti fossili. Infatti l'intero quantitativo di diesel, rappresenta una fonte fossile ed il suo consumo ne genera un importante contributo. Questo è da sommarsi a quello derivante dalla produzione del gasolio.
- L'energia elettrica e l'idrogeno invece, non rappresentano fonte fossile, dunque i sistemi alternativi equipaggiati con batterie e fuel cell non danno contributo all'esaurimento delle scorte di fonti fossili durante la fase Tank to Wheel. L'unico contributo sarà quindi dato dalla produzione dei vettori energetici, ovvero dalla fase Well to Tank.

In sostanza, per la configurazione tradizionale si avrà un contributo dall'analisi Well to Tank ed un contributo dall'analisi Tank to Wheel, mentre per le configurazioni alternative sarà presente solamente il primo dei due.

I grafici mostrati in *figura 5.13* e *figura 5.14*, indicano sia per il consumo chilometrico, sia per il consumo per unità di payload, che le architetture del drivetrain basate sulle tecnologie alternative, consentono una riduzione del consumo di fonti fossili rispetto alle tecnologie tradizionali. La tecnologia elettrica risulta essere la più vantaggiosa, nonostante essa richieda una riduzione del carico utile. La tecnologia ibrida invece, si posiziona seconda, e consente comunque di ottenere un rilevante vantaggio rispetto a quella tradizionale.

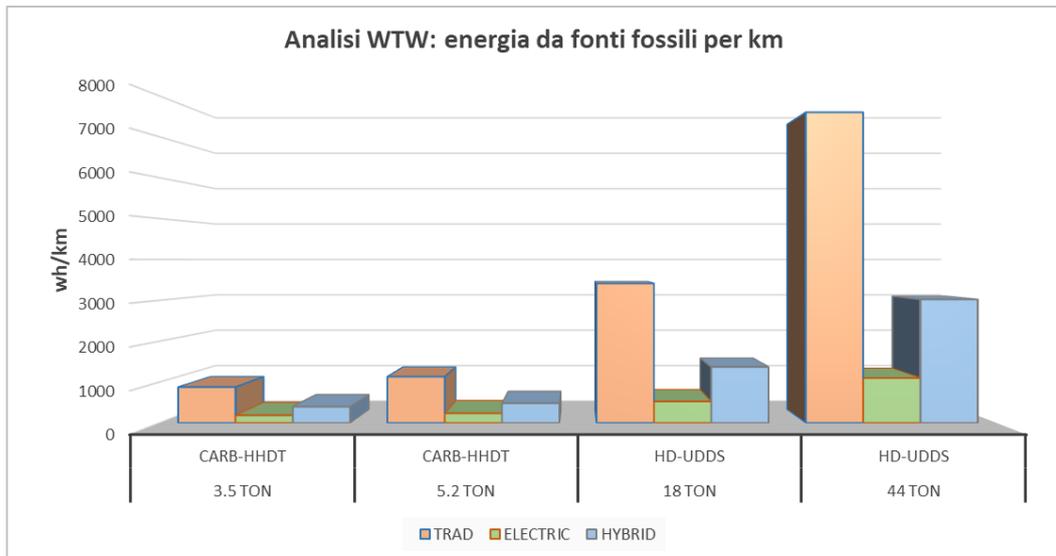


Figura 5.13 – Consumo di energia derivante da fonti fossili per unità di spazio percorso in relazione all'analisi Well to Wheel

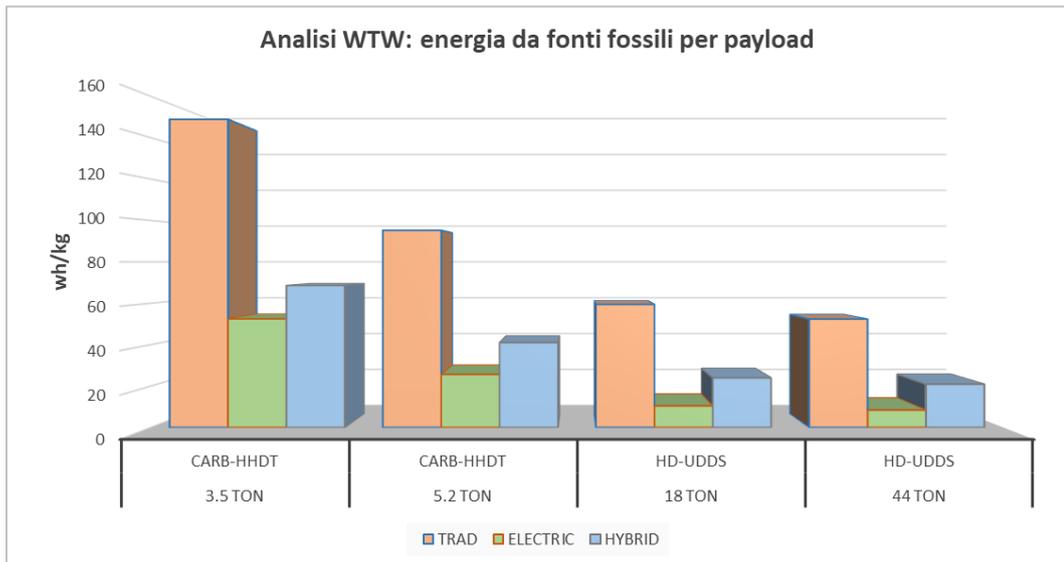


Figura 5.14 - Consumo di energia derivante da fonti fossili per unità di payload in relazione all'analisi Well to Wheel

I risultati numerici di questa analisi, sono riportati in *tabella 5.14*.

WTW Wh fossil al km					WTW Wh fossil per payload				
Diesel	EL EU mix	H2 EU mix	EL EU mix	tot	Diesel	EL EU mix	H2 EU mix	EL EU mix	tot
[Wh/km]	[Wh/km]	[Wh/km]	[Wh/km]	[Wh/km]	[Wh/km]	[Wh/km]	[Wh/km]	[Wh/km]	[Wh/km]
877	186	374	23	396	149	52	65	4	69
1131	235	438	45	483	95	26	37	4	41
3410	526	1308	60	1368	59	10	23	1	24
7600	1096	2893	128	3021	52	8	20	1	21

Tabella 5.13 – Riassunto dei consumi di energia derivante da fonti fossili in relazione all'analisi Well to Wheel

5.3.3 Emissioni di GHG

Come più volte sottolineato, le emissioni di GHG sono la principale causa del riscaldamento globale, e da decenni hanno assunto un ruolo di discussione per le politiche ambientali. L'emissione può avvenire durante entrambe le fasi dell'analisi Well to Wheel, ma a seconda di quando avviene, si determinano due tipologie di inquinamento:

- Analisi Well to Tank = l'emissione di gas serra durante questa fase comporta una produzione di inquinamento da gas serra globale, ovvero non localizzato a dove avviene la propulsione veicolare.
- Analisi Tank to Wheel = in questo caso l'emissione comporta inquinamento localizzato nelle aree dove avviene la propulsione veicolare.

Nel caso di drivetrain tradizionale, l'emissione di GHG avviene in entrambe le due fasi, mentre nel caso di drivetrain alternative, l'emissione di GHG avviene soltanto nella fase di produzione dei vettori energetici, vale a dire nella fase Well to Tank.

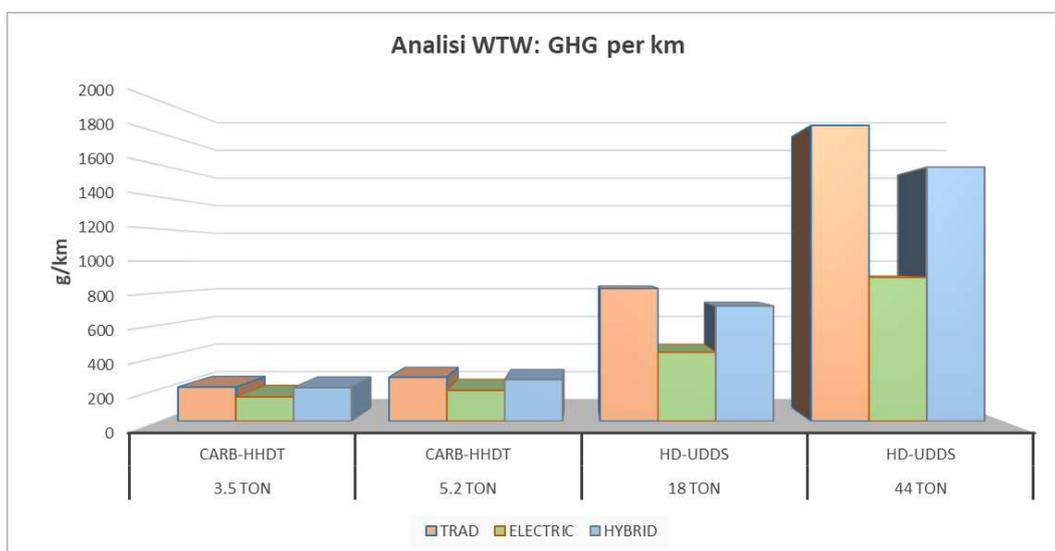


Figura 5.15 – Emissioni di gas serra per unità di spazio percorso in relazione all'analisi Well to Wheel

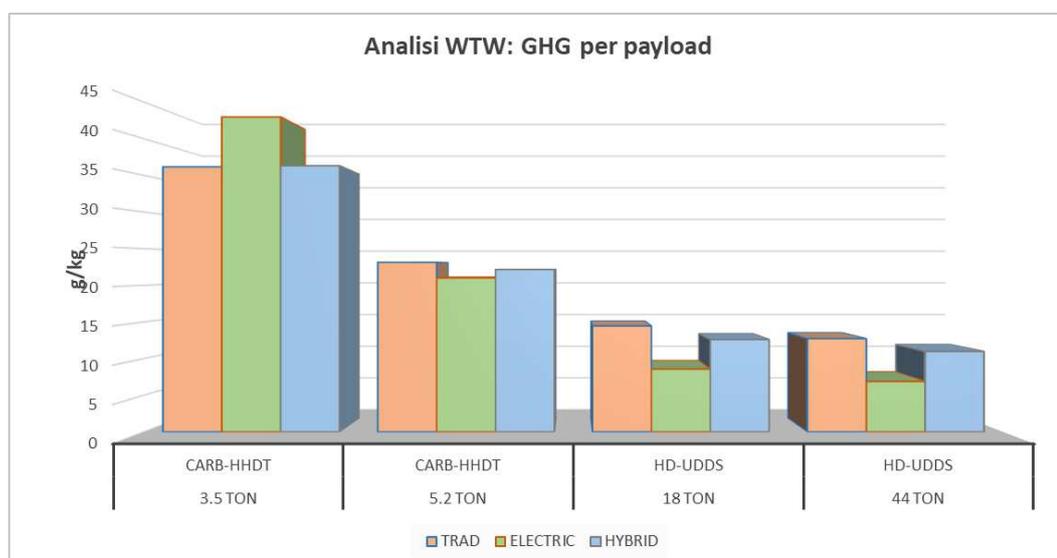


Figura 5.16 – Emissioni di gas serra per unità di payload in relazione all’analisi Well to Wheel

Osservando figura 5.15 e figura 5.16, si può intuire che, nel caso di veicoli da 5,2, 18 e 44 tonnellate, la soluzione elettrica risulta la più generosa nei confronti dell’ambiente, sia per quanto riguarda l’emissione chilometrica, sia per quanto riguarda l’emissione per unità di carico utile. Passando dal veicolo più pesante a quello da 5,2 tonnellate, si può notare un graduale decremento del vantaggio ambientale della soluzione elettrica e ciò è dato dal più volte citato minor carico utile trasportabile. Il veicolo più leggero da 3,5 tonnellate in configurazione elettrica, avevamo visto essere caratterizzato da una diminuzione eccessiva del payload e ciò ne comporta un aumento delle emissioni di GHG in rapporto al carico utile.

Per i veicoli da 18 e 44 tonnellate inoltre, la soluzione ibrida si pone in leggero vantaggio rispetto a quella tradizionale, la quale rimane la più inquinante. Nel caso di veicoli da 3,5 e 5,2 tonnellate invece, le soluzioni tradizionale ed ibrida risultano circa equivalenti.

Tabella 5.15, contiene tutti i valori numerici dell’analisi sulle emissioni di GHG e può essere utilizzata come spunto per considerazioni più approfondite riguardanti il risparmio in termini ambientali di una soluzione piuttosto che un’altra.

WtW - GHG per km					WtW - GHG per payload				
<i>Diesel</i>	<i>EL EU mix</i>	<i>H2 EU mix</i>	<i>EL EU mix</i>	<i>tot</i>	<i>Diesel</i>	<i>EL EU mix</i>	<i>H2 EU mix</i>	<i>EL EU mix</i>	<i>tot</i>
				[g/km]					[g/kg]
213	152	191	18	210	36	43	33	3	36
275	193	224	37	261	23	21	19	3	22
828	431	670	49	719	14	9	12	1	13
1847	897	1481	105	1586	13	7	10	1	11

Tabella 5.14 – Riassunto delle emissioni di gas serra in relazione all'analisi Well to Wheel

Si può dunque concludere che:

- Le soluzioni elettrica ed ibrida, consentono di azzerare le emissioni localizzate, grazie all'annullamento dell'emissione di gas serra durante la propulsione.
- La soluzione elettrica consente di ridurre l'inquinamento globalizzato nel caso in cui il carico utile trasportabile non venga ridotto in maniera eccessiva.
- La soluzione ibrida consente una riduzione delle emissioni piuttosto marginale rispetto alla configurazione tradizionale.

6. Conclusioni

I dimensionamenti dei sistemi di accumulo e le analisi energetiche descritte nelle sezioni precedenti, consentono di avere una più chiara idea degli effetti che un'evoluzione verso una mobilità alternativa genererebbe sulle richieste energetiche, sull'esaurimento di fonti fossili e sulle emissioni di gas serra. Innanzitutto è di fondamentale importanza considerare la diversità tra veicoli commerciali leggeri e pesanti, i quali sono condizionati da capacità di carico e cicli-guida profondamente differenti. Come precedentemente descritto, i veicoli commerciali più leggeri, assimilabili ai comuni furgoni da lavoro, sono caratterizzati da capacità di carico molto ridotte rispetto al peso totale a terra del veicolo, quindi lo studio di tecnologie alternative deve tenere conto di questa limitazione, senza ridurre in maniera eccessiva il payload. L'installazione delle batterie a bordo dei veicoli con drivetrain alternativi, consente di recuperare energia in fase di frenata, migliorando l'efficienza energetica della propulsione, ma anche in questo caso i veicoli più leggeri risultano i meno efficienti. I veicoli commerciali più pesanti infatti, sono caratterizzati da un utilizzo che consente di recuperare quantità di energia molto superiori, stabilendo un reale vantaggio per le tecnologie alternative. Le capacità di carico contenute, parallelamente alle scarse capacità di recupero di energia in frenata, condizionano in modo evidente la possibilità di trarre vantaggio da una conversione degli apparati propulsivi a bordo di veicoli commerciali leggeri.

Da un punto di vista del consumo energetico, l'analisi Well to Wheel precedente, non indica un reale vantaggio nell'utilizzo di tecnologie alternative, anzi, i veicoli leggeri sono condizionati da consumi superiori in configurazione elettrica piuttosto che in configurazione tradizionale. L'evoluzione verso una tecnologia ibrida elettrica-idrogeno, consente invece di eguagliare quasi sempre i consumi energetici della tecnologia tradizionale.

È però necessario considerare altri aspetti legati al consumo di fonti fossili ed all'emissione di gas serra durante l'intero processo di produzione e consumo del vettore energetico.

Come era facile intuire, la sezione 5.3.2 ha decretato molto conveniente un passaggio alle tecnologie alternative da un punto di vista del consumo di fonti fossili. Per tutti i veicoli infatti, la propulsione elettrica consente un risparmio di energia ottenuta da fonti fossili pari al 85% rispetto alla soluzione tradizionale. La soluzione ibrida si piazza invece ad un livello intermedio, consentendo comunque un risparmio del 60%. Una conversione verso le tecnologie alternative, consentirebbe, sotto questo punto di vista, di ritardare l'esaurimento di scorte fossili, guadagnando tempo per lo sviluppo di impianti rinnovabili per l'energia elettrica e per migliorare l'efficienza dei processi per la produzione di idrogeno da energia elettrica, in modo da rivalutare la produzione tramite elettrolisi.

L'aspetto probabilmente più importante per determinare la convenienza di un passaggio alle tecnologie alternative per la mobilità sostenibile, sono le emissioni di gas serra e di gas nocivi alla salute. Questi ultimi sono completamente assenti nel caso di propulsione elettrica o ad idrogeno ed in tal senso, le configurazioni alternative consentirebbero un totale abbattimento dell'inquinamento localizzato da parte del settore dei trasporti. Le emissioni di gas serra richiedono invece l'analisi Well to Wheel affrontata nella sezione 5.3, stabilendo la rilevanza dell'apparato produttivo dei vettori energetici in esame. Le soluzioni alternative, da questo punto di vista, non presentano un miglioramento evidente rispetto a quelle tradizionali, soprattutto nel caso di veicoli leggeri. Questi ultimi infatti, se configurati con propulsore elettrico rischiano persino di emettere un quantitativo di anidride carbonica equivalente superiore per il 20 % rispetto alla soluzione tradizionale, mentre quella idrogeno si mantiene agli stessi livelli della tecnologia odierna. Le soluzioni alternative si dimostrano invece

convenienti per veicoli caratterizzati da massa equivalente a terra superiore, consentendo una riduzione delle emissioni di GHG fino al 15 % per la soluzione ibrida e fino al 35 % per quella elettrica.

Si può dunque concludere che una conversione del parco veicoli commerciali verso tecnologie alternative, rappresenta un passo verso una mobilità sostenibile, ma richiede ad oggi un intervento migliorativo dei processi di produzione dei vettori energetici. Nel breve-medio periodo infatti, le soluzioni elettrica ed ibrida consentono di eliminare l'inquinamento locale provocato dalla propulsione veicolare e di ritardare significativamente l'esaurimento delle fonti fossili, senza abbattere in maniera evidente le emissioni di GHG. Nel lungo periodo invece, se accompagnate da sviluppo tecnologico degli impianti di produzione e da un utilizzo sempre maggiore delle fonti rinnovabili, la conversione presentata in questa tesi si potrebbe rilevare un'ottima soluzione, rendendo la propulsione indipendente dai combustibili fossili e dalle problematiche ad essi connesse.

Bibliografia

- [1] U.S. Energy Information and Administration, "International Energy Outlook 2016", maggio 2016
- [2] ACI ANFIA – Associazione Nazionale Filiera Industria Automobilistica, statistiche dicembre 2015
- [3] British Petroleum, "Statistical Review of World Energy", giugno 2017
- [4] Intergovernmental Panel on Climate Change, "Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability"
- [5] IEA - International Energy Agency, "Global EV Outlook Understanding the Electric Vehicle Landscape to 2020", aprile 2013
- [6] ACI, Statistiche annuario 2016
- [7] European Commission, "Clean power for transport", Bruxelles, 2013
- [8] Intergovernmental Panel on Climate Change, "Special Report on Emission Scenarios"
- [9] Kyoto Protocol, report
- [10] "Effect of cathode composition on capacity fade, impedance rise and power fade in high-power, lithium-ion cells", giugno 2003
- [11] Johnson Controls Press, Johnson Controls expands global production of Start-Stop batteries to meet rising automaker demand, settembre 2015
- [12] Sito web Iveco. web.iveco.com/italy/pages/homepage.aspx
- [13] Eberle Ulrich, Mueller Bernd, von Helholt Rittmar, Energy & Environmental Science, "Fuel cell electric vehicles and hydrogen infrastructure: status 2012", 2014
- [14] K. Kelly, R. Prohaska, A. Ragatz, and A. Konan, National Renewable Energy Laboratory, "NREL DriveCAT - Chassis Dynamometer Test Cycles", 2016
- [15] Schwalbe website, "Schwalbe Tires: Rolling Resistance".

Indice Figure

Figura 1.1 - Consumo energetico nelle aree del settore dei trasporti [1].....	6
Figura 1.2 – Vista da satellite della città di Brescia, con i riferimenti della presenza di traffico intenso abituale per veicoli commerciali pesanti	8
Figura 1.3 – Percentuali di approvvigionamento di energia primaria globale, negli Stati Uniti, in Unione Europea, in Italia, nei paesi OCSE e non-OCSE [3].....	9
Figura 1.4 – Consumo di energia primaria globale e nei paesi OCSE e non-OCSE dal 1965 al 2015 [3]	11
Figura 1.5 – Consumo di petrolio globale e nei paesi OCSE e non-OCSE dal 1965 al 2015 [3]	11
Figura 1.6 –Previsione di emissioni di CO2 per tipologia di fonte fossile (carbone, gas naturale e petrolio) [1]	13
Figura 1.7 – Stima dell’aumento medio di temperatura globale fino al 2100 [8].....	14
Figura 1.8 – Contributo alla riduzione delle emissioni di anidride carbonica da parte del settore industriale, residenziale e commerciale [5]	16
Figura 2.1 – Architettura del drivetrain di un veicolo commerciale pesante in configurazione tradizionale.....	23
Figura 2.2 – Esempio di consumo specifico di carburante [g/Wh] per motore a 3 cilindri a ciclo guida	24
Figura 2.3 - Architettura del drivetrain di un veicolo commerciale pesante in configurazione elettrica	26
Figura 2.4 - Architettura del drivetrain di un veicolo commerciale pesante in configurazione ibrida .	29
Figura 3.1 – Resistenza aerodinamica e resistenza al rotolamento in funzione della velocità di percorrenza per veicolo commerciale con massa complessiva a terra di 44 tonnellate	36
Figura 4.1 – Ciclo-guida CARB-HHDDT	53
Figura 4.2 – Potenza richiesta a un veicolo commerciale di 3.5 tonnellate per la percorrenza del ciclo-guida CARB-HHDDT	54
Figura 4.3 - Potenza richiesta a un veicolo commerciale di 5.2 tonnellate per la percorrenza del ciclo-guida CARB-HHDDT	54
Figura 4.4 - Potenza richiesta a un veicolo commerciale di 44 tonnellate per la percorrenza del ciclo-guida CARB-HHDDT	55

Figura 4.5 - Potenza richiesta a un veicolo commerciale di 18 tonnellate per la percorrenza del ciclo-guida CARB-HHDDT	55
Figura 4.1 – Resistenza aerodinamica e resistenza al rotolamento per i veicoli pesanti in esame durante la percorrenza del ciclo-guida CARB-HHDDT.....	56
Figura 5.1 – Animazione dell’analisi Well to Wheel per la produzione ed il consumo di carburante per la propulsione.....	81
Figura 5.2 – Provenienza geografica del petrolio importato all’interno dell’Unione Europea.....	86
Figura 5.3 – Consumo energetico per unità di spazio percorso, in riferimento all’analisi Well to Tank	97
Figura 5.4 - Consumo energetico per unità di payload, in riferimento all’analisi Well to Tank.....	97
Figura 5.5 – Emissioni di gas serra per unità di spazio percorso, in riferimento all’analisi Well to Tank	98
Figura 5.6 – Emissioni di gas serra per unità di payload, in riferimento all’analisi Well to Tank.....	98
Figura 5.7 - Consumo di trasporto, in riferimento all’analisi Tank to Wheel.....	100
Figura 5.8 - Consumo energetico per unità di spazio percorso, in riferimento all’analisi Tank to Wheel	101
Figura 5.9 - Consumo energetico per unità di payload, in riferimento all’analisi Tank to Wheel	102
Figura 5.10 – Emissioni di gas serra per unità di spazio percorso in riferimento all’analisi Tank to Wheel	106
Figura 5.11 – Consumo energetico per unità di spazio percorso in riferimento all’analisi Well to Wheel	108
Figura 5.12 – Consumo energrtico per unità di payload in riferimento all’analisi Well to Wheel.....	110
Figura 5.13 – Consumo di energia derivante da fonti fossili per unità di spazio percorso in relazione all’analisi Well to Wheel.....	113
Figura 5.14 - Consumo di energia derivante da fonti fossili per unità di payload in relazione all’analisi Well to Wheel.....	113
Figura 5.15 – Emissioni di gas serra per unità di spazio percorso in relazione all’analisi Well to Wheel	114
Figura 5.16 – Emissioni di gas serra per unità di payload in relazione all’analisi Well to Wheel.....	115

Indice tabelle

Tabella 1.1 - Parco veicoli circolanti in Italia negli anni 2014 e 2015 [2]	6
Tabella 1.2 – Percentuali di approvvigionamento di energia primaria, in alcune aree geografiche di riferimento [3].....	9
Tabella 1.3 – Previsioni dei consumi di energia primaria fino al 2040 in alcune regioni del mondo [1]	12
Tabella 1.4 – Previsione dei consumi giornalieri di barili di petrolio fino al 2040 in alcune regioni del mondo [1].....	12
Tabella 1.5 – Parco circolante in Italia nell’anno 2016, suddiviso per tipologia di veicolo e per tecnologia di propulsione [6]	17
Tabella 3.1 – Interfaccia del simulatore riportante dimensioni frontali, coefficienti di penetrazione aerodinamica, potenze ausiliari e caratteristiche del drivetrain per veicoli commerciali con massa complessiva a terra di 3.5, 5.2, 18 e 44 tonnellate	49
Tabella 4.1 – Principali caratteristiche tecniche dei quattro veicoli commerciali in esame	51
Tabella 4.2 – Potenza richiesta ai veicoli in esame per la percorrenza del ciclo-guida CARB-HHDDT..	53
Tabella 4.3 – Rapporti peso/potenza dei veicoli in esame	55
Tabella 5.1 – Consumi energetici ed emissioni di CO2 durante le fasi di estrazione del petrolio	87
Tabella 5.2 – Consumi energetici ed emissioni di CO2 durante i processi di raffinazione per carburante benzina e diesel.....	89
Tabella 5.3 – Risultati dell’analisi Well to Tank per carburante diesel durante tutte le fasi di estrazione, lavorazione e distribuzione	89
Tabella 5.4 – Mix energetico all’interno del gruppo EU-27	91
Tabella 5.5 – Risultato dell’analisi Well to Tank per la produzione di energia elettrica in UE-27	92
Tabella 5.6 – Risultato dell’analisi Well to Tank per la produzione di idrogeno in UE-27	94
Tabella 5.7 – Riassunto dei consumi energetici necessari al raggiungimento di 250km di autonomia da parte dei veicoli studiati con le diverse configurazioni di drivetrain	95
Tabella 5.8 – Consumi energetici ed emissioni di CO2 per l’analisi Well to Tank di carburante diesel, energia elettrica ed idrogeno.....	95
Tabella 5.9 – Consumi energetici e “consumo di trasporto” per i veicoli studiati nelle varie configurazioni.....	99
Tabella 5.10 – Confronto del payload tra le varie configurazioni di drivetrain.....	103

Tabella 5.11 – Riassunto delle emissioni di gas serra in riferimento all’analisi Tank to Wheel.....	105
Tabella 5.13 – Riassunto consumi energetici per unità di spazio percorso e per unità di payload in riferimento all’analisi Well to Wheel	111
Tabella 5.14 – Riassunto dei consumi di energia derivante da fonti fossili in relazione all’analisi Well to Wheel.....	113
Tabella 5.15 – Riassunto delle emissioni di gas serra in relazione all’analisi Well to Wheel.....	116