

Dipartimento di Energetica
Politecnico di Torino

Ing. Davide ROSSI

Relazione di Assegno di Ricerca
Responsabile scientifico Prof. Massimo Santarelli

Analisi e progettazione di una iniziativa di mobilità sostenibile

Torino, 15/04/2009

La ricerca è stata possibile grazie al sostegno della Fondazione Telios – Onlus, Torino

INDICE

1. Introduzione
 - 1.1. Scopo e obiettivi della ricerca
 - 1.2. La riduzione delle emissioni: lo scenario EU-2015
2. Energia e trasporti nell'EU-25
 - 2.1. La situazione demografica
 - 2.2. La situazione energetica europea
 - 2.3. Il settore dei trasporti
3. I carburanti
 - 3.1. I carburanti tradizionali
 - 3.2. I biofuel
 - 3.3. I vettori energetici
4. Le tecnologie di propulsione
 - 4.1. Propulsori tradizionali
 - DISI (Direct Injection Spark Ignition)
 - PISI (Port Injection Spark Ignition)
 - DIC (Direct Injection Compression Ignition)
 - 4.2. Propulsori innovativi
 - Propulsori ibridi
 - Propulsori elettrici a fuel cells
 - Propulsori elettrici a batteria
5. L'analisi well-to-wheel
 - 5.1. Ipotesi
6. Analisi dati well-to-wheel
 - 6.1. Well-To-Tank: Considerazioni energetiche
 - 6.2. Tank-To-Wheel: Considerazioni energetiche
 - 6.3. Well-To-Wheel: Considerazioni energetiche
 - 6.4. Well-To-Tank: Considerazioni ambientali
 - 6.5. Tank-To-Wheel: Considerazioni ambientali
 - 6.6. Well-To-Wheel: Considerazioni ambientali
 - 6.7. Conclusioni generali
7. Gli scenari proposti di opzioni di carburante-propulsore in conformità con gli obiettivi EU 2015
 - 7.1. Impostazione del problema
 - 7.2. Variabili del problema
 - 7.3. Risoluzione matematica
 - 7.4. Biofuel, ciclo aperto e chiuso
 - 7.5. Scenari di produzione utilizzati
8. Classificazione scenari
 - 8.1. Percentuali di introduzione nel mercato
 - 8.2. Well-To-Tank: Considerazioni energetiche
 - 8.3. Tank-To-Wheel: Considerazioni energetiche
 - 8.4. Well-To-Wheel: Considerazioni energetiche

- 8.5. Well-To-Tank: Considerazioni ambientali
- 8.6. Tank-To-Wheel: Considerazioni ambientali
- 8.7. Well-To-Wheel: Considerazioni ambientali
- 8.8. Conclusioni generali

9. Conclusioni finali

10. Bibliografia

11. Acronimi

1. INTRODUZIONE

1.1. SCOPO E OBIETTIVI DELLA RICERCA

Il presente lavoro è il frutto dell'attività di ricerca svolta dal Dipartimento di Energetica del Politecnico di Torino in collaborazione con la Fondazione TELIOS, società ONLUS che ha come obiettivo la diffusione e la promozione delle energie rinnovabili e della sostenibilità.

La definizione di sostenibilità risale al 1987 ed è contenuta nel cosiddetto “Rapporto Brundtland”, dal nome dell'allora presidente della Commissione Mondiale per l'Ambiente e lo Sviluppo (WCED):

“...Uno sviluppo che soddisfi i bisogni del presente senza compromettere le capacità delle generazioni future di soddisfare i propri e i cui obiettivi devono essere definiti in termini di sostenibilità in tutti i paesi, sviluppati o in via di sviluppo che siano, a economia di mercato o a pianificazione centralizzata”.

Questo tema è oggi al centro di ogni dibattito che riguardi gli aspetti energetici dello sviluppo e del progresso, a partire dall'efficienza energetica degli edifici fino ad arrivare alle cosiddette “auto ad emissioni zero”.

La scelta di focalizzare l'attenzione sul tema della mobilità scaturisce dalla constatazione della sua criticità sia dal punto di vista economico che ambientale. Le automobili rivestono dal XX Secolo un ruolo fondamentale nella vita quotidiana dei cittadini europei; tuttavia, il loro uso ha un forte impatto sul cambiamento del clima, tanto da essere responsabile di oltre il 12% delle emissioni totali antropiche di CO₂.

Il settore dei trasporti è inoltre quello che più criticamente dipende dal petrolio (dai suoi derivati), che ne soddisfa circa il 97% del fabbisogno.

Si inserisce in quest'ottica l'esigenza di un confronto scientifico, supportato da chiari dati numerici, che permetta di comparare combustibili, tecnologie di propulsione, vettori energetici e rispettivi processi di produzione, riconducendo il tutto ad unità di misura uniformi utili per un confronto critico.

1.2. LA RIDUZIONE DELLE EMISSIONI: LO SCENARIO EU-2015

L'Unione europea ha stabilito obiettivi ambiziosi per ridurre i gas a effetto serra e migliorare l'efficienza dei processi di trasformazione energetica, ai quali tutti i settori economici interessati dovranno contribuire.

Il 7 Febbraio 2007 la Commissione Europea ha pubblicato due comunicazioni collegate:

- “Risultati del riesame della strategia comunitaria per ridurre le emissioni di CO₂ delle autovetture e dei veicoli commerciali leggeri”
- “Un quadro normativo competitivo nel settore automobilistico per il XXI secolo”

In tali comunicazioni è indicata la strategia proposta per raggiungere l'obiettivo dell'EU di 120 g di emissioni di biossido di carbonio (CO₂) al km per le autovetture nuove entro il 2012.

La proposta precisa della Commissione è stata la seguente:

*“La Commissione porterà avanti il suo approccio integrato al fine di raggiungere entro il 2012 l'**obiettivo UE di 120 g di CO₂/km**. Tale obiettivo può essere raggiunto facendo leva su una combinazione di interventi dell'UE e degli Stati membri. La Commissione proporrà, se possibile già nel 2007 e al più tardi a metà del 2008, un quadro legislativo inteso a conseguire l'obiettivo UE di 120 g di CO₂/km, puntando a riduzioni obbligatorie delle emissioni di CO₂ per raggiungere l'obiettivo di 130 g/km per il nuovo parco auto medio, grazie a miglioramenti tecnologici apportati al motore dei veicoli, e un ulteriore abbattimento di 10 g di CO₂/km, o equivalente se tecnicamente possibile, grazie ad altri **miglioramenti tecnologici e ad un maggiore uso dei biocarburanti**. In particolare si tratterà delle seguenti misure:*

- a. definizione di requisiti minimi di efficienza per gli impianti di condizionamento;*

- b. *installazione obbligatoria di sistemi precisi di controllo della pressione dei pneumatici;*
- c. *definizione di limiti massimi di resistenza al rotolamento dei pneumatici applicabili nell'UE per i pneumatici delle autovetture e dei veicoli commerciali leggeri;*
- d. *impiego di indicatori di cambio marcia, per stabilire in che misura i consumatori utilizzano questi dispositivi nelle condizioni reali di guida;*
- e. *miglioramenti in termini di risparmio del carburante nei veicoli commerciali leggeri (furgoni), con l'obbligo di raggiungere l'obiettivo di 175 g di CO₂ /km entro il 2012 e di 160 g di CO₂ /km entro il 2015;*
- f. *incremento dell'uso di biocarburanti, massimizzandone le prestazioni ambientali.*

Tutti questi interventi saranno misurabili e controllabili, sarà possibile rendere conto della loro efficacia e non presenteranno il rischio di una doppia contabilizzazione delle emissioni di CO₂.

Al di là del quadro legislativo, la strategia della Commissione intesa ad abbattere ulteriormente le emissioni di CO₂ dovrebbe promuovere un impegno supplementare per quanto riguarda gli altri mezzi di trasporto su strada (veicoli pesanti ecc.) da parte degli Stati Membri (tassa sulla CO₂ e altri incentivi fiscali, appalti pubblici ecologici, gestione del traffico, infrastrutture, ecc.) e da parte dei consumatori (scelta informata al momento dell'acquisto, comportamento di guida responsabile ecc.)."

La proposta è stata poi modificata raggiungendo una sorta di compromesso, approvato il 2 Dicembre 2008, che sposta la scadenza al 2015 tramite uno "scaglionamento progressivo" dell'obiettivo di abbassare la media delle emissioni a 130 g/km, più un'ulteriore riduzione di 10 g/km con l'utilizzo di biocarburanti e di nuove tecnologie.

I biocombustibili rappresentano una via alternativa alle fonti energetiche di origine fossile. Il loro uso è molto discusso anche dal punto di vista etico, oltre che da quello energetico. Secondo lo scenario previsto dalla EU il loro utilizzo in quantità moderate potrebbe permettere di raggiungere l'obiettivo della riduzione di 5 gCO_{2eq}/km.

Per meglio precisare la definizione di “nuove tecnologie”, rientrano nel loro ambito il motore elettrico (sia alimentato a batterie e.g. agli ioni di litio, sia alimentato da celle a combustibile a Idrogeno) nonché i propulsori ibridi. Sebbene già esistenti, tali tecnologie non sono ancora diffuse su larga scala; secondo le intenzioni della EU, la loro introduzione sul mercato, in chiave futura, potrebbe cambiare il quadro energetico ed ambientale in virtù della loro maggiore efficienza energetica e delle emissioni più contenute (obiettivi che richiedono un'analisi ad hoc, e di cui si tratterà un quadro all'interno di questa pubblicazione).

I produttori europei dovranno soddisfare tale requisito (ossia 130 g/km di CO₂) per il 65% di tutti i modelli prodotti entro il 2012, per il 75% nel 2013, per l'80% nel 2014 e per il 100% nel 2015. Entro il 2020 si punta ad una riduzione a 95 g/km, sebbene ad oggi non vi sia alcun accordo vincolante in tal senso.

Sono state inoltre stabilite le sanzioni per i produttori inadempienti: 5 Euro per ogni vettura venduta per il primo grammo di CO₂ in eccesso (131 g/km di CO₂), 15 per il secondo, 25 per il terzo e 95 dal quarto in poi.

2. ENERGIA E TRASPORTI NELL'EU-25

2.1. LA SITUAZIONE ENERGETICA MONDIALE

L'IEA (International Energy Agency) e la Comunità Europea hanno diffuso le previsioni degli scenari demografici, energetici ed ambientali per i prossimi 30 anni, sia a livello mondiale (IEA) che per l'Europa dei 25 Stati Membri.

Da oggi al 2030 si prevede un aumento della domanda energetica mondiale dell'1,6% all'anno¹, soprattutto a causa del contributo di Paesi emergenti come l'India e la Cina, la quale da sola sarà responsabile di oltre il 30% dell'aumento generale.

Circa la metà di tale domanda sarà dovuta alla generazione di elettricità e un quinto alla mobilità, il cui fabbisogno è soddisfatto in modo quasi esclusivo dal petrolio.

Table 2.1: World Primary Energy Demand in the Reference Scenario
(Mtoe)

	1980	2004	2010	2015	2030	2004 - 2030*
Coal	1 785	2 773	3 354	3 666	4 441	1.8%
Oil	3 107	3 940	4 366	4 750	5 575	1.3%
Gas	1 237	2 302	2 686	3 017	3 869	2.0%
Nuclear	186	714	775	810	861	0.7%
Hydro	148	242	280	317	408	2.0%
Biomass and waste	765	1 176	1 283	1 375	1 645	1.3%
Other renewables	33	57	99	136	296	6.6%
Total	7 261	11 204	12 842	14 071	17 095	1.6%

* Average annual growth rate.

SOURCE: IEA - World Energy Outlook 2006

In quest'arco di tempo i combustibili di origine fossile – petrolio, carbone e gas naturale – rimarranno la principale fonte energetica, fornendo l'83% dell'energia totale necessaria².

Si prevede che il consumo di petrolio raggiungerà la quota di 99 milioni di barili al giorno nel 2015 e di 116 milioni nel 2030³, pur osservando un leggero calo nel mix energetico a favore del carbone, il cui uso principale sarà però riservato alla generazione di elettricità.

Il gas naturale dovrebbe veder aumentare la propria domanda, seppur in modo lieve a causa dell'aumento dei prezzi, mentre l'energia di origine nucleare dovrebbe subire un drastico calo.

L'uso delle fonti rinnovabili, seppur in crescita, dovrebbe conservare un ruolo modesto, mentre quello delle biomasse, anche se trainato dallo sviluppo della tecnologia dei biofuels, sarà destinato ad un calo a causa dell'abbandono di tale forma di produzione energetica nei Paesi in via di sviluppo a favore di processi e tecnologie più moderne.

¹ IEA – World Energy Outlook 2006.

^{2,3} IEA – World Energy Outlook 2006.

³

Table 2.4: World Energy-Related CO₂ Emissions by Sector in the Reference Scenario (million tonnes)

	1990	2004	2010	2015	2030	2004-2030*
Power generation	6 955	10 587	12 818	14 209	17 680	2.0%
Industry	4 474	4 742	5 679	6 213	7 255	1.6%
Transport	3 885	5 289	5 900	6 543	8 246	1.7%
Residential and services**	3 353	3 297	3 573	3 815	4 298	1.0%
Other***	1 796	2 165	2 396	2 552	2 942	1.2%
Total	20 463	26 079	30 367	33 333	40 420	1.7%

*Average annual growth rate. **Includes agriculture and public sector. ***Includes international marine bunkers, other transformation and non-energy use.

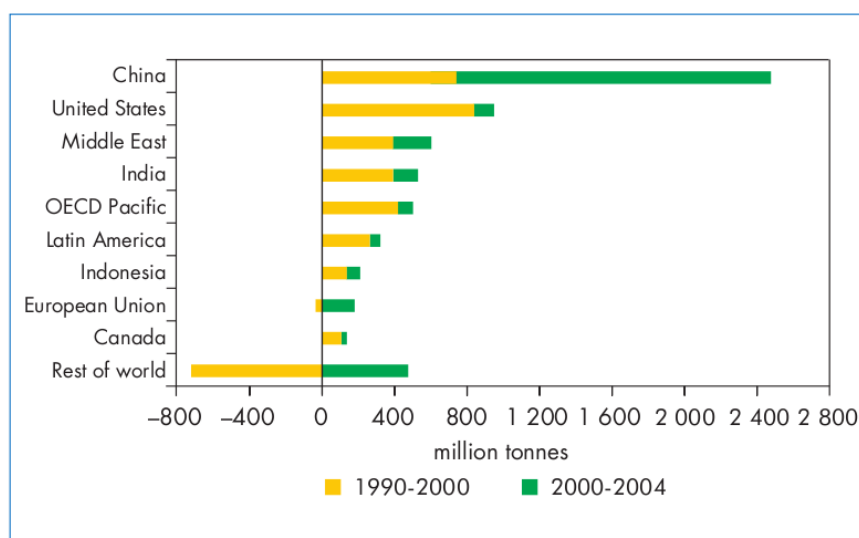
SOURCE: IEA - World Energy Outlook 2006

L'aumento del consumo di fonti energetiche di origine fossile produrrà necessariamente un aumento delle emissioni di anidride carbonica, per le quali si prevede una crescita del 55% nel periodo 2004-2030, pari all'1,7% all'anno⁴.

Circa la metà di tali emissioni saranno dovute alla generazione di elettricità e in particolare all'utilizzo di carbone e petrolio.

I Paesi in via di sviluppo saranno i principali responsabili del vertiginoso aumento delle emissioni di gas serra a causa dell'uso intensivo del carbone e del modesto consumo di gas naturale, motivo per cui tale crescita sarà più rapida rispetto a quella della domanda energetica.

Figure 2.7: Increase in Energy-Related CO₂ Emissions by Region



SOURCE: IEA - World Energy Outlook 2006

2.2. LA SITUAZIONE EUROPEA

Nel presente lavoro si fa riferimento all'Europa comprendente 25 Stati Membri, includendo dunque i recenti ingressi di Cipro, Estonia, Lettonia, Lituania, Malta, Polonia, Repubblica Ceca, Slovacchia, Slovenia e Ungheria.

La popolazione rimarrà piuttosto stabile, raggiungendo un picco di 462 milioni di abitanti nel 2020, per poi decrescere leggermente fino ai 458 milioni nel 2030⁵.

⁴ IEA – World Energy Outlook 2006.

⁵ European Commission - “Energy and Transport Outlook to 2030, part IV”, 2008.

Table 4-1: Population trends in EU-25, 1990 to 2030.

	Million inhabitants					annual growth rate				
	1990	2000	2010	2020	2030	90/00	00/10	10/20	20/30	00/30
EU15	366.01	378.69	387.83	390.45	389.02	0.34	0.24	0.07	-0.04	0.09
ACC	75.12	74.73	73.40	71.67	69.14	-0.05	-0.18	-0.24	-0.36	-0.26
EU-25	441.13	453.41	461.23	462.11	458.16	0.28	0.17	0.02	-0.09	0.03

Source: EUROSTAT, Global Urban Observatory and Statistics Unit of UN-HABITAT, PRIMES, ACE.⁷¹

SOURCE: European Commission - "Energy and Transport Outlook to 2030, part IV", 2008.

Nell'arco di tempo dal 2000 al 2030 si prevede un aumento del 29,3% della domanda energetica; il settore dell'industria incrementerà i propri consumi del 24,6%, il terziario del 41,2% e quello residenziale del 21,3%⁶.

Il settore dei trasporti rimarrà uno dei settori critici, il cui fabbisogno rappresenterà il 31% della domanda energetica totale, contro il 27% del 1990⁷.

Table 4-9: Final energy demand in EU-25 by sector.

	Mtoe					Annual Growth Rate (%)				
	1990	2000	2010	2020	2030	90/00	00/10	10/20	20/30	00/30
Industry	328.4	310.2	338.1	364.8	385.5	-0.6	0.9	0.8	0.6	0.7
Domestic	412.2	433.3	482.3	522.7	556.4	0.5	1.1	0.8	0.6	0.8
Tertiary	144.8	154.3	173.7	193.9	217.8	0.6	1.2	1.1	1.2	1.2
Households	267.4	279.1	308.6	328.9	338.6	0.4	1.0	0.6	0.3	0.6
Transport	273.6	333.1	388.6	428.5	449.8	2.0	1.6	1.0	0.5	1.0
Total	1014	1077	1209	1316	1392	0.6	1.2	0.9	0.6	0.9
current EU	859	955	1077	1165	1229	1.1	1.2	0.8	0.5	0.8
acceding countries	155	121	132	151	163	-2.4	0.9	1.3	0.7	1.0

Source: PRIMES, ACE.

SOURCE: European Commission - "Energy and Transport Outlook to 2030, part IV", 2008.

Table 4-10: Final energy demand in EU-25 by fuel.

	Mtoe					Annual Growth Rate (%)				
	1990	2000	2010	2020	2030	90/00	00/10	10/20	20/30	00/30
Solid Fuels	120.7	56.7	41.7	33.6	29.0	-7.3	-3.0	-2.1	-1.5	-2.2
Liquid Fuels	427.5	465.0	503.7	538.7	554.9	0.8	0.8	0.7	0.3	0.6
Gas fuels	195.1	246.2	299.2	324.7	341.3	2.4	2.0	0.8	0.5	1.1
Steam	60.5	55.6	64.6	74.3	83.5	-0.8	1.5	1.4	1.2	1.4
Electricity	176.6	211.3	253.6	297.7	337.1	1.8	1.8	1.6	1.3	1.6
New fuels (hydrogen etc.)	0.0	0.0	0.3	1.0	1.4	-	-	13.5	3.3	-
Biomass	27.3	33.7	35.4	33.7	31.2	2.1	0.5	-0.5	-0.8	-0.3
Waste	6.0	7.5	8.7	9.2	9.4	2.2	1.5	0.6	0.2	0.8
Other renewables	0.5	0.8	2.0	3.2	4.0	4.6	10.0	4.9	2.4	5.7
Total	1014	1077	1209	1316	1392	0.6	1.2	0.9	0.6	0.9

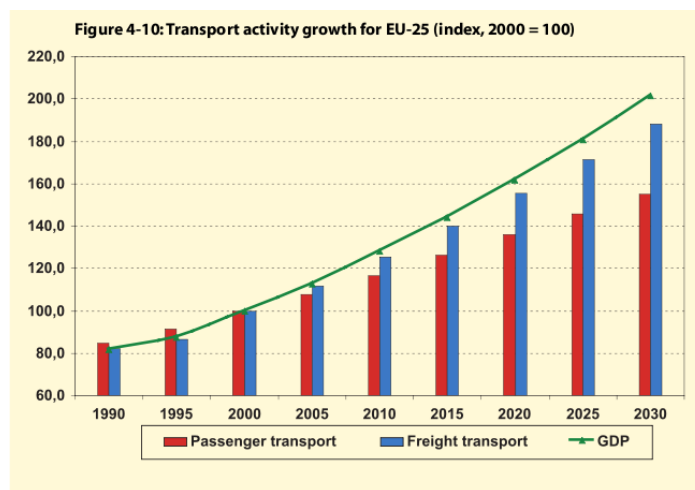
Source: PRIMES, ACE.

SOURCE: European Commission - "Energy and Transport Outlook to 2030, part IV", 2008.

L'energia utilizzata nel settore dei trasporti include i consumi dovuti al traffico di passeggeri e di merci. La crescita economica riveste un fattore chiave per la previsione della domanda energetica, poiché implica un aumento della produzione, e dunque della necessità di spostamento per beni e materie prime, nonché un miglioramento del benessere che si traduce in una maggior domanda di mobilità.

^{6,7} European Commission - "Energy and Transport Outlook to 2030, part IV", 2008.

7



Source: PRIMES, ACE.

Proprio per questo motivo si prevede che la domanda di petrolio per il settore dei trasporti sia destinata a crescere fino al 2030, arrivando a ricoprire il 56% del consumo petrolifero europeo⁸.

⁸ EIA (Energy Administration Information) – “International Energy Outlook 2008”.

3. I CARBURANTI

Nelle analisi condotte in questo studio, sono state prese in considerazione varie tipologie di carburanti utilizzabili nel settore dei trasporti, in combinazione con differenti tecnologie di propulsione.

Si sono considerati sia carburanti tradizionali, derivanti da fonti di energia fossile, di elevata diffusione nel XX secolo e tutt'ora dominanti sul mercato, utilizzati generalmente in motori a combustione interna (comunemente noti come motori a pistoni).

Oltre ad essi, si sono considerati anche e soprattutto carburanti di tipo alternativo, derivanti da fonti di energia rinnovabili; oppure vettori energetici, derivanti da fonti rinnovabili ma anche da fonti fossili, ma utilizzabili in tecnologie di propulsione di tipo innovativo (spesso caratterizzate da interessanti efficienze di conversione).

Nel prosieguo, è effettuata una breve descrizione delle caratteristiche principali dei carburanti presi in esame, funzionale alla comprensione degli scenari analizzati nel testo.

3.1. I CARBURANTI TRADIZIONALI

Le fonti fossili hanno dominato il mercato dell'energia dal XX° secolo in poi, per la loro relativa economicità (rispetto ad altre fonti), perché sono caratterizzate da facilità di trasporto ed utilizzo, e soprattutto per la loro elevata densità energetica.

Questi aspetti sono particolarmente importanti nel settore dei trasporti. I carburanti tradizionali, infatti, sono prodotti quasi esclusivamente da fonti fossili: benzina, diesel e GPL sono infatti ottenuti da processi di raffinazione del petrolio, mentre il gas naturale (che sta acquisendo sempre maggior interesse a seguito sia di una maggiore sensibilità al problema ambientale, sia perché, seppur di origine fossile, è comunque una fonte alternativa ai derivati del petrolio) è utilizzato direttamente in veicoli opportunamente modificati. Diesel e benzina, in particolare, si spartiscono da soli quasi il 99% del mercato automobilistico⁹.

Secondo le proiezioni dello scenario a cui si fa riferimento questo lavoro, le fonti liquide rimarranno la principale fonte di energia fino al 2030. Per tale data, come già anticipato, si prevede di raggiungere la produzione di 116 milioni di barili di petrolio al giorno¹⁰.

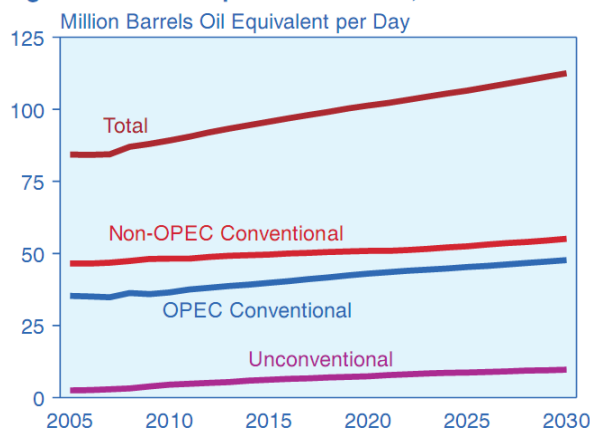
A partire dal 2030 la supremazia del petrolio dovrebbe iniziare a ridursi a vantaggio delle fonti alternative, spinto soprattutto dall'aumento dei prezzi di estrazione provocato dall'impoverimento dei giacimenti. Il settore dei trasporti, tuttavia, dovrebbe rimanere il più vincolato a tale fonte energetica, a causa della mancanza di alternative disponibili su larga scala: dal 2005 al 2030 i trasporti saranno infatti responsabili di oltre il 74% dell'aumento della domanda di petrolio¹¹.

⁹ CONCAWE, EUCAR, Joint Research Center, "Well-To-Wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the european context", 2007.

^{10,11} EIA (Energy Administration Information) – "International Energy Outlook 2008".

¹¹

Figure 4. World Liquids Production, 2005-2030



Sources: **2005:** Energy Information Administration (EIA), *International Energy Annual 2005* (June-October 2007), web site www.eia.doe.gov/iea. **Projections:** EIA, Generate World Oil Balance Model (2008).

International Energy Outlook 2008

Producers, Exporters and Importers of Crude Oil

Producers	Mt	% of World total
Saudi Arabia	507	12.9
Russia	477	12.1
United States	310	7.9
Islamic Rep. of Iran	216	5.5
Peoples Rep. of China	184	4.7
Mexico	183	4.6
Canada	151	3.8
Venezuela	151	3.8
Kuwait	139	3.5
United Arab Emirates	134	3.4
Rest of the World	1 484	37.8
World	3 936	100.0

2006 data

Exporters	Mt
Saudi Arabia	364
Russia	253
Islamic Rep. of Iran	132
Nigeria	119
Norway	115
Mexico	100
Venezuela	97
United Arab Emirates	97
Kuwait	84
Canada	84
Rest of the World	733
World	2 178

2005 data

Importers	Mt
United States	582
Japan	213
Peoples Rep. of China	127
Korea	115
Germany	112
India	99
Italy	95
France	84
Netherlands	62
Spain	60
Rest of the World	709
World	2 258

2005 data

SOURCE: IEA (International Energy Agency) – “Key World Energy Statistics”

3.2. I BIOFUELS

I biofuels, o bio-carburanti, rientrano nella categoria dei carburanti ottenuti da fonti energetiche alternative di origine non fossile: in generale, sono ottenuti tramite il processamento di biomasse in senso lato (quali ad esempio piante e rifiuti organici). Nel caso della mobilità, rappresentano una delle possibili soluzioni per raggiungere l'indipendenza dal petrolio, anche in virtù del prevedibile aumento dei prezzi del greggio che dovrebbe rendere più competitivi i combustibili alternativi.

Tra i possibili vantaggi si possono elencare l'ampia disponibilità teorica, che appare meglio distribuita rispetto al petrolio, il quale è localizzato in aree della Terra più ristrette, e il miglior sfruttamento dei rifiuti che potrebbe essere un'ottima soluzione per la riduzione degli stessi.

Tuttavia, la produzione a partire dalla parte commestibile dei vegetali (i cosiddetti biofuels di “prima generazione”) è oggi al centro di accesi dibattiti, essendo ritenuta responsabile del rincaro mondiale dei prezzi dei generi alimentari, che si ripercuotono soprattutto sui Paesi del Terzo Mondo. Per questo motivo la ricerca sta cercando soluzioni alternative che possano coniugare la provenienza biologica (rinnovabile), lo sfruttamento delle componenti non commestibili delle piante (“no food”), il risparmio energetico ed economico nei processi di produzione dei carburanti: si parla quindi di bio-carburanti di “seconda generazione”.

I processi utilizzati per la produzione dei bio-carburanti comporta, inevitabilmente, emissioni di CO₂, in maniera variabile a seconda del processo. Si produce anidride carbonica per coltivare i campi, per raccogliere il prodotto agricolo, per trasformarlo chimicamente e per distribuirlo.

Inoltre, è necessario tenere in considerazione che la riduzione delle emissioni di gas serra può venire annullata se la coltivazione delle colture bioenergetiche determina la distruzione di habitat che immagazzinano il carbonio, come ad esempio è accaduto in passato (e tutt'ora continua) in Amazzonia ove grandi appezzamenti di foresta pluviale sono stati disboscati per fare posto a coltivazioni di vario tipo.

Nell'ambito dei biofuels si possono distinguere due grandi famiglie: l'etanolo, utilizzabile nei motori a benzina, e il biodiesel, utilizzabile nei propulsori diesel.

Nella maggior parte dei casi entrambi vengono miscelati in proporzioni variabili con i combustibili fossili, formando miscele di concentrazione variabile. Il loro nome commerciale riporta una lettera (E per etanolo e B per biodiesel), seguita da un numero indicante la concentrazione di biofuel: ad esempio l'E85 è un miscela contenente l'85% di etanolo e 15% di benzina, mentre B20 è un carburante composto al 20% da biodiesel e all'80% da diesel fossile.

L'impatto dei bio-carburanti sull'effetto serra è molto discusso e si può dividere in due linee di pensiero:

Ciclo della CO₂ chiuso: le emissioni globali di biossido di carbonio, durante il ciclo di vita della pianta (crescita e utilizzo energetico) sono considerate nulle, in quanto le emissioni prodotte durante la combustione compensano esattamente la CO₂ assorbita durante la crescita.

Ciclo della CO₂ aperto: le più importanti aree verdi del pianeta (come ad esempio la foresta amazzonica) si trovano a grande distanza dai Paesi industrializzati in cui avviene la maggiore percentuale di utilizzo dei bio-carburanti per trazione, e dove quindi avvengono le effettive emissioni di gas serra. Tale squilibrio, pur essendo nullo a livello globale, ha un non trascurabile effetto a livello locale, in particolare nei grandi agglomerati urbani. Le emissioni di CO₂ sono considerate quindi come diverse da zero, e coincidono con le emissioni effettive nel luogo e nel tempo della combustione dei bio-carburanti nei motori termici (tale aspetto verrà approfondito nel Capitolo 5).

In questo lavoro si è scelto di prendere in esame entrambi i casi, al fine di evidenziarne le differenze.

L'indice ambientale delle emissioni di CO₂, considerato nella fase di produzione dei bio-carburanti, assume in alcuni casi valori negativi. La causa risiede in alcuni sistemi produttivi utilizzati per ottenere biofuels, che possono prevedere il riutilizzo degli scarti per generare elettricità e calore. Il surplus energetico realizzato restituisce un “credito” in termini di emissioni di CO₂ che comporta quindi un valore negativo alle emissioni in ambiente.

Segue una breve descrizione delle tipologie principali di bio-carburanti.

Etanolo

Anche se considerato di recente introduzione, si tratta (come spesso accade) di una riscoperta, in quanto l'etanolo è stato in realtà il carburante che ha alimentato i primi motori a scoppio realizzati alla fine del XIX secolo. All'epoca infatti la benzina non era ancora prodotta in quote significative. Nel 1896, quando Nikolaus Otto inventò il motore a quattro tempi, lo progettò affinché fosse alimentato da etanolo. Anche il celebre modello "T" di Henry Ford era progettato per funzionare con etanolo, benzina, o una miscela dei due mediante opportune modifiche manuali al carburatore.

Oggi l'etanolo può essere utilizzato nei tradizionali motori a combustione interna non modificati in concentrazioni fino al 10%; per concentrazioni superiori sono richieste alcune modifiche al motore (ad esempio al carburatore, all'iniezione, ecc...), mentre per l'utilizzo in forma pura è necessario un motore apposito noto come "Flex".

Le fonti principali di produzione sono le specie vegetali ricche di zuccheri, quali grano, mais e canna da zucchero. Come già accennato, si tratta di sistemi produttivi che lo pongono in concorrenza diretta con i generi alimentari, con il conseguente aumento dei prezzi. Ad esempio, negli Stati Uniti, nel 2006, solo il 12,1% della produzione di mais è stata destinata al consumo umano, contro il 14,3% destinato alla produzione di etanolo¹².

Una resa migliore si potrebbe ottenere convertendo l'intera pianta, anziché la sola parte commestibile: ad esempio la canna da zucchero è composta al 40% da zuccheri e al 60% da fibre, comprese le foglie.

La produzione da sola cellulosa è limitata al momento ad una produzione di nicchia.

Attualmente le fonti più utilizzate per la produzione di etanolo sono la canna da zucchero, soprattutto in Brasile, e il mais, più diffuso negli Stati Uniti. Il primo prevede l'estrazione degli zuccheri cristallizzati dalla pianta e la successiva fermentazione; il mais richiede invece l'aggiunta di enzimi che trasformano il chicco in zuccheri, i quali necessitano poi di una fase fermentativa come nell'altro caso.

L'etanolo (21.156 kJ/l) ha una densità energetica inferiore alla benzina (31.772 kJ/l), così che dal punto di vista energetico un litro di benzina corrisponde a circa un litro e mezzo di etanolo.

In realtà, essendo utilizzato soprattutto in miscela, la differenza tra i due si riduce sempre di più all'aumentare del tenore di benzina del mix, fino a diventare trascurabile per l'etanolo E10.

Si stima che nel 2006, negli Stati Uniti, il 46% della benzina sia stata miscelata con etanolo, e che un terzo del consumo totale dei motori a benzina sia stato costituito proprio da E10¹³.

L'etanolo brucia molto rapidamente ed ha un numero di ottani superiore alla benzina, caratteristica che gli consente di essere utilizzato in motori con rapporti di compressione più elevati. Le proprietà di partenza a freddo sono al contrario più scadenti a causa del suo alto calore di vaporizzazione, tanto che nei mesi invernali viene solitamente addizionato di quantità di benzina superiori al normale.

La distribuzione non può avvenire nel sistema esistente di condutture a causa di possibili contaminazioni con acqua e residui di altri derivati del petrolio, nonché a causa delle proprietà corrosive dell'alcol. Solitamente viene trasportato via terra fino alla stazione di distribuzione, dove viene eventualmente miscelato con la benzina.

Biodiesel

Il primo motore sviluppato da Rudolf Diesel era progettato per essere alimentato da olio d'arachidi; la larga disponibilità di petrolio e il conseguente calo dei prezzi fecero tuttavia abbandonare l'utilizzo di oli vegetali.

Il biodiesel è un bio-carburante composto essenzialmente da oli e grassi vegetali, che può essere utilizzato in qualsiasi concentrazione senza alcuna modifica al motore.

Rispetto al diesel di origine fossile ha molti pregi: estende la vita dei motori, ha emissioni inquinanti inferiori, è biodegradabile, non tossico e più sicuro.

¹² U.S. Department of Energy – "Biomass Energy Data Book, Edition 1".

¹³ U.S. Department of Energy – "Biomass Energy Data Book, Edition 1".

Le principali fonti di produzione sono la colza, la soia, gli oli vegetali esausti, le alghe, la cellulosa. Moltissime specie vegetali sono adatte alla produzione di biodiesel, ma le scelte privilegiate sono quelle che garantiscono un'alta resa per ettaro; proprio l'aumento della resa è una delle direzioni verso cui attualmente si sta orientando la ricerca.

In Europa la colza è la più utilizzata, mentre negli Stati Uniti la soia occupa la posizione predominante.

Il processo produttivo sfrutta la reazione chimica di trasformazione dei trigliceridi in esteri, nota come transesterificazione, spesso attivata da un catalizzatore come l'idrossido di sodio: il prodotto è composto da due fasi liquide, il glicerolo e il biodiesel, il quale viene separato e successivamente ripulito da eventuali residui di alcol e catalizzatore.

Affinchè possa essere utilizzato nei comuni motori diesel, l'olio vegetale deve avere una viscosità cinematica inferiore a $2 \cdot 10^{-5}$ mm²/s. Per ottenere tale risultato è necessario installare un secondo serbatoio riscaldato dal calore proveniente dal radiatore; l'accensione deve avvenire tramite diesel convenzionale, dopodichè, una volta raggiunta la viscosità richiesta, è possibile passare all'alimentazione alternativa.

Il biodiesel puro ha il 24% di energia per chilogrammo in meno rispetto alla versione fossile (32 contro 42 MJ/kg), ma un'efficienza di combustione superiore del 7%.

Tenendo conto di entrambi i fattori si può concludere che l'efficienza generale è inferiore di circa il 5%.

La temperatura di condensazione è superiore a quella del diesel, il che lo rende meno tollerante alle basse temperature; le miscele in concentrazioni superiori al B20 permettono però di ovviare al problema.

Il trasporto e lo stoccaggio avvengono negli stessi contenitori del diesel convenzionale, favoriti sotto l'aspetto della sicurezza dalla superiore temperatura di ignizione (150°C contro 52°C) e dalla completa biodegradabilità del prodotto.

Anche per il biodiesel, così come per l'etanolo, sussiste il problema dell'utilizzo della parte commestibile del vegetale, motivo per il quale si sta investendo molto sulla produzione da alghe e da cellulosa.

3.3. I VETTORI ENERGETICI

Si intende per vettore energetico una forma di energia di migliore fruibilità, dal punto di vista del trasporto, accumulo o utilizzo. Esso è dunque uno stadio intermedio nella trasformazione dell'energia, ottenuto a partire dalle fonti primarie, e meglio utilizzabile per l'ottenimento dei servizi energetici finali.

Nel settore dei trasporti, e quindi in termini di carburanti in senso lato, i vettori potenzialmente più interessanti sono l'elettricità e gas quali l'idrogeno.

Appare chiaro come, parlando di mobilità sostenibile, la fonte primaria e il processo di trasformazione utilizzati per la loro produzione rivestano un ruolo critico. E' infatti possibile ricavare entrambi sia da fonti fossili che da fonti rinnovabili, ampliando il ventaglio delle opzioni a disposizione, in termini di carburanti, da analizzare e confrontare. In generale, i vettori energetici sono ottenibili da quasi tutte le fonti primarie, con processi caratterizzati da efficienze di produzione diverse dal punto di vista sia energetico che ambientale, e la loro valutazione è legata molto a considerazioni di accumulo e utilizzo in combinazione con propulsori più o meno efficienti e rispettosi dell'ambiente

Elettricità

L'elettricità può essere ottenuta da molteplici fonti, sia fossili (carbone, gas naturale, olio combustibile, ecc...) che rinnovabili (eolico, solare, idroelettrico).

E' immagazzinabile in accumulatori elettrochimici, le batterie, che possono essere di vario tipo: da quelle al piombo fino ai più moderni modelli agli ioni di litio. L'elettricità è utilizzata in combinazione con propulsori basati su un motore elettrico.

Nella fase di marcia, un'auto elettrica non produce alcuna emissione. Le emissioni totali sono dunque completamente a carico della fase di produzione dell'energia necessaria per la produzione del vettore elettrico, che può essere a sua volta nulla in caso di produzione di elettricità da fonte rinnovabile.

I motori elettrici sono caratterizzati da un'alta efficienza energetica; anche in questo caso l'efficienza complessiva di una vettura elettrica è significativamente influenzata dal processo adottato per produrre l'energia elettrica.

Idrogeno

L'idrogeno, pur essendo l'elemento più abbondante presente in natura, non è disponibile in forma libera, ma associato ad altri elementi in composti organici ed inorganici. La sua separazione dai composti in cui si trova combinato necessita pertanto di un consumo di fonti energetiche primarie.

Se considerato dal punto di vista della massa ha più energia di qualunque altro carburante; dal punto di vista del volume è al contrario quello che ne contiene meno.

Le fonti principali da cui è possibile estrarlo sono l'acqua, la biomassa e gli idrocarburi, utilizzando i seguenti processi:

- **Elettrolisi**

E' la decomposizione dell'acqua per mezzo di potenza elettrica, tramite un processo di ossido-riduzione in un dispositivo elettrochimico (elettrolizzatore) composto da due elettrodi (anodo e catodo) ed un elettrolita (soluzione elettrolitica, polimero, ossidi solidi sali fusi, etc); la potenza elettrica applicata al dispositivo consente la produzione di idrogeno al catodo e ossigeno all'anodo. Il processo richiede una grande quantità di energia, che può essere parzialmente ridotta operando ad alte temperature (900-1000°C).

- **Steam reforming del gas naturale**

E' il processo più utilizzato e consiste nell'estrazione dell'idrogeno da molecole di idrocarburi più complessi, tra i quali il gas naturale, e dall'acqua di processo stessa; è il più utilizzato perchè molto efficiente (idrogeno ottenuto sia dalla molecola di idrocarburo che da quella dell'acqua) e quindi più economico.

- **Gassificazione/Pirolisi**

La gassificazione è la decomposizione termica di biomassa, operata a temperature comprese tra 700 e 900°C in un ambiente a basso tenore di ossigeno (20-40% della quantità richiesta per la combustione). Il prodotto è un gas sintetico contenente principalmente idrogeno, monossido di carbonio, anidride carbonica e alcani a basso peso molecolare. La pirolisi è molto simile alla gassificazione, dalla quale si differenzia solo perchè il riscaldamento avviene in assenza di ossigeno.

- **Fermentazione**

Si tratta di un processo ancora in fase di sviluppo che consiste nell'impiego di microorganismi che consumano biomassa, operando la conversione di glucosio in idrogeno attraverso la fermentazione aerobica o anaerobica. E' una tecnologia molto interessante in quanto ha costi energetici molto bassi, poiché i microorganismi traggono energia direttamente dalla biomassa.

L'idrogeno può essere utilizzato direttamente nei motori a combustione interna oppure, in modo energeticamente più efficiente, come combustibile anodico per le celle a combustibile, convertitori elettrochimici che producono potenza elettrica che alimenta un motore elettrico per la propulsione del veicolo.

L'idrogeno ha bassa densità volumetrica, per cui aumentarne la densità (a fini di accumulo significativo sul veicolo) è un'operazione energeticamente dispendiosa.

4. LE TECNOLOGIE DI PROPULSIONE

A partire dal XIX secolo, periodo in cui venne inventato il motore a ciclo Otto, la tecnologia meccanica si è sviluppata notevolmente, consentendo incrementi di autonomia, prestazioni e affidabilità. Oggi, pur essendo ancora dominato dai tradizionali motori a combustione interna, il mercato si sta aprendo a nuove tecnologie, per via di spinte di diversa natura: economica, ambientale e politica. Le crescenti pressioni dell'Unione Europea verso la realizzazione di motori meno inquinanti, nonché la necessità di superare i limiti di efficienza, e quindi di economicità di gestione, dei motori a scoppio, stanno favorendo lo sviluppo e la ricerca di nuove soluzioni.

In molti casi si tratta in realtà di un rinnovato interesse nei confronti di tecnologie già esistenti e collaudate, anche se mai sfruttate su larga scala commerciale: l'auto elettrica, ad esempio, risale addirittura alla prima metà dell'Ottocento, mentre il motore a idrogeno è stato progettato intorno al 1970. Il primo utilizzo dell'idrogeno per la produzione di energia è datato 1839, quando Sir William Grove riuscì a scindere la molecola dell'acqua in idrogeno e ossigeno combinando tre fuel cells in serie e collegandole a due elettrodi in una soluzione acida, operando la suddetta scissione.

Più recenti sono i motori ibridi, che combinano i vantaggi del motore elettrico (silenziosità, efficienza, assenza di emissioni) all'autonomia e alle prestazioni del motore termico.

Nel prosieguo, è effettuata una breve descrizione delle caratteristiche principali delle tecnologie di propulsione prese in esame, funzionale alla comprensione degli scenari analizzati nel testo.

4.1. PROPULSORI TRADIZIONALI

DISI (Direct Injection Spark Ignition)¹⁴

Motore a benzina ad accensione comandata e iniezione diretta: la miscela di aria e vapori di benzina viene innescata da una scintilla fatta scoccare tra gli elettrodi di una candela. L'iniezione avviene direttamente nella camera di combustione.

Il principale vantaggio consiste nella possibilità di alimentare il motore con miscele di aria e carburante più magre, diminuendo i consumi. E' necessario però garantirne l'accensione facendo in modo che nel volume che si trova intorno alla candela la concentrazione rispetti il rapporto stechiometrico.

PISI (Port Injection Spark Ignition)¹⁵

Motore ad accensione comandata come nel caso precedente, da cui si differenzia per l'iniezione di tipo indiretto; il processo consiste nell'iniettare il carburante (benzina), opportunamente polverizzato, nel collettore di aspirazione anziché direttamente nella camera di combustione.

Il collettore di aspirazione può essere di dimensioni superiori alle versioni installate nei motori ad iniezione diretta, migliorando così potenza e ripresa; si ha inoltre il vantaggio di utilizzare un solo iniettore per tutti i cilindri.

Lo svantaggio principale risiede nella minore omogeneità della miscelazione.

Rispetto all'iniezione diretta è un sistema che risulta più favorevole al riempimento per le seguenti ragioni:

- sono minori le perdite di carico in aspirazione, perché sono eliminati gli organi di preparazione della miscela del carburatore, anche se restano dei sensori della portata dell'aria;
- il riscaldamento dei condotti, per assicurare uniformità nella distribuzione della miscela fra i cilindri, può essere ridotto od eliminato.

DICI (Direct Injection Compression Ignition)¹⁶

Motore diesel a compressione. L'accensione viene detta "spontanea" perché il combustibile viene iniettato, opportunamente polverizzato, nell'aria calda compressa, innescando l'autoaccensione.

^{14,15} Il paragrafo riprende concetti trattati più dettagliatamente nel volume di Ferrari, Giancarlo - "Motori a combustione interna", Il Capitello, 1992, Torino.

¹⁵ Il paragrafo riprende concetti trattati più dettagliatamente nel volume di Ferrari, Giancarlo - "Motori a combustione interna", Il Capitello, 1992, Torino.

L'iniezione avviene a valvola di aspirazione ormai chiusa ed il gruppo di alimentazione del combustibile non interferisce con l'aspirazione dell'aria, per cui non si ha in questo caso alcuna influenza sul rapporto di carica.

Le principali differenze tra motore Diesel e benzina sono così riassunte:

Vantaggi

- migliore rendimento globale grazie alla possibilità di raggiungere rapporti di compressione più elevati;
- peggioramento del rendimento al diminuire del carico inferiore rispetto al motore a benzina;
- utilizzo di combustibili meno pregiati, la cui produzione in raffineria richiede un dispendio energetico inferiore.

Svantaggi

- elevato peso specifico in rapporto alla potenza sviluppata;
- maggiore lentezza del processo di combustione che, unita alle grandi masse in gioco, impedisce di raggiungere elevati regimi di rotazione (e dunque potenza specifica per unità di cilindrata inferiore rispetto ai modelli a benzina);
- ruvidezza della combustione che si traduce in un aumento delle vibrazioni e della rumorosità.

Se ne può concludere che il motore Diesel trova impiego privilegiato nelle applicazioni che prevedono un'esigenza di consumi ridotti a discapito dei problemi di peso e di ingombro; il motore Otto risulta invece particolarmente indicato per coprire il campo delle basse potenze, nonché per le applicazioni che richiedono leggerezza e fluidità di esercizio.

Il motore Diesel può essere associato ad un filtro antiparticolato che abbatta le emissioni di polveri sottili; la sua presenza incide sulle prestazioni energetiche ed ambientali: per questo motivo nel prosieguo dell'analisi sono state prese in considerazione entrambe le opzioni.

4.2. PROPULSORI INNOVATIVI

PROPULSORI IBRIDI¹⁷

Le vetture ibride integrano un motore termico ed uno elettrico, alimentato da una batteria elettrica. La soluzione più utilizzata è la connessione in parallelo, in cui il motore elettrico viene connesso direttamente alle ruote tramite una cinghia di trasmissione, in modo da ottenere una rotazione sincrona con quella prodotta dal motore termico; la coppia risultante è pertanto la somma di entrambi i propulsori. Il motore elettrico può funzionare sia come propulsore che come dinamo, accumulando energia nelle fasi di decelerazione della vettura ed effettuando la ricarica della batteria, aumentando in tal modo l'efficienza complessiva della vettura.

Un sistema più complesso prevede invece due dispositivi elettrici, uno per muovere la vettura (propulsione) e l'altro per generare l'elettricità di servizio (batteria ausiliaria); tale configurazione è stata adottata sulla Toyota Prius.

Le vetture ibride sono state inizialmente ideate per essere usate in versione "charge sustaining" come accumulatori di carica, in modo da aumentare l'efficienza complessiva del veicolo.

I primi modelli realizzati prevedevano l'utilizzo del motore elettrico a basse velocità nel ciclo urbano, al quale subentrava poi il motore a combustione per le lunghe percorrenze; la ricarica delle batterie era affidata all'energia recuperata durante la marcia con alimentazione a benzina.

La nuova generazione, nota come "plug-in", consente invece la ricarica dalla presa di corrente come i modelli completamente elettrici; la batteria è generalmente più capiente rispetto ai modelli ibridi puri, in quanto la maggior autonomia richiede una quantità di energia superiore, solitamente pari a un incremento da 1-2 a 9-10 kWh.

¹⁷ Il presente paragrafo riprende concetti trattati più dettagliatamente nel volume di Kutz, Myer - "Environmentally conscious transportation", Wiley 2008.

PROPULSORI ELETTRICI A FUEL CELLS¹⁸

Il principio di funzionamento delle fuel cells è stato ideato e dimostrato per la prima volta nel 1839 da Sir William Grove, ma di è dovuto attendere fino alla seconda metà del XIX secolo per vederne lo sviluppo, grazie al loro inserimento all'interno di programmi di ricerca dell'industria aerospaziale. Tuttavia, malgrado gli sforzi operati negli anni '70 e '80 soprattutto negli Stati Uniti ed in Giappone, la tecnologia delle fuel cells è ancora oggi vista come una risorsa futura ancora lontana da uno sfruttamento commerciale¹⁹.

La necessità di sviluppare nuovi sistemi di immagazzinamento dell'energia che non producano emissioni sembra aver però accelerato l'urgenza di poter disporre di tecnologie “pulite”, per cui si è recentemente assistito ad un rinnovamento dell'interesse nei confronti delle celle a combustibile.

La cella a combustibile è un dispositivo elettrochimico progettato per trasformare direttamente l'energia chimica in energia elettrica in corrente continua, utilizzabile per alimentare carichi elettrici. Al contrario dei motori termici, la trasformazione avviene in assenza di un ciclo termodinamico basato su una reazione di combustione, ma attraverso lo sfruttamento di due semi-reazioni elettrochimiche redox. Tale dispositivo è quindi definibile come un convertitore elettrochimico. E' costituita da due elettrodi, uno positivo (catodo) e uno negativo (anodo), tra i quali si frappone un elettrolita solido (una membrana polimerica: nelle attuali celle commerciali si utilizza un polimero commerciale noto come Nafion) che permette la conduzione dei soli ioni H⁺ dall'anodo verso il catodo.

All'anodo viene fornito idrogeno gassoso (ad elevato grado di purezza nelle attuali celle commerciali), e sull'elettrodo, per mezzo di un materiale catalizzatore (solitamente platino), viene ossidato in protoni ed elettroni. I protoni migrano verso il catodo attraverso la membrana polimerica, mentre gli elettroni, ai quali la conduzione è impedita, migrano verso il catodo passando attraverso un circuito esterno, generando una corrente elettrica. Al catodo, contemporaneamente, viene fornito ossigeno (solitamente aria), che si riduce, sempre con l'aiuto di un catalizzatore (platino), con i protoni provenienti dalla membrana e con gli elettroni provenienti dal circuito esterno, generando acqua secondo le due semi-reazioni elettrochimiche anodica e catodica, e la reazione completa di sintesi dell'acqua:

anodo (*ossidazione idrogeno*)



catodo (*riduzione ossigeno*)



reazione completa



Dunque il prodotto della combustione è acqua sotto forma di vapore in aria (aria umida). A differenza della batteria elettrica, in cui il processo si arresta una volta esaurita la carica, in una fuel cell la reazione può continuare finchè viene fornito il combustibile. Da qui l'importanza dello stoccaggio dell'idrogeno a bordo dell'autovettura, sicuramente uno dei limiti principali dell'attuale tecnologia, anche in considerazione della scarsa densità energetica del gas su base volumica.

Per l'utilizzo in cicli misti tipico dei mezzi privati la soluzione migliore sono al momento le bombole di gas compresso, la cui tecnologia si è sviluppata moltissimo negli ultimi anni, permettendo di resistere fino ad una pressione nominale di 70 MPa (circa 700 volte la pressione atmosferica).

I principali vantaggi delle fuel cells sono:

- assenza di limiti di efficienza termodinamica legati al ciclo di Carnot
- bassa temperatura di esercizio (circa 80°C)

¹⁸ Il presente paragrafo riprende concetti trattati più dettagliatamente nel volume di Kutz, Myer - “Environmentally conscious transportation”, Wiley 2008.

¹⁹ Larminie, James & Dicks, Andrew - “Fuel Cells Explained (Second Edition), Wiley 2003.

- alta densità energetica
- assenza di emissioni
- silenziosità

I principali svantaggi sono invece:

- necessità di gas ad alta purezza
- costi
- degradabilità dei materiali e dei componenti
- problematica gestione dell'aria, del calore e dell'acqua

PROPULSORI ELETTRICI A BATTERIA²⁰

Benchè lo sviluppo delle batterie sia datato a più di 30 anni fa, le tecnologie utilizzate attualmente si riducono a pochi esemplari: tra le più diffuse si possono citare le batterie basate su elettroliti al piombo, nickel-metallo idruro, ioni di litio e polimeri di litio.

L'elemento base di una batteria è la cella, o accumulatore, composta da tre elementi: una coppia di piastre, anodo e catodo, ed un liquido nel quale sono immerse, detto elettrolita. Chiudendo il circuito elettrico tra le due piastre, si genera una differenza di potenziale tra le due piastre a cui fa seguito una corrente elettrica che produce riduzione ad un elettrodo e ossidazione all'altro. Assemblando più celle si ottiene la batteria vera e propria, dunque sarebbe più corretto parlare di batteria di accumulatori.

Le prestazioni dei vari modelli sono ben rappresentate da due caratteristiche fondamentali: potenza specifica (W/kg) ed energia specifica (Wh/kg), che possono assumere un ampio range di valori in funzione della configurazione delle celle e dei moduli utilizzati; generalmente alti valori di uno dei due parametri corrispondono a bassi valori dell'altro.

Attualmente le batterie al piombo sono le più diffuse grazie ai costi contenuti. Hanno tuttavia una notevole serie di svantaggi: hanno bassa densità di energia e sono dunque molto pesanti; sono inoltre altamente inquinanti nella fase di dismissione delle batterie stesse (a fine ciclo vita).

Soffrono inoltre dell'effetto memoria: si tratta di un difetto tipico degli accumulatori che consiste nella non completa reversibilità dei cicli di carica/scarica, con la conseguente riduzione della capacità della batteria.

La progettazione mirata ad un uso in vetture ibride deve necessariamente tenere conto di fattori quali il peso complessivo, il tempo e il numero di cicli di ricarica.

Ioni di litio

Al momento il futuro delle batterie destinate alla mobilità sembra orientato verso la tecnologia degli ioni di litio. L'ostacolo principale alla loro diffusione risiede negli alti costi di produzione, per i quali si prevede un progressivo abbassamento con il progredire della tecnologia produttiva e l'aumento della domanda.

I vantaggi sono notevoli. Si elencano di seguito i più importanti:

- Assenza dell'effetto memoria.
- Auto-scarica quasi assente
- Alta densità energetica
- Possibilità di rigenerazione “pulita”

Tra gli svantaggi, oltre ai già citati costi di produzione, si trovano la durata limitata nel tempo, in quanto la batteria esaurisce il suo potenziale indipendentemente dal fatto che venga usata o meno, e la notevole reattività al calore, che richiede misure di sicurezza adeguate.

²⁰ Il presente paragrafo riprende concetti trattati più dettagliatamente nel volume di Kutz, Myer - “Environmentally conscious transportation”, Wiley 2008.

5. L'ANALISI WELL-TO-WHEEL²¹

L'indice well-to-wheel è un indicatore assoluto, nato per analisi strettamente energetiche, ma può essere applicato, senza particolari difficoltà, anche a riflessioni di carattere ambientale: è sufficiente, infatti, considerare le emissioni di gas inquinanti al posto dei consumi. La funzione dell'indice WTW è di rendere confrontabili tra loro combinazioni di diverse tecnologie propulsive e diversi carburanti, sia dal punto di vista dell'efficienza in quanto mezzo di trasporto, che del rendimento della tecnologia che permette di ottenere il carburante – benzina, cherosene, ecc. – o il vettore energetico usato nei trasporti – elettricità ma anche idrogeno. L'indice WTW, infatti, riduce tutte le spese energetiche in termini assoluti (Joule) e, quindi, permette il confronto, in termini scientifici ed oggettivi, tra fonti e vettori energetici diversi. Esso considera la quantità di energia necessaria per rendere disponibile un carburante su di un'auto partendo dalla fonte primaria di energia (estrazione, processi chimici e trasporto) e la quantità di energia usata per muovere un'auto per una determinata distanza (funzione della combinazione del carburante e della tecnologia propulsiva). L'analisi energetica delle varie opzioni legate ai trasporti è ora completa e molto più aderente alla realtà, perché oltre a paragonare il rendimento del motore vero e proprio, permette il confronto delle efficienze dei processi produttivi e delle catene di distribuzione di diversi carburanti, che possono essere ottenuti da fonti energetiche primarie completamente diverse.

L'indice well-to-wheel, definibile come *l'integrazione di tutti i processi richiesti per produrre e distribuire un combustibile (iniziando dalla risorsa energetica primaria) e utilizzarlo in un veicolo*, è costituito dalla combinazione di due più specifici sottoindici: il well-to-tank (WTT, dal pozzo al serbatoio) e il tank-to-wheel (TTW, dal serbatoio alla ruota).

Il WTT, definibile come *la cascata dei passaggi richiesti per produrre e distribuire un combustibile (iniziando dalla risorsa energetica primaria), incluso il rifornimento del veicolo*, considera l'ammontare di energia necessario per rendere disponibile un carburante dalla fonte energetica primaria (estrazione, processo chimico e distribuzione) fino al rifornimento nel serbatoio dell'automobile; solitamente viene espresso in MJ/MJ_f , dove MJ_f è l'energia contenuta nel carburante immagazzinato nel serbatoio del veicolo e MJ_t è l'energia primaria totale spesa per rendere disponibile un MJ di carburante. Alcuni studi forniscono questo indice in MJ_{ex}/MJ_f , indicando con il termine a numeratore, non l'energia totale per fornire una unità di energia di carburante, ma l'energia spesa, e quindi persa, per ottenere quell'unità energetica di carburante. Altri studi considerano invece l'indice well-to-pump al posto del WTT, intendendo quindi la pompa della stazione di rifornimento, e non il serbatoio dell'auto, come l'elemento discriminatore tra i due componenti dell'indice well-to-wheel.

Il TTW, definibile come *la descrizione della combustione di un carburante in un veicolo*, considera l'ammontare di energia usato per muovere un'automobile per una determinata distanza, dipendente evidentemente dalla combinazione del carburante e della tecnologia propulsiva usata. Rappresenta, più intuitivamente, il consumo specifico di carburante ed è la componente più nota della catena del consumo energetico di un veicolo. Solitamente è espresso in MJ_l/km o in $MJ_l/100 km$ e rappresenta quindi la quantità di energia usata per muovere un veicolo per 1 o 100 chilometri; è calcolato facendo riferimento ad un ciclo urbano standard. A rigore si dovrebbe sempre parlare di consumo energetico specifico medio, dal momento che lo si quantifica sulla base di un ciclo di guida standard, diverso tra USA ed Europa, che simula un determinato percorso urbano – solitamente in Europa – o anche extraurbano – in America – con caratteristiche diffuse di altimetria e di fermate ai semafori che possono essere ragionevolmente considerabili rappresentativi delle condizioni medie delle strade europee o americane. Il ciclo europeo, chiamato NEDC – New European Drive Cycle, prevede la partenza a freddo, un primo periodo di guida urbana di 780 secondi (un percorso di poco più di 1 km percorso quattro volte) ed un secondo periodo di guida extraurbana (quasi 7 km) della durata di 400 secondi.

Dal punto di vista analitico, la valutazione dell'indice WTW è fornita dalla prima relazione se il WTT è fornito in MJ_l/MJ_f o dalla seconda se in MJ_{ex}/MJ_f :

²¹ Il presente capitolo è tratto dalla tesi di laurea di Ricagno, Roberto – “Sostenibilità e condizionamento energetico della mobilità e dei trasporti nel XXI secolo: tipologie e prospettive d'impiego dei sistemi ad uso condiviso”, Politecnico di Torino, 2007.

$$WTW \left[\frac{MJ_t}{km} \right] = WTT \left[\frac{MJ_t}{MJ_f} \right] \cdot TTW \left[\frac{MJ_f}{km} \right] \quad [4.1]$$

$$WTW \left[\frac{MJ_t}{km} \right] = \left(WTT \left[\frac{MJ_{ex}}{MJ_f} \right] + 1 \right) \cdot TTW \left[\frac{MJ_f}{km} \right] \quad [4.2]$$

L'indice WTW può essere applicato anche ad altri sistemi di trasporto, anche se quelli ad uso condiviso presentano il già sottolineato problema che è necessario definirli in termini di MJ/pkm perché altrimenti non hanno nessun significato pratico; di questo argomento si discuterà nel capitolo successivo.

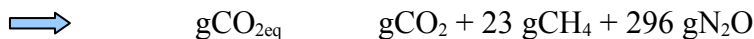
Come già accennato in precedenza, è possibile calcolare l'indice well-to-wheel anche dal punto di vista del rendimento ambientale delle tecnologie propulsive e dei carburanti. In questo caso si devono però accettare delle approssimazioni più forti perché la definizione delle emissioni nocive in ambiente non è così scientifica come il consumo di energia, sia nella fase di produzione di energia che in quella di utilizzo. Inoltre, non va dimenticato che l'usura dei motori e la non perfetta manutenzione possono incrementare tali emissioni: in questa sede si è fatto necessariamente riferimento a dati standard che non tengono conto di quest'ultimo fattore. L'indice well-to-wheel ambientale, per distinguerlo da quello energetico, viene qui indicato con WTW_{EM} (dove il pedice EM indica le *emissioni di agenti inquinanti*) ed è anch'esso composto dai due sottoindici well-to-tank (WTT_{EM}) e tank-to-wheel (TTW_{EM}); il primo quantifica i grammi di sostanze inquinanti emessi durante le fasi di estrazione, produzione e trasporto di ogni MJ di carburante, indicato con MJ_f , il secondo i grammi di sostanze nocive emessi durante la fase di utilizzazione del carburante per ogni chilometro percorso dal veicolo.

L'indice WTW_{EM} può essere valutato mediante l'espressione se si dispone di dati WTT_{EM} in grammi/energia di combustibile:

$$WTW_{EM} \left[\frac{g}{km} \right] = WTT_{EM} \left[\frac{g}{MJ_f} \right] \cdot TTW \left[\frac{MJ_f}{km} \right] + TTW_{EM} \left[\frac{g}{km} \right] \quad [4.3]$$

Riassumendo, l'indice WTW considera l'energia totale usata per ogni chilometro coperto da un'automobile, mentre il corrispondente indice WTW_{EM} considera l'ammontare totale, dalla prima operazione di estrazione della fonte energetica all'utilizzo del carburante, di sostanze inquinanti emesse per ogni chilometro coperto da un'automobile.

Da notare che il metano (CH_4) e il diossido di azoto (N_2O), pur rivestendo una quota marginale delle emissioni totali, sono caratterizzati da un "warming potential" rispettivamente pari a 23 e 296 volte quello della CO_2 . La formula per il calcolo della CO_{2eq} è la seguente.



Il concetto di CO_2 equivalente permette di unificare in un unico indicatore il contributo di gas diversi.

Per effettuare una analisi WTW, sono stati utilizzati i dati forniti da EUCAR (European Council for Automotive Research & Development), CONCAWE (Conservation of Clean Air and Water in Europe) e JRC (Joint Research Center of the EU Commission), i quali hanno cooperato ad un progetto di ricerca mirato alla valutazione dei costi energetici e delle emissioni correlati all'uso e alla produzione dei carburanti nell'Europa del 2010. Il progetto originale, risalente al 2003, è stato aggiornato nel 2007 e comprende motorizzazioni che nel mercato attuale occupano un posto di nicchia o sono presenti solo a livello di prototipo.

A partire da tali dati è stato possibile simulare un'analisi di sensitività il cui obiettivo è di valutare, al variare delle possibili future evoluzioni del mercato dei carburanti e dei propulsori, lo scenario che soddisfa i requisiti di emissioni proposti dalla Comunità Europea, minimizzando l'impatto ambientale e il consumo energetico

5.1. IPOTESI

Si elencano nel prossimo paragrafo le ipotesi prese in considerazione per l'impostazione del problema. Alcune di esse si riferiscono a situazioni attuali e reali, come ad esempio le quote del mercato automobilistico aggiornate al 2008; altre sono invece proiezioni mirate a prevedere l'evoluzione tecnologica in un periodo di tempo attinente allo studio in questione.

1) *Quote di mercato*

Le quote di mercato per i carburanti tradizionali fanno riferimento al 2008 e sono così suddivise²²:

Diesel	55,3%
Benzina	43,2%
Gpl	1,1%
Gas naturale	0,2%.

Appare evidente come la situazione attuale sia un monopolio quasi esclusivo del Diesel e della Benzina, che da soli soddisfano quasi il 99% del mercato.

2) *Ciclo della CO₂ per i biofuels*

Per i biofuel sono stati presi in considerazione sia il ciclo aperto che il ciclo chiuso. Il ciclo chiuso ha il suo fondamento teorico nell'assunto che ogni specie vegetale, durante la sua vita, assorbe la stessa quantità di carbonio (e quindi di anidride carbonica) che libererà nel caso in cui un carburante di produzione biologica (biofuel) venga utilizzato per la propulsione di un veicolo, annullando di fatto la quantità di emissioni totali.

Al contrario il ciclo aperto attenua tale ipotesi, assegnando ad ogni carburante di provenienza biologica le emissioni specifiche effettuate durante l'utilizzo come carburanti.

3) *Emissioni di CO₂ negative*

I processi di produzione di etanolo e biodiesel permettono, grazie all'utilizzo degli scarti della lavorazione, di generare e immettere nella rete elettrica un surplus energetico che genera un credito di emissioni. Il significato di un valore WTT ambientale negativo è dunque da intendersi come un risparmio di emissioni dovuto alla mancata produzione di un certo ammontare di energia elettrica tramite fonti fossili.

4) *Veicolo medio di riferimento*

Come riferimento è stato preso un veicolo virtuale medio a cinque posti, dalle dimensioni e prestazioni paragonabili a quelle di una Volkswagen Golf del 2002 con motore PISI. Al veicolo sono poi state applicate alcune prestazioni "soglia" minime, in modo da escludere le combinazioni carburante-propulsore non in grado di soddisfarle. Le caratteristiche sono riportate nella tabella seguente²³:

- accelerazione 0-50 km/h: < 4 s
- accelerazione 0-100 km/h: < 13 s
- ripresa da 80 a 120 km/h < 13 s
- velocità massima: > 180 km/h
- accelerazione > 4 m/s²
- autonomia: > 600 km
- massima pendenza superabile a 1 km/h: > 30%

²² CONCAWE, EUCAR, Joint Research Center, "Well-To-Wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the european context", 2007.

²³ CONCAWE, EUCAR, Joint Research Center, "Well-To-Wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the european context", 2007.

5) Filtro antiparticolato

Il filtro antiparticolato è un dispositivo opzionale abbinato alle motorizzazioni diesel, il cui scopo è l'abbattimento del particolato presente nei gas di scarico.

L'effetto viene ottenuto imprigionando le polveri sottili in una matrice di struttura alveolare in grado di catturarli. Il materiale raccolto viene poi bruciato durante i percorsi extraurbani durante la fase di pulizia del filtro.

Proprio a causa di queste iniezioni supplementari di carburante, la presenza del filtro antiparticolato (DPF) aumenta i consumi per una quantità stimata pari al 2,5%²⁴.

6) Evoluzione dei motori nel periodo 2002-2010

Il “reference case” di questo lavoro è riferito al 2010. Trattandosi di una data, al momento della stesura del rapporto in oggetto, ancora futura, le prestazioni ed i consumi delle tecnologie propulsive sono state calcolate incrementando l'efficienza dei veicoli reali disponibili nel 2002 secondo le percentuali riportate nella tabella seguente²⁵:

Benzina PISI:	+15%
Benzina DISI:	+10%
GPL PISI Bi-fuel:	+15%
Diesel DICI (no DPF):	+6%
Diesel DICI (sì DPF):	+3,5%
NG PISI Bi-fuel:	+17%
NG PISI Dedicated:	+16%

Lo stesso procedimento è stato applicato per le propulsioni ibride, facendo riferimento ancora una volta alle motorizzazioni reali presenti nel 2002 secondo la seguente tabella²⁶:

Benzina PISI:	+27,7%
Benzina DISI:	+21,9%
Diesel DICI (sì DPF):	+20,5%
NG PISI:	+37,4%
L-H ₂ PISI:	+15,6%

7) Consumo di biofuels

Per i carburanti alternativi alla benzina (etanolo) e al diesel (biodiesel e synthetic diesel) è stato assunto che il consumo energetico fosse lo stesso sia per l'utilizzo puro che per le miscele, assegnando loro di fatto un carattere di neutralità nei confronti dell'efficienza durante la fase di combustione nel motore. Le corrispondenti emissioni sono state calcolate sulla base del dato formato dalle due componenti: ad esempio il mix 95/5 (95% di combustibile fossile e 5% di biocombustibile) produce un'emissione complessiva pari alla somma delle emissioni dei due carburanti da cui è formato, ciascuna pesata per la propria percentuale volumetrica

8) GPL

Per il GPL è stato considerato un motore bi-fuel in cui l'efficienza della benzina e del gas di petrolio liquefatto si equivalgono.

^{24,25} CONCAWE, EUCAR, Joint Research Center, “Well-To-Wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the european context ”, 2007.

²⁶ CONCAWE, EUCAR, Joint Research Center, “Well-To-Wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the european context ”, 2007.

6. ANALISI DATI WELL-TO-WHEEL²⁷

6.1. WELL-TO-TANK:CONSIDERAZIONI ENERGETICHE

Per permettere una lettura più intuitiva dei risultati, l'indice well-to-tank, originariamente espresso per mezzo del rapporto tra energia spesa e energia fornita, è stato qui convertito in MJ/100km, la stessa unità di misura del dell'indice tank-to-wheel. In tal modo il dato well-to-tank rappresenta l'energia spesa per produrre la quantità di energia necessaria per spostare un veicolo a propulsione nota di 100 km.

WTT ENERGETICO								
		ENERGY (MJ/100 km)				GHG (g CO ₂ eq/km)		
		TOTAL			FOSSIL	TTW	WTT	WTW
		TTW	WTT	WTW	WTW	CO ₂ eq	CO ₂ eq	CO ₂
Elettrica (da eolica)	Lt-Ion	110	3	113		0	0	0
Gas Naturale (mix-EU)	PISI hybrid	139	17	156		81	12	92
Gas Naturale (mix-EU)	PISI dedicated 2010	187	22	209		108	16	123
Gas Naturale (mix-EU)	PISI bi-fuel 2010	188	22	210		108	16	124
GPL	PISI 2010	190	22	212		126	15	141
Benzina	PISI hybrid	162	22	184		120	20	140
Diesel	DICI hybrid DPF	146	23	169		108	21	129
Benzina	Reformer + FC	162	23	185		120	20	140
Benzina	DISI hybrid	163	23	186		121	20	141
Diesel	DICI hybrid no DPF	141	23	164		105	20	125
Diesel	Reformer + FC	162	26	188		121	23	144
Benzina	DISI 2010	188	26	214		139	24	162
Benzina	PISI 2010	190	26	216		140	24	164
Diesel	DICI 2010 no DPF	172	27	199		128	24	152
Diesel	DICI 2010 DPF	177	28	205		131	25	156
Biodiesel 95/5 (da colza)	DICI hybrid no DPF	141	30	171	158	106	16	122
Biodiesel 95/5 (da cellulosa)	DICI hybrid no DPF	141	30	171	156	105	14	119
Biodiesel 95/5 (da colza)	DICI hybrid DPF	146	31	177	164	109	17	126
Biodiesel 95/5 (da cellulosa)	DICI hybrid DPF	146	31	177	161	108	15	123
Bioetanolo 95/5 (da grano)	DISI Hybrid	163	36	199	184	120	18	139
Bioetanolo 95/5 (da canna da zucchero)	DISI Hybrid	163	36	199	177	120	14	135
Biodiesel 95/5 (da colza)	DICI 2010 no DPF	172	36	208	193	128	21	149
Biodiesel 95/5 (da cellulosa)	DICI 2010 no DPF	172	36	208	190	128	18	145
Biodiesel 95/5 (da colza)	DICI 2010 PDF	177	37	214	198	132	21	153
Biodiesel 95/5 (da cellulosa)	DICI 2010 PDF	177	37	214	195	131	18	149
Bioetanolo 95/5 (da cellulosa)	DISI Hybrid	163	37	200	179	120	15	136
Gas Naturale (Siberia)	PISI hybrid	139	41	181		81	30	111
Bioetanolo 95/5 (da canna da zucchero)	DISI 2010	188	42	230	204	139	17	155
Bioetanolo 95/5 (da grano)	PISI 2010	190	42	232	214	140	21	162
Bioetanolo 95/5 (da canna da zucchero)	PISI 2010	190	42	232	206	140	17	157
Bioetanolo 95/5 (da grano)	DISI 2010	188	42	230	212	139	21	160
Bioetanolo 95/5 (da cellulosa)	DISI 2010	188	43	231	206	139	17	156
Bioetanolo 95/5 (da cellulosa)	PISI 2010	190	44	234	208	140	18	158
Gas Naturale (Siberia)	PISI bi-fuel 2010	188	56	244		108	41	149
Gas Naturale (Siberia)	PISI dedicated 2010	187	56	243		108	41	148
Idrogeno (da elettrolisi eolica)	FC hybrid	84	66	150	16	0	8	8
Idrogeno (da reforming Gas Naturale)	FC hybrid	84	71	155		0	88	88
Idrogeno (da elettrolisi eolica)	FC	94	74	168	18	0	9	9

²⁷ Tutti i dati e le tabelle riportati in questo capitolo sono tratti dalla pubblicazione ad opera di CONCAWE, EUCAR e Joint Research Center, "Well-To-Wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the european context", 2007.

WTT ENERGETICO								
		ENERGY (MJ/100 km)			GHG (g CO ₂ eq/km)			
		TOTAL			FOSSIL	TTW	WTT	WTW
		TTW	WTT	WTW	WTW	CO ₂ eq	CO ₂ eq	CO ₂
Idrogeno (da reforming Gas Naturale)	FC	94	79	173		0	98	98
Idrogeno (da elettrolisi eolica)	PISI hybrid	149	117	265	29	0	14	14
Idrogeno (da reforming Gas Naturale)	PISI hybrid	149	125	274		0	155	156
Idrogeno (da elettrolisi eolica)	PISI 2010	168	132	299	32	0	15	16
Synth Diesel puro (da Carbone)	DICI hybrid no DPF	141	137	278		102	182	284
Idrogeno (da reforming Gas Naturale)	PISI 2010	168	141	309		0	175	176
Synth Diesel puro (da Carbone)	DICI hybrid DPF	146	142	287		105	188	293
Synth Diesel puro (da Carbone)	DICI 2010 no DPF	172	167	339		124	222	346
Biodiesel puro (da colza)	DICI hybrid no DPF	141	168	309	65	109	-41	69
Biodiesel puro (da cellulosa)	DICI hybrid no DPF	141	168	310	9	102	-93	8
Synth Diesel puro (da Carbone)	DICI 2010 PDF	177	172	348		127	228	355
Biodiesel puro (da colza)	DICI hybrid DPF	146	173	319	67	113	-42	71
Biodiesel puro (da cellulosa)	DICI hybrid DPF	146	174	319	9	105	-96	9
Biodiesel puro (da colza)	DICI 2010 no DPF	172	205	377	79	133	-50	83
Biodiesel puro (da cellulosa)	DICI 2010 no DPF	172	205	378	11	124	-114	10
Elettrica (da mix europeo)	Lt-Ion	110	206	316		0	142	142
Biodiesel puro (da colza)	DICI 2010 DPF	177	210	387	81	136	-51	85
Biodiesel puro (da cellulosa)	DICI 2010 DPF	177	211	388	12	127	-117	10
Bioetanolo puro (da grano)	DISI Hybrid	163	290	453	144	118	-20	98
Bioetanolo puro (da canna da zucchero)	DISI Hybrid	163	292	455	4	118	-99	19
Elettrica (da nucleare)	Lt-Ion	110	301	411		0	5	5
Idrogeno (da elettrolisi mix EU)	FC hybrid	84	304	387		0	174	174
Bioetanolo puro (da cellulosa)	DISI Hybrid	163	316	479	44	118	-81	37
Bioetanolo puro (da grano)	DISI 2010	188	334	522	167	136	-23	113
Bioetanolo puro (da canna da zucchero)	DISI 2010	188	337	525	4	136	-115	21
Bioetanolo puro (da grano)	PISI 2010	190	338	528	168	137	-23	114
Idrogeno (da elettrolisi mix EU)	FC	94	340	434		0	196	196
Bioetanolo puro (da canna da zucchero)	PISI 2010	190	341	531	4	137	-116	22
Bioetanolo puro (da cellulosa)	DISI 2010	188	365	553	50	136	-93	43
Bioetanolo puro (da cellulosa)	PISI 2010	190	369	559	51	137	-94	43
Idrogeno (da elettrolisi nucleare)	FC hybrid	84	421	504	16	0	6	6
Idrogeno (da elettrolisi nucleare)	FC	94	472	566	18	0	7	7
Idrogeno (da elettrolisi mix EU)	PISI hybrid	149	538	686		0	309	309
Idrogeno (da elettrolisi mix EU)	PISI 2010	168	607	774		0	349	349
Idrogeno (da elettrolisi nucleare)	PISI hybrid	149	746	895	29	0	10	11
Idrogeno (da elettrolisi nucleare)	PISI 2010	168	842	1010	32	0	12	12

CARBURANTI FOSSILI

- I tradizionali carburanti di origine fossile (benzina, diesel, gpl e gas naturale) hanno un'ottima efficienza dovuta all'ottimizzazione della catena produttiva, e come valore medio si ha 23 MJ/100km

BIOFUELS

- I biocarburanti miscelati nelle proporzioni 95-5 (95% fossile, 5% biofuel) hanno una buona efficienza dovuta all'alta percentuale di combustibile di origine fossile, pur essendo meno performanti dei fossili puri. Il biodiesel è superiore all'etanolo, attestandosi su consumi medi pari a 35 MJ/100km circa, contro i 40 MJ/100km dell'etanolo.
- I biofuels puri hanno costi energetici da 5 ad 8 volte più elevati rispetto ai combustibili di origine fossile: il biodiesel, come già sottolineato, rimane più efficiente (valor medio 190MJ/100km) rispetto al bioetanolo (valor medio 331MJ/100km).

IDROGENO

- Nella analisi WTT, come già anticipato, l'efficienza della produzione di idrogeno dipende non solo dal processo utilizzato, ma in gran parte anche dalla tecnologia di autotrazione in cui esso verrà poi impiegato: da un'attenta analisi dei dati WTT (che, si ricorda, sono espressi in funzione della distanza percorsa) si evince infatti come l'idrogeno sia particolarmente sensibile a questo aspetto.
- L'idrogeno associato alle fuel cells ibride è la soluzione migliore nel caso in cui sia prodotto tramite elettrolisi da energia eolica (66MJ/100km) o da reforming del gas naturale (71 MJ/100km); è energeticamente molto sfavorevole se ottenuto invece tramite elettrolisi da mix europeo (340 MJ/100km) o da nucleare (472 MJ/100km).
- Usato in motori PISI l'idrogeno peggiora e in particolare i valori più critici si hanno quando è prodotto da elettrolisi in mix europeo o nucleare: da 538 fino a 842 MJ/100km.
- L'idrogeno da elettrolisi da eolico o da reforming di gas naturale ha comunque un WTT energetico sempre minore rispetto ai biocombustibili puri, sia a parità di propulsore, ma anche nel caso di propulsore peggiore.

ELETTRICITA'

- L'elettrica varia dall'ottima efficienza della produzione da fonti rinnovabili (eolico, 3 MJ/100km), a quelle modeste da mix europeo (206 MJ/100km) e nucleare (301 MJ/100km).
- L'elettrica da mix europeo è molto penalizzata: è meglio del solo bioetanolo puro (in qualunque propulsore), dei biodiesel puri con propulsioni scadenti (DICI semplici), e dell'idrogeno da elettrolisi in mix EU
- Peggio ancora il risultato ottenuto da elettrica da nucleare, a cui sono da preferire tutti i biodiesel puri
- L'elettricità prodotta da energia rinnovabile (eolica) accoppiata al motore elettrico e alle batterie agli ioni di litio ha l'efficienza di gran lunga migliore (3 MJ/100km).

ALTRI

- Il Synth Diesel puro da carbone sembra comportarsi meglio del biodiesel puro a parità di propulsore; si comporta meglio anche del bioetanolo puro, ma in questo caso perché ha un vantaggio della sua possibilità di utilizzo in un miglior propulsore (DICI).

6.2. TANK-TO-WHEEL: CONSIDERAZIONI ENERGETICHE

TTW ENERGETICO		ENERGY (MJ/100 km)				GHG (g CO ₂ eq/km)		
		TOTAL			FOSSIL	TTW	WTT	WTW
		TTW	WTT	WTW	WTW	CO ₂ eq	CO ₂ eq	CO ₂
Idrogeno (da elettrolisi mix EU)	FC hybrid	84	304	387		0	174	174
Idrogeno (da elettrolisi nucleare)	FC hybrid	84	421	504	16	0	6	6
Idrogeno (da reforming Gas Naturale)	FC hybrid	84	71	155		0	88	88
Idrogeno (da elettrolisi eolica)	FC hybrid	84	66	150	16	0	8	8
Idrogeno (da elettrolisi eolica)	FC	94	74	168	18	0	9	9
Idrogeno (da reforming Gas Naturale)	FC	94	79	173		0	98	98
Idrogeno (da elettrolisi mix EU)	FC	94	340	434		0	196	196
Idrogeno (da elettrolisi nucleare)	FC	94	472	566	18	0	7	7
Elettrica (da nucleare)	Lt-Ion	110	301	411		0	5	5
Elettrica (da mix europeo)	Lt-Ion	110	206	316		0	142	142
Elettrica (da eolica)	Lt-Ion	110	3	113		0	0	0
Gas Naturale (mix-EU)	PISI hybrid	139	17	156		81	12	92
Gas Naturale (Siberia)	PISI hybrid	139	41	181		81	30	111
Diesel	DICI hybrid no DPF	141	23	164		105	20	125
Biodiesel puro (da colza)	DICI hybrid no DPF	141	168	309	65	109	-41	69
Synth Diesel puro (da Carbone)	DICI hybrid no DPF	141	137	278		102	182	284
Biodiesel 95/5 (da cellulosa)	DICI hybrid no DPF	141	30	171	156	105	14	119
Biodiesel puro (da cellulosa)	DICI hybrid no DPF	141	168	310	9	102	-93	8
Biodiesel 95/5 (da colza)	DICI hybrid no DPF	141	30	171	158	106	16	122
Diesel	DICI hybrid DPF	146	23	169		108	21	129
Synth Diesel puro (da Carbone)	DICI hybrid DPF	146	142	287		105	188	293
Biodiesel 95/5 (da cellulosa)	DICI hybrid DPF	146	31	177	161	108	15	123
Biodiesel puro (da cellulosa)	DICI hybrid DPF	146	174	319	9	105	-96	9
Biodiesel 95/5 (da colza)	DICI hybrid DPF	146	31	177	164	109	17	126
Biodiesel puro (da colza)	DICI hybrid DPF	146	173	319	67	113	-42	71
Idrogeno (da elettrolisi nucleare)	PISI hybrid	149	746	895	29	0	10	11
Idrogeno (da elettrolisi eolica)	PISI hybrid	149	117	265	29	0	14	14
Idrogeno (da reforming Gas Naturale)	PISI hybrid	149	125	274		0	155	156
Idrogeno (da elettrolisi mix EU)	PISI hybrid	149	538	686		0	309	309
Diesel	Reformer + FC	162	26	188		121	23	144
Benzina	PISI hybrid	162	22	184		120	20	140
Benzina	Reformer + FC	162	23	185		120	20	140
Bioetanolo 95/5 (da canna da zucchero)	DISI Hybrid	163	36	199	177	120	14	135
Bioetanolo 95/5 (da grano)	DISI Hybrid	163	36	199	184	120	18	139
Bioetanolo puro (da canna da zucchero)	DISI Hybrid	163	292	455	4	118	-99	19
Benzina	DISI hybrid	163	23	186		121	20	141
Bioetanolo 95/5 (da cellulosa)	DISI Hybrid	163	37	200	179	120	15	136
Bioetanolo puro (da grano)	DISI Hybrid	163	290	453	144	118	-20	98
Bioetanolo puro (da cellulosa)	DISI Hybrid	163	316	479	44	118	-81	37
Idrogeno (da elettrolisi mix EU)	PISI 2010	168	607	774		0	349	349
Idrogeno (da reforming Gas Naturale)	PISI 2010	168	141	309		0	175	176
Idrogeno (da elettrolisi eolica)	PISI 2010	168	132	299	32	0	15	16
Idrogeno (da elettrolisi nucleare)	PISI 2010	168	842	1010	32	0	12	12
Biodiesel puro (da colza)	DICI 2010 no DPF	172	205	377	79	133	-50	83
Biodiesel 95/5 (da colza)	DICI 2010 no DPF	172	36	208	193	128	21	149
Diesel	DICI 2010 no DPF	172	27	199		128	24	152
Biodiesel 95/5 (da cellulosa)	DICI 2010 no DPF	172	36	208	190	128	18	145

TTW ENERGETICO								
		ENERGY (MJ/100 km)				GHG (g CO ₂ eq/km)		
		TOTAL			FOSSIL	TTW	WTT	WTW
		TTW	WTT	WTW	WTW	CO ₂ eq	CO ₂ eq	CO ₂
Biodiesel puro (da cellulosa)	DICI 2010 no DPF	172	205	378	11	124	-114	10
Synth Diesel puro (da Carbone)	DICI 2010 no DPF	172	167	339		124	222	346
Biodiesel puro (da cellulosa)	DICI 2010 DPF	177	211	388	12	127	-117	10
Synth Diesel puro (da Carbone)	DICI 2010 DPF	177	172	348		127	228	355
Biodiesel puro (da colza)	DICI 2010 DPF	177	210	387	81	136	-51	85
Diesel	DICI 2010 DPF	177	28	205		131	25	156
Biodiesel 95/5 (da colza)	DICI 2010 DPF	177	37	214	198	132	21	153
Biodiesel 95/5 (da cellulosa)	DICI 2010 DPF	177	37	214	195	131	18	149
Gas Naturale (Siberia)	PISI dedicated 2010	187	56	243		108	41	148
Gas Naturale (mix-EU)	PISI dedicated 2010	187	22	209		108	16	123
Bioetanolo puro (da canna da zucchero)	DISI 2010	188	337	525	4	136	-115	21
Bioetanolo 95/5 (da canna da zucchero)	DISI 2010	188	42	230	204	139	17	155
Benzina	DISI 2010	188	26	214		139	24	162
Bioetanolo puro (da cellulosa)	DISI 2010	188	365	553	50	136	-93	43
Bioetanolo 95/5 (da grano)	DISI 2010	188	42	230	212	139	21	160
Gas Naturale (Siberia)	PISI bi-fuel 2010	188	56	244		108	41	149
Gas Naturale (mix-EU)	PISI bi-fuel 2010	188	22	210		108	16	124
Bioetanolo 95/5 (da cellulosa)	DISI 2010	188	43	231	206	139	17	156
Bioetanolo puro (da grano)	DISI 2010	188	334	522	167	136	-23	113
Benzina	PISI 2010	190	26	216		140	24	164
Bioetanolo puro (da canna da zucchero)	PISI 2010	190	341	531	4	137	-116	22
Bioetanolo puro (da grano)	PISI 2010	190	338	528	168	137	-23	114
Bioetanolo 95/5 (da grano)	PISI 2010	190	42	232	214	140	21	162
Bioetanolo 95/5 (da cellulosa)	PISI 2010	190	44	234	208	140	18	158
Bioetanolo puro (da cellulosa)	PISI 2010	190	369	559	51	137	-94	43
Bioetanolo 95/5 (da canna da zucchero)	PISI 2010	190	42	232	206	140	17	157
GPL	PISI 2010	190	22	212		126	15	141

MOTORI TERMICI

- Il motore a iniezione diretta (DISI – Direct Injection Spark Ignition) si rivela, seppur di poco, energeticamente più efficiente di quello a iniezione indiretta (PISI – Port Injection Spark Ignition); l'incremento è dell'1% circa.
- Benzina e Gpl, nel tradizionale motore a combustione interna, fanno registrare l'efficienza peggiore (190 MJ/100km).
- L'uso di diesel puro o benzina pura in una soluzione con reformer a bordo e propulsione a fuel cells si rivela migliore di tutti i casi dell'utilizzo di benzina pura e dei suoi sucedanei (etanolo puro o miscelato) in propulsioni PISI (ibride o semplici) e DISI (ibride o semplici), nonché del diesel e dei suoi sucedanei (biodiesel puro o miscelato) in propulsori DICI semplici; è infine migliore anche dell'idrogeno quando questo viene usato in un propulsore PISI.
- L'idrogeno puro, a parità di propulsore (PISI semplice), opera meglio della benzina e dei suoi sucedanei (etanolo puro o miscelato); di conseguenza opera meglio anche degli stessi carburanti usati in propulsore DISI semplice.
- I motori termici a gas naturale ottengono un risultato identico al classico motore termico a benzina (188 MJ/100km)
- I biofuels, in accordo a quanto specificato nelle ipotesi iniziali, hanno la stessa resa dei combustibili che mirano a sostituire: i risultati ottenuti per ogni propulsore sono dunque identici sia in versione pura che in versione miscelata.

MOTORI IBRIDI

- Il motore ibrido aumenta l'efficienza energetica dell'alimentazione diesel del 22% circa; nel caso dell'alimentazione a benzina l'incremento è solo del 15%.
- La benzina e i suoi sucedanei (etanolo puro e miscelato) hanno un consumo energetico pari a 163 MJ/100km nei motori ibridi a iniezione diretta; hanno dunque un'efficienza inferiore del 15,6% rispetto ai diesel utilizzati nei motori senza filtro antiparticolato e del 11,6% rispetto ai motori in cui il filtro è invece presente.
- Nell'ambito della propulsione ibrida, i carburanti diesel e i loro sucedanei (biodiesel puri e miscelati) grazie alla propulsione DICI sono sempre superiori alle soluzioni con benzina e loro sucedanei (bioetanolo puro e miscelato) che operano con propulsione PISI (benzina pura) o DISI (etanolo e benzina).
- I motori ibridi confermano la loro superiore efficienza rispetto ai motori a combustione interna, a partire da quelli alimentati a gas naturale (139 MJ/100km) e diesel in tutte le sue forme (synth, fossile, biofuel puro e miscelato); la presenza del filtro antiparticolato aumenta il consumo energetico di 5 MJ/100km, un incremento pari al 3,5%.
- Il motore ibrido a gas naturale ottiene, seppur di poco, la migliore prestazione tra i combustibili fossili tradizionali (139 MJ/100km).
- Anche in questo caso i biofuels si comportano esattamente come le loro controparti di origine fossile, in accordo con le ipotesi.

PROPULSORI BASATI SU MOTORI ELETTRICI

- I vettori energetici (idrogeno, elettricità) hanno i rendimenti migliori dovuti alla superiore efficienza del motore elettrico, che permette il recupero dell'energia in frenata grazie alla presenza della batteria di accumulo.
- L'idrogeno si colloca al primo posto nella versione ibrida che accoppia le celle a combustibile alle batterie al litio, seguito dalla versione a fuel cells normale.
- L'auto elettrica si colloca subito a ridosso dell'idrogeno: a parità di tecnologia di autotrazione (motore elettrico), le batterie agli ioni di litio si rivelano essere meno performanti delle celle a combustibile del 17% circa. *(In generale l'auto elettrica dovrebbe essere più efficiente di quella a fuel cells, perchè a parità di motore elettrico il rendimento delle batterie al litio è superiore rispetto a quello delle celle a combustibile. Questo però a patto di fare riferimento all'autonomia standard delle due tecnologie: poco più di 100 km per l'auto elettrica, circa 300 per quella a idrogeno. Lo ricerca in questione, però, prevede che tutte le combinazioni carburante-propulsore soddisfino i requisiti prestazionali dell'auto media europea; tra di essi vi è l'autonomia di 600 km. Per raggiungere tale risultato l'auto elettrica dovrebbe avere un pacco batterie molto più pesante della corrispettiva auto a idrogeno di pari autonomia)*

6.3. WELL-TO-TANK:CONSIDERAZIONI ENERGETICHE

WTW ENERGETICO								
		ENERGY (MJ/100 km)			GHG (g CO ₂ eq/km)			
		TOTAL			FOSSIL	TTW	WTT	WTW
		TTW	WTT	WTW	WTW	CO ₂ eq	CO ₂ eq	CO ₂
Elettrica (da eolica)	Lt-Ion	110	3	113		0	0	0
Idrogeno (da elettrolisi eolica)	FC hybrid	84	66	150	16	0	8	8
Idrogeno (da reforming Gas Naturale)	FC hybrid	84	71	155		0	88	88
Gas Naturale (mix-EU)	PISI hybrid	139	17	156		81	12	92
Diesel	DICI hybrid no DPF	141	23	164		105	20	125
Idrogeno (da elettrolisi eolica)	FC	94	74	168	18	0	9	9
Diesel	DICI hybrid DPF	146	23	169		108	21	129
Biodiesel 95/5 (da cellulosa)	DICI hybrid no DPF	141	30	171	156	105	14	119
Biodiesel 95/5 (da colza)	DICI hybrid no DPF	141	30	171	158	106	16	122
Idrogeno (da reforming Gas Naturale)	FC	94	79	173		0	98	98
Biodiesel 95/5 (da colza)	DICI hybrid DPF	146	31	177	164	109	17	126
Biodiesel 95/5 (da cellulosa)	DICI hybrid DPF	146	31	177	161	108	15	123
Gas Naturale (Siberia)	PISI hybrid	139	41	181		81	30	111
Benzina	PISI hybrid	162	22	184		120	20	140
Benzina	Reformer + FC	162	23	185		120	20	140
Benzina	DISI hybrid	163	23	186		121	20	141
Diesel	Reformer + FC	162	26	188		121	23	144
Diesel	DICI 2010 no DPF	172	27	199		128	24	152
Bioetanolo 95/5 (da grano)	DISI Hybrid	163	36	199	184	120	18	139
Bioetanolo 95/5 (da canna da zucchero)	DISI Hybrid	163	36	199	177	120	14	135
Bioetanolo 95/5 (da cellulosa)	DISI Hybrid	163	37	200	179	120	15	136
Diesel	DICI 2010 DPF	177	28	205		131	25	156
Biodiesel 95/5 (da cellulosa)	DICI 2010 no DPF	172	36	208	190	128	18	145
Biodiesel 95/5 (da colza)	DICI 2010 no DPF	172	36	208	193	128	21	149
Gas Naturale (mix-EU)	PISI dedicated 2010	187	22	209		108	16	123
Gas Naturale (mix-EU)	PISI bi-fuel 2010	188	22	210		108	16	124
GPL	PISI 2010	190	22	212		126	15	141
Benzina	DISI 2010	188	26	214		139	24	162
Biodiesel 95/5 (da cellulosa)	DICI 2010 DPF	177	37	214	195	131	18	149
Biodiesel 95/5 (da colza)	DICI 2010 DPF	177	37	214	198	132	21	153
Benzina	PISI 2010	190	26	216		140	24	164
Bioetanolo 95/5 (da grano)	DISI 2010	188	42	230	212	139	21	160
Bioetanolo 95/5 (da canna da zucchero)	DISI 2010	188	42	230	204	139	17	155
Bioetanolo 95/5 (da cellulosa)	DISI 2010	188	43	231	206	139	17	156
Bioetanolo 95/5 (da canna da zucchero)	PISI 2010	190	42	232	206	140	17	157
Bioetanolo 95/5 (da grano)	PISI 2010	190	42	232	214	140	21	162
Bioetanolo 95/5 (da cellulosa)	PISI 2010	190	44	234	208	140	18	158
Gas Naturale (Siberia)	PISI dedicated 2010	187	56	243		108	41	148
Gas Naturale (Siberia)	PISI bi-fuel 2010	188	56	244		108	41	149
Idrogeno (da elettrolisi eolica)	PISI hybrid	149	117	265	29	0	14	14
Idrogeno (da reforming Gas Naturale)	PISI hybrid	149	125	274		0	155	156
Synth Diesel puro (da Carbone)	DICI hybrid no DPF	141	137	278		102	182	284
Synth Diesel puro (da Carbone)	DICI hybrid DPF	146	142	287		105	188	293
Idrogeno (da elettrolisi eolica)	PISI 2010	168	132	299	32	0	15	16
Biodiesel puro (da colza)	DICI hybrid no DPF	141	168	309	65	109	-41	69

WTW ENERGETICO								
		ENERGY (MJ/100 km)				GHG (g CO ₂ eq/km)		
		TOTAL			FOSSIL	TTW	WTT	WTW
		TTW	WTT	WTW	WTW	CO ₂ eq	CO ₂ eq	CO ₂
Idrogeno (da reforming Gas Naturale)	PISI 2010	168	141	309		0	175	176
Biodiesel puro (da cellulosa)	DICI hybrid no DPF	141	168	310	9	102	-93	8
Elettrica (da mix europeo)	Lt-Ion	110	206	316		0	142	142
Biodiesel puro (da colza)	DICI hybrid DPF	146	173	319	67	113	-42	71
Biodiesel puro (da cellulosa)	DICI hybrid DPF	146	174	319	9	105	-96	9
Synth Diesel puro (da Carbone)	DICI 2010 no DPF	172	167	339		124	222	346
Synth Diesel puro (da Carbone)	DICI 2010 DPF	177	172	348		127	228	355
Biodiesel puro (da colza)	DICI 2010 no DPF	172	205	377	79	133	-50	83
Biodiesel puro (da cellulosa)	DICI 2010 no DPF	172	205	378	11	124	-114	10
Biodiesel puro (da colza)	DICI 2010 DPF	177	210	387	81	136	-51	85
Idrogeno (da elettrolisi mix EU)	FC hybrid	84	304	387		0	174	174
Biodiesel puro (da cellulosa)	DICI 2010 DPF	177	211	388	12	127	-117	10
Elettrica (da nucleare)	Lt-Ion	110	301	411		0	5	5
Idrogeno (da elettrolisi mix EU)	FC	94	340	434		0	196	196
Bioetanolo puro (da grano)	DISI Hybrid	163	290	453	144	118	-20	98
Bioetanolo puro (da canna da zucchero)	DISI Hybrid	163	292	455	4	118	-99	19
Bioetanolo puro (da cellulosa)	DISI Hybrid	163	316	479	44	118	-81	37
Idrogeno (da elettrolisi nucleare)	FC hybrid	84	421	504	16	0	6	6
Bioetanolo puro (da grano)	DISI 2010	188	334	522	167	136	-23	113
Bioetanolo puro (da canna da zucchero)	DISI 2010	188	337	525	4	136	-115	21
Bioetanolo puro (da grano)	PISI 2010	190	338	528	168	137	-23	114
Bioetanolo puro (da canna da zucchero)	PISI 2010	190	341	531	4	137	-116	22
Bioetanolo puro (da cellulosa)	DISI 2010	188	365	553	50	136	-93	43
Bioetanolo puro (da cellulosa)	PISI 2010	190	369	559	51	137	-94	43
Idrogeno (da elettrolisi nucleare)	FC	94	472	566	18	0	7	7
Idrogeno (da elettrolisi mix EU)	PISI hybrid	149	538	686		0	309	309
Idrogeno (da elettrolisi mix EU)	PISI 2010	168	607	774		0	349	349
Idrogeno (da elettrolisi nucleare)	PISI hybrid	149	746	895	29	0	10	11
Idrogeno (da elettrolisi nucleare)	PISI 2010	168	842	1010	32	0	12	12

Per il well-to-wheel si è scelto di operare una suddivisione in classi di prestazioni, dal momento che il carattere eterogeneo di questo indicatore impedisce la suddivisione per carburanti o per propulsori. Le fasce proposte sono ordinate in funzione della prestazione energetica, dalla migliore alla peggiore.

< 150 MJ/100km

- Dal punto di vista energetico le fonti rinnovabili si rivelano vincenti; l'auto elettrica da eolico ha la migliore efficienza energetica (113 MJ/100km), seguita dall'auto a fuel cells ibrida con idrogeno prodotto da elettrolisi eolica (150 MJ/100km).

150-170 MJ/100km

- L'idrogeno prodotto tramite reforming del gas naturale (cioè da un combustibile non rinnovabile) e associato alle fuel cells hybrid è la migliore soluzione di questa fascia (155 MJ/100km);
- La migliore soluzione con carburanti tradizionali non rinnovabili è il Gas Naturale in propulsione PISI hybrid (156 MJ/100km).
- In generale, le prestazioni dei carburanti tradizionali con propulsioni ibride sono buone: nell'ordine, Gas Naturale (156 MJ/100km), Diesel (164 e 169 MJ/100km in base alla presenza del filtro DPF) e Benzina (184 MJ/100km); sono superiori a tutti i biocarburanti con propulsioni ibride e non ibride

(tranne il biodiesel 95/5 in DICI hybrid 141 e 146 MJ/100km in base alla presenza o meno del filtro antiparticolato), al synthetic diesel da carbone, e all'idrogeno (tranne nel caso di produzione da elettrolisi eolica e da reforming del Gas Naturale e propulsore FC hybrid o semplice).

- Si nota che in questa fascia la soluzione ibrida è predominante

170-190 MJ/100km

- L'idrogeno prodotto tramite reforming del gas naturale (cioè da un combustibile non rinnovabile) usato con le celle a combustibile semplici (173 MJ/100km) è battuto solo da gas naturale, diesel e biodiesel 95/5 in propulsori ibridi; si comporta peggio la benzina con propulsore ibrido (184 MJ/100km).
- Anche in questa fascia la soluzione ibrida è ancora predominante

190-250 MJ/100km

- La migliore soluzione tradizionale (in termini di carburante e di propulsore) è rappresentata da Diesel in propulsore DICI NO DPF (199 MJ/100km), migliore di tutti i biocarburanti con propulsioni ibride e non ibride (tranne il biodiesel 95/5 in DICI hybrid), del synth diesel da carbone, e dell'idrogeno (tranne nel caso di produzione da elettrolisi eolica e da reforming di gas naturale e propulsore FC hybrid o semplice), ed è peggio solo dei carburanti tradizionali con propulsori ibridi
- Come soluzioni tradizionali, dopo il Diesel (199 e 205 MJ/km in base alla presenza del filtro DPF) seguono gas naturale PISI, GPL PISI e benzina DISI e PISI, tutti superiori a 200 MJ/100km.

>250 MJ/100km

- Poco praticabile appare la sintesi Fischer-Tropsch del carbone, sia in combinazione con motore ibrido (278 MJ/100km) che normale (339 MJ/100km). E' comunque meglio del Biodiesel puro (a parità di propulsore) e di tutto il Bioetanolo puro. Nel caso di suo utilizzo con propulsori ibridi (DICI hybrid) è comunque meglio anche di H2 in propulsori tradizionali (PISI), e della elettrica da mix EU e da nucleare
- Tutti i biocarburanti utilizzati in forma pura si collocano in questa fascia, a partire dal biodiesel puro da colza (309 MJ/km).
- La ricarica dell'auto elettrica da mix europeo è poco efficiente (316 MJ/100km), fornendo un risultato nettamente al di sotto della classica auto a benzina abbinata a motore termico.
- Il nucleare è la soluzione meno efficiente per la ricarica delle auto elettriche (411 MJ/100km)
- Le soluzioni meno efficienti riguardano la produzione di idrogeno da energia nucleare e da elettrolisi da mix europeo (>500 MJ/100km)

ALTRE CONSIDERAZIONI GENERALI:

- I motori ibridi aumentano l'efficienza WTW del 20% circa se alimentati da diesel, del 15% se alimentati a benzina
- La presenza del filtro antiparticolato nei motori diesel riduce l'efficienza del 3%.
- I biofuels risultano una buona soluzione quando miscelati con carburanti fossili, con una netta supremazia del biodiesel 95/5 rispetto all'etanolo 95/5 (efficienza superiore del 17%)
- Quando utilizzati puri, i biofuels invece risultano poco efficienti, fornendo prestazioni WTW inferiori a tutti i carburanti di origine fossile, all'auto elettrica alimentata da mix europeo e all'auto a idrogeno prodotto da reforming del gas naturale.

6.4. WELL-TO-TANK:CONSIDERAZIONI AMBIENTALI

WTT AMBIENTALE								
		ENERGY (MJ/100 km)				GHG (g CO ₂ eq/km)		
		TOTAL			FOSSIL	TTW	WTT	WTW
		TTW	WTT	WTW	WTW	CO ₂ eq	CO ₂ eq	CO ₂
Biodiesel puro (da cellulosa)	DICI 2010 DPF	177	211	388	12	127	-117	10
Bioetanolo puro (da canna da zucchero)	PISI 2010	190	341	531	4	137	-116	22
Bioetanolo puro (da canna da zucchero)	DISI 2010	188	337	525	4	136	-115	21
Biodiesel puro (da cellulosa)	DICI 2010 no DPF	172	205	378	11	124	-114	10
Bioetanolo puro (da canna da zucchero)	DISI Hybrid	163	292	455	4	118	-99	19
Biodiesel puro (da cellulosa)	DICI hybrid DPF	146	174	319	9	105	-96	9
Bioetanolo puro (da cellulosa)	PISI 2010	190	369	559	51	137	-94	43
Bioetanolo puro (da cellulosa)	DISI 2010	188	365	553	50	136	-93	43
Biodiesel puro (da cellulosa)	DICI hybrid no DPF	141	168	310	9	102	-93	8
Bioetanolo puro (da cellulosa)	DISI Hybrid	163	316	479	44	118	-81	37
Biodiesel puro (da colza)	DICI 2010 DPF	177	210	387	81	136	-51	85
Biodiesel puro (da colza)	DICI 2010 no DPF	172	205	377	79	133	-50	83
Biodiesel puro (da colza)	DICI hybrid DPF	146	173	319	67	113	-42	71
Biodiesel puro (da colza)	DICI hybrid no DPF	141	168	309	65	109	-41	69
Bioetanolo puro (da grano)	DISI 2010	188	334	522	167	136	-23	113
Bioetanolo puro (da grano)	PISI 2010	190	338	528	168	137	-23	114
Bioetanolo puro (da grano)	DISI Hybrid	163	290	453	144	118	-20	98
Elettrica (da eolica)	Lt-Ion	110	3	113		0	0	0
Elettrica (da nucleare)	Lt-Ion	110	301	411		0	5	5
Idrogeno (da elettrolisi nucleare)	FC hybrid	84	421	504	16	0	6	6
Idrogeno (da elettrolisi nucleare)	FC	94	472	566	18	0	7	7
Idrogeno (da elettrolisi eolica)	FC hybrid	84	66	150	16	0	8	8
Idrogeno (da elettrolisi eolica)	FC	94	74	168	18	0	9	9
Idrogeno (da elettrolisi nucleare)	PISI hybrid	149	746	895	29	0	10	11
Gas Naturale (mix-EU)	PISI hybrid	139	17	156		81	12	92
Idrogeno (da elettrolisi nucleare)	PISI 2010	168	842	1010	32	0	12	12
Biodiesel 95/5 (da cellulosa)	DICI hybrid no DPF	141	30	171	156	105	14	119
Bioetanolo 95/5 (da canna da zucchero)	DISI Hybrid	163	36	199	177	120	14	135
Idrogeno (da elettrolisi eolica)	PISI hybrid	149	117	265	29	0	14	14
Biodiesel 95/5 (da cellulosa)	DICI hybrid DPF	146	31	177	161	108	15	123
GPL	PISI 2010	190	22	212		126	15	141
Bioetanolo 95/5 (da cellulosa)	DISI Hybrid	163	37	200	179	120	15	136
Idrogeno (da elettrolisi eolica)	PISI 2010	168	132	299	32	0	15	16
Gas Naturale (mix-EU)	PISI bi-fuel 2010	188	22	210		108	16	124
Biodiesel 95/5 (da colza)	DICI hybrid no DPF	141	30	171	158	106	16	122
Gas Naturale (mix-EU)	PISI dedicated 2010	187	22	209		108	16	123
Biodiesel 95/5 (da colza)	DICI hybrid DPF	146	31	177	164	109	17	126
Bioetanolo 95/5 (da canna da zucchero)	DISI 2010	188	42	230	204	139	17	155
Bioetanolo 95/5 (da canna da zucchero)	PISI 2010	190	42	232	206	140	17	157
Bioetanolo 95/5 (da cellulosa)	DISI 2010	188	43	231	206	139	17	156
Bioetanolo 95/5 (da grano)	DISI Hybrid	163	36	199	184	120	18	139
Biodiesel 95/5 (da cellulosa)	DICI 2010 DPF	177	37	214	195	131	18	149
Bioetanolo 95/5 (da cellulosa)	PISI 2010	190	44	234	208	140	18	158
Biodiesel 95/5 (da cellulosa)	DICI 2010 no DPF	172	36	208	190	128	18	145
Benzina	DISI hybrid	163	23	186		121	20	141
Benzina	Reformer + FC	162	23	185		120	20	140
Benzina	PISI hybrid	162	22	184		120	20	140

WTT AMBIENTALE								
		ENERGY (MJ/100 km)				GHG (g CO ₂ eq/km)		
		TOTAL			FOSSIL	TTW	WTT	WTW
		TTW	WTT	WTW	WTW	CO ₂ eq	CO ₂ eq	CO ₂
Diesel	DICI hybrid no DPF	141	23	164		105	20	125
Bioetanolo 95/5 (da grano)	DISI 2010	188	42	230	212	139	21	160
Diesel	DICI hybrid DPF	146	23	169		108	21	129
Bioetanolo 95/5 (da grano)	PISI 2010	190	42	232	214	140	21	162
Biodiesel 95/5 (da colza)	DICI 2010 no DPF	172	36	208	193	128	21	149
Biodiesel 95/5 (da colza)	DICI 2010 DPF	177	37	214	198	132	21	153
Diesel	Reformer + FC	162	26	188		121	23	144
Diesel	DICI 2010 no DPF	172	27	199		128	24	152
Benzina	DISI 2010	188	26	214		139	24	162
Benzina	PISI 2010	190	26	216		140	24	164
Diesel	DICI 2010 DPF	177	28	205		131	25	156
Gas Naturale (Siberia)	PISI hybrid	139	41	181		81	30	111
Gas Naturale (Siberia)	PISI bi-fuel 2010	188	56	244		108	41	149
Gas Naturale (Siberia)	PISI dedicated 2010	187	56	243		108	41	148
Idrogeno (da reforming Gas Naturale)	FC hybrid	84	71	155		0	88	88
Idrogeno (da reforming Gas Naturale)	FC	94	79	173		0	98	98
Elettrica (da mix europeo)	Lt-Ion	110	206	316		0	142	142
Idrogeno (da reforming Gas Naturale)	PISI hybrid	149	125	274		0	155	156
Idrogeno (da elettrolisi mix EU)	FC hybrid	84	304	387		0	174	174
Idrogeno (da reforming Gas Naturale)	PISI 2010	168	141	309		0	175	176
Synth Diesel puro (da Carbone)	DICI hybrid no DPF	141	137	278		102	182	284
Synth Diesel puro (da Carbone)	DICI hybrid DPF	146	142	287		105	188	293
Idrogeno (da elettrolisi mix EU)	FC	94	340	434		0	196	196
Synth Diesel puro (da Carbone)	DICI 2010 no DPF	172	167	339		124	222	346
Synth Diesel puro (da Carbone)	DICI 2010 DPF	177	172	348		127	228	355
Idrogeno (da elettrolisi mix EU)	PISI hybrid	149	538	686		0	309	309
Idrogeno (da elettrolisi mix EU)	PISI 2010	168	607	774		0	349	349

COMBUSTIBILI FOSSILI

- Diesel e benzina hanno emissioni simili: 20-24 gCO₂eq/km.
- Tra i combustibili fossili i valori WTT più vantaggiosi sono ottenuti dal GPL e dal Gas Naturale. Va però tenuto conto dell'origine del gas naturale: infatti esistono situazioni decisamente sfavorevoli come nel caso di importazioni da giacimenti a lunga distanza tipo la Siberia in cui il WTT ha un range 30-41 gCO₂eq/km.
- Non appare invece praticabile la soluzione della sintesi Fischer-Tropsch a partire da carbone fossile, con valori WTT che si attestano intorno ai 200 gCO₂eq/km.

BIOFUELS

- Il processo produttivo dei biofuels, che permette di recuperare parte dell'energia spesa utilizzando gli scarti come combustibili, genera un credito ambientale che si traduce in valori WTT negativi quando i carburanti sono utilizzati in forma pura.
- La canna da zucchero e la cellulosa, da questo punto di vista, appaiono più vantaggiose del grano e della colza per la produzione rispettivamente di etanolo e biodiesel.
- I biofuels miscelati beneficiano della frazione negativa di emissioni dovuta alla loro parte biologica. La produzione di etanolo 95/5 da canna da zucchero e da cellulosa è più efficiente della produzione da grano, con emissioni inferiori di oltre il 20%.

- Il biodiesel sembra trarre maggior beneficio dell'etanolo dalla produzione di seconda generazione: la produzione da cellulosa genera infatti meno emissioni di quella da colza, mentre l'etanolo da cellulosa è più impattante dell'etanolo derivato da canna da zucchero.

VETTORI ENERGETICI

- L'energia eolica non produce emissioni, dunque la generazione di elettricità da fonte rinnovabile ha un indice WTT nullo.
- L'energia nucleare produce scarsissime emissioni: ne beneficiano dunque i vettori elettricità e idrogeno, ottenendo un indice WTT molto basso, inferiore a 12 gCO_{2eq}/km.
- La produzione dei vettori energetici da fonti fossili (elettricità da mix europeo e gas naturale) ha emissioni notevolmente superiori, compensate tuttavia in parte dall'impatto nullo che ottengono nel TTW.
- La produzione di idrogeno da steam reforming del gas naturale ha emissioni piuttosto elevate 90-175 gCO_{2eq}/km.
- L'Idrogeno da elettrolisi con mix EU è una scelta molto debole dal punto di vista del WTT ambientale (175-350 gCO_{2eq}/km), e paga le emissioni del mix elettrico europeo

6.5. TANK-TO-WHEEL:CONSIDERAZIONI AMBIENTALI

TTW AMBIENTALE								
		ENERGY (MJ/100 km)				GHG (g CO2eq/km)		
		TOTAL			FOSSIL	TTW	WTT	WTW
		TTW	WTT	WTW	WTW	CO2eq	CO2eq	CO2
Biodiesel puro (da colza)	DICI 2010 DPF	177	210	387	81	0	-51	-51
Biodiesel puro (da colza)	DICI hybrid DPF	146	173	319	67	0	-42	-42
Biodiesel puro (da cellulosa)	DICI 2010 no DPF	172	205	378	11	0	-114	-114
Biodiesel puro (da colza)	DICI 2010 no DPF	172	205	377	79	0	-50	-50
Biodiesel puro (da colza)	DICI hybrid no DPF	141	168	309	65	0	-41	-41
Biodiesel puro (da cellulosa)	DICI hybrid DPF	146	174	319	9	0	-96	-96
Biodiesel puro (da cellulosa)	DICI 2010 DPF	177	211	388	12	0	-117	-117
Biodiesel puro (da cellulosa)	DICI hybrid no DPF	141	168	310	9	0	-93	-93
Bioetanolo puro (da grano)	DISI 2010	188	334	522	167	0	-23	-23
Bioetanolo puro (da cellulosa)	DISI Hybrid	163	316	479	44	0	-81	-81
Bioetanolo puro (da cellulosa)	PISI 2010	190	369	559	51	0	-94	-94
Bioetanolo puro (da grano)	DISI Hybrid	163	290	453	144	0	-20	-20
Bioetanolo puro (da grano)	PISI 2010	190	338	528	168	0	-23	-23
Bioetanolo puro (da canna da zucchero)	DISI Hybrid	163	292	455	4	0	-99	-99
Bioetanolo puro (da canna da zucchero)	PISI 2010	190	341	531	4	0	-116	-116
Bioetanolo puro (da cellulosa)	DISI 2010	188	365	553	50	0	-93	-93
Bioetanolo puro (da canna da zucchero)	DISI 2010	188	337	525	4	0	-115	-115
Idrogeno (da elettrolisi nucleare)	FC hybrid	84	421	504	16	0	6	6
Idrogeno (da elettrolisi eolica)	PISI 2010	168	132	299	32	0	15	16
Elettrica (da eolica)	Lt-Ion	110	3	113		0	0	0
Idrogeno (da elettrolisi mix EU)	PISI 2010	168	607	774		0	349	349
Idrogeno (da elettrolisi mix EU)	PISI hybrid	149	538	686		0	309	309
Idrogeno (da reforming Gas Naturale)	PISI 2010	168	141	309		0	175	176
Idrogeno (da elettrolisi eolica)	FC	94	74	168	18	0	9	9
Idrogeno (da elettrolisi nucleare)	FC	94	472	566	18	0	7	7
Idrogeno (da elettrolisi mix EU)	FC hybrid	84	304	387		0	174	174
Idrogeno (da elettrolisi eolica)	FC hybrid	84	66	150	16	0	8	8
Idrogeno (da reforming Gas Naturale)	FC hybrid	84	71	155		0	88	88
Idrogeno (da elettrolisi nucleare)	PISI hybrid	149	746	895	29	0	10	11
Idrogeno (da elettrolisi nucleare)	PISI 2010	168	842	1010	32	0	12	12
Idrogeno (da elettrolisi mix EU)	FC	94	340	434		0	196	196
Idrogeno (da reforming Gas Naturale)	PISI hybrid	149	125	274		0	155	156
Elettrica (da mix europeo)	Lt-Ion	110	206	316		0	142	142
Idrogeno (da elettrolisi eolica)	PISI hybrid	149	117	265	29	0	14	14
Elettrica (da nucleare)	Lt-Ion	110	301	411		0	5	5
Idrogeno (da reforming Gas Naturale)	FC	94	79	173		0	98	98
Gas Naturale (mix-EU)	PISI hybrid	139	17	156		81	12	92
Gas Naturale (Siberia)	PISI hybrid	139	41	181		81	30	111
Synth Diesel puro (da Carbone)	DICI hybrid no DPF	141	137	278		102	182	284
Biodiesel puro (da cellulosa)	DICI hybrid no DPF	141	168	310	9	102	-93	8
Diesel	DICI hybrid no DPF	141	23	164		105	20	125
Biodiesel 95/5 (da cellulosa)	DICI hybrid no DPF	141	30	171	156	105	14	119
Synth Diesel puro (da Carbone)	DICI hybrid DPF	146	142	287		105	188	293
Biodiesel puro (da cellulosa)	DICI hybrid DPF	146	174	319	9	105	-96	9
Biodiesel 95/5 (da colza)	DICI hybrid no DPF	141	30	171	158	106	16	122

TTW AMBIENTALE								
		ENERGY (MJ/100 km)				GHG (g CO ₂ eq/km)		
		TOTAL			FOSSIL	TTW	WTT	WTW
		TTW	WTT	WTW	WTW	CO ₂ eq	CO ₂ eq	CO ₂
Gas Naturale (mix-EU)	PISI dedicated 2010	187	22	209		108	16	123
Gas Naturale (mix-EU)	PISI bi-fuel 2010	188	22	210		108	16	124
Gas Naturale (Siberia)	PISI bi-fuel 2010	188	56	244		108	41	149
Biodiesel 95/5 (da cellulosa)	DICI hybrid DPF	146	31	177	161	108	15	123
Diesel	DICI hybrid DPF	146	23	169		108	21	129
Gas Naturale (Siberia)	PISI dedicated 2010	187	56	243		108	41	148
Biodiesel 95/5 (da colza)	DICI hybrid DPF	146	31	177	164	109	17	126
Biodiesel puro (da colza)	DICI hybrid no DPF	141	168	309	65	109	-41	69
Biodiesel puro (da colza)	DICI hybrid DPF	146	173	319	67	113	-42	71
Bioetanolo puro (da grano)	DISI Hybrid	163	290	453	144	118	-20	98
Bioetanolo puro (da cellulosa)	DISI Hybrid	163	316	479	44	118	-81	37
Bioetanolo puro (da canna da zucchero)	DISI Hybrid	163	292	455	4	118	-99	19
Bioetanolo 95/5 (da grano)	DISI Hybrid	163	36	199	184	120	18	139
Benzina	PISI hybrid	162	22	184		120	20	140
Bioetanolo 95/5 (da canna da zucchero)	DISI Hybrid	163	36	199	177	120	14	135
Benzina	Reformer + FC	162	23	185		120	20	140
Bioetanolo 95/5 (da cellulosa)	DISI Hybrid	163	37	200	179	120	15	136
Benzina	DISI hybrid	163	23	186		121	20	141
Diesel	Reformer + FC	162	26	188		121	23	144
Synth Diesel puro (da Carbone)	DICI 2010 no DPF	172	167	339		124	222	346
Biodiesel puro (da cellulosa)	DICI 2010 no DPF	172	205	378	11	124	-114	10
GPL	PISI 2010	190	22	212		126	15	141
Biodiesel puro (da cellulosa)	DICI 2010 PDF	177	211	388	12	127	-117	10
Synth Diesel puro (da Carbone)	DICI 2010 PDF	177	172	348		127	228	355
Biodiesel 95/5 (da colza)	DICI 2010 no DPF	172	36	208	193	128	21	149
Diesel	DICI 2010 no DPF	172	27	199		128	24	152
Biodiesel 95/5 (da cellulosa)	DICI 2010 no DPF	172	36	208	190	128	18	145
Diesel	DICI 2010 DPF	177	28	205		131	25	156
Biodiesel 95/5 (da cellulosa)	DICI 2010 DPF	177	37	214	195	131	18	149
Biodiesel 95/5 (da colza)	DICI 2010 DPF	177	37	214	198	132	21	153
Biodiesel puro (da colza)	DICI 2010 no DPF	172	205	377	79	133	-50	83
Bioetanolo puro (da canna da zucchero)	DISI 2010	188	337	525	4	136	-115	21
Biodiesel puro (da colza)	DICI 2010 DPF	177	210	387	81	136	-51	85
Bioetanolo puro (da grano)	DISI 2010	188	334	522	167	136	-23	113
Bioetanolo puro (da cellulosa)	DISI 2010	188	365	553	50	136	-93	43
Bioetanolo puro (da grano)	PISI 2010	190	338	528	168	137	-23	114
Bioetanolo puro (da cellulosa)	PISI 2010	190	369	559	51	137	-94	43
Bioetanolo puro (da canna da zucchero)	PISI 2010	190	341	531	4	137	-116	22
Benzina	DISI 2010	188	26	214		139	24	162
Bioetanolo 95/5 (da canna da zucchero)	DISI 2010	188	42	230	204	139	17	155
Bioetanolo 95/5 (da grano)	DISI 2010	188	42	230	212	139	21	160
Bioetanolo 95/5 (da cellulosa)	DISI 2010	188	43	231	206	139	17	156
Bioetanolo 95/5 (da cellulosa)	PISI 2010	190	44	234	208	140	18	158
Bioetanolo 95/5 (da grano)	PISI 2010	190	42	232	214	140	21	162
Benzina	PISI 2010	190	26	216		140	24	164

TTW AMBIENTALE								
		ENERGY (MJ/100 km)				GHG (g CO _{2eq} /km)		
		TOTAL			FOSSIL	TTW	WTT	WTW
		TTW	WTT	WTW	WTW	CO _{2eq}	CO _{2eq}	CO ₂
Bioetanolo 95/5 (da canna da zucchero)	PISI 2010	190	42	232	206	140	17	157

MOTORI TERMICI

- Il GPL in propulsore PISI semplice rappresenta lo spartiacque tra i propulsori ibridi (con varie alimentazioni) e i propulsori tradizionali con varie alimentazioni (DICI, DISI e PISI), con un punteggio pari a 126 gCO_{2eq}/km
- Le vetture meno efficienti in termini di TTW ambientale risultano essere quelle spinte da motori a combustione convenzionali alimentati da diesel (fossile e bio, circa 130 gCO_{2eq}/km, motori DICI) e benzina (fossile e bio, poco meno di 140 gCO_{2eq}/km, motori DISI e infine PISI).
- Il gas naturale è la fonte fossile che produce meno emissioni quando utilizzata in motori termici. La quantità di CO₂ emessa (108 gCO_{2eq}/km) è addirittura inferiore alle emissioni di alcune vetture ibride alimentate da fonti fossili (ad esempio la benzina, 120 gCO_{2eq}/km).

MOTORI IBRIDI

- L'auto ibrida a gas naturale è la più virtuosa tra le auto che producono emissioni (81 gCO_{2eq}/km).
- Le vetture ibride alimentate a diesel (synth, fossile, e biodiesel, sia puro che miscelato) e le auto a gas naturale (con propulsore PISI semplice o bi-fuel) hanno un'efficienza praticamente equivalente, con valori di emissioni intorno a 105 gCO_{2eq}/km.
- I motori ibridi a benzina ed etanolo (puro e miscelato) che fanno registrare emissioni pari a circa 120 gCO_{2eq}/km, risultando dunque meno efficienti di circa il 15% rispetto alle corrispondenti vetture ibride alimentate con diesel e succedanei.

PROPULSORI BASATI SU MOTORI ELETTRICI

- L'auto elettrica e quella a idrogeno non producono emissioni nell'utilizzo: hanno pertanto la migliore efficienza ambientale nel TTW.
- L'utilizzo più virtuoso del diesel, dopo i propulsori ibridi e prima dei propulsori tradizionali, è in un propulsore con reformer on board + FC (121 gCO_{2eq}/km)
- L'utilizzo più virtuoso della benzina è in un propulsore con reformer on board + FC (120 gCO_{2eq}/km).

6.6. WELL-TO-WHEEL: CONSIDERAZIONI AMBIENTALI

WTW AMBIENTALE								
		ENERGY (MJ/100 km)				GHG (g CO ₂ eq/km)		
		TOTAL			FOSSIL	TTW	WTT	WTW
		TTW	WTT	WTW	WTW	CO ₂ eq	CO ₂ eq	CO ₂ eq
Biodiesel puro (da cellulosa)	DICI 2010 DPF	177	211	388	12	0	-117	-117
Bioetanolo puro (da canna da zucchero)	PISI 2010	190	341	531	4	0	-116	-116
Bioetanolo puro (da canna da zucchero)	DISI 2010	188	337	525	4	0	-115	-115
Biodiesel puro (da cellulosa)	DICI 2010 no DPF	172	205	378	11	0	-114	-114
Bioetanolo puro (da canna da zucchero)	DISI Hybrid	163	292	455	4	0	-99	-99
Biodiesel puro (da cellulosa)	DICI hybrid DPF	146	174	319	9	0	-96	-96
Bioetanolo puro (da cellulosa)	PISI 2010	190	369	559	51	0	-94	-94
Biodiesel puro (da cellulosa)	DICI hybrid no DPF	141	168	310	9	0	-93	-93
Bioetanolo puro (da cellulosa)	DISI 2010	188	365	553	50	0	-93	-93
Bioetanolo puro (da cellulosa)	DISI Hybrid	163	316	479	44	0	-81	-81
Biodiesel puro (da colza)	DICI 2010 DPF	177	210	387	81	0	-51	-51
Biodiesel puro (da colza)	DICI 2010 no DPF	172	205	377	79	0	-50	-50
Biodiesel puro (da colza)	DICI hybrid DPF	146	173	319	67	0	-42	-42
Biodiesel puro (da colza)	DICI hybrid no DPF	141	168	309	65	0	-41	-41
Bioetanolo puro (da grano)	DISI 2010	188	334	522	167	0	-23	-23
Bioetanolo puro (da grano)	PISI 2010	190	338	528	168	0	-23	-23
Bioetanolo puro (da grano)	DISI Hybrid	163	290	453	144	0	-20	-20
Elettrica (da eolica)	Lt-Ion	110	3	113		0	0	0
Elettrica (da nucleare)	Lt-Ion	110	301	411		0	5	5
Idrogeno (da elettrolisi nucleare)	FC hybrid	84	421	504	16	0	6	6
Idrogeno (da elettrolisi nucleare)	FC	94	472	566	18	0	7	7
Biodiesel puro (da cellulosa)	DICI hybrid no DPF	141	168	310	9	102	-93	8
Idrogeno (da elettrolisi eolica)	FC hybrid	84	66	150	16	0	8	8
Biodiesel puro (da cellulosa)	DICI hybrid DPF	146	174	319	9	105	-96	9
Idrogeno (da elettrolisi eolica)	FC	94	74	168	18	0	9	9
Biodiesel puro (da cellulosa)	DICI 2010 no DPF	172	205	378	11	124	-114	10
Biodiesel puro (da cellulosa)	DICI 2010 PDF	177	211	388	12	127	-117	10
Idrogeno (da elettrolisi nucleare)	PISI hybrid	149	746	895	29	0	10	11
Idrogeno (da elettrolisi nucleare)	PISI 2010	168	842	1010	32	0	12	12
Idrogeno (da elettrolisi eolica)	PISI hybrid	149	117	265	29	0	14	14
Idrogeno (da elettrolisi eolica)	PISI 2010	168	132	299	32	0	15	16
Bioetanolo puro (da canna da zucchero)	DISI Hybrid	163	292	455	4	118	-99	19
Bioetanolo puro (da canna da zucchero)	DISI 2010	188	337	525	4	136	-115	21
Bioetanolo puro (da canna da zucchero)	PISI 2010	190	341	531	4	137	-116	22
Bioetanolo puro (da cellulosa)	DISI Hybrid	163	316	479	44	118	-81	37
Bioetanolo puro (da cellulosa)	DISI 2010	188	365	553	50	136	-93	43
Bioetanolo puro (da cellulosa)	PISI 2010	190	369	559	51	137	-94	43
Biodiesel puro (da colza)	DICI hybrid no DPF	141	168	309	65	109	-41	69
Biodiesel puro (da colza)	DICI hybrid DPF	146	173	319	67	113	-42	71
Biodiesel puro (da colza)	DICI 2010 no DPF	172	205	377	79	133	-50	83
Biodiesel puro (da colza)	DICI 2010 DPF	177	210	387	81	136	-51	85
Idrogeno (da reforming Gas Naturale)	FC hybrid	84	71	155		0	88	88

WTW AMBIENTALE								
		ENERGY (MJ/100 km)				GHG (g CO ₂ eq/km)		
		TOTAL			FOSSIL	TTW	WTT	WTW
		TTW	WTT	WTW	WTW	CO ₂ eq	CO ₂ eq	CO ₂ eq
Gas Naturale (mix-EU)	PISI hybrid	139	17	156		81	12	92
Idrogeno (da reforming Gas Naturale)	FC	94	79	173		0	98	98
Bioetanolo puro (da grano)	DISI Hybrid	163	290	453	144	118	-20	98
Gas Naturale (Siberia)	PISI hybrid	139	41	181		81	30	111
Bioetanolo puro (da grano)	DISI 2010	188	334	522	167	136	-23	113
Bioetanolo puro (da grano)	PISI 2010	190	338	528	168	137	-23	114
Biodiesel 95/5 (da cellulosa)	DICI hybrid no DPF	141	30	171	156	105	14	119
Biodiesel 95/5 (da colza)	DICI hybrid no DPF	141	30	171	158	106	16	122
Biodiesel 95/5 (da cellulosa)	DICI hybrid DPF	146	31	177	161	108	15	123
Gas Naturale (mix-EU)	PISI dedicated 2010	187	22	209		108	16	123
Gas Naturale (mix-EU)	PISI bi-fuel 2010	188	22	210		108	16	124
Diesel	DICI hybrid no DPF	141	23	164		105	20	125
Biodiesel 95/5 (da colza)	DICI hybrid DPF	146	31	177	164	109	17	126
Diesel	DICI hybrid DPF	146	23	169		108	21	129
Bioetanolo 95/5 (da canna da zucchero)	DISI Hybrid	163	36	199	177	120	14	135
Bioetanolo 95/5 (da cellulosa)	DISI Hybrid	163	37	200	179	120	15	136
Bioetanolo 95/5 (da grano)	DISI Hybrid	163	36	199	184	120	18	139
Benzina	Reformer + FC	162	23	185		120	20	140
Benzina	PISI hybrid	162	22	184		120	20	140
Benzina	DISI hybrid	163	23	186		121	20	141
GPL	PISI 2010	190	22	212		126	15	141
Elettrica (da mix europeo)	Lt-Ion	110	206	316		0	142	142
Diesel	Reformer + FC	162	26	188		121	23	144
Biodiesel 95/5 (da cellulosa)	DICI 2010 no DPF	172	36	208	190	128	18	145
Gas Naturale (Siberia)	PISI dedicated 2010	187	56	243		108	41	148
Biodiesel 95/5 (da colza)	DICI 2010 no DPF	172	36	208	193	128	21	149
Biodiesel 95/5 (da cellulosa)	DICI 2010 DPF	177	37	214	195	131	18	149
Gas Naturale (Siberia)	PISI bi-fuel 2010	188	56	244		108	41	149
Diesel	DICI 2010 no DPF	172	27	199		128	24	152
Biodiesel 95/5 (da colza)	DICI 2010 DPF	177	37	214	198	132	21	153
Bioetanolo 95/5 (da canna da zucchero)	DISI 2010	188	42	230	204	139	17	155
Bioetanolo 95/5 (da cellulosa)	DISI 2010	188	43	231	206	139	17	156
Idrogeno (da reforming Gas Naturale)	PISI hybrid	149	125	274		0	155	156
Diesel	DICI 2010 DPF	177	28	205		131	25	156
Bioetanolo 95/5 (da canna da zucchero)	PISI 2010	190	42	232	206	140	17	157
Bioetanolo 95/5 (da cellulosa)	PISI 2010	190	44	234	208	140	18	158
Bioetanolo 95/5 (da grano)	DISI 2010	188	42	230	212	139	21	160
Bioetanolo 95/5 (da grano)	PISI 2010	190	42	232	214	140	21	162
Benzina	DISI 2010	188	26	214		139	24	162
Benzina	PISI 2010	190	26	216		140	24	164
Idrogeno (da elettrolisi mix EU)	FC hybrid	84	304	387		0	174	174
Idrogeno (da reforming Gas Naturale)	PISI 2010	168	141	309		0	175	176
Idrogeno (da elettrolisi mix EU)	FC	94	340	434		0	196	196
Synth Diesel puro (da Carbone)	DICI hybrid no DPF	141	137	278		102	182	284
Synth Diesel puro (da Carbone)	DICI hybrid DPF	146	142	287		105	188	293
Idrogeno (da elettrolisi mix EU)	PISI hybrid	149	538	686		0	309	309
Synth Diesel puro (da Carbone)	DICI 2010 no DPF	172	167	339		124	222	346

WTW AMBIENTALE								
		ENERGY (MJ/100 km)			GHG (g CO _{2eq} /km)			
		TOTAL			FOSSIL	TTW	WTT	WTW
		TTW	WTT	WTW	WTW	CO _{2eq}	CO _{2eq}	CO _{2eq}
Idrogeno (da elettrolisi mix EU)	PISI 2010	168	607	774		0	349	349
Synth Diesel puro (da Carbone)	DICI 2010 DPF	177	172	348		127	228	355

Anche in questo caso è stato scelto per il well-to-wheel un criterio di classificazione suddiviso in fasce di virtuosità ambientale decrescente.

0-20 gCO_{2eq}/km

- L'auto elettrica con elettricità prodotta da fonte primaria eolica è l'unica soluzione a emissioni zero nella catena completa di trasformazioni (WTT + TTW).
- L'idrogeno da eolico è una valida alternativa dal punto di vista ambientale, con emissioni complessive pari a 8 gCO_{2eq}/km.
- Emissioni trascurabili hanno anche le vetture spinte da vettori energetici (elettricità o idrogeno) prodotti da energia nucleare, con emissioni complessive inferiori ai 16 gCO_{2eq}/km.
- I bio-carburanti sembrano essere una buona soluzione quando utilizzati in forma pura e prodotti tramite processi che prevedano il recupero degli scarti. Nell'interessante caso dei biodiesel di seconda generazione (produzione da cellulosa – circa 10 gCO_{2eq}/km) si evidenzia la supremazia sull'etanolo (di qualunque produzione), il quale ha emissioni complessive superiori del 400%.

20-85 gCO_{2eq}/km

- Il biodiesel puro da colza (circa 77 gCO_{2eq}/km) si colloca dopo il bioetanolo da canna da zucchero (circa 20 gCO_{2eq}/km) o da cellulosa (circa 40 gCO_{2eq}/km nelle varie opzioni propulsive).

85-120 gCO_{2eq}/km

- Un buon risultato è ottenuto anche da idrogeno ottenuto da elettrolisi da fonte eolica usato in propulsore FC (hybrid o semplice).
- Il bioetanolo puro da grano è la soluzione meno virtuosa tra i biocarburanti (circa 107 gCO_{2eq}/km).
- Tra i carburanti fossili il minor impatto ambientale è ottenuto nel caso del gas naturale convertito in idrogeno prodotto da reforming e utilizzato in propulsore a fuel cells hybrid (88 gCO_{2eq}/km), soprattutto grazie al TTW nullo. Subito dopo si situa il Gas Naturale usato più semplicemente in propulsore PISI hybrid (circa 100 gCO_{2eq}/km).

120-140 gCO_{2eq}/km

- Seguono le miscele 95/5, in cui il biodiesel di diversa provenienza con propulsore DICI (hybrid con o senza filtro DPF) si situa prima del bioetanolo di diversa provenienza con propulsore DISI hybrid.
- Si collocano in questa fascia anche il gas naturale in motori tradizionali (circa 124 gCO_{2eq}/km) e il diesel in motori ibridi (circa 127 gCO_{2eq}/km).

140-170 gCO_{2eq}/km

- Il GPL con propulsore PISI semplice ha lo stesso risultato della benzina in propulsore DISI hybrid (141gCO_{2eq}/km), ma peggio dei diesel in propulsore DICI hybrid (circa 127 gCO_{2eq}/km).
- Tra i carburanti tradizionali l'accoppiata benzina-motore ICE risulta la più inquinante, con emissioni intorno ai 170 gCO_{2eq}/km.
- Il veicolo elettrico Lt-ion da mix europeo non ha un buon risultato (142 gCO_{2eq}/km), e si situa tra la benzina in propulsore DISI hybrid e il diesel in propulsore DICI semplice.

>170 gCO_{2eq}/km

- La produzione di synthetic diesel da carbone non appare praticabile a causa della scarsa efficienza sia nel TTW che nel WTT.

- Allo stesso modo la produzione di idrogeno tramite elettrolisi da mix europeo non appare una soluzione vincente (174 gCO_{2eq}/km in FC Hybrid e 196 gCO_{2eq}/km in FC normali).

ALTRE CONSIDERAZIONI

- L'utilizzo di motori ibridi sembra avere un impatto significativo sulla riduzione delle emissioni, in virtù del minor consumo di carburante. La riduzione delle emissioni è superiore al 20%.
- Il diesel è più efficiente della benzina, specialmente se applicato a vetture prive di filtro antiparticolato. I motori ibridi accentuano questa differenza, che passa da un vantaggio del 6% (nei tradizionali motori a combustione interna) a oltre il 10%.

6.6. CONCLUSIONI GENERALI

Uno spostamento da carburanti prodotti a partire da fonti primarie fossili a favore di quelli prodotti a partire da fonti primarie rinnovabili può ridurre significativamente le emissioni di gas serra, ma in genere richiede processi di produzione a maggiore intensità energetica. Il processo adottato è cruciale.

Non esiste nel breve periodo un'unica strada che permetta di produrre grandi quantità di carburante “low carbon”: saranno al contrario necessari i contributi di diverse tecnologie.

Il mercato dovrà attrezzarsi per accogliere carburanti di nuova tipologia.

I bio-carburanti utilizzati in miscela dovranno essere considerati solo se il risparmio delle emissioni sarà prodotto a costi economici ragionevoli.

L'auto elettrica e quella ad idrogeno, qualora i vettori-carburanti siano prodotti a partire da fonti primarie rinnovabili, determinano i più grandi benefici in termini di emissioni di gas serra.

- Biofuel avanzati, idrogeno ed elettricità sono migliori potenziali sostituti dei carburanti fossili rispetto ai biofuel convenzionali. Tuttavia gli alti costi e la complessità degli impianti saranno probabilmente d'ostacolo alla loro affermazione.
- L'uso di fonti rinnovabili ad uso esclusivo per il settore dei trasporti potrebbe non massimizzarne il potenziale ecologico. Un utilizzo più razionale di tali risorse dovrebbe prendere in considerazione la domanda energetica anche di altri settori.
- Il progresso tecnologico dei propulsori contribuirà alla riduzione delle emissioni e al miglioramento dell'efficienza energetica. Durante l'arco temporale considerato in questo studio, i miglioramenti più consistenti sono previsti per i motori PISI a benzina e Gas Naturale, piuttosto che per i motori Diesel.
- L'ibridizzazione dei veicoli può migliorarne sia il rendimento ambientale che quello energetico, aumentandone però i costi e la complessità.
- La fonte di approvvigionamento riveste per il Gas Naturale un ruolo critico, sia dal punto di vista ambientale che da quello energetico. Anche se la disponibilità di tale risorsa non appare un problema nel medio periodo, è probabile che barriere infrastrutturali e di mercato ne ostacolino la diffusione per il settore dei trasporti.
- Il risparmio di energia fossile e di emissioni associato ai bio-carburanti dipende criticamente dal processo produttivo, dalla destinazione dei sottoprodotti e dalle emissioni di N₂O associate all'agricoltura.
- Nella produzione di etanolo e biodiesel i benefici maggiori si ottengono utilizzando biomassa di scarso valore, anche se la produzione in grandi quantità è improbabile nell'immediato futuro.
- L'idrogeno, se prodotto da Gas Naturale:
 - permette un risparmio nelle emissioni solo se viene utilizzato in veicoli a fuel cells;
 - quando utilizzato in un motore ICE standard l'efficienza energetica ed ambientale è inferiore a quella del Gas Naturale da cui proviene.

- Nel breve periodo il Gas Naturale sarà l'unica fonte economica per la produzione di idrogeno su larga scala.
- Sempre nel breve periodo, i motori ICE per l'idrogeno saranno disponibili più rapidamente di quelli a fuel cells.
- Le emissioni, nel caso dell'idrogeno e dell'auto elettrica, sono tutte a carico del WTT; questo rende possibile una riflessione sulla possibilità di intervenire a monte dell'utilizzo, ovvero nella fase di produzione del carburante, per effettuare processi di sequestrazione della CO₂

7. GLI SCENARI PROPOSTI DI OPZIONI CARBURANTE-PROPULSORE IN CONFORMITA' CON GLI OBIETTIVI EU 2015

7.1. IMPOSTAZIONE DEL PROBLEMA

Lo scenario previsto dalla Comunità Europea per il 2015 stabilisce nuovi limiti per le emissioni delle vetture europee. Più in dettaglio, l'obiettivo è quello di abbassare la media delle emissioni dei veicoli tradizionali a 130 g/km, a cui aggiungere un'ulteriore riduzione di 10 g/km con l'utilizzo di bio-carburanti e di nuove tecnologie (per una quota di riduzione minima pari a 5 gCO_{2eq}/km ciascuna). Tutto questo per raggiungere obiettivo complessivo di una media di emissioni del parco circolante pari a 120 g/km.

Prima di tutto, si vede come l'obiettivo riguardi le emissioni delle autovetture durante il loro utilizzo effettivo: si tratta quindi di un obiettivo relativo alla fase TTW. Invece, la fase WTT, cioè il processo di produzione e trasporto dei carburanti, seppur fondamentale dal punto di vista energetico ed ambientale, non è presa in considerazione in queste misure.

In secondo luogo, è ovvio che obiettivo può essere raggiunto con diverse opzioni, cioè con diversi scenari di composizione del parco circolante: ad esempio, una quota parte di vetture elettriche a batteria, con una quota parte di vetture alimentate a bio-carburanti, che vadano ad integrare il parco circolante di veicoli tradizionali. Riacciacciandosi al commento precedente, è chiaro che diversi scenari di parco circolante, che siano tutti in grado di soddisfare l'obiettivo imposto, possano avere però delle diverse efficienze se considerate dal punto di vista WTT, sia dal punto di vista energetico che ambientale.

E' quindi interessante prima di tutto l'individuazione dei diversi scenari della composizione del parco circolante che siano in grado di rispettare l'obiettivo TTW imposto; e in secondo luogo, analizzare questi scenari (tutti validi dal punto di vista TTW) anche dal punto di vista della analisi WTT.

Il primo aspetto dell'analisi consiste, come detto, nella individuazione degli scenari della composizione del parco circolante che rispettino l'obiettivo TTW imposto. Questo problema di individuazione degli scenari può essere impostato da un punto di vista matematico, e in particolare come un problema di ottimizzazione vincolata. Le variabili di decisione del problema possono essere individuate nelle percentuali di introduzione nel parco circolante dei:

1. veicoli tradizionali (*tradizionali*)
2. veicoli alimentati a bio-carburanti (*biofuels*)
3. veicoli con nuove tecnologie di propulsione (*nuove tecnologie*)

In ogni categoria di veicoli ci sono molte tipologie possibili: per esempio, nelle nuove tecnologie ci sono i veicoli a batteria a litio, ma anche i veicoli a celle a combustibile alimentate ad idrogeno prodotto secondo diversi processi. Per cui, si possono generare vari scenari tutti che rispettino l'obiettivo ambientale, introducendo di volta in volta una particolare tipologia di combinazione carburante-propulsore, e calcolando quale dovrebbe essere la sua percentuale di introduzione nel parco circolante al fine di raggiungere l'obiettivo ambientale imposto. Pertanto, l'ottimizzazione matematica del problema consiste nello stabilire, dopo aver individuato i vincoli opportuni, quale sia la combinazione percentuale possibile delle tre categorie (per rispettare il vincolo ambientale) al variare della combinazione carburante-propulsore di una di esse, e mantenendo nel contempo fisse le composizioni del parco circolante delle altre due categorie di veicoli.

E' meglio precisare subito che la categoria "Nuove tecnologie", inoltre, è stata divisa per chiarezza in due famiglie: veicoli a emissioni zero e veicoli ibridi, per entrambe le quali è stata calcolata la soluzione ottimale.

Riassumendo, le incognite utilizzate sono le seguenti e comprendono i casi indicati:

Lo scenario è stato risolto per ciascuna di tali voci, valutandone l'incidenza nell'ottica della riduzione delle emissioni e del rispetto dei limiti imposti dalla EU.

7.2. VARIABILI DEL PROBLEMA

Il problema consiste, dal punto di vista matematico, in un sistema di 3 incognite e 3 equazioni risolventi; la soluzione, quando si siano fissate le variabili, è pertanto (se esiste) unica.

Per ottimizzare tutti i casi possibili generati dall'incrocio delle tre categorie già menzionate, è necessario dunque iterare il procedimento tante volte quante sono le variabili in gioco, dove per variabile si intende la percentuale di introduzione nel parco circolante di ogni combinazione carburante-propulsore considerata, in modo da rispettare l'obiettivo ambientale imposto.

Per risolvere il problema, ad ogni variabile di decisione X (percentuale di introduzione della combinazione carburante-propulsore) deve essere associato il dato di emissioni di quella scelta tecnologica. Questi dati di emissione sono così nominati:

V_t : Emissioni medie della categoria "Tradizionali"

V_b : Emissioni medie della categoria "Biofuels". Nel caso in cui il ciclo della CO_2 sia considerato come chiuso, tale variabile assume valore nullo.

V_n : Emissioni medie della categoria "Nuove Tecnologie". Tale variabile, quando riferita alle sole vetture elettrica e a idrogeno, assume valore nullo. Quando riferita alle vetture ibride o alimentate a diesel sintetico, assume il valore medio delle emissioni caratteristiche di tali tecnologie.

7.3. RISOLUZIONE MATEMATICA

I vincoli che definiscono il problema derivano dalla formulazione matematica dello scenario EU e prevedono le seguenti condizioni:

- riduzione delle emissioni generali, tenendo conto di tutte le categorie, ad un valore (massimo) di $120 \text{ gCO}_{2\text{eq}}/\text{km}$;
- riduzione delle emissioni per una quantità minima di $5 \text{ gCO}_{2\text{eq}}/\text{km}$ per mezzo dei biofuels;
- riduzione delle emissioni per una quantità minima di $5 \text{ gCO}_{2\text{eq}}/\text{km}$ per mezzo delle nuove tecnologie.

I vincoli suddetti, espressi matematicamente, assumono questa forma:

$$1) \quad X_t V_t + X_b V_b + X_n V_n = 120$$

$$2) \quad X_b (V_b - V_t) < -5$$

3) $X_n(V_n - V_t) < -5$

Il risultato, calcolato per ogni caso specifico, stabilisce quale sia la miglior soluzione possibile nell'ipotesi che la tecnologia in esame, per la quale si prevede lo sviluppo più significativo, dia, all'interno della categoria a cui appartiene, il contributo principale alla riduzione delle emissioni.

L'auto elettrica, ad esempio, fa parte della categoria delle nuove tecnologie. Un ipotetico scenario "Auto elettrica" si baserà sul presupposto che, nel futuro prossimo, sia proprio tale tecnologia ad avere lo sviluppo tecnologico più significativo, in modo da rappresentare interamente le nuove tecnologie nel calcolo della riduzione delle emissioni di CO₂.

Non sempre esiste una soluzione: in alcuni casi la combinazione di tecnologie e carburanti non produce risultati accettabili, perchè insufficienti per il conseguimento del risultato cercato.

Allo stesso modo sono stati scartati alcuni scenari, pur risolvibili matematicamente, perchè non rappresentativi di una possibile evoluzione futura del mercato; ad esempio l'eventualità di un mercato dell'automobile costituito al 90% da veicoli alimentati tramite gas naturale non ha significato pratico, in quanto è molto improbabile che si possa verificare.

7.4 SCENARI CONSIDERATI PER LA PRODUZIONE DEI CARBURANTI

Per biofuels e vettori energetici sono stati utilizzati gli scenari di produzione ritenuti rappresentativi considerando lo sviluppo tecnologico attuale e le possibili evoluzioni future, nonché tenendo conto delle esigenze ambientali di riduzione dei consumi e delle emissioni. I biofuels sono stati analizzati sia come prima che come seconda generazione: dunque colza e cellulosa per il biodiesel, grano, canna da zucchero e cellulosa per l'etanolo. Il caso della canna da zucchero, pur meno utilizzato in Europa, è stato considerato in quanto caso molto significativo a livello mondiale delle conseguenze dell'utilizzo di biocarburanti in ampie quantità.

Per quanto riguarda l'idrogeno, oltre al largamente diffuso processo di steam reforming del gas naturale, sono state prese in considerazione le ipotesi produzione per elettrolisi da fonte nucleare, rinnovabile (da energia eolica) e mix europeo.

Le ultime tre fonti sono le stesse utilizzate come riferimento per la produzione di elettricità per l'auto elettrica.

Segue la descrizione degli scenari utilizzati:

BIOFUELS

Biodiesel

ROFA1 – Rape to FAME (Fatty Acid Methyl Ester)

Produzione di biodiesel dalla colza. Gli scarti del processo di produzione (glicerina) sono destinati all'alimentazione animale.

WWS1 – Waste wood to synthetic diesel

Il biodiesel è prodotto tramite la gassificazione della cellulosa seguita da sintesi Fischer-Tropsch.

Etanolo

WTET1a – Wheat grain to ethanol

Produzione di etanolo da grano. In questo processo il calore per l'impianto di produzione dell'etanolo è assicurato da un boiler alimentato a gas naturale, mentre l'elettricità prodotta viene immessa nella rete. Gli scarti sono destinati all'alimentazione di animali.

SCET1 – Sugar cane to ethanol (Brazil)

L'etanolo è prodotto dalla canna da zucchero brasiliana e viene spedito in Europa dove viene miscelato con la benzina. Gli scarti sono utilizzati come combustibile generando a loro volta un surplus di energia.

WWET1 – Waste wood to ethanol

Il sistema è identico a quello della produzione da grano, al quale sostituisce la cellulosa proveniente dagli scarti della lavorazione del legno.

NUOVE TECNOLOGIE

Diesel sintetico

KOSD1 – Coal to Synthetic Diesel

Il carbone, di provenienza europea, viene sottoposto al processo Fischer-Tropsch per la produzione di diesel sintetico. La lavorazione produce grandi quantità di CO₂.

Idrogeno

GMCH1 – EU-mix NG supply to on-site hydrogen production and compression

Il gas naturale, di provenienza europea, viene fornito direttamente alle stazioni di rifornimento, dove viene trasformato in idrogeno tramite reforming e successiva compressione (per alimentazione del veicolo) direttamente on-site.

EMEL1CH1 – EU-mix electricity to compressed/liquid hydrogen via on-site electrolysis

La produzione di idrogeno avviene tramite elettrolisi alimentata da elettricità proveniente da mix europeo. Questo scenario prevede che il processo avvenga nel luogo in cui avverrebbe il rifornimento dei veicoli.

WDEL1CH1 – Wind to compressed hydrogen via central electrolysis

L'elettrolisi è alimentata da energia eolica e avviene in impianti centralizzati.

NUEL1CH1 - Nuclear to compressed hydrogen via on-site electrolysis

Come lo scenario EMEL1CH1, ma l'elettrolisi è alimentata da energia nucleare.

Elettricità

EMEL1 – EU-mix electricity

Elettricità prodotta da mix europeo.

WDEL1 – Wind electricity

Elettricità prodotta da eolico.

NUEL1 – Nuclear electricity

Elettricità prodotta da nucleare.

8. CONCLUSIONI SCENARI

Sono stati presi in considerazione solo gli scenari aventi reali possibilità di concretizzarsi, in cui la percentuale delle vetture tradizionali fosse pari o superiore all'84%.

Il caso dei biofuels con CO₂ considerata come ciclo aperto non ha pertanto soluzioni, dal momento che la situazione più conservativa prevede il rinnovo del 33% del parco macchine circolante attualmente.

Nel caso del ciclo chiuso, invece, le emissioni nulle della variabile V_b permettono di conseguire il risultato dell'abbattimento di 5 gCO_{2eq}/km introducendo nel parco circolante il 6,4% di vetture alimentate con un qualunque bio-carburante.

Di seguito si elencano le soluzioni ritenute valide:

- Auto a idrogeno da nucleare
- Auto a idrogeno da rinnovabile
- Auto a idrogeno da mix europeo
- Auto a idrogeno da gas naturale
- Auto elettrica da nucleare
- Auto elettrica da rinnovabile
- Auto elettrica da mix europeo
- Auto a gas naturale (da Siberia e da mix europeo) in motore ibrido
- Biodiesel puro (da colza e da cellulosa)*
- Etanolo puro (da grano, da canna da zucchero e da cellulosa)*

Le ultime due opzioni sono state calcolate utilizzando i veicoli a emissioni zero per rappresentare il parametro V_n nella risoluzione del sistema, che risulta così impostato:

-V_t: Veicoli tradizionali;

-V_b: Biodiesel puro (primo caso) oppure Etanolo puro (secondo caso);

-V_n: Veicoli a emissioni zero.

Lo stesso problema, impostato utilizzando i motori ibridi per rappresentare V_n, non produce risultati accettabili.

N.	Scenario TTW	% Tradizionali	% Biofuels	% Nuove Tecnologie	ENERGY (MJ/100 km)			GHG (g CO _{2eq} /km)		
					TTW	WTT	WTW	TTW	WTT	WTW
13	Gas ibrida (da Siberia)	0,841	0,064	0,095	176,0	43,0	219,0	120,0	18,4	138,2
12	Gas ibrida (da NG EU)	0,841	0,064	0,095	176,0	40,7	216,7	120,0	16,7	136,4
19	Biodiesel puro (colza) – Em0	0,899	0,064	0,037	176,8	45,2	222,1	120,0	21,6	141,4
1	BASE – Veicoli em. Zero	0,899	0,064	0,037	177,5	49,8	227,3	120,0	19,8	139,6
23	Etanolo puro (cellulosa) – Em0	0,899	0,064	0,037	178,2	53,8	232,0	120,0	17,5	137,3
22	Etanolo puro (canna zucc.) – Em0	0,899	0,064	0,037	178,2	53,6	231,8	120,0	23,1	142,9
21	Etanolo puro (grano) – Em0	0,899	0,064	0,037	178,2	53,6	231,8	120,0	23,1	142,9
20	Biodiesel puro (cellulosa) – Em0	0,899	0,064	0,037	176,8	45,2	222,1	120,0	17,8	137,6
3	H2 (ref. NG)	0,899	0,064	0,037	177,8	44,5	222,3	120,0	21,8	141,6
7	Elettrica (da mix EU)	0,899	0,064	0,037	177,3	48,3	225,6	120,0	22,3	142,1
9	Elettrica (da Nucleare)	0,899	0,064	0,037	177,3	51,9	229,2	120,0	17,1	136,9
8	Elettrica (da Eolica)	0,899	0,064	0,037	177,3	40,7	218,0	120,0	16,9	136,7
4	H2 (elettr. Mix EU)	0,899	0,064	0,037	177,8	57,4	235,1	120,0	26,6	146,4

N.	Scenario TTW	% Tradizionali	% Biofuels	% Nuove Tecnologie	ENERGY (MJ/100 km)			GHG (g CO ₂ eq/km)		
					TTW	WTT	WTW	TTW	WTT	WTW
5	H2 (elettr. Eolica)	0,899	0,064	0,037	177,8	44,3	222,0	120,0	17,4	137,2
6	H2 (elettr. Nucleare)	0,899	0,064	0,037	177,8	63,9	241,6	120,0	17,3	137,1

8.1 PERCENTUALI DI INTRODUZIONE NEL MERCATO

Le soluzioni accettate, come già anticipato, sono le più conservative: soddisfano dunque il vincolo ambientale stabilito dalla Comunità Europea senza stravolgere il mercato dell'auto con introduzioni massicce di nuove tecnologie e carburanti.

Pertanto tutti gli scenari accettati rispettano la posizione predominante occupata dalle vetture alimentate a Diesel e benzina, che nell'arco di tempo considerato continueranno ad essere il mezzo di trasporto più utilizzato.

I biofuels, considerati a ciclo chiuso ($V_b=0$ gCO₂eq/km per tutti i casi considerati), forniscono ovviamente lo stesso risultato per tutte le opzioni, con una percentuale di introduzione sul mercato pari al 6,4%.

Le nuove tecnologie ottengono risultati diversi in base al tipo di propulsione considerata: nel caso delle vetture a emissione zero (motore elettrico, con tutte le alimentazioni possibili), è sufficiente un percentuale di introduzione sul mercato pari al 3,7%; nel caso delle vetture ibride, a causa delle emissioni più elevate, la percentuale richiesta per soddisfare i vincoli dello scenario è più che doppia, arrivando al 9,5%.

L'auto ibrida alimentata a gas naturale (sia di provenienza europea che siberiana) fornisce l'unico risultato utile qualora si volesse utilizzare la tecnologia ibrida a rappresentare le nuove tecnologie nel mix automobilistico; sembra dunque che l'aumento di efficienza apportato da tale tipo di veicoli non sia sufficiente al rispetto del vincolo di 120 gCO₂eq/km di emissioni globali, se non nel caso particolare dell'uso in sinergia con una fonte fossile più virtuosa della media quale il gas naturale.

Diverso è il caso dei veicoli a emissioni zero: anche in questo caso, grazie all'omogeneità della variabile utilizzata, il risultato è lo stesso per tutte le opzioni considerate, che risultano pertanto equivalenti (in termini di numero di vetture da introdurre nel mix automobilistico).

8.2 WELL-TO-TANK: CONSIDERAZIONI ENERGETICHE

N.	Scenario TTW	% Tradizionali	% Biofuels	% Nuove Tecnologie	ENERGY (MJ/100 km)			GHG (g CO ₂ eq/km)		
					TTW	WTT	WTW	TTW	WTT	WTW
12	Gas ibrida (da NG EU)	0,841	0,064	0,095	176,0	40,7	216,7	120,0	16,7	136,4
8	Elettrica (da Eolica)	0,899	0,064	0,037	177,3	40,7	218,0	120,0	16,9	136,7
13	Gas ibrida (da Siberia)	0,841	0,064	0,095	176,0	43,0	219,0	120,0	18,4	138,2
5	H2 (elettr. Eolica)	0,899	0,064	0,037	177,8	44,3	222,0	120,0	17,4	137,2
3	H2 (ref. NG)	0,899	0,064	0,037	177,8	44,5	222,3	120,0	21,8	141,6
19	Biodiesel puro (colza) – Em0	0,899	0,064	0,037	176,8	45,2	222,1	120,0	21,6	141,4
20	Biodiesel puro (cellulosa) – Em0	0,899	0,064	0,037	176,8	45,2	222,1	120,0	17,8	137,6
7	Elettrica (da mix EU)	0,899	0,064	0,037	177,3	48,3	225,6	120,0	22,3	142,1
1	BASE – Veicoli em. Zero	0,899	0,064	0,037	177,5	49,8	227,3	120,0	19,8	139,6
9	Elettrica (da Nucleare)	0,899	0,064	0,037	177,3	51,9	229,2	120,0	17,1	136,9
21	Etanolo puro (grano) – Em0	0,899	0,064	0,037	178,2	53,6	231,8	120,0	23,1	142,9
22	Etanolo puro (canna zucc.) - Em0	0,899	0,064	0,037	178,2	53,6	231,8	120,0	23,1	142,9
23	Etanolo puro (cellulosa) – Em0	0,899	0,064	0,037	178,2	53,8	232,0	120,0	17,5	137,3
4	H2 (elettr. Mix EU)	0,899	0,064	0,037	177,8	57,4	235,1	120,0	26,6	146,4
6	H2 (elettr. Nucleare)	0,899	0,064	0,037	177,8	63,9	241,6	120,0	17,3	137,1

- L'auto elettrica alimentata da eolico si colloca al primo posto con 40,7 MJ/km. Tale risultato, pur identico a quello del motore ibrido a gas, è da preferire a quest'ultimo perchè più conservativo, richiedendo uno scenario con introduzione di solo 3,7% di vetture elettriche, contro lo scenario che richiede l'introduzione del 9,5% delle vetture a gas.
- Anche il motore ibrido alimentato a gas naturale proveniente da mix europeo, con 40,7 MJ/km, si colloca al primo posto. Il sito di provenienza in questo caso incide sul risultato a causa dei costi energetici di trasporto: la stessa soluzione, adottando il gas proveniente dalla Siberia, ottiene un risultato pari a 43 MJ/km.
- L'idrogeno ottiene un buon risultato quando prodotto da energia eolica (44,3 MJ/km) e da reforming del gas naturale (44,5 MJ/km). La produzione da energia nucleare e da mix europeo sono invece in fondo alla classifica, rispettivamente con 63,9 MJ/km e 57,4 MJ/km.
- Il biodiesel ottiene un buon risultato e si colloca a ridosso dell'idrogeno da gas reforming con 45,2 MJ/km.
- L'auto elettrica alimentata da mix europeo e da nucleare si attesta a metà classifica, con valori da 48,3 a 51,9 MJ/km.
- L'etanolo si conferma poco efficiente (53,6 MJ/km).

8.3 TANK-TO-WHEEL: CONSIDERAZIONI ENERGETICHE

N.	Scenario TTW	% Tradizionali	% Biofuels	% Nuove Tecnologie	ENERGY (MJ/100 km)			GHG (g CO ₂ eq/km)		
					TTW	WTT	WTW	TTW	WTT	WTW
12	Gas ibrida (da NG EU)	0,841	0,064	0,095	176,0	40,7	216,7	120,0	16,7	136,4
13	Gas ibrida (da Siberia)	0,841	0,064	0,095	176,0	43,0	219,0	120,0	18,4	138,2
19	Biodiesel puro (colza) – Em0	0,899	0,064	0,037	176,8	45,2	222,1	120,0	21,6	141,4
20	Biodiesel puro (cellulosa) – Em0	0,899	0,064	0,037	176,8	45,2	222,1	120,0	17,8	137,6
9	Elettrica (da Nucleare)	0,899	0,064	0,037	177,3	51,9	229,2	120,0	17,1	136,9
8	Elettrica (da Eolica)	0,899	0,064	0,037	177,3	40,7	218,0	120,0	16,9	136,7
7	Elettrica (da mix EU)	0,899	0,064	0,037	177,3	48,3	225,6	120,0	22,3	142,1
1	BASE – Veicoli em. Zero	0,899	0,064	0,037	177,5	49,8	227,3	120,0	19,8	139,6
5	H2 (elettr. Eolica)	0,899	0,064	0,037	177,8	44,3	222,0	120,0	17,4	137,2
4	H2 (elettr. Mix EU)	0,899	0,064	0,037	177,8	57,4	235,1	120,0	26,6	146,4
3	H2 (ref. NG)	0,899	0,064	0,037	177,8	44,5	222,3	120,0	21,8	141,6
6	H2 (elettr. Nucleare)	0,899	0,064	0,037	177,8	63,9	241,6	120,0	17,3	137,1
23	Etanolo puro (cellulosa) – Em0	0,899	0,064	0,037	178,2	53,8	232,0	120,0	17,5	137,3
22	Etanolo puro (canna zucc.) - Em0	0,899	0,064	0,037	178,2	53,6	231,8	120,0	23,1	142,9
21	Etanolo puro (grano) – Em0	0,899	0,064	0,037	178,2	53,6	231,8	120,0	23,1	142,9

Non ci sono differenze significative tra le soluzioni del sistema: la migliore è rappresentata dal gas naturale associato ad un motore ibrido, con un valore pari a 176 MJ/km; la soluzione peggiore, con 178,2 MJ/km, è invece l'etanolo, qualunque sia la fonte da cui è prodotto.

- La soluzione migliore è rappresentata dalla vettura a gas ibrida.
- Il biodiesel fa registrare un buon risultato, subito a ridosso dell'auto a gas ibrida.
- Auto elettrica e ad idrogeno sono quasi equivalenti, con una leggera prevalenza della prima, indipendentemente dalla fonte utilizzata per caricare le batterie.
- L'etanolo è la soluzione peggiore, da qualunque fonte provenga.

8.4 WELL-TO-WHEEL: CONSIDERAZIONI ENERGETICHE

N.	Scenario TTW	% Tradizionali	% Biofuels	% Nuove Tecnologie	ENERGY (MJ/100 km)			GHG (g CO ₂ eq/km)		
					TTW	WTT	WTW	TTW	WTT	WTW
12	Gas ibrida (da NG EU)	con	0,064	0,095	176,0	40,7	216,7	120,0	16,7	136,4
8	Elettrica (da Eolica)	0,899	0,064	0,037	177,3	40,7	218,0	120,0	16,9	136,7
13	Gas ibrida (da Siberia)	0,841	0,064	0,095	176,0	43,0	219,0	120,0	18,4	138,2
5	H2 (elettr. Eolica)	0,899	0,064	0,037	177,8	44,3	222,0	120,0	17,4	137,2
19	Biodiesel puro (colza) – Em0	0,899	0,064	0,037	176,8	45,2	222,1	120,0	21,6	141,4
20	Biodiesel puro (cellulosa) – Em0	0,899	0,064	0,037	176,8	45,2	222,1	120,0	17,8	137,6
3	H2 (ref. NG)	0,899	0,064	0,037	177,8	44,5	222,3	120,0	21,8	141,6
7	Elettrica (da mix EU)	0,899	0,064	0,037	177,3	48,3	225,6	120,0	22,3	142,1
1	BASE – Veicoli em. Zero	0,899	0,064	0,037	177,5	49,8	227,3	120,0	19,8	139,6
9	Elettrica (da Nucleare)	0,899	0,064	0,037	177,3	51,9	229,2	120,0	17,1	136,9
21	Etanolo puro (grano) – Em0	0,899	0,064	0,037	178,2	53,6	231,8	120,0	23,1	142,9
22	Etanolo puro (canna zucc.) - Em0	0,899	0,064	0,037	178,2	53,6	231,8	120,0	23,1	142,9
23	Etanolo puro (cellulosa) – Em0	0,899	0,064	0,037	178,2	53,8	232,0	120,0	17,5	137,3
4	H2 (elettr. Mix EU)	0,899	0,064	0,037	177,8	57,4	235,1	120,0	26,6	146,4
6	H2 (elettr. Nucleare)	0,899	0,064	0,037	177,8	63,9	241,6	120,0	17,3	137,1

- L'auto a gas naturale europeo in motore ibrido è la soluzione migliore dal punto di vista energetico (216,7 MJ/km), ma che richiede una introduzione del 9,5% di vetture sul mercato per rispettare il vincolo ambientale sulle emissioni del parco circolante.
- Segue l'auto elettrica da eolico, con 218 MJ/km e un'introduzione di appena 3,7% di nuove vetture nel mercato.
- Gli scenari biodiesel e auto idrogeno, prodotto sia da reforming del gas naturale che da eolico, ottengono un risultato molto simile (circa 222 MJ/km) pur con le stesse percentuali di introduzione sul mercato (rispettivamente 6,4% e 3,7%).
- Anche in questo caso si conferma la scarsa efficienza dell'auto elettrica quando alimentata da nucleare o da mix europeo (rispettivamente 229,2 e 225,6 MJ/km), introdotta per una quantità pari al 3,7% del mercato.
- L'etanolo puro, così come l'auto a idrogeno da nucleare e da mix europeo, pagano un WTT molto elevato e occupano rispettivamente il penultimo e l'ultimo posto della classifica. Come nei casi precedenti, il biocarburante è introdotto per una quantità pari al 6,4%.

8.5 WELL-TO-TANK: CONCLUSIONI AMBIENTALI

N.	Scenario TTW	% Tradizionali	% Biofuels	% Nuove Tecno- logie	ENERGY (MJ/100 km)			GHG (g CO ₂ eq/km)		
					TTW	WTT	WTW	TTW	WTT	WTW
12	Gas ibrida (da NG EU)	0,841	0,064	0,095	176,0	40,7	216,7	120,0	16,7	136,4
8	Elettrica (da Eolica)	0,899	0,064	0,037	177,3	40,7	218,0	120,0	16,9	136,7
9	Elettrica (da Nucleare)	0,899	0,064	0,037	177,3	51,9	229,2	120,0	17,1	136,9
6	H2 (elettr. Nucleare)	0,899	0,064	0,037	177,8	63,9	241,6	120,0	17,3	137,1
5	H2 (elettr. Eolica)	0,899	0,064	0,037	177,8	44,3	222,0	120,0	17,4	137,2
23	Etanolo puro (cellulosa) – Em0	0,899	0,064	0,037	178,2	53,8	232,0	120,0	17,5	137,3
20	Biodiesel puro (cellulosa) – Em0	0,899	0,064	0,037	176,8	45,2	222,1	120,0	17,8	137,6
13	Gas ibrida (da Siberia)	0,841	0,064	0,095	176,0	43,0	219,0	120,0	18,4	138,2
1	BASE – Veicoli em. Zero	0,899	0,064	0,037	177,5	49,8	227,3	120,0	19,8	139,6
19	Biodiesel puro (colza) – Em0	0,899	0,064	0,037	176,8	45,2	222,1	120,0	21,6	141,4
3	H2 (ref. NG)	0,899	0,064	0,037	177,8	44,5	222,3	120,0	21,8	141,6
7	Elettrica (da mix EU)	0,899	0,064	0,037	177,3	48,3	225,6	120,0	22,3	142,1
22	Etanolo puro (canna zucc.) - Em0	0,899	0,064	0,037	178,2	53,6	231,8	120,0	23,1	142,9
21	Etanolo puro (grano) – Em0	0,899	0,064	0,037	178,2	53,6	231,8	120,0	23,1	142,9
4	H2 (elettr. Mix EU)	0,899	0,064	0,037	177,8	57,4	235,1	120,0	26,6	146,4

- Anche in questo caso l'auto ibrida a gas naturale europeo si rivela la soluzione migliore (16,7 gCO₂/km).
- Seguono l'auto elettrica da eolico e nucleare (16,9 e 17,1 gCO_{2eq}/km) e quella a idrogeno, anche in questo caso da eolico e nucleare (17,3 e 17,4 gCO_{2eq}/km).
- I bio-carburanti, sia etanolo che biodiesel, ottengono buoni risultati quando prodotti da cellulosa; non avviene altrettanto per le produzioni di prima generazione.
- Il dato peggiore è ottenuto dall'idrogeno da elettricità da mix europeo (26,6 gCO_{2eq}/km).

8.6 WELL-TO-WHEEL: CONCLUSIONI AMBIENTALI

N.	Scenario TTW	% Tradizionali	% Biofuels	% Nuove Tecnologie	ENERGY (MJ/100 km)			GHG (g CO ₂ eq/km)		
					TTW	WTT	WTW	TTW	WTT	WTW
12	Gas ibrida (da NG EU)	0,841	0,064	0,095	176,0	40,7	216,7	120,0	16,7	136,4
8	Elettrica (da Eolica)	0,899	0,064	0,037	177,3	40,7	218,0	120,0	16,9	136,7
9	Elettrica (da Nucleare)	0,899	0,064	0,037	177,3	51,9	229,2	120,0	17,1	136,9
6	H2 (elettr. Nucleare)	0,899	0,064	0,037	177,8	63,9	241,6	120,0	17,3	137,1
5	H2 (elettr. Eolica)	0,899	0,064	0,037	177,8	44,3	222,0	120,0	17,4	137,2
23	Etanolo puro (cellulosa) – Em0	0,899	0,064	0,037	178,2	53,8	232,0	120,0	17,5	137,3
20	Biodiesel puro (cellulosa) – Em0	0,899	0,064	0,037	176,8	45,2	222,1	120,0	17,8	137,6
13	Gas ibrida (da Siberia)	0,841	0,064	0,095	176,0	43,0	219,0	120,0	18,4	138,2
1	BASE – Veicoli em. Zero	0,899	0,064	0,037	177,5	49,8	227,3	120,0	19,8	139,6
19	Biodiesel puro (colza) – Em0	0,899	0,064	0,037	176,8	45,2	222,1	120,0	21,6	141,4
3	H2 (ref. NG)	0,899	0,064	0,037	177,8	44,5	222,3	120,0	21,8	141,6
7	Elettrica (da mix EU)	0,899	0,064	0,037	177,3	48,3	225,6	120,0	22,3	142,1
22	Etanolo puro (canna zucc.) - Em0	0,899	0,064	0,037	178,2	53,6	231,8	120,0	23,1	142,9
21	Etanolo puro (grano) – Em0	0,899	0,064	0,037	178,2	53,6	231,8	120,0	23,1	142,9
4	H2 (elettr. Mix EU)	0,899	0,064	0,037	177,8	57,4	235,1	120,0	26,6	146,4

Dal momento che il TTW ambientale è, per ipotesi, pari a 120 gCO₂/km, le considerazioni fatte per il WTT sono valide anche per il WTW.

8.7 CONCLUSIONI GENERALI

Considerando sia gli aspetti ambientali che quelli energetici, la soluzione migliore pare essere l'introduzione di una quantità pari al 9,5% di auto ibride a gas, unitamente al 6,4% di vetture alimentate a biofuels. Un risultato simile si può ottenere anche grazie ai veicoli elettrici e ad idrogeno, la cui presenza sul mercato sarebbe pari al 3,7% del totale (sempre abbinate al 6,4% di biofuels). Proprio in virtù di tale quantità conservativa queste due opzioni sembrerebbero preferibili a quella precedente.

Sono invece da scartare le vetture elettriche e ad idrogeno quando la fonte di alimentazione è nucleare o fossile. Nel primo caso si registrano risultati insufficienti dal punto di vista energetico, nel secondo caso anche dal punto di vista ambientale.

Pare insufficiente anche la soluzione dell'etanolo, in particolare quando ottenuto dalla parte commestibile delle piante.

Il biodiesel da cellulosa potrebbe invece essere una soluzione accettabile sia dal punto di vista ambientale che da quello energetico, anche in virtù della miglior adattabilità ai motori già circolanti attualmente, per i quali non è richiesta alcuna modifica.

9. BIBLIOGRAFIA

- CONCAWE, EUCAR, Joint Research Center, “Well-To-Wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the european context ”, 2007.
- EIA (Energy Administration Information) – “International Energy Outlook 2008”.
- European Commission - “Energy and Transport Outlook to 2030, part IV”, 2008.
- Ferrari, Giancarlo - “Motori a combustione interna”, Il Capitello, 1992, Torino.
- IEA (International Energy Agency) - “World Energy Outlook 2006”.
- IEA (International Energy Agency) – “Key World Energy Statistics”
- Kutz, Myer - “Environmentally conscious transportation”, Wiley 2008.
- Larminie, James & Dicks, Andrew - “Fuel Cells Explained (Second Edition), Wiley 2003.
- Ricagno, Roberto - “Sostenibilità e condizionamento energetico della mobilità e dei trasporti nel XXI secolo: tipologie e prospettive d’impiego dei sistemi ad uso condiviso”, Tesi di laurea, Politecnico di Torino, 2007.
- U.S. Department of Energy – “Biomass Energy Data Book, Edition 1”, Oak Ridge National Laboratory, Tennessee, 2006.

10. ACRONIMI

CO ₂	Anidride Carbonica
CO _{2eq}	Anidride Carbonica Equivalente
CONCAWE	Oil Companies' European Association for Environment, health and safety in refining and distribution
DICI	Direct Injection Compression Ignition
DISI	Direct Injection Spark Ignition
DPF	Diesel Particulate Filter
EUCAR	European Council for Automotive Research and Development
FAME	Fatty Acid Methyl Ester
FC	Fuel Cells
FT	Sintesi Fischer-Tropsch
GPL	Gas di Petrolio Liquefatto
ICE	Internal Combustion Engine
Mix-EU	Mix europeo: composizione media di una certa risorsa o carburante in Europa
PISI	Port Injection Spark Ignition
TTW	Tank-To-Wheel
V _t	Media delle emissioni dei veicoli tradizionali
V _b	Media delle emissioni dei veicoli a biofuels
V _n	Media delle emissioni dei veicoli a nuova tecnologia
WTT	Well-To-Tank
WTW	Well-To-Wheel