

## **Celle a Idrogeno Polimeriche**

### **Città, costruttori d'auto e industria petrolifera in un nuovo network**

Giancarlo FIORITO  
[gianfiorito@yahoo.com](mailto:gianfiorito@yahoo.com)

Il nuovo paradigma della società dell'informazione sta cambiando i nostri bisogni in energia e mobilità e le relative infrastrutture: da verticale, centralizzata ed orientata alla produzione, l'energia si avvicina al punto di consumo e deve essere affidabile e pulita. La società di rete spinge per una ottimizzazione a 360° del processo economico, che deve prendere in considerazione il ciclo completo di energia e materiali di ogni attività produttiva.

Iniziata nel 1973, per *umentare* la sicurezza dell'offerta, la ricerca di un sistema energetico alternativo al petrolio ha portato al mercato delle tecnologie nuove, come il nucleare ed il fotovoltaico, oltre a migliorarne altre già esistenti come l'eolico e la turbina a gas. L'energia rinnovabile è oggi in commercio, ma appare inadeguata alla sostituzione del sistema tradizionale basato sulle fonti fossili, specialmente per i picchi di domanda di energia elettrica ed i carburanti.

La duplice sfida della riduzione dei gas ad effetto serra (globale) e dell'inquinamento da trasporti (locale) delinea un nuovo obiettivo: *ridurre* le emissioni per *mantenere* la crescita economica; e' una sfida importante ed urgente, che implica un ripensamento fondamentale del nostro modello di sviluppo. Infatti, gli obiettivi di Kyoto sulla riduzione del CO<sub>2</sub>, uniti alla urgente priorità di una mobilità sostenibile, pongono dei seri dubbi sulla possibilità di soddisfare i crescenti bisogni energetici con dei semplici miglioramenti delle tecnologie convenzionali o mediante il dispiegamento massiccio delle marmitte catalitiche.

Questo documento presenta le principali opzioni tecnologiche per i trasporti, con i relativi costi e benefici, cercando di dimostrare come la tecnologia delle celle a combustibile possa contribuire al raggiungimento degli obiettivi sopramenzionati. Le celle a polimeri in particolare, sono candidate a caratterizzare un radicale cambiamento nell'infrastruttura dei trasporti, coinvolgendo la società civile, i governi e la grande industria. Si tratta di cambiamenti sia al livello della produzione di energia (tecnologia) che dei consumi (stili di vita). Per intravedere il cambiamento, già in corso, è necessario immaginare un mercato concorrenziale dell'idrogeno prodotto da fonti energetiche sia fossili che rinnovabili, per alimentare un parco crescente di veicoli elettrici – Fuel Cell Vehicles (FCV) - che spaziano dalla bicicletta all'autobus di linea. Il vettore idrogeno spinge ad un rinnovamento dell'infrastruttura energetica a favore delle fonti rinnovabili, senza escludere le possibilità offerte dalle fonti tradizionali, quali, soprattutto metano e GPL.

Infine, descriviamo brevemente come sia possibile incoraggiare una mutazione infrastrutturale che favorisca le realtà locali. Una "devolution dell'energia" in cui i *produttori di energia* rinnovabile diventino *fornitori di carburante* – con il conseguente plusvalore - per veicoli. Le celle a combustibile costituiscono una leva formidabile per indurre dei cambiamenti non marginali nelle abitudini della popolazione e, contemporaneamente, sfruttare il potenziale della grande industria nell'implementazione delle innovazioni infrastrutturali di lungo periodo divenute necessarie alla luce della presente situazione geopolitica.

## 1 - La mobilità – Storia di accelerazioni e perdite

*Capire la mobilità inizia con la biologia: gli uomini sono animali territoriali che, istintivamente, cercano di massimizzare il territorio; il motivo è che territorio significa opportunità e risorse.*

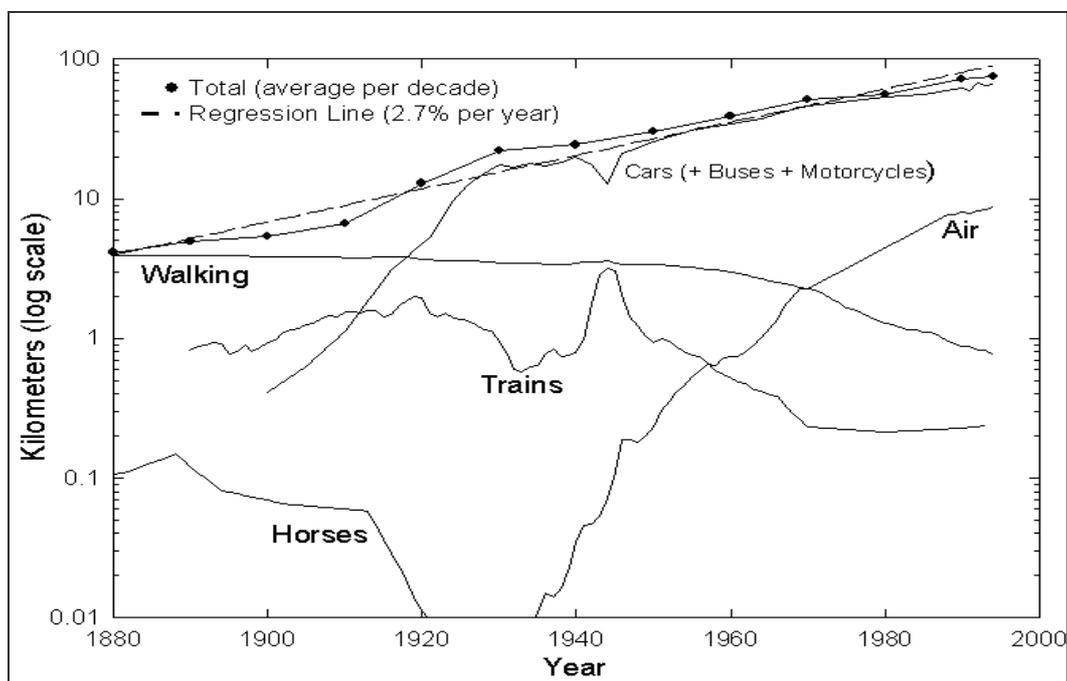
Cesare Marchetti

Nell'ultimo ventennio del XIX secolo, il motore a scoppio - un sistema di sfruttamento della dilatazione dei gas su un albero meccanico - perfezionandosi rapidamente si avviava a diventare la prima industria mondiale. La potenza dei nuovi motori, che oggi spazia da pochi watts ad oltre 100 kW, unita alla loro compattezza, permise la propulsione di navi e locomotive, sostituendo la “macchina di Watt”, ma anche, cosa inedita, per le carrozze.

All'inizio del XX secolo, le industrie dell'automobile, petrolifera e della gomma per i pneumatici, indussero un gigantesco sviluppo dei lavori pubblici per la costruzione delle strade moderne. Questi fenomeni sinergici hanno radicalmente cambiato la mobilità, lo spazio ed il modo di vivere in generale.

Il motore a combustione interna ha permesso, allargando i confini di produzione e distribuzione di merci e servizi, lo sviluppo delle grandi città moderne e oggi l'automobile rappresenta una parte essenziale del nostro vivere quotidiano. Il *Grafico 1* mostra come i km percorsi siano aumentati nel secolo scorso e come, nonostante gli aerei siano il settore in maggior crescita, l'incremento sia principalmente dovuto alla diffusione dell'auto privata<sup>1</sup>.

**Grafico 1 – I chilometri procapita all'anno secondo il mezzo di locomozione**

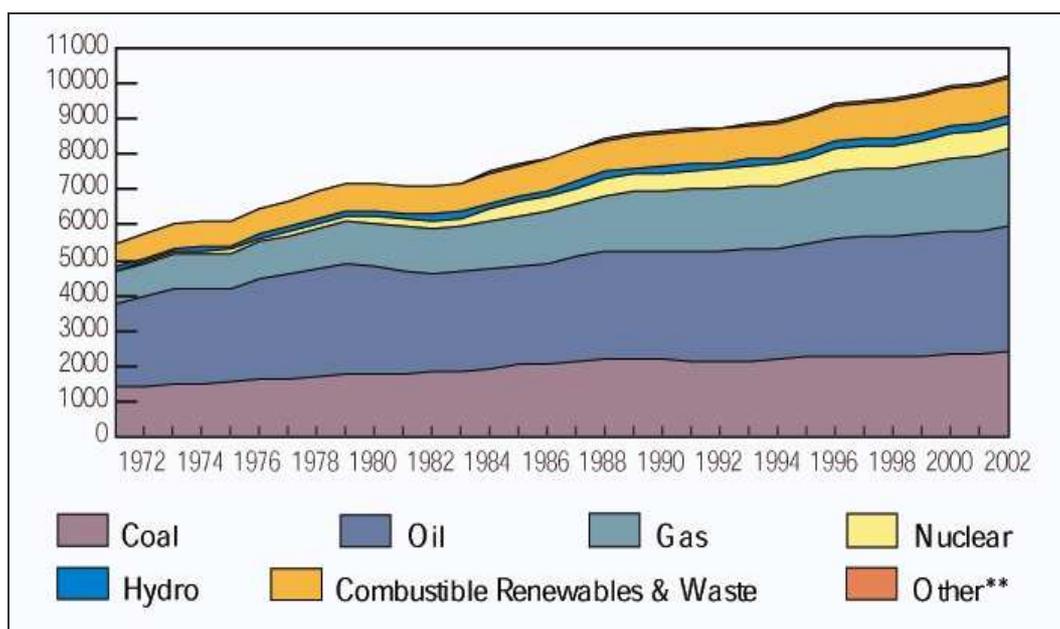


La propulsione mediante energia fossile ha un significato particolare com'è facile osservare nel *Grafico 2*: il petrolio ha la parte più importante nella produzione mondiale di energia primaria<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> J.H.Ausubel, C. Marchetti, P.S.Meyer, *Toward Green Mobility: the Evolution of Transport*, European Review, Vol.6, No.2, 137-156 (1998), p.138 ; anche in [http://phe.rockefeller.edu/green\\_mobility/](http://phe.rockefeller.edu/green_mobility/)

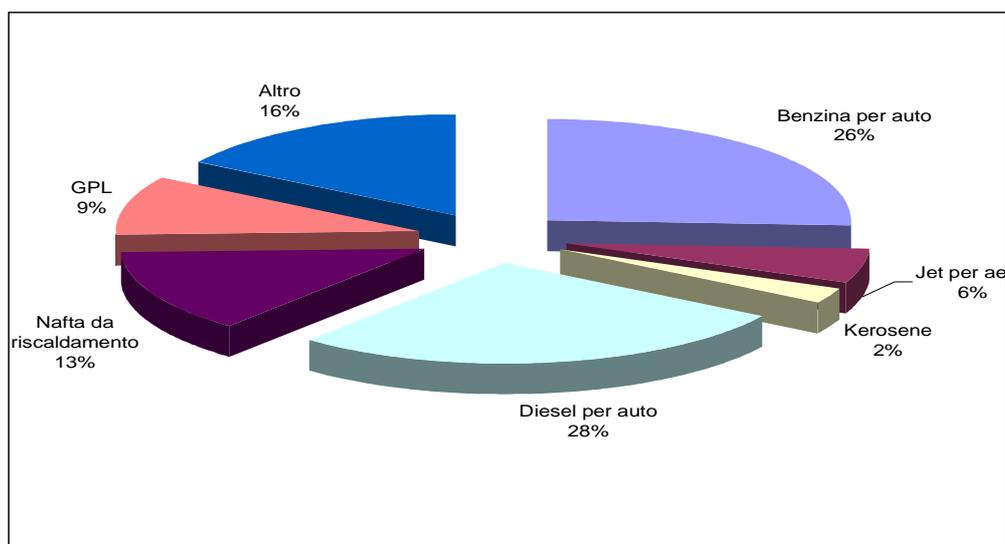
<sup>2</sup> International Energy Agency, 2004, [www.iea.org](http://www.iea.org)

**Grafico 2 – L'offerta di energia primaria**



Cosa diviene e com'è utilizzata questa risorsa? Il *Grafico 3* sintetizza la domanda per i prodotti derivati dalla raffinazione al livello mondiale nel 2001<sup>3</sup>. Oltre il 50% diviene *carburante* per autotrazione terrestre<sup>4</sup>. La stima econometrica della domanda di carburanti conferma che l'elasticità-prezzo è estremamente bassa ( $\approx -0.1$ )<sup>5</sup>; è questo il motivo principale dell'inefficacia delle politiche di prezzo per correggere le imperfezioni del mercato ed includere nel prezzo della benzina il costo sociale dei trasporti.

**Grafico 3 – La domanda di Petrolio nel mondo secondo l'uso**



Dai *Grafici 2 e 3* sopra ben si intuisce come oltre la metà della risorsa petrolio venga usata nei trasporti, ma, volendo proporre delle soluzioni tecnologiche, è necessario quantificare la

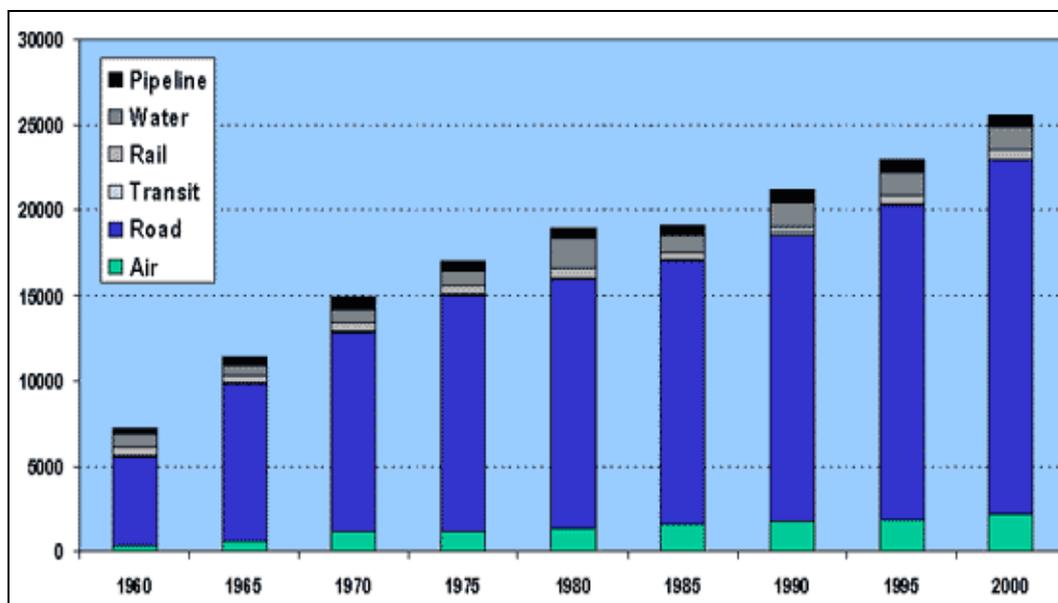
<sup>3</sup> U.S. DOE <http://www.eia.doe.gov/emeu/international/oilconsumption.html>

<sup>4</sup> Da distinguere dal *combustibile* quando non serve per il trasporto (riscaldamento, processi chimici..).

<sup>5</sup> DOE *Policies and Measures for Reducing Energy Related Greenhouse gas Emissions, Lessons from the Recent Literature* DOE/PO-0042. U.S. Department of Energy, Washington, DC

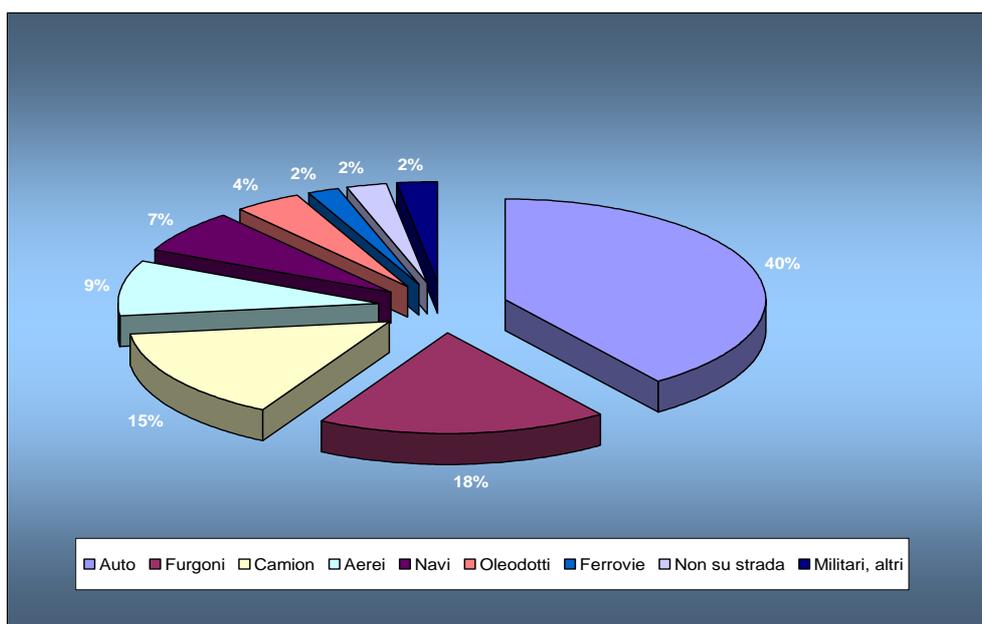
ripartizione secondo i mezzi di trasporto dell'utilizzatore finale. Il *Grafico 4* offre la ripartizione dei consumi per i diversi mezzi di trasporto negli Stati Uniti<sup>6</sup>.

**Grafico 4 – Domanda di petrolio nei trasporti nel tempo**



Il *Grafico 5* da inoltre un'idea intuitiva della parte dei veicoli leggeri (“furgoni” e “auto”) all'interno dei trasporti: la mobilità richiede carburanti e la benzina ed il diesel sono quelli ideali per automobili e furgoncini che, in termini di consumo, costituiscono oltre il 60%.

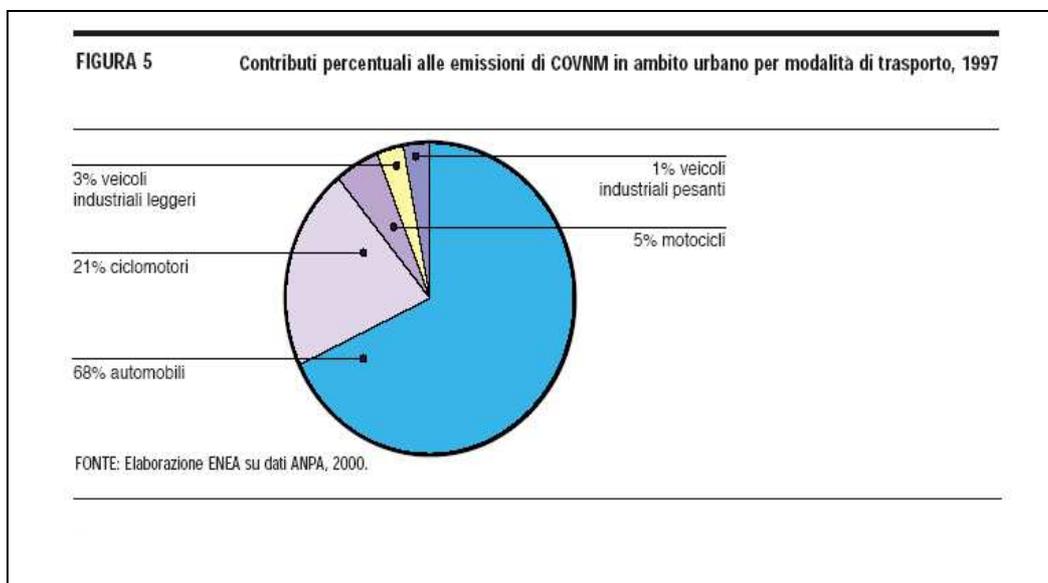
**Grafico 5 – Percentuali dei consumi di petrolio per tipo negli Stati Uniti**



<sup>6</sup> DeCicco, J.M. e Mark, J. *Meeting the energy and climate change challenge for transportation in the United States*, in Energy Policy, vol 26, umero 5, pagine 395-412, 1998.

Guardando all'Italia, il *Grafico 6* presenta infine le fonti delle emissioni nelle città<sup>7</sup>:

### Grafico 6 – Emissioni di composti organici volatili non metanici in città



Questi dati spiegano come e perché, nonostante i grandi sforzi di diversificazione ed incentivazione (GPL, metano, alcol, biodiesel) il trasporto su gomma rimane rigidamente petrolio-dipendente. I dati si traducono così in CO<sub>2</sub> da inefficienza ed emissioni locali (particolato, monossido di carbonio, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, PM10 ecc.) le cui conseguenze “d’impatto” sono rumore, danni alla salute e alle cose, congestione e caos: i problemi chiave per l’ambiente e la qualità della vita del nostro tempo.

Riassumendo, i trasporti sono un settore ad alto consumo di combustibili fossili che, come vedremo (Capitolo 2, *Grafico 7*) è anche caratterizzato da una bassissima efficienza: 10% in media. Questo dato si traduce in molto CO<sub>2</sub> per km percorso alla guida di un veicolo. Un impegno forte sia politico che sociale diviene quindi essenziale, poiché si tratta di incoraggiare e guidare nelle fasi iniziali una *nuova tecnologia* di prevenzione dell’inquinamento, che prende in considerazione il ciclo globale delle risorse coinvolte.

<sup>7</sup> [http://www.minambiente.it/Sito/pubblicazioni/Collana\\_RSA/RSA\\_2001/Parte\\_a/6\\_trasporti.pdf](http://www.minambiente.it/Sito/pubblicazioni/Collana_RSA/RSA_2001/Parte_a/6_trasporti.pdf)

## 2 – I trasporti - Tra politica e tecnologia

Nella letteratura si trovano differenti opzioni per affrontare la questione di un sistema sostenibile nei trasporti. Adottiamo una classificazione molto generale che distingue le tecnologie secondo “dove” agiscono<sup>8</sup>. Queste opzioni possono essere classificate in:

1 – **Tecnologie “di ripulitura”**: dirette all’*effetto* dell’inquinamento, servono a diminuire o togliere l’inquinamento esistente o a ridurre il danno o disturbo da essa direttamente creato; nel settore dei trasporti un esempio sono le barriere anti-rumore.

2 - **Tecnologie “al tubo di scappamento”**: dirette alla *fonte* dell’inquinamento, sono un insieme di tecnologie atte a pulire o filtrare le emissioni prima della loro dispersione; l’esempio tipico è la marmitta catalitica.

3 - **Tecnologie integrate nel processo**: dirette all’efficienza finale e/o globale del processo; hanno per scopo *prevenire* l’inquinamento, mediante un cambiamento il processo di conversione energetico stesso, ma dipendono dall’innovazione - più che da invenzioni *ex-novo* - e dalla volontà politica.

E’ generalmente riconosciuto che le tecnologie integrate sono le uniche capaci di ridurre l’impatto dell’inquinamento nei trasporti; una diretta conseguenza di questo consenso è che la pianificazione dei trasporti e i programmi pubblici per la mobilità hanno già orientato lavoro e risorse finanziarie verso “cicli globali sostenibili”. La società civile ed i governi possono scegliere di *domandare* le “soluzioni”, mediante politiche che, a loro volta, possono essere elencate secondo un grado crescente di innovazione tecnologica:

- 1) **Lo strumento legislativo** per incoraggiare o imporre l’aumento progressivo degli standards di efficienza, con lo scopo di abbattere le emissioni locali e globali; un esempio per l’Europa sono le norme EURO III, IV ecc;
- 2) **I carburanti alternativi**: bruciando benzina riformulata, etanolo, metanolo, metano, colza e l’idrogeno si opera per delle innovazioni nell’infrastruttura di produzione e distribuzione; in questo scenario solo la politica può favorire l’adeguamento normativo per favorire le necessarie e complesse certificazioni; queste politiche producono dei buoni risultati soprattutto per l’abbattimento delle emissioni locali;
- 3) **Le tecnologie alternative**: introducendo l’iniezione diretta (DIEV<sup>9</sup>), gli ibridi (HEV<sup>10</sup>), gli elettrici a batteria (BPV<sup>11</sup>) ed i veicoli a idrogeno (FCV<sup>12</sup>) si cambia il sistema di trazione nel settore strategico della mobilità individuale. La trazione è sempre fornita da un motore elettrico o termico, mentre la differenza in efficienza ed emissioni proviene dal modo di produrla e di utilizzarla; queste dipendono, rispettivamente, dalla termodinamica e dal ciclo di guida.

Per ciò che concerne la prima opzione, l’aumento di efficienza dei veicoli dovrebbe essere un obiettivo “naturale” delle imprese costruttrici, tuttavia lo strumento legislativo si è dimostrato fondamentale per velocizzare il processo a basso costo; ad esempio, i modelli dell’*Energy Information Administration for Transportation* ipotizzano una diminuzione progressiva dei consumi dei veicoli a motore che raggiunge i 3.1 lt/100km intorno al 2020.

---

<sup>8</sup> Ispirata da Geerlings, H. *Towards sustainability of technological innovation in transport ; The role of government in generating a window of technological opportunity*, Erasmus University, Rotterdam, 1998.

<sup>9</sup> DIEV : Direct Injection Engine Vehicle.

<sup>10</sup> HEV : Hybrid Electric Vehicle.

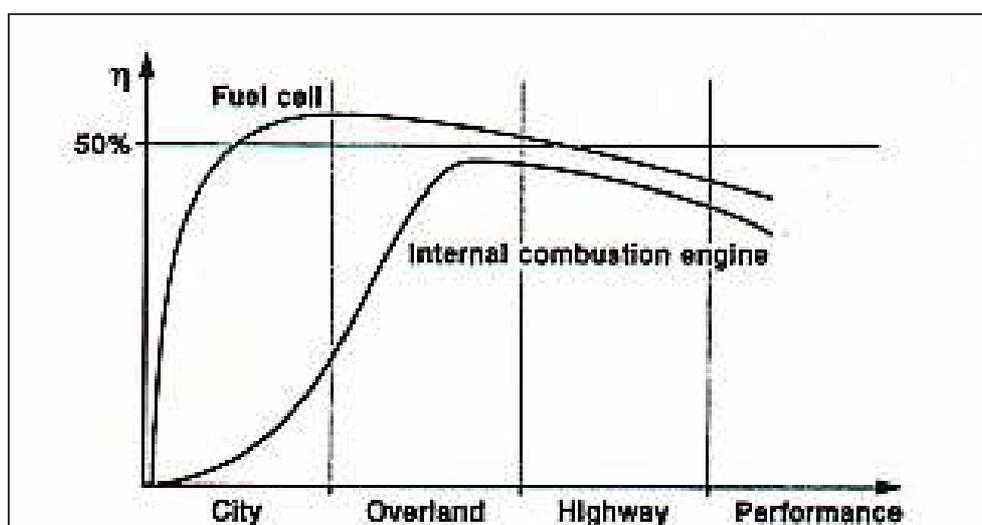
<sup>11</sup> BPV : Battery Powered Vehicle.

<sup>12</sup> FCV : Fuel Cell Vehicle.

L'uso di alcol e olio di colza nei motori a combustione interna serve a ridurre la dipendenza dal petrolio, ma il loro impiego, sempre congiunto con benzina e diesel rispettivamente, non produce vantaggi considerevoli nella qualità dell'aria, eccettuati il monossido di carbonio e lo zolfo. Secondo alcuni esperti inoltre, la benzina riformulata può avere risultati migliori<sup>13</sup>.

Il motivo degli scarsi risultati ottenibili sia dall'elevazione degli standards che dai carburanti alternativi risiede nel ruolo cruciale dell'efficienza finale nel ciclo energetico del settore dei trasporti; vi sono dei precisi limiti tecnici del motore a combustione interna nei diversi modi di guida<sup>14</sup>. Questi limiti sono poco conosciuti in dettaglio e li presentiamo nel *Grafico 7*. Il grafico presenta sull'ordinata i rendimenti di un DIEV e di un FCV per i tre possibili cicli di guida, urbano, misto ed autostrada, in ascissa.

**Grafico 7 – L'efficienza delle celle a combustibile rispetto all'iniezione diretta**<sup>15</sup>



Trasposto nel reale, il vantaggio del cambiamento tecnologico appare ancora più chiaramente, infatti i due terzi degli spostamenti sono effettuati in aree urbane molto trafficate a 10/20 kmh di media dove l'efficienza dell'auto è del 5 – 10 %.

Da questi brevi e semplici riferimenti tecnico-economici deduciamo la necessità urgente di adottare una tecnologia alternativa per il trasporto individuale. Il prossimo capitolo spiega la tecnologia delle celle a combustibile e gli investimenti necessari per l'infrastruttura e lo sviluppo dei veicoli; investimenti che richiedono – è bene ribadirlo - il ruolo attivo del settore pubblico locale e nazionale per adeguare le infrastrutture di distribuzione e manutenzione e ridurre i costi.

<sup>13</sup> Vedi: UNDP, *Energy after Rio Prospects and Challenges* [www.undp.org/seed/energy/chapter3.html](http://www.undp.org/seed/energy/chapter3.html)

<sup>14</sup> L'efficienza viene calcolata sulla base del potere calorico inferiore del carburante : watts in entrata al serbatoio ed in uscita all'albero motore. Il ciclo completo – presentato in seguito - *well-to-wheel* include la produzione e distribuzione del carburante.

<sup>15</sup> C.E. Borroni-Bird, Chrysler Corporation, *Fuel Cell commercialisation issues for light-duty applications*. J. of Power Sources 61 (1996) p 34.

### 3 – Le celle a combustibile - Il microchip nella rete dell'energia<sup>16</sup>

*Le auto saranno costruite attorno al sistema di trazione della cella a combustibile in modo di unire quest'ultima con la tecnologia by-wire, questo permetterà ai veicoli di essere controllati elettronicamente invece che meccanicamente.*

Christopher Borroni-Bird

Le celle a combustibile sono dei motori elettrochimici che realizzano la conversione diretta dei carburanti in elettricità ed hanno un'efficienza elettrica che varia dal 40 al 60%. La cella a combustibile fu inventata in Inghilterra da Sir William Grove nel 1839 nel tentativo di dimostrare la fattibilità dell'inverso dell'elettrolisi dell'acqua, introducendo idrogeno e ossigeno in una soluzione di acido solforico con degli elettrodi di platino.

A quel tempo i grandi progressi della meccanica avevano già portato allo sviluppo dei motori a vapore, inizialmente impiegati nelle miniere di carbone profonde e, in seguito, nei trasporti; l'elettricità non era ancora un'industria, la cella a combustibile rimase in laboratorio fino al 1950 quando Francis Bacon in Inghilterra riprese la tecnologia sviluppandola per il programma spaziale. La tabella 1 presenta le diverse tecnologie di celle a combustibile distinte secondo l'elettrolita.

**Tabella 1 – Celle a combustibile - Tipologia, efficienze, status e applicazioni.**

Fuel Cell (Elettrolita)	Efficienza elett. cella $\eta_{el}$ % (sistema)	Applicazioni e status della tecnologia
PEMFC <sup>17</sup> (membrana polimerica)	60 (35-40)	Mobile, generatori (0.01 – 300 kW) pre-commerciale (alta densità di potenza)
Alcalina (85wt% di KOH in acqua)	50 (40)	Mobile, commerciale (1-40 kW)
Acido Fosforico	50 (40)	Ciclo combinato, commerciale (200kW)
Carbonati fusi (Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> + K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> )	(50-60)	Ciclo combinato, Field testing (1MW)
Ossidi Solidi (ZrO <sub>2</sub> + YO <sub>3</sub> )	(40, 70 con Turbina a Gas)	Ciclo combinato, pre-commerciale (10-200kW), tests sul campo
Metanolo	35	Elettronica di largo consumo, pre-commerciale (1 - 300 W)

Tradizionalmente, la tecnologia delle celle a combustibile è stata spinta dall'industria aerospaziale e militare per motivi di interesse nazionale. Le celle sono note tra gli ingegneri per produrre elettricità in modo efficace ed affidabile, ma solo recentemente gli sviluppi tecnici delle PEM hanno infiammato gli interessi sia finanziari che politici. Il motivo risiede nella crescita impressionante della densità di potenza, espressa in kW/lt, raggiunta da produttori quali Ballard (*Foto 1*), paragonabile a quella dei motori a scoppio; tali sviluppi hanno riguardato tutti i componenti della cella a membrana polimerica: dalle membrane, agli elettrodi, al catalizzatore. Le previsioni della grande industria e dei più prestigiosi laboratori di ricerca circa le riduzioni dei costi infine, motivano l'attuale copertura mediatica della tecnologia<sup>18</sup>.

<sup>16</sup> Questa sezione del documento si basa sulla tesi di master dell'autore: *PEMFC Sytems – A Techno-Economic Analysis*, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Losanna, Novembre 1997.

<sup>17</sup> Il nome deriva dall'uso di una membrana a scambio di protoni come elettrolita; Polymer Electrolyte Fuel Cell (marchio registrato della General Electric), Proton Exchange Membrane Fuel Cell e Solid Polymer Fuel Cell sono equivalenti.

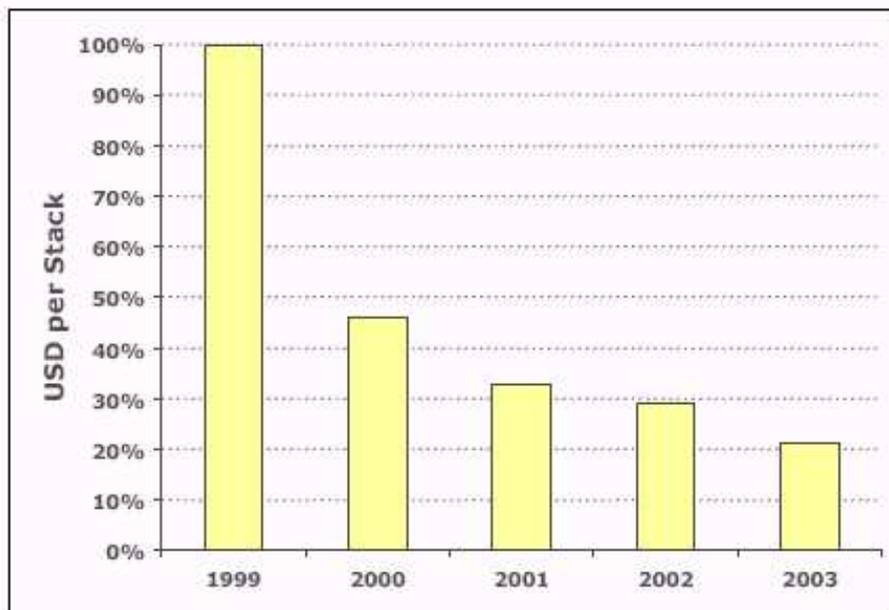
<sup>18</sup> L'industria automobilistica prevede dei costi compresi tra 750 e 1000 \$ per una cella da 50 kW, traducibile in un costo specifico di circa 60 \$/kw per il sistema di trazione completo, paragonabile a quello degli attuali motori a scoppio.

Foto 1 – La densità di potenza delle celle a combustibile<sup>19</sup>



Nel Grafico 8 presentiamo il trend del costo delle celle<sup>20</sup>.

Grafico 8 – Costo di una cella a combustibile



L'Europa ha delle ottime possibilità di introdurre dei veicoli a cella a combustibile, poiché gode della partecipazione attiva delle compagnie energetiche e degli enti di trasporto locali; la comunità europea con l'industria energetica ed automobilistica hanno un ruolo di primo piano

<sup>19</sup> Ballard Annual Report, 2004, [www.ballard.com](http://www.ballard.com) ; nella foto si vedono, da destra a sinistra, le celle prodotte dal 1993 al 2003 e la relativa potenza in kW.

<sup>20</sup> La cella in sé (chiamata « stack ») dovrebbe rappresentare un terzo del costo totale del sistema di trazione, il resto è composto dal sistema di stoccaggio e gestione dell'idrogeno e dall'elettronica di potenza ed altri accessori, per un totale di circa 3000 \$.

nello sviluppo delle celle a combustibile<sup>21</sup>. Il recente studio dell'equipe del Prof. Vincenzo Naso del CIPRS dell'Università di Roma<sup>22</sup> ha stimato l'impatto della transizione all'idrogeno sull'impiego al livello italiano ed europeo.

La traiettoria di sviluppo delle celle a combustibile può riassumersi nel modo seguente :

**Tabella 2 – Evoluzione per comparti della tecnologia delle celle a combustibile**

<b>Campo</b>	<b>Passaggio</b>		
Ricerca	Fondamentale	⇒	Applicata
Dinamica Tecnologica	Interesse nazionale (tech.push)	⇒	Ambiente (technology.pull)
Competizione in R&S	Produzione di energia (upscaling)	⇒	Motori (downscaling)
Attore principale	Governi, Majors	⇒	Regioni, comuni, Coop, ONG

<sup>21</sup> [http://europa.eu.int/comm/dgs/energy\\_transport/rtd/6/call\\_3/doc/2004\\_tren\\_3\\_workprog\\_61\\_en.pdf](http://europa.eu.int/comm/dgs/energy_transport/rtd/6/call_3/doc/2004_tren_3_workprog_61_en.pdf)

<sup>22</sup> <http://www.movimentoecologista.org/speciali/idrogeno/naso.shtml>

#### 4 – Il vettore idrogeno – Quando etico ed ecologico saranno sinonimi

*Nel 1894 Ostwald, cofondatore con Van't Hoof e Arrenius dell'elettrochimica, diede una conferenza alla Società Tedesca di Chimica in cui prospettava un futuro nel secolo a venire in cui le macchine avrebbero operato secondo i principi di una scienza nuova, piuttosto che le leggi che regolano i cambiamenti volumetrici dei gas sottoposti all'azione della temperatura, stabilite agli albori della fisica. Le nuove macchine avrebbero operato senza vapore, fiamme, ceneri e fumi e le altre forme di inquinamento, convertendo l'energia chimica dei combustibili direttamente in forza motrice, invece di convertirla in calore con un inefficiente ciclo termico.*

John Appelby<sup>23</sup>

L'idrogeno può essere prodotto da molte fonti energetiche, benzina inclusa, ne consegue che i veicoli a cella a combustibile (FCV) possono inizialmente usare l'infrastruttura esistente sviluppata per i carburanti fossili. Il metanolo è stato a lungo valutato come candidato per la propulsione di un FCV, può essere prodotto sia dal metano che dalla biomassa, è liquido (il che evita rischi e consumi della compressione dell'idrogeno), mentre la sua conversione in idrogeno non abbassa significativamente l'efficienza globale. I fautori hanno sottolineato come il rifornimento con il metanolo sia simile a quello con la benzina, mentre il costo della conversione di una stazione di benzina al metanolo sono modesti (\$50,000/ stazione)<sup>24</sup>. Stime recenti indicano che con un investimento di 4.7 miliardi di dollari, il metanolo potrebbe essere disponibili nel 25 % delle stazioni di benzina esistenti in Nord America, Europa e Giappone. La stima va comparata con i \$13 miliardi di dollari spesi dal 1991 al 2000 dall'industria petrolifera americana per produrre benzina riformulata<sup>25</sup>.

Si deve sottolineare che i consumi di energia e le emissioni delle diverse tecnologie motoristiche (alternative e tradizionali) devono essere comparati in un ciclo energetico globale. L'analisi di rendimento dal pozzo di petrolio alle ruote motrici, o *well-to-wheel*, permette di svelare tutti i dettagli della catena energetica.

A tal fine, presentiamo – in estrema sintesi – i risultati di uno studio rigoroso condotto da General Motors per 10 schemi di carburante e sistema di trazione che include sia l'efficienza che le emissioni<sup>26</sup>. Lo studio dettaglia la fase “dal pozzo al serbatoio” per 75 possibili filiere, considerando le riserve mondiali e con credibili ipotesi per i costi futuri, con delle stime di probabilità empirica applicate nelle varie fasi. La seconda parte – “dal serbatoio alle ruote” – analizza 15 distinte opzioni carburante/trazione. Il risultato finale consiste in una combinazione di 10 possibili carburanti-auto, elencati nella Tabella 3 in basso:

**Tabella 3 – Definizioni nell'analisi “dal pozzo alle ruote”**

Filiera del Carburante	Configurazione del Veicolo	Abbreviazione carburante	Abbreviazione veicolo
1 Benzina a basso tenore di Zolfo	Benzina CONVenzionale a candele	GASO	SI CONV
2 Diesel a basso tenore di Zolfo	Diesel CONVenzionale a iniezione diretta compressa	DIESEL	CIDI CONV
3 Etanolo 85 da cellulosa erbacea	Etanolo85 CONV a iniezione diretta compressa	HE85	SI CONV
4 Diesel a basso tenore di Zolfo	Diesel a iniezione diretta compressa ibrido parallelo	DIESEL	CIDI HEV
5 Etanolo 85 da cellulosa erbacea	Etanolo85 a candele ibrido parallelo	HE85	SI HEV
6 Benzina a basso tenore di Zolfo	Benzina processore cella comb. ibrido parallelo	GASO	FP FC HEV
7 Nafta	Benzina processore cella comb. ibrido parallelo	NAP	FP FC HEV
8 Metanolo da metano non nord Americano	Metanolo processore cella comb. ibrido parallelo	MEOH	FP FC HEV
9 Etanolo 100 da cellulosa erbacea	Etanolo processore cella comb. ibrido parallelo	HE100	FP FC HEV
10 Idrogeno gassoso da metano non nord Americano	Idrogeno gassoso da stazioni locali celle comb. ibrido parallelo	GH2	FC HEV

<sup>23</sup> Appleby, J. *Fuel cell technology : Status and future prospects*, Energy 21, 1996, pag. 1.

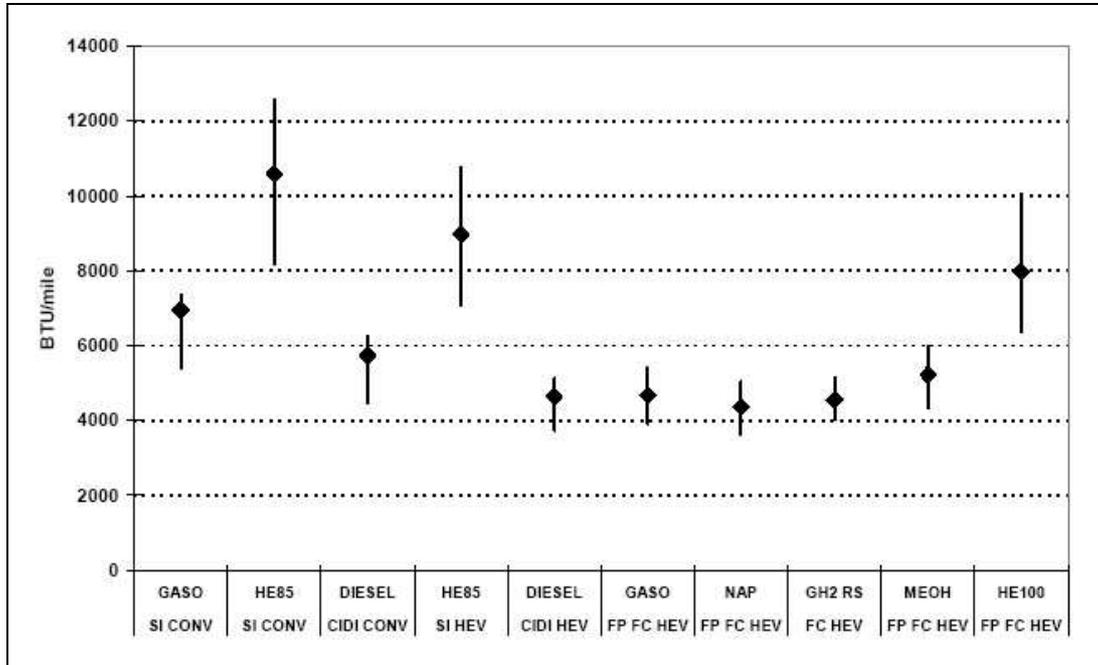
<sup>24</sup> Stime prodotte da EA Engineering, Inc. per conto dell'American Methanol Institute.

<sup>25</sup> National Petroleum Council, *U.S. Petroleum Refining : Meeting Requirements for Cleaner Fuels and Refineries*, Washington DC, 1993.

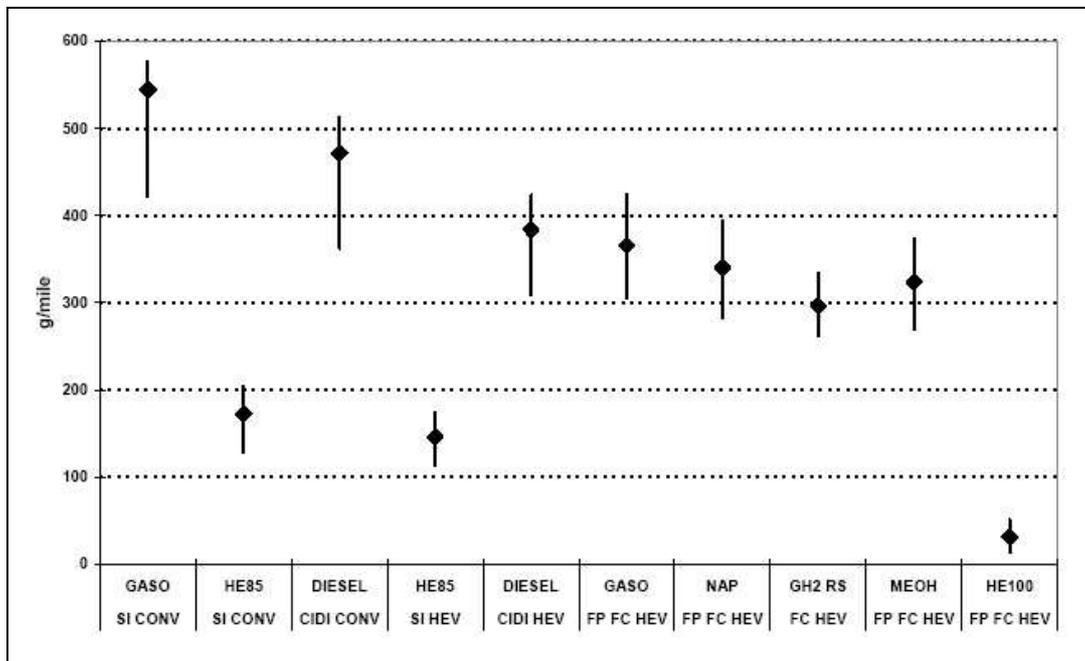
<sup>26</sup> In due parti, disponibile su <http://www.transportation.anl.gov/pdfs/TA/163.pdf> e /164.pdf mentre per l'equivalente europeo: "Well-to-Wheel Analysis of Energy Use and Greenhouse Gas Emissions of Advanced Fuel/Vehicle Systems - A European Study" <http://www.lbst.de/gm-wtw/>

Le efficienze e le emissioni di gas ad effetto serra di queste opzioni sono riportate rispettivamente nei *Grafici 9 e 10* :

**Grafico 9 – Consumi (BTU/miglio) dal pozzo alle ruote per 10 sistemi integrati**



**Grafico 10 – Emissioni di gas ad effetto serra (gr/miglio) dal pozzo alle ruote per 10 sistemi integrati**



I parametri usati per i grafici sono dettagliati alla Tabella 4.

**Tabella 4 – Parametri usati per i Grafici 9 e 10**

		WTW Energy Use			Energy Use Share		GHG Emissions		
		20%	50%	80%	WTT	TTW	20%	50%	80%
SI CONV	GASO	5388	6949	7365	23%	77%	422	544	577
CIDI CONV	DIESEL	4462	5735	6232	21%	79%	362	472	513
CIDI CONV	FTD	6191	7945	8718	46%	54%	375	484	524
SI CONV	CNG	5566	7224	7644	27%	73%	385	501	530
SI CONV	HE85	8170	10579	12582	54%	46%	128	172	205
SI HEV	GASO	4617	5788	6362	24%	76%	366	454	498
CIDI HEV	DIESEL	3741	4650	5126	22%	78%	309	384	423
CIDI HEV	FTD	5209	6471	7169	48%	52%	313	392	432
SI HEV	HE85	7097	8974	10771	56%	44%	113	146	174
FP FCV	GASO	4339	5192	5953	25%	75%	339	408	468
FP FCV	NAP	4025	4828	5549	18%	82%	315	378	434
FP FCV	FT NAP	5842	7026	8105	48%	52%	349	419	484
FP FC HEV	GASO	3912	4675	5398	26%	74%	305	366	424
FP FC HEV	NAP	3621	4357	5035	18%	82%	283	340	394
FP FC HEV	FT NAP	5272	6362	7346	49%	51%	315	377	436
FP FCV	MEOH	4927	5919	6827	45%	55%	308	371	428
FP FC HEV	MEOH	4341	5224	5997	46%	54%	270	324	373
FP FCV	HE100	7053	8827	11044	65%	35%	15	35	56
FP FC HEV	HE100	6358	7979	10052	66%	34%	13	31	51
FCV	GH2 RS	4476	5060	5729	59%	41%	293	330	371
FC HEV	GH2 RS	4022	4549	5159	61%	39%	262	296	333
FCV	GH2 CP	4595	5140	5765	57%	43%	285	318	354
FC HEV	GH2 CP	4122	4625	5178	59%	41%	256	286	319
FCV	LH2	5655	6351	7115	69%	31%	363	405	452
FC HEV	LH2	5101	5718	6427	71%	29%	326	364	407
FCV	GH2 EL	8117	9238	10549	85%	15%	651	750	863
FC HEV	GH2 EL	7294	8289	9463	86%	14%	584	675	777

Infine, considerando sia i consumi che le emissioni lo studio della General Motors si conclude con le considerazioni seguenti :

- Tra i derivati del petrolio ed del metano, il diesel ad iniezione diretta CIDI HEV, benzina e nafta FP FC HEV e GH<sub>2</sub> FC HEV sono quasi identici in termini di consumi (BTU/mile). Tra queste filiere, tuttavia le emissioni sono minime per quello ad idrogeno e massime per il diesel CIDI HEV;
- Comparato al veicolo a benzina a candele convenzionale (CONV SI) la benzina ed il diesel ibridi mostrano dei significativi benefici in entrambi i campi;
- Il veicolo a cella a combustibile a metanolo (MEOH FP FC HEV) non offre vantaggi significativi, nè in termini di emissioni che di efficienza, rispetto ai veicoli FC HEV da metano o da petrolio;
- Le filiere dell'etanolo hanno di gran lunga le più basse emissioni globali, reggendo allo stesso tempo il confronto con le filiere fossili nella fase pozzo-serbatoio;
- Sulla base dell'efficienza e delle emissioni le filiere del metano e della benzina per i sistemi di trazione convenzionali sono identici.

Nel totale rispetto delle conclusioni raggiunte, dobbiamo aggiungere due precisazioni:

1. le **emissioni locali** – tra cui il rumore - hanno un peso che non è affatto trascurabile nella scelta delle filiere specialmente in Europa per i siti storici e di alto valore ambientale;
2. i **sistemi ibridi a benzina con processore a bordo** (GASO FP) non sono più presi in considerazione a causa di complessità tecniche che fanno optare per l'uso della benzina con le celle per delle stazioni fisse di produzione dell'idrogeno: a bordo del veicolo vi è una bombola di idrogeno compresso.

## 5 – Nuove auto e carburanti verdi – Il ruolo dell'intervento pubblico

*Dovremo curarci per liberarci di quella che chiamo la “circumdrome del rasoio”, che consiste nel radersi più in fretta per aver più tempo per lavorare a una macchina che rada più in fretta per poi avere tempo per lavorare a una macchina che rada ancora più in fretta, e così via ad infinitum.[...] Dobbiamo renderci conto che un prerequisito importante per una buona vita è una quantità considerevole di tempo libero trascorso in modo intelligente.*

Nicolas Georgescu-Roegen.

La spinta alla commercializzazione della tecnologia delle celle a combustibile presenta certamente una notevole complessità: le celle possono essere :

- una centrale elettrica (10 – 1000 kW)
- una batteria (1 – 50 W)
- un motore (0.5 – 100 kW)

secondo la configurazione dell'applicazione. L'idrogeno inoltre è un vettore energetico “difficile” da gestire e diffondere in sicurezza.

Nel campo dei veicoli è generalmente accettato che l'incentivo pubblico per ricerca, sviluppo e dimostrazione è necessario e strategico. A livello internazionale, le partnership miste pubblico/privato contribuiscono a:

- accelerare lo sviluppo della tecnologia e l'integrazione delle applicazioni finali;
- creare l'infrastruttura dell'idrogeno ed il relativo consenso;
- raccordare le autorità locali (energia rinnovabile decentralizzata) con la grande industria (tecnologia per celle e combustibili gassosi)

L'obiettivo è certamente ambizioso: creare un processo virtuoso che conduca a rapide economie di scala mediante la produzione in serie – necessaria per la riduzione dei costi, stimolando le sinergie tra gli interessi strategici per i combustibili alternativi degli stati sovrani e l'attuale infrastruttura energetica ed industriale delle aziende multinazionali.

Al livello locale, le aziende municipalizzate già partecipano allo sviluppo delle celle a combustibile favorendo il cambiamento infrastrutturale finalizzato all'introduzione dei carburanti rinnovabili nel settore dei trasporti, beneficiando di un ritorno di immagine positivo dalle iniziative stesse.

Le celle a combustibile nei trasporti combinano i benefici di corto e lungo periodo: risolvono immediatamente l'urgente problema dell'inquinamento urbano<sup>27</sup>, introducendo contemporaneamente l'uso dei carburanti rinnovabili nei trasporti. Questo secondo elemento è essenziale nel lungo periodo in quanto il ciclo globale *rinnovabile-idrogeno-cella a combustibile*, per l'alto valore aggiunto economico, energetico ed ambientale nelle sue fasi, contribuirà sia alla riduzione della fattura energetica che delle emissioni ad effetto serra. Infatti:

- Le fonti energetiche rinnovabili riducono il ritorno sull'investimento dei finanziatori, producendo oltre l'elettricità, anche carburanti per i veicoli;
- I veicoli riducono l'inquinamento globale (alta efficienza allo stadio finale di utilizzo), eliminando contemporaneamente ogni forma di inquinamento locale;

<sup>27</sup> I FCV sono a Veicoli a Zero Emissioni (ZEV) ma anche silenziosi (< 20 db).

- Le aziende energetiche municipali, continuano la trasformazione in compagnie di servizi, specializzate e ad alto livello tecnologico;
- Le amministrazioni locali acquistano un ruolo primario nel finanziamento (obbligazioni) e coordinamento tra i diversi attori e nelle varie fasi attraverso piani per la mobilità, campagne informative ed incentivi.

Una strategia adattativa per la commercializzazione dei FCV potrebbe essere :

Fase 1 2007-2012	Introduzione di flotte aziendali di FCV usando metano e GPL commerciali in stazioni di rifornimento-prototipo; idrogeno generato da elettrolisi con energia rinnovabile o a basso costo in progetti pilota; familiarizzazione con la tecnologia, formazione nell'industria e standardizzazione di norme e componenti.
Fase 2 2013-2030	Commercializzazione di auto private ed adattamento dell'infrastruttura del gas per la distribuzione dell'idrogeno al livello locale; sviluppo delle sinergie fra fondi d'investimento per energia rinnovabile, amministrazioni locali e industria dell'indotto per la tecnologia FC; l'idrogeno locale rinnovabile compete con quello globale petrolifero.
Fase 3 2030 in poi	La mobilità sta cambiando profondamente; i paesi commerciano in know how e fonti energetiche rinnovabili.

## 6 - Conclusioni

Oggi più che mai tecnologia ed innovazione esercitano un grande fascino perché intuitivamente “*li*” risiede la chiave della soluzione ai gravi problemi del nostro tempo. Il riscaldamento globale e l'inquinamento locale, così come il rumore e la mancanza di spazio vitale sono il rovescio della medaglia di una crescita economica esponenziale durata 60 anni.

Questa stessa crescita, tuttavia, vista al livello regionale presenta delle vistose difformità:

- nei paesi dell'area OCSE vi è una saturazione dei consumi e un deficit di servizi sociali motivato in larga misura dall'invecchiamento della popolazione;
- nei paesi in via di sviluppo più arretrati si assiste ad un boom demografico, mentre altri (specialmente in Asia) vivono una stagione di capitalismo d'assalto;
- in tutti i paesi la sicurezza nazionale assorbe una parte crescente di risorse finanziarie al fine di controllare e gestire le fonti energetiche ed idriche, che sono alla base dello sviluppo.

Un'attività economica sostenibile e l'uso efficiente dell'energia sono le più urgenti priorità della nostra epoca; semplificando al massimo la “sostenibilità” si riassume in due concetti chiave: *Controllo delle Esternalità* ed *Esaurimento delle risorse*. Se il primo è una battaglia attiva per controllare e ridurre le diverse forme d'inquinamento, il secondo si presenta come un quasi-passivo monitoraggio del sottosuolo, irreversibilmente impoverito da miniere, pompaggio e dall'attività estrattiva in generale. Entrambi si trovano – in forme diverse - al cuore dell'attività ambientalista. La connessione tra i due esiste, ma non è evidente, perché implica un ripensamento fondamentale del concetto di crescita.

L'energia è *il* settore strategico. In questo periodo il **triplice vincolo** del rispetto degli obiettivi di Kyoto sui gas ad effetto serra da un lato, dei limiti sanitari dell'inquinamento urbano da trasporto individuale e la decrescente disponibilità di petrolio, pongono dei dubbi serissimi sulla possibilità di soddisfare i bisogni della popolazione mondiale, mediante miglioramenti delle tecnologie in uso o con l'imposizione di strumenti di abbattimento delle emissioni “al tubo di scappamento”. Da almeno tre decenni, l'industria dell'energia e dei trasporti stanno seriamente cercando la strada che conduce verso una transizione dolce dallo sfruttamento corrente delle risorse minerali (stock) all'annunciato impiego delle fonti rinnovabili (flusso).

Sfortunatamente, lo sfruttamento diretto di acqua, sole e vento soffre di due grossi inconvenienti tecnici:

- 1) la produzione di elettricità resta dipendente dai *combustibili* per soddisfare le punte di domanda delle fredde giornate d'inverno o degli onnipresenti condizionatori appena arrivano i 30°C;
- 2) i mezzi di trasporto di uomini e merci necessitano dei *carburanti* per mantenere le prestazioni e l'autonomia richiesti dai consumatori e, sfortunatamente le batterie funzionano per spostamenti di vicinato e con poco carico.

Riassumendo e semplificando, all'inizio del III millennio l'industria dell'energia e quella dei trasporti si trovano a convergere nella ricerca di un *combustibile rinnovabile*. La "soluzione" è attesa dal mondo delle tecnologie dell'energia, un vasto e vario settore finanziario che raggruppa dei prodotti diversissimi, quali i gruppi elettrogeni, le batterie e le elettroniche di potenza e di supporto per la rete elettrica o internet. Il settore include sia le fonti d'energia che i mezzi di conversione, oltre a quasi tutto ciò che è associabile con l'elettricità distribuita e non inquinante. E' doveroso notare che i prodotti finali inclusi spaziano dalle centrali elettriche alle batterie per giocattoli.

Il fenomeno geopolitico in questi anni è importante : gli obiettivi contrastanti dei domini tecnici ed economici e socio-politici conducono l'economia dell'energia verso una transizione fondamentale che riguarda la progressiva adozione dell'elettricità e dell'idrogeno come principali *vettori* energetici. L'evidenza della transizione stessa è fornita dai nuovi bisogni qualitativi di energia che comportano una trasformazione delle *filiere energetiche*. Per i risparmiatori, le opportunità d'investimento sono fornite dall'affermazione dell'*industria delle tecnologie dell'energia*, che si compone di :

- 1) infrastruttura dei combustibili ;
- 2) tecnologie di conversione ;
- 3) infrastruttura elettrica.

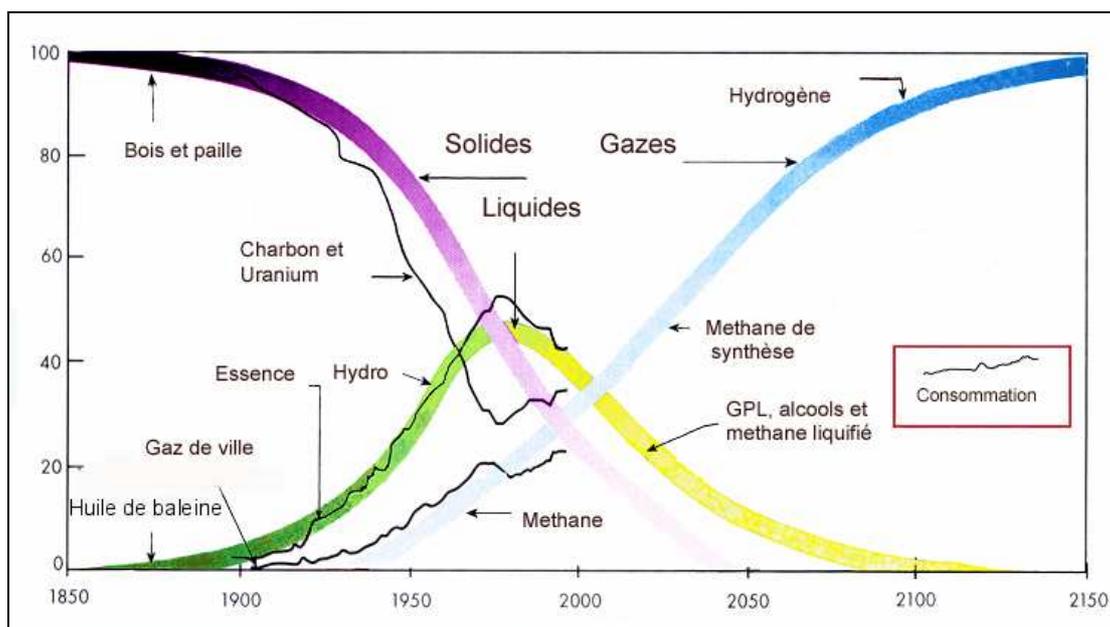
I mercati coinvolti includono i 3000GW del mercato dell'elettricità mondiale, così come i 60 milioni di veicoli venduti annualmente.

Queste tendenze sembrano delineare la progressiva affermazione di filiere energetiche caratterizzate dall'uso sia di combustibili rinnovabili, quali l'alcool, il biodiesel e l'idrogeno, che da nuove tecnologie di conversione dell'energia, quali i sistemi di trazione ibridi e le celle a combustibile. Queste filiere, che al livello tecnologico avranno sia basse emissioni che alta efficienza totale (CO<sub>2</sub>), saranno tuttavia probabilmente più care della filiera fossile, anche nella loro fase matura.

Questo documento ha semplicemente tentato di schematizzare le interazioni tra una tecnologia rivoluzionaria dei trasporti – la cella a combustibile – la disponibilità attuale di combustibili e i possibili percorsi di lungo periodo dell'energia rinnovabile, con l'obiettivo di aiutare i *decision makers* nel loro ruolo guida e nella definizione delle priorità.

In conclusione e a conferma della transizione iniziata in questo ultimo decennio presentiamo un ultimo grafico che schematizza una storia dell'energia attraverso i combustibili, ripartiti secondo il loro stato fisico (solido, liquido o gassoso)

Grafico 11 – L'evoluzione dei combustibili



*“Da quando ho cominciato a interessarmi della natura entropica del processo economico, non riesco a liberarmi di un'idea: è disposto il genere umano a prendere in considerazione un programma che implichi una limitazione della sua assuefazione alle comodità esosomatiche? Forse il destino dell'uomo è quello di avere una vita breve, ma ardente, eccitante e stravagante piuttosto che un'esistenza lunga, monotona e vegetativa. Siano le altre specie le amebe per esempio – che non hanno ambizioni spirituali, a ereditare una terra ancora immersa in un oceano di luce solare.”*

Nicholas Georgescu-Roegen

Giancarlo Fiorito  
11/05/2006