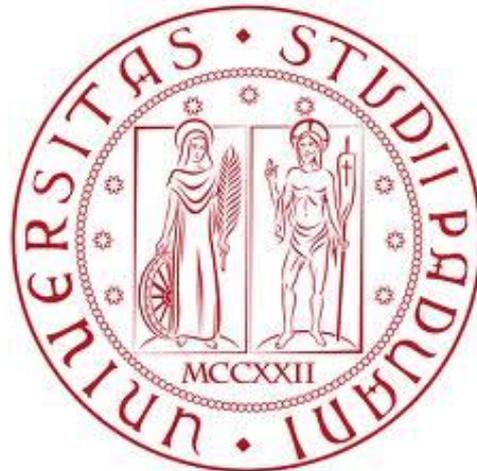


# UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

TESI DI LAUREA IN INGEGNERIA GESTIONALE



## LA NUOVA STRADA AD IDROGENO

RELATORE: CH.MO PROF. MIRTO MOZZON

CORRELATORE: CH.MO PROF. RINO A. MICHELIN

LAUREANDO: CERON SIMONE

ANNO ACCADEMICO 2011 – 2012

*“A te amica mia”*

# INDICE

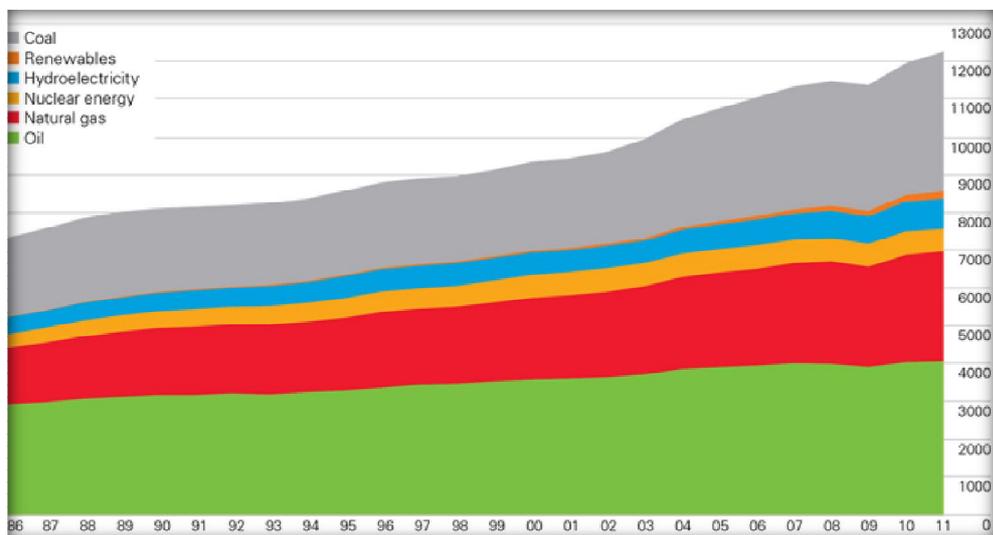
	pag.
<b>Introduzione</b>	1
<b>CAPITOLO 1: Gli aspetti ambientali</b>	5
1.1. Effetto serra e i gas serra	5
1.2. Conseguenze e provvedimenti	7
<b>CAPITOLO 2: L'idrogeno</b>	9
2. Produzione, stoccaggio, trasporto	11
2.1. Produzione	11
2.1.1. Steam reforming del gas metano	11
2.1.2. Ossidazione parziale di idrocarburi	12
2.1.3. Gassificazione del carbone	13
2.1.4. Soluzioni "on-board"	13
2.1.5. Altri processi	14
2.1.6. Elettrolisi dell'acqua	14
2.1.7. Pirolisi e gassificazione delle biomasse	16
2.1.8. Processi sperimentali di sintesi biologica	17
2.2. Stoccaggio	18
2.2.1. Idrogeno allo stato compresso	18
2.2.2. Idrogeno allo stato liquido	19
2.2.3. Idruri metallici	20
2.2.4. Idruri chimici	21
2.2.5. Microsfere di cristallo	21
2.2.6. Nanostrutture di carbonio	22
2.2.6. Considerazioni sul sistema di stoccaggio	23
2.3. Trasporto	24
2.3.1. Trasporto su strada	24
2.3.2. Gasdotti	24
<b>CAPITOLO 3: Le fuel cells</b>	25
3.1. Struttura e funzionamento	25
3.2. Tipi di celle a combustibile	27
3.2.1. Fuel cells ad elettrolita alcalino (A-FC)	27
3.2.2. Fuel cells con elettrolita a membrana polimerica a scambio protonico (PEM-FC)	28
3.2.3. Fuel cells ad alimentazione diretta di metanolo (DM-FC)	29
3.2.4. Fuel cells ad acido fosforico (PA-FC)	30

3.2.5.Fuel cells a carbonati fusi (MC-FC)	31
3.2.6.Fuel cells a ossidi solidi (SO-FC)	32
3.2.7.Considerazioni riguardanti le diverse tecnologie	33
<b>CAPITOLO 4: I veicoli ad idrogeno</b>	<b>35</b>
4.1.Componenti di un'auto a fuel cells	36
4.2.Motore elettrico	37
4.2.1.Motore a corrente continua	37
4.2.2.Motore a corrente alternata	37
4.3.Sistema di controllo del motore	38
4.4.Le batterie	38
4.4.1.Batterie al Piombo gel	38
4.4.2.Batterie al NiMH (Nichel - Idruri di metallo)	39
4.4.3.Batterie agli ioni di Litio	39
4.4.4.Batterie Zebra (Zero Emission Battery Research Activity)	39
4.5.Confronto economico fra propulsione elettrica e benzina	39
4.6.Confronto di efficienza	40
4.6.1.Analisi upstream	40
4.6.2.Analisi vehicle	42
4.6.3.Confronto di efficienza globale nel sistema "well-to-wheel"	42
4.7.Grandezza dell'investimento necessario al nuovo sistema	44
<b>CAPITOLO 5: Le Case automobilistiche</b>	<b>47</b>
<b>5.1 primi esemplari</b>	<b>47</b>
5.1.Scooter a idrogeno	47
5.2.Automobili a idrogeno	49
5.2.1.La Fiat	49
5.2.2.Mercedes-Benz	51
5.2.3.Audi	53
5.2.4.BMW	54
5.2.5.Honda	55
5.2.6.General Motors	55
5.2.7.Ford	57
5.2.8.Mazda	60
5.2.9.Mitsubishi	61
5.2.10.Nissan	62
5.2.11.Hyundai	63
<b>Conclusioni</b>	<b>64</b>
<b>Bibliografia</b>	<b>66</b>

# INTRODUZIONE

Lo sviluppo della nostra società è legato ai consumi di energia. Senza l'energia l'uomo non sarebbe riuscito a raggiungere l'attuale livello di benessere e di qualità della vita. Senza la disponibilità di sufficienti risorse energetiche lo sviluppo economico futuro sarebbe compromesso. Le fonti d'energia finora maggiormente utilizzate sono tuttavia i combustibili fossili. I motivi della grande diffusione dei combustibili fossili per ricavarne energia sono numerosi: la loro elevata densità energetica, vale a dire l'alto rapporto fra energia immagazzinata e massa oppure volume, la facilità di trasporto e di immagazzinamento, il costo relativamente basso. Però si tratta di fonti non rinnovabili, cioè soggette a esaurimento, perciò sempre più preziose come dimostra il continuo aumento del loro prezzo. I 12,2 miliardi di TEP<sup>1</sup> commercializzati nel mondo nel 2011, sono stati così distribuiti:

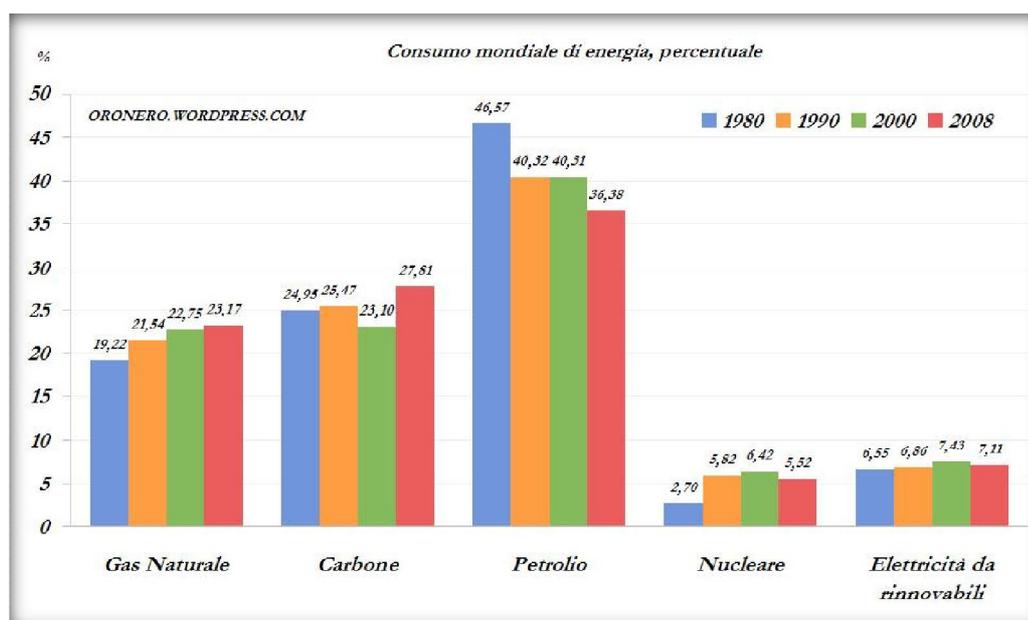
- Petrolio: 33%
- Carbone: 29,1%
- Gas naturale: 24,6%
- Nucleare: 4%
- Idroelettrico: 7%
- Rinnovabili: 1,5%



**Figura 1.** Distribuzione delle risorse energetiche commercializzate

<sup>1</sup> Il TEP o tonnellata equivalente di petrolio è un valore fissato convenzionalmente che rappresenta la quantità di energia rilasciata dalla combustione di una tonnellata di petrolio grezzo e vale circa 42 GJ.

Ciò mostra come circa l'87% dell'energia distribuita sia stata ottenuta da fonti fossili non rinnovabili, con l'utilizzo principale di petrolio. Tali risorse non essendo appunto rinnovabili sono in via di esaurimento, con una prospettiva di termine piuttosto incerto che si colloca, ai ritmi attuali di consumo, attorno ai 40 anni per il petrolio, circa 60 anni per il gas naturale e circa 200 anni per il carbone. L'incertezza di tali stime è dovuta a una difficoltà previsionale legata a diversi fattori. Uno di questi è l'inesorabile aumento dei consumi, si parla di una vera e propria "fame" di energia da parte dei paesi emergenti in via di sviluppo. Un ulteriore elemento è un continuo aumento dell'efficienza di estrazione e utilizzo di tali risorse, che da un lato permette un miglior sfruttamento delle attuali risorse, dall'altro consente il riutilizzo di quelle considerate economicamente non sfruttabili. Negli ultimi trent'anni infatti la capacità media di sfruttamento di un pozzo petrolifero è passata dal 22% al 34%, e ogni percento in più equivale a circa due anni di consumi mondiali. A questo problema si somma quello della disparità, tra diverse nazioni, del livello di benessere raggiunto. La distribuzione dei consumi di energia è molto anomala: il 20% della popolazione mondiale, quella dei Paesi più ricchi, utilizza l'80% dell'energia prodotta. Questa situazione è in forte contrasto con i basilari principi di equità tra i popoli, di sviluppo sostenibile e di qualità globale della vita. Paesi come l'Africa o l'India sono attualmente molto poveri, ed aspirano ad aumentare il loro livello di benessere. Per poterlo fare, però, hanno necessità di utilizzare quantità di energia sempre maggiori, con un progressivo aumento della richiesta globale.



**Figura 2.** Consumi mondiali di energia

Il consumo mondiale di energia primaria è cresciuto del 2,5% nel 2011, sostanzialmente in linea con la media degli ultimi 10 anni. Il consumo nei paesi dell'OCSE<sup>2</sup> è sceso dello 0,8%, il terzo calo negli ultimi quattro anni, mentre nei paesi non-OCSE il consumo è cresciuto del 5,3%, in linea con la media di 10 anni. Il tasso di crescita annuo del consumo energetico dei paesi in via di sviluppo è mediamente tre-quattro volte superiore a quello dei paesi industrializzati. Secondo le attuali tendenze, la domanda e l'intensità energetica, rapporto tra consumo e prodotto, aumentano e aumenteranno fortemente nel prossimo futuro, in particolare nel continente asiatico. Tale tendenza, se messa in relazione con il progressivo esaurimento delle risorse fossili, non potrà che risultare insostenibile a lungo andare.

Qualora si associ a tale scenario anche la questione dell'instabilità del Medio Oriente, in cui sono concentrate circa il 75% delle riserve mondiali di petrolio, non si può non intuire quanto sia profondo e attuale il problema energetico che il mondo sta vivendo. Ogni variazione della domanda, per lo sviluppo in particolare dei paesi emergenti ma non solo, e dell'offerta, legata ai rischi di conflitto, a eventi naturali oppure a speculazioni finanziarie, non sono più ormai facilmente assorbibili con variazioni della medesima offerta o domanda, ma impattano immediatamente sul prezzo del greggio.

Dato che i combustibili fossili costituiscono, in molti casi, fonte di inquinamento dell'ambiente, in particolare dell'aria, possiamo inoltre immaginare come l'impatto sull'ambiente sarà notevole, con conseguente insostenibilità dello sviluppo dal punto di vista ambientale. Il loro impiego nelle combustioni produce necessariamente anidride carbonica e anche, a seconda delle modalità della combustione, varie sostanze inquinanti. Tutte le sostanze combustibili usate comunemente sono infatti costituite da carbonio o da idrocarburi, le cui molecole sono a loro volta costituite da atomi di carbonio e di idrogeno. Sicché i prodotti delle reazioni di combustione sono costituiti da anidride carbonica ( $\text{CO}_2$ ), dove si ritrova il carbonio, e da vapor d'acqua ( $\text{H}_2\text{O}$ ), dove si ritrova l'idrogeno. Nelle combustioni, in realtà, si sviluppano anche altri gas, alcuni derivanti da impurità eventualmente contenute nel combustibile. Fra queste gli ossidi di zolfo ( $\text{SO}_2$  e  $\text{SO}_3$ ) e gli ossidi di azoto ( $\text{NO}_x$ ), che sono prodotti da reazioni ad alta temperatura fra l'azoto e l'ossigeno dell'aria.

L'attuale modello industriale basato sull'energia delle fonti fossili e in particolare del petrolio è dunque da considerarsi critico. Tale criticità deriva da un quadro piuttosto complesso: da un lato una crescente domanda energetica da fonti fossili, che mette a

---

<sup>2</sup> L' OCSE o organizzazione per la cooperazione e lo sviluppo economico è un'organizzazione internazionale di studi economici per i paesi membri, paesi sviluppati aventi in comune un sistema di governo di tipo democratico ed un'economia di mercato.

rischio l'ambiente, ma appare inevitabile in quanto legata al tasso di sviluppo delle nazioni; dall'altro un progressivo e certo esaurimento delle suddette fonti con un insostenibilità economica legata all'aumento dei prezzi. Si aprirà dunque davanti alla società moderna un bivio che vede da un lato una fatale regressione tecnologica, dall'altro lato l'individuazione e lo sviluppo di nuove strade, economicamente e ambientalmente percorribili, basate necessariamente sulle fonti rinnovabili.

Un tale scenario dovrebbe essere basato su un elemento con caratteristiche di impatto ambientale, sia globale che locale, quasi nullo. Producibile da più fonti energetiche primarie, tra loro intercambiabili e disponibili su larga scala anche in futuro, e distribuibile preferenzialmente attraverso una rete. L'idrogeno è un vettore in grado di soddisfare i requisiti precedentemente indicati, infatti:

- è un gas che brucia nell'aria secondo la semplice reazione che da come unico prodotto di reazione acqua pura;
- può essere prodotto sia da fonti fossili, sia da fonti rinnovabili;
- può essere distribuito in rete abbastanza agevolmente compatibilmente con gli usi finali e con lo sviluppo delle tecnologie di trasporto e di stoccaggio;
- può essere impiegato in diverse applicazioni, dalla produzione di energia elettrica centralizzata o distribuita alla trazione, con un impatto locale nullo o estremamente ridotto.

Si può dire, quindi, che l'idrogeno rappresenta in prospettiva un componente ideale di un futuro sistema energetico sostenibile, costituendo un incentivo verso l'impiego diffuso delle fonti rinnovabili e già nel breve-medio termine può rendere i combustibili fossili compatibili con le esigenze ambientali.

# CAPITOLO 1: Gli aspetti ambientali

L'anno 2008 mostra come i combustibili fossili provvedevano circa a poco più dell'87% del fabbisogno energetico mondiale: di questo il petrolio contribuiva per il 37%, il carbone per il 23% e il gas naturale per il 28%. Altre stime danno percentuali leggermente differenti: 35% petrolio, 24% carbone e 21% gas, che non modificano tuttavia l'ordine di grandezza dei valori in discussione. Accanto ai vantaggi che ne fanno da anni le colonne portanti della nostra società, esistono necessariamente degli svantaggi:

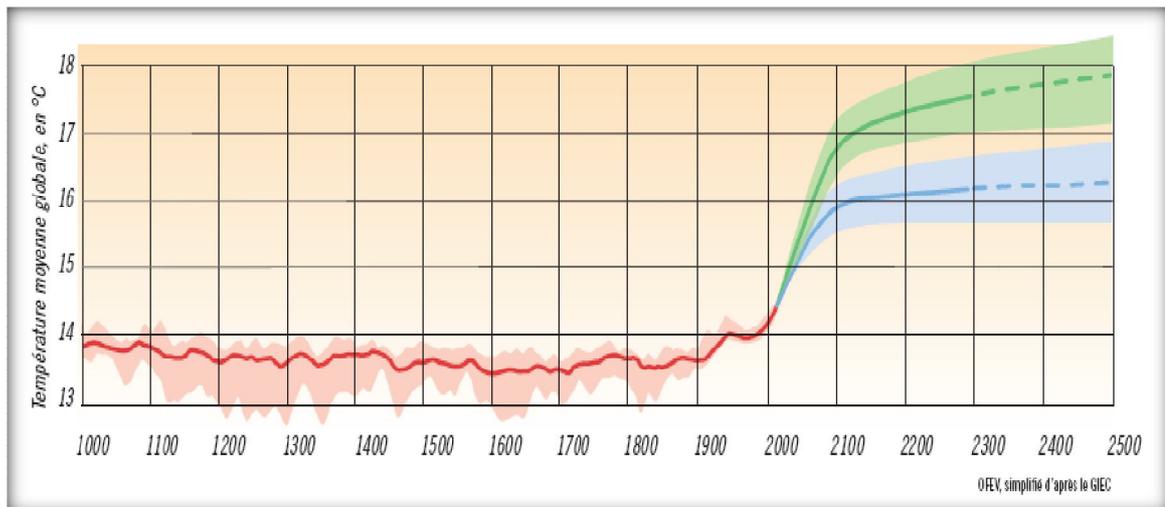
- sono inquinanti, anche se con l'utilizzo di macchine moderne questo problema si è notevolmente ridotto. Una forma di inquinamento è data dalla diffusione in atmosfera di sostanze associate naturalmente a questi combustibili. Per esempio la liberazione di anidride solforosa (SO<sub>2</sub>) responsabile del fenomeno delle piogge acide;
- il loro utilizzo determina un incremento della quantità di CO<sub>2</sub> in atmosfera, un gas non direttamente inquinante, ma oggi considerato come il maggiore imputato del surriscaldamento globale. La quantità di CO<sub>2</sub> emessa dipende dal tipo di combustibile utilizzato, a parità di energia prodotta il carbone produce una quantità quasi doppia di anidride carbonica rispetto al gas naturale;
- non sono risorse rinnovabili, dato che il processo di fossilizzazione della sostanza organica è estremamente lungo e la quantità che oggi si fossilizza è trascurabile rispetto ai fabbisogni energetici della società in cui viviamo.

Questo comporta un progressivo esaurimento dei giacimenti e quindi delle scorte disponibili, a fronte di un progressivo e costante aumento della domanda di energia con conseguente aumento dei prezzi. L'aumento dei prezzi, la consapevolezza che le scorte disponibili sono destinate ad esaurirsi ed una maggiore sensibilità verso le tematiche ambientali, ha accentuato le politiche di diversificazione delle fonti dei singoli paesi, favorendo lo sviluppo di sistemi di approvvigionamento energetico alternativi ai combustibili fossili.

## 1. Effetto serra e i gas serra

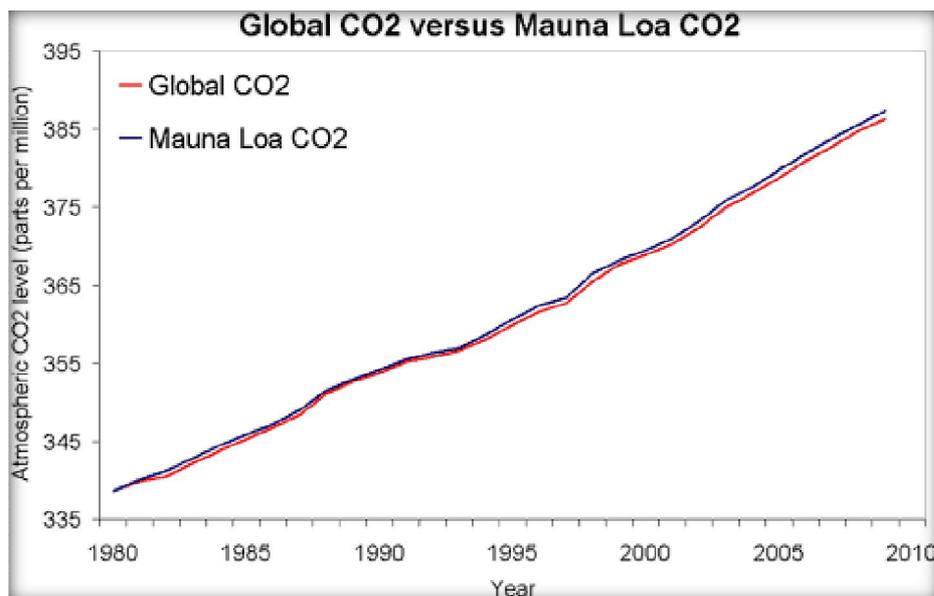
La temperatura della Terra è determinata da un delicato equilibrio tra l'energia proveniente dal Sole e l'energia costantemente riflessa dalla Terra verso lo spazio. Parte dell'energia riflessa è intrappolata dai gas serra che costituiscono l'atmosfera, che lascia filtrare la luce solare e trattiene il calore. Senza i gas serra la temperatura della Terra sarebbe di circa 30°C inferiore a quella attuale poiché il calore del Sole rimbalzerebbe sulla superficie della Terra e si rifletterebbe nello spazio. Tuttavia, a

partire dalla rivoluzione industriale (circa 1750 d.C.), l'uomo ha iniziato ad immettere in atmosfera quantità di gas serra sempre crescenti, aumentando significativamente la loro concentrazione in atmosfera, il che ha comportato un progressivo aumento della temperatura del pianeta. Tale aumento di temperatura è la causa dei cosiddetti cambiamenti climatici. Gli esperti del clima prevedono che tale tendenza sarà accelerata e che la temperatura media mondiale aumenterà di 1,4 °C - 5,8° C entro il 2100 e quella europea di 2 °C- 6,3 °C.



**Figura 3.** Andamento della temperatura globale

Sono chiamati gas serra quei gas presenti in atmosfera, che sono trasparenti alla radiazione solare in entrata sulla Terra ma riescono a trattenere, in maniera consistente, la radiazione infrarossa emessa dalla superficie terrestre, dall'atmosfera e dalle nuvole. I gas serra possono essere di origine sia naturale che antropica, e assorbono ed emettono a specifiche lunghezze d'onda nello spettro della radiazione infrarossa. Questa loro proprietà causa il fenomeno noto come effetto serra. Il principale gas serra prodotto dalle attività umane è la CO<sub>2</sub>, che rappresenta il 75% circa delle emissioni mondiali di gas serra. La principale sorgente di anidride carbonica è la combustione dei combustibili fossili (carbone, petrolio, gas naturale), che al momento rimangono la fonte di energia maggiormente utilizzata per produrre elettricità, calore, nonché i carburanti per i mezzi di trasporto. Nel novecento, il livello di CO<sub>2</sub> in atmosfera è aumentato del 40% rispetto al secolo precedente come conseguenza dello sviluppo dei trasporti, in particolare l'invenzione dell'automobile come bene di massa.



**Figura 4.** Andamento della CO<sub>2</sub> globale in riferimento a Mauna Loa.

Mauna Loa genera un "prodotto" che serve a convalidare l'idea che la CO<sub>2</sub> sia in crescita costante dal 1959. Il record di Mauna Loa è stato usato spesso come esempio di crescita della concentrazione di anidride carbonica atmosferica in quanto è formato alla serie più lunga di misure dirette. Il motivo per il quale si accetta che Mauna Loa rappresenti la concentrazione di CO<sub>2</sub> a livello globale risiede nel fatto che il sito è a notevole altezza sul livello del mare (3397 m) e che la CO<sub>2</sub> si mescola molto bene in atmosfera. Conseguentemente il trend di Mauna Loa (1.64 ppm/anno) è statisticamente indistinguibile dal trend globale (1.66 ppm/anno).

### 1.2. Conseguenze e provvedimenti

I cambiamenti climatici, risultato dell'effetto serra, sono già in atto da tempo e gli effetti sono visibili. Eventi meteorologici estremi, quali tifoni, inondazioni, siccità, ondate di calore, aumentano in intensità e frequenza e porteranno a mutazioni considerevoli nel clima e in particolare nei regimi di precipitazione con accentuazione dell'aridità nel Sud dell'Europa. L'aumento della superficie marina e lo scioglimento dei ghiacci mettono a rischio gli abitanti delle zone costiere e delle piccole isole e potrebbe causare salinizzazione dei suoli agricoli e delle riserve di acqua potabile. Gli scenari su scala globale prefigurano carenze di cibo, di acqua potabile, di terreni coltivabili, l'acutizzarsi delle disuguaglianze fra nord e sud del mondo con conseguenti migrazioni e conflitti.

I cambiamenti climatici sono una minaccia reale per il pianeta e già da qualche tempo si è creata un'azione coordinata a livello internazionale. Nel 1992 fu approvata la Convenzione quadro delle Nazioni Unite sui Cambiamenti Climatici (UNFCCC) il cui obiettivo ultimo è di stabilizzare le concentrazioni in atmosfera di gas serra ad un livello

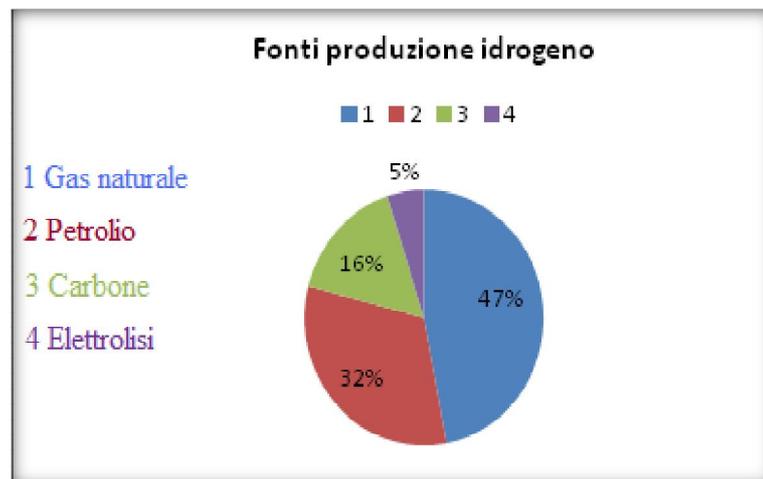
tale da impedire che le attività umane interferiscano negativamente con il sistema climatico. La Convenzione impegna i Paesi che l'hanno accettata a monitorare le emissioni di gas serra prodotte ed elaborare strategie nazionali per ridurre le proprie emissioni, aiutando inoltre i Paesi in via di sviluppo ad affrontare la problematica dei cambiamenti climatici. Più tardi, nel 1997, fu fatto un ulteriore passo avanti in questa direzione, approvando il Protocollo di Kyoto, che indica gli obiettivi internazionali per la riduzione di gas ad effetto serra, ritenuti responsabili del riscaldamento globale del pianeta. L'obiettivo fissato è una riduzione media del 5,2 % dei livelli di emissione del 1990, nel periodo 2008-2012. Per alcuni Paesi è prevista una riduzione maggiore: 8 % l'Unione europea, 7 % per Stati Uniti, 6 % il Giappone. Per altri Paesi, considerati in via di sviluppo, sono stati fissati obiettivi minori.

## CAPITOLO 2: L' idrogeno

L'idrogeno, scoperto nel 1776 da Henry Cavendish, è l'elemento più diffuso fra tutti gli elementi presenti sul pianeta. È presente nell'acqua e in tutti i composti organici e organismi viventi. La sua molecola  $H_2$  non è una fonte di energia ma un vettore energetico, in quanto è possibile produrlo usando altre fonti di energia, immagazzinando in esso tale energia, che può così essere trasportata e successivamente recuperata. Questo recupero può avvenire semplicemente bruciando l'idrogeno, nel qual caso l'energia immagazzinata assume la forma di calore, oppure per mezzo delle cosiddette celle a combustibile, le quali convertono tale energia in elettricità. In entrambi i casi si ha un processo sostanzialmente pulito, che da un punto di vista chimico da come prodotto acqua. Esso potrebbe rappresentare la chiave per cambiare il futuro in molti settori della nostra vita rivoluzionando l'intero sistema energetico, sia come combustibile nel traffico sia come fornitore di energia per produrre elettricità e calore. In tutti questi settori l'idrogeno consentirebbe infatti l'uso di fonti energetiche rinnovabili. La molecola di idrogeno è un vettore energetico molto promettente, soprattutto in relazione al possibile e definitivo decollo delle fonti energetiche rinnovabili, in quanto può rappresentare la migliore risposta allo stoccaggio delle stesse. I vantaggi dell'idrogeno sono numerosi: in particolare, grazie ad un'elevata densità energetica in rapporto al peso e alla possibilità di ottenerlo da numerose fonti, permette di ridurre la dipendenza da petrolio e di consentire la necessaria diversificazione delle fonti energetiche. Le fonti rinnovabili come la radiazione solare e il vento su tutte e la stessa energia elettrica, hanno il grosso problema che non sono immagazzinabili o lo sono scarsamente. L'idrogeno può rappresentare la soluzione ideale nell'immagazzinamento di energia, soprattutto da quella a fonti rinnovabili. Il problema principale dell'idrogeno è che la molecola  $H_2$  non è presente allo stato naturale e la si deve ricavare da altri elementi. Allo stato attuale la sua produzione è quasi esclusivamente da fonti fossili, mentre la nuova frontiera dovrebbe essere quella dell'estrazione fonti rinnovabili.

Vi sono, tuttavia, principalmente due svantaggi nell'utilizzo di un qualsiasi vettore energetico che non sia una fonte primaria di energia. Il primo consiste nella perdita netta di energia che si verifica nella trasformazione da una forma di energia all'altra, per cui questi vettori vengono anche chiamati assorbitori. Il secondo consiste nel fatto che la trasformazione comporta un processo e un impianto aggiuntivo nella filiera e, in definitiva, un aumento del costo dell'unità di energia. La perdita di energia che si verifica usando un vettore energetico intermedio costituisce certamente un peggioramento del rendimento complessivo, ma questo può essere limitato, annullato

o addirittura più che annullato, se il vettore energetico ottenuto consente di ottenere, nei processi a valle considerati, rendimenti superiori a quelli realizzabili con il vettore di partenza. L'aumento del costo dell'energia che caratterizza il vettore intermedio, invece, è dovuto non solo al costo dell'alimentazione (su cui incide il rendimento energetico dell'impianto), ma anche al costo dell'impianto (investimento, funzionamento, manutenzione, etc) che va distribuito sulla vita dell'impianto stesso costituendo un costo aggiuntivo. Attualmente l'idrogeno, qualunque sia la sua origine, a parità di energia risulta più costoso dei combustibili fossili e quindi non è utilizzato per scopi energetici, ma solo nell'industria chimica, petrolchimica e aerospaziale e per usi di laboratorio. Nel mondo sono commercializzati circa 500 miliardi di Nm<sup>3</sup>, normal metro cubo<sup>3</sup>, di idrogeno prodotti per oltre il 90% principalmente a partire da fonti fossili. Per i valori accettati un metro cubo geometrico di idrogeno ha densità di 0,0823 kg, dunque i volumi di vendita coinvolgono circa 41,2 milioni di tonnellate di H<sub>2</sub>.



**Figura 5.** Fonti di produzione dell'idrogeno

Per il futuro, considerata l'attuale evoluzione del settore energetico, si prevede un notevole incremento della domanda di idrogeno, determinata principalmente dalle conseguenze che avranno i numerosi vincoli imposti dalla legislazione ambientale e dalle esigenze del mercato. I fattori critici per lo sviluppo di tale mercato sono tre: produzione, trasporto, stoccaggio.

<sup>3</sup> Si definisce Nm<sup>3</sup> il volume occupato da un gas alla pressione atmosferica e alla temperatura di zero gradi centigradi. Nella realtà pratica si fa riferimento alla pressione di un atmosfera e alla temperatura ambiente.

## 2. Produzione, stoccaggio, trasporto

### 2.1. Produzione

Le tecnologie di produzione sono meno sviluppate rispetto a quelle d'immagazzinaggio e di trasporto ed un loro miglioramento si tradurrebbe in una notevole riduzione dei costi d'investimento del settore energetico. Inoltre, progressi nelle tecnologie di produzione dell'idrogeno consentirebbero di ottenere significativi miglioramenti nelle infrastrutture necessarie per un uso diffuso dell'idrogeno. Il processo di produzione è funzione di due vincoli fondamentali: la compatibilità ambientale e un costo di produzione accettabile. Le principali tecnologie sono:

- Steam reforming del gas metano;
- Ossidazione parziale non catalitica di idrocarburi;
- Gassificazione del carbone;
- Soluzioni "on-board"
- Altri metodi (cracking termico, metodo Kvaerner)
- Elettrolisi dell'acqua;
- Gassificazione e pirolisi delle biomasse;
- Processi sperimentali di sintesi biologica

#### 2.1.1. Steam reforming del gas metano

Il processo più utilizzato per la produzione dell'idrogeno è lo steam methane reforming (SMR), attraverso il quale si produce circa il 50% dell'idrogeno mondiale. Si basa sulla reazione chimica tra il metano, contenuto nel gas naturale, e il vapore acqueo. Su scala industriale tale processo richiede una temperatura operativa di circa 800 °C ed una pressione di 2,5 MPa.

La prima fase consiste nella decomposizione del metano in idrogeno e monossido di carbonio secondo la reazione



Nella seconda fase, chiamata "shift reaction", il monossido di carbonio e il vapore acqueo a temperatura minore, circa 400 °C, si trasformano in biossido di carbonio ed idrogeno.



La terza fase è data dalla purificazione del gas. E' necessario eliminare l'inevitabile anidride carbonica prodotta in quanto essa andrebbe a disperdersi nell'atmosfera aumentando, conseguentemente, l'effetto serra. Per far ciò, si procede mediante isolamento o abbattimento in loco.

Lo Steam Reforming è il processo più economico per ottenere l'idrogeno: richiede una spesa media di 3,3-3,5 kWh (12-15 MJ) per produrre 1 Nm<sup>3</sup> di idrogeno. Il rendimento del processo si aggira sul 60%-70% con costi notevolmente inferiori rispetto ad altri metodi come per esempio l'elettrolisi e pertanto piuttosto competitivi con quelli delle altre tecnologie. Tenendo in conto tutti i costi di capitale e di funzionamento si ottiene un costo di produzione dell'idrogeno di circa 0,10 €/Nm<sup>3</sup> pari a circa 9,26 €/GJ.

Una versione innovativa dello Steam Reforming è il processo denominato SER (Sorption Enhanced Reforming). Rispetto al tradizionale SMR, tale processo implica la produzione di idrogeno a temperatura particolarmente bassa e l'abbinamento di un processo di rimozione selettiva dell'anidride carbonica rilasciata. Il vantaggio principale del SER consiste nell'ottenere direttamente dei flussi separati, estremamente puri, sia di idrogeno che di CO<sub>2</sub> senza ricorrere a costosi sistemi di purificazione. Questi impianti sono dotati di sottosistemi per il recupero del calore, in modo che il rendimento sia il massimo possibile.

### *2.1.2. Ossidazione parziale di idrocarburi*

L'idrogeno può essere ottenuto dall'ossidazione parziale non catalitica, a partire da idrocarburi pesanti, come la nafta, la benzina e il metano, facendoli reagire con ossigeno o aria. Le temperature in gioco sono più elevate rispetto lo steam reforming, circa 1300-1500 °C, con un efficienza complessiva del processo tuttavia minore, circa 50%. La tecnologia POX è impiegata anche nei piccoli reformer da installare a bordo di veicoli per ottenere l'idrogeno dai combustibili presenti sul mercato, da biomassa e da altri liquidi di origine vegetale. Il processo di ossidazione parziale è tecnologicamente completo. Considerando tutti i costi di capitale e di funzionamento si ottiene un costo di produzione dell'idrogeno di 9,10-11,85 €/GJ. Il costo dell'impianto di ossidazione parziale è maggiore rispetto a quello dell'impianto di steam reforming, dipendente dal costo del sistema di separazione dell'aria e dal costo extra di rimozione dello zolfo e delle altre impurezze che sono presenti nei combustibili pesanti in quantità maggiori che nei combustibili leggeri. Se si combina tale processo con il processo di Steam Reforming è possibile ottenere l'idrogeno senza dover aggiungere combustibile. Questa tecnica prende il nome di ATR (Auto Thermal Reforming) o reforming

autotermico. È un processo chimico industriale per la produzione di syngas<sup>4</sup>, in cui il reagente di partenza è gas naturale che viene messo in un reattore dove subisce sia ossidazione parziale con ossigeno che reazione di reforming con vapore.

### *2.1.3. Gassificazione del carbone*

Tale processo consiste nella parziale ossidazione del carbone, che inizialmente viene ridotto in polveri e poi trasformato in un combustibile gassoso. Questo gas poi viene convertito chimicamente in una miscela contenente idrogeno e ossido di carbonio ed essa viene, alla fine, trattata per isolare e purificare l'idrogeno. Le reazioni chimiche coinvolte nel processo utilizzano vapore, ossigeno o aria in un intervallo di temperature tra i 400°C e i 1200°C. Rispetto allo steam reforming il processo risulta più complesso e i costi di realizzazione dell'idrogeno più elevati a causa delle difficoltà operative. Tenendo in conto tutti i costi di capitale e di funzionamento si ottiene un costo di produzione dell'idrogeno di circa 0,15÷0,18 €/Nm<sup>3</sup> (12,57-15,01 €/GJ), fortemente influenzato dai costi correlati alla lavorazione e all'energia primaria. La gassificazione di combustibili fossili si presenta comunque economicamente interessante nelle regioni in cui il carbone abbonda ed è poco costoso, come Cina e Sud Africa.

### *2.1.4. Soluzioni "on-board"*

Uno sottoinsieme particolarmente esplorato in questi anni è quello dei "fuel processor", impianti per il trattamento del combustibile e per la produzione diretta dell'idrogeno a bordo del veicolo. Questi impianti possono rappresentare un ponte concreto verso una nuova economia ad idrogeno, poiché utilizzano come input i combustibili, come metano, gasolio, benzina o metanolo, sfruttando le normali reti di distribuzione dei carburanti esistenti oggi. L'installazione di un reformer on-board che funzioni a metanolo viene a costare 1500 € o 3000 € nel caso utilizzi benzina. L'idrogeno prodotto da questi trasformatori può essere sfruttato dalle fuel cells per produrre la potenza elettrica di cui necessita il veicolo per muoversi, con il vincolo tuttavia che sia quasi puro, pena una rapida degenerazione della cella. Sebbene questa soluzione porti con sé due contributi positivi, da un lato impiega il combustibile fossile con un'efficienza maggiore rispetto ad un tradizionale motore termico, dall'altro apre la strada a una tecnologia a emissioni zero, non è la soluzione perfetta, poiché vengono comunque utilizzati ancora combustibili derivanti da idrocarburi fossili e, anche se ridotte

---

<sup>4</sup> Il termine syngas (o gas di sintesi) è un portmanteau che nasce dall'unione delle due parole synthetic gas e indica non un gas vero e proprio, bensì una miscela di gas, essenzialmente monossido di carbonio (CO) e idrogeno (H<sub>2</sub>), con la presenza in quantità variabile anche di metano (CH<sub>4</sub>) e anidride carbonica (CO<sub>2</sub>).

notevolmente, le emissioni nocive sono ancora presenti. I requisiti necessari affinché sia possibile la presenza di un impianto di produzione di idrogeno on-board sono quelli tipici di un veicolo: costo contenuto, peso limitato, ingombri ridotti, efficienza elevata, pochi problemi nelle fasi di avvio, affidabilità e durata elevate. Lo sviluppo graduale di una rete sufficientemente capillare di distribuzione dell'idrogeno, in seguito all'espansione del mercato delle utenze, renderebbe in futuro inutili i fuel processor a bordo, consentendo la circolazione di veicoli ad idrogeno e fuel cells senza reformer. L'obiettivo finale sarà ancora una volta l'utilizzo di fonti rinnovabili come input per la produzione di idrogeno, anche se sarà l'ultimo step nel percorso di sviluppo.

#### *2.1.5. Altri processi*

Se pur di diffusione limitata, a causa dei rendimenti minori o dei problemi tecnologici ad essi legati, esistono ulteriori processi quali il cracking termico (TC) e il metodo Kvaerner.

Il cracking termico consiste nella rottura di molecole di idrocarburi per effetto dell'elevata temperatura generata in un'atmosfera priva di aria o acqua. Il calore è originato dalla combustione di metano ma potrebbe essere fornito anche dalla combustione dell'idrogeno prodotto come combustibile, eliminando così ogni emissione a parità di costi di produzione

Il processo Kvaerner sfrutta un arco di plasma a temperature elevate dell'ordine dei 1600°C al fine di ottenere la rottura degli idrocarburi. Questo processo richiede una grande quantità di energia elettrica ed elevati costi di impianto. Ciò nonostante è interessante perché il rendimento del processo è elevato, circa 98%, non vi è alcuna produzione significativa di anidride carbonica e il calore generato può essere facilmente utilizzato per una produzione successiva di energia elettrica.

È da tener presente, che la produzione d'idrogeno da combustibili fossili deve essere considerata come una sorta di "ponte tecnologico" verso la produzione da fonti rinnovabili. Tale soluzione lascia irrisolti in particolare i problemi economici a causa dell'inevitabile progressivo esaurimento delle riserve di combustibili fossili e del costo aggiuntivo del confinamento della CO<sub>2</sub>.

#### *2.1.6. Elettrolisi dell'acqua*

L'idrogeno può essere ottenuto tramite elettrolisi, con acqua pura e energia elettrica come uniche alimentazioni necessarie. Questo processo fu applicato per la prima volta da Sir William Grove, nell'anno 1839. Il processo avviene per mezzo di una cella elettrolitica. La cella elettrolitica è composta da due elettrodi immersi in una soluzione

elettrolitica (soluzione alcalina con idrossido di potassio) e separati da una membrana microporosa permeabile solo agli ioni. La corrente elettrica innesca una reazione elettrochimica che scinde il legame molecolare tra idrogeno e l'ossigeno, i quali così separati confluiscono rispettivamente verso il catodo e verso l'anodo.



L'intero processo di produzione e consumo è ambientalmente sostenibile purché sia disponibile una corrispondente quantità di energia elettrica pulita in grado di alimentare il processo di elettrolisi. Nella pratica, queste tecnologie attualmente non sono economicamente convenienti per la produzione di idrogeno su vasta scala. D'altra parte l'impiego di energia elettrica generata da combustibili fossili per la produzione di idrogeno porta ad un costo da tre a cinque volte maggiore rispetto all'idrogeno prodotto direttamente dai combustibili fossili. Senza dimenticare che la produzione di energia elettrica da combustibili fossili è causa di emissioni inquinanti. Attualmente quindi, solo il 5% della produzione mondiale di idrogeno avviene per elettrolisi dell'acqua e solo per soddisfare richieste limitate di idrogeno estremamente puro, con valori prossimi al 99,95%. Il rendimento del ciclo non è alto ma uno dei vantaggi è dato dal fatto che il processo consente di produrre l'idrogeno direttamente nello stesso luogo di utilizzo oppure di generarlo in un dato luogo e trasportarlo in seguito dove serve.

Per incrementare l'efficienza e ridurre i problemi di perdite liquide o gassose, grazie all'utilizzo di un elettrolita solido che non è corrosivo, si sta studiando una nuova tipologia di elettrolisi ad alta temperatura o HTE (High Temperature Electrolysis), con valori di temperature più elevate, circa 900-1000 °C. L'elevata efficienza che discende dall'utilizzo di una temperatura elevata deriva dal fatto che all'aumentare di questa diminuisce la tensione di decomposizione e diminuiscono le sovratensioni agli elettrodi. Ciò può essere ottenuto anche utilizzando il vapore ottenuto da altri processi industriali, o attraverso un'ottimizzazione dei materiali dei due elettrodi, facilitando il flusso di corrente al loro interno e riducendo le perdite elettriche. Poiché sono necessarie temperature molto elevate, la tecnica HTE richiede sia una fonte di calore ad alta temperatura che l'utilizzo di materiali e tecniche di fabbricazione costosi, ma un incentivo sta nel fatto che il rendimento raggiungibile è prossimo al 95%.

### *2.1.7. Pirolisi e gassificazione delle biomasse*

La formulazione prevista dalla Direttiva Europea 2009/28/CE intende per biomassa “la frazione biodegradabile dei prodotti, rifiuti e residui di origine biologica provenienti dall'agricoltura (comprendente sostanze vegetali e animali), dalla silvicoltura e dalle industrie connesse, comprese la pesca e l'acquacoltura, nonché la parte biodegradabile dei rifiuti industriali e urbani”. Rappresenta una tecnologia in continua evoluzione che permette di ricavare energia elettrica sfruttando i prodotti derivati dal trattamento delle biomasse originate dai rifiuti urbani, industriali e delle sostanze scartate della produzione agricola e zootecnica. Le biomasse ed i combustibili da esse derivate emettono nell'atmosfera, durante la combustione, una quantità di anidride carbonica più o meno corrispondente a quella che viene assorbita, in precedenza dai vegetali durante il processo di crescita. L'impiego delle biomasse ai fini energetici limita quindi il rilascio di nuova anidride carbonica, principale responsabile dell'effetto serra. Ciò è particolarmente corretto per le biomasse di origine naturale, mentre i rifiuti urbani necessitano di particolare attenzione, dato il rischio di immettere nell'atmosfera sostanze nocive.

I metodi per ricavare energia dalle biomasse sono tre:

- **Termovalorizzatori:** questo metodo prevede di bruciare le biomasse, porgendo attenzione a non disperdere nell'ambiente sostanze tossiche. Con il calore prodotto viene generata energia elettrica tramite un ciclo di turbina-vapore. L'energia elettrica può essere sfruttata anche per la produzione di idrogeno mediante elettrolisi. L'utilizzo delle biomasse in queste centrali permette di recuperare il 45% dell'energia elettrica che andrebbe altrimenti persa in discarica.
- **Gassificazione:** il processo avviene a temperature elevate (700-800 °C). La biomassa viene convertita in gas di sintesi (syngas) attraverso la reazione parziale con ossigeno e mediante l'apporto di calore. Il gas viene poi raffreddato e purificato dei composti di zolfo. Il syngas (composto principalmente da H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CO, CO<sub>2</sub> e vapor d'acqua) può essere bruciato direttamente all'interno di motori a combustione interna oppure può essere utilizzato per produrre metanolo e idrogeno attraverso la reazione di reforming e in seguito quella di shift.
- **Pirolisi:** tale tecnologia utilizza temperature molto alte (900°C) e spezza le molecole delle sostanze organiche negli elementi semplici che le costituiscono, formando i vari tipi di gas fra cui l'idrogeno. La percentuale di idrogeno nelle biomasse è del 7%. Per eliminare le sostanze indesiderate è necessario un sistema di purificazione durante il ciclo.

### *2.1.8. Processi sperimentali di sintesi biologica*

La ricerca si muove fondamentalmente in due direzioni: migliorare le tecnologie esistenti e sperimentare nuovi metodi. L'obiettivo è da un lato la riduzione dei costi delle tecnologie in uso, riducendo la quantità dei materiali impiegati e aumentando i rendimenti di conversione degli impianti esistenti, dall'altro lato si ricerca un perfezionamento dei nuovi sistemi che consentano di risolvere la questione dell'impatto ambientale delle tecnologie basate sull'impiego degli idrocarburi. Un sistema emergente, definito "fotoconversione", consente la produzione di idrogeno tramite l'impiego diretto dell'energia solare per la scissione dell'acqua, in sostituzione dell'energia elettrica. Ci sono due classificazioni principali di tali sistemi: fotobiologico e fotoelettrochimico.

- I processi fotobiologici riguardano la generazione dell'idrogeno da sistemi biologici, che usano la luce solare. Assorbendo l'energia solare alcune alghe separano l'idrogeno dall'acqua utilizzando un enzima (idrogenasi) con un'efficienza circa del 5%. Tuttavia, gli enzimi dell'alga vengono distrutti dall'ossigeno che si libera dalla scissione dell'acqua. Esistono però, organismi che riescono a sopperire a questo problema e sono attualmente oggetto di studio.

I sistemi "whole-cell", che coinvolgono batteri, hanno potenziale per la produzione a breve termine con efficienza di conversione del 10% e sistemi "cell-free", utilizzano solo gli enzimi che producono l'idrogeno, che a lungo termine possono raggiungere un'efficienza di circa il 25%.

Oltre ai problemi relativi alla bassa efficienza di conversione, l'azione di quasi tutti gli enzimi che elaborano l'idrogeno, è notevolmente rallentata dalla presenza dell'ossigeno prodotto dalla scissione dell'acqua.

- I processi fotoelettrochimici usano degli elettrodi semiconduttori in una cella fotoelettrochimica per convertire energia solare in idrogeno. Un materiale semiconduttore è utilizzato sia per assorbire l'energia solare sia per agire da elettrodo per la scissione dell'acqua in idrogeno e ossigeno. Questa tecnologia è ancora ai primi stadi del suo sviluppo con un'efficienza che raggiunge il 12%. La ricerca attualmente si sta occupando di migliorare l'efficienza di conversione in energia di tali celle, aumentare la loro durata e ridurre i costi. A tale scopo vi sono progetti per l'identificazione di nuovi materiali semiconduttori ad alta efficienza e stabilità.

## 2.2.Stoccaggio

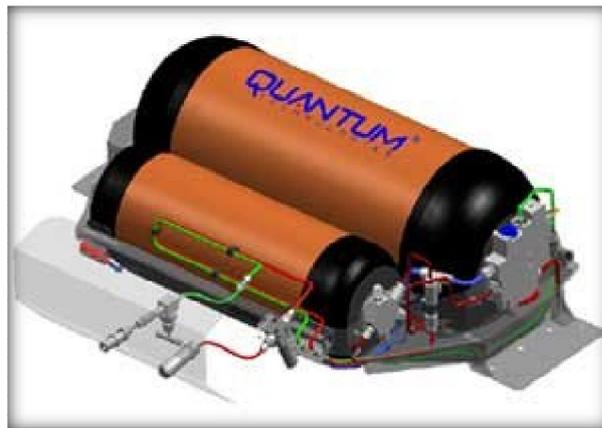
Un fattore critico per l'utilizzo dell'idrogeno è l'effettiva disponibilità ovunque, data la mancanza di una rete sufficientemente capillare delle possibili stazioni di rifornimento. E' necessario, allora, risolvere la questione relativa al suo trasporto, al suo stoccaggio e alla sua erogazione. I metodi per l'accumulo sono funzione delle distanze da percorrere nella successiva movimentazione. Nel caso di grandi trasporti risalta la necessità di immagazzinare la massima quantità possibile, mentre per il trasporto veicolare, quale i serbatoi delle auto, diventano importanti i fattori "automotive". L'idrogeno contiene il più elevato rapporto energia-peso rispetto agli altri fluidi messi a confronto, tuttavia contiene minor energia per unità di volume; ciò comporta indubbe difficoltà di stoccaggio con notevoli svantaggi, in particolare, nelle applicazioni veicolari, che invece richiedono volumi e pesi ridotti, con un' accettabile autonomia di guida. L'idrogeno è immagazzinabile:

- allo stato gassoso compresso;
- allo stato liquido;
- con idruri metallici;
- con idruri chimici;
- con nanostrutture di carbonio;
- all'interno di microsfere di cristallo;
- con altri metodi

### *2.2.1.Idrogeno allo stato compresso*

Portato in pressione, attraverso l'utilizzo di un compressore, il gas viene poi immagazzinato allo stato gassoso compresso all'interno di bombole che vengono collocate all'aperto in zone protette oppure raccolte in magazzini. Il processo di compressione risulta la fase chiave di tale procedimento, dato che i costi di stoccaggio lo individuano come parametro più incidente. Al fine di ridurre la spesa energetica si utilizzano compressori assiali, in un processo a più stadi, che tuttavia necessitano di tempi più lunghi rispetto all'utilizzo di compressori radiali. Se le quantità di gas sono particolarmente elevate, superiori ai 15000 Nm<sup>3</sup> si preferisce stoccare il gas non più in bombole cilindriche ma in contenitori di forma sferica che hanno però costi più elevati per unità di volume. Dopo la fase di compressione l'idrogeno si trova a valori di pressione che raggiungono i 200-250 bar, i quali forniscono una densità di energia molto bassa di soli 2-2,6 MJ/l contro i 31,6 della benzina nello stesso volume. Questo comporta la necessità, a livello automobilistico, di serbatoi più grandi e pesanti, a parità di energia accumulata, pur nella consapevolezza che il problema dello spazio è critico

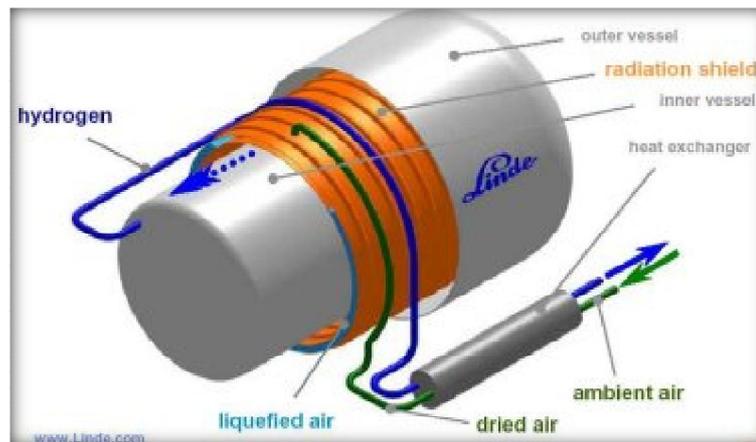
nelle vetture. Essendo l'autonomia di un veicolo a idrogeno direttamente legata alla quantità di gas disponibile a bordo, risulta immediato individuare una strada percorribile nell'aumento della pressione dell'idrogeno, che richiede tuttavia maggiore spesa energetica e serbatoi speciali. Si raggiungono in questo modo, attraverso l'utilizzo di serbatoi speciali, valori di 700 bar, che riducono il peso di quattro volte e l'ingombro geometrico della metà, rispetto a un serbatoio di acciaio di tipo classico, anche se le normative vigenti in campo di sicurezza, per ora non permettono la circolazione di vetture con serbatoi a questi valori di pressioni.



**Figura 6.** *Bombole ad alta pressione [Quantum]*

### *2.2.2. Idrogeno allo stato liquido*

L'idrogeno liquido risulta molto interessante dato che permette, di trasportare un quantitativo di energia nettamente maggiore rispetto allo stato gassoso, a parità di ingombro del serbatoio. Tuttavia la temperatura di equilibrio alla quale deve essere mantenuto è molto bassa, con valori prossimi allo "zero assoluto", circa  $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Risulta evidente la necessità di contenitori speciali, definiti criogenici, e la presenza di diverse difficoltà legate al suo trattamento, rappresentate dalle elevate energie spese durante il processo di liquefazione e dall'isolamento termico dei contenitori in modo da limitare le perdite per ebollizione. Il costo energetico di liquefazione sommato alle speciali attrezzature richieste per il controllo del processo e il mantenimento della temperatura, coprono quasi il 30% del contenuto energetico del combustibile, valore ben superiore all'8% consumato nei contenitori di idrogeno compresso. Un ulteriore limite è rappresentato dall'evaporazione di piccole parti del liquido, trovandosi in un precario equilibrio termico, che risultano essere un problema sia per quanto riguarda la sicurezza del veicolo che per l'accumulo e l'autonomia. L'obiettivo è l'individuazione di materiali, strutture e processi che permettano di ridurre i costi e aumentare l'affidabilità di tale tecnologia.



**Figura 7.** Serbatoio criogenico [Linde]

### 2.2.3. Idruri metallici

Una delle tecnologie che meglio si presta all'immagazzinamento dell'idrogeno, soprattutto per applicazioni veicolari, è l'immagazzinamento allo stato solido, che sfrutta la tendenza di alcuni metalli e leghe di assorbire chimicamente idrogeno e poi di rilasciarlo reversibilmente. Gli idruri si formano ed agiscono attraverso due fasi: l'assorbimento ed il rilascio dell'idrogeno. L'assorbimento dell'idrogeno nello spazio interatomico, denominato idrogenazione, è un processo esotermico che richiede raffreddamento mentre il rilascio di idrogeno, ossia deidrogenazione, è un processo endotermico che richiede calore. Il calore generato durante la formazione dell'idruro deve essere continuamente rimosso per evitare che le proprietà d'assorbimento dell'idruro ne risultino alterate e il sistema possa infiammarsi. Con la deidrogenazione invece, fornendo una certa quantità di calore, si spezza il legame formatosi tra il metallo e l'idrogeno e viene rilasciato idrogeno puro. Il rilascio non mai è completo, resta in giacenza circa il 10% dell'idrogeno ottenibile, che generalmente non viene recuperata. La temperatura e la pressione di queste reazioni dipendono dalla composizione specifica dell'idruro. I valori di densità energetica sono nettamente migliori rispetto alla tecnica di compressione gassosa a 700 bar e sono paragonabili a quelli dell'idrogeno allo stato liquido, con ulteriori vantaggi legati all'ingombro ridotto, la stabilità dello stoccaggio e la sicurezza dovuta alle basse pressioni in gioco. Gli svantaggi sono, però, la bassa percentuale in peso dell'idrogeno immagazzinato ed il costo generalmente elevato dei materiali che non consentono ancora la realizzazione di sistemi di immagazzinamento ad idruri utilizzabili commercialmente su larga scala.

#### 2.2.4. Idruri chimici

Questo metodo di stoccaggio, che risulta valido per lunghi tempi di conservazione, tipicamente stagionali, sfrutta una reazione reversibile tra idrogeno e toluene<sup>5</sup>. L'utilizzo del toluene, con formazione di metilcicloesano<sup>6</sup>, è promettente poiché sia il toluene sia il metilcicloesano sono composti conosciuti, facilmente trasportabili e sicuri. La formazione di metilcicloesano è ottenuta mediante idrogenazione del toluene seguita da quella di deidrogenazione, che avviene a circa 500 °C. Anche se il processo di liberazione in questo caso consuma circa il 18 % dell'energia dell'idrogeno stoccato, l'uso dei sistemi chimici è vantaggioso perché sfrutta tecnologie sperimentate e attendibili, con infrastrutture di trasporto ed immagazzinaggio già esistenti. Lo svantaggio è dato dalla mancata fattibilità dell'utilizzo di tale tecnologia per applicazioni automotive. Le ragioni tecnico-economiche sono legate alla gestione della fase di deidrogenazione, la quale richiederebbe dei mini-impainti per essere eseguita on-board.

#### 2.2.5. Microsfere di cristallo

Nello studio riguardante le nanostrutture, una valida soluzione potrebbe essere l'immagazzinaggio dell'idrogeno in microsfere di cristallo. Esse consistono in piccole sfere di cristallo, vuote, con un diametro che varia da 25 a 500 micron ed uno spessore di un solo micron, capaci di accumulare idrogeno se sottoposte ad alta pressione e medie temperature (200 °C - 400° C). Il processo si conclude quando la pressione interna raggiunge lo stesso valore della pressione esterna. Le microsfere, raffreddate a temperatura ambiente, che ne riduce drasticamente la diffusività, nella fase di utilizzo vengono poi riscaldate con conseguente emissione del gas. L'efficienza del processo quindi, dipende da determinate caratteristiche quali: pressione dell'idrogeno, temperatura e volume del letto, dimensioni e composizione chimica delle microsfere. Una volta considerato un piccolo costo legato all'energia termica necessaria al processo di estrazione dell'idrogeno, tale tecnica mostra la sua convenienza rispetto agli idruri di metallo, sia in termini di spesa energetica che di sicurezza, e non presenta inoltre problemi in caso di esposizione all'aria.

---

<sup>5</sup> Il toluene (nome IUPAC metilbenzene) è un liquido volatile ed incolore dall'odore caratteristico. La sua formula bruta è C<sub>7</sub>H<sub>8</sub>. È un idrocarburo aromatico, e viene usato generalmente come solvente in sostituzione del più tossico benzene, cui somiglia sotto molti aspetti.

<sup>6</sup> Si tratta di un cicloalcano, appartenente anch'esso alla più ampia classe degli idrocarburi.

### 2.2.6. Nanostrutture di carbonio

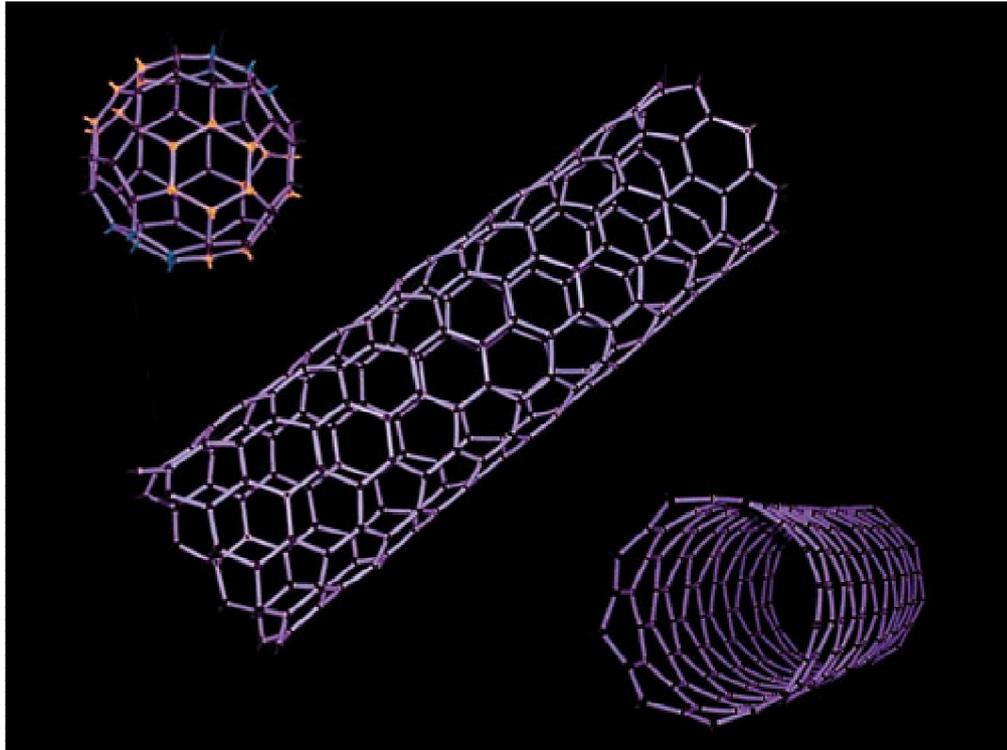
Studi relativi a sistemi che consentano d'immagazzinare, a temperatura normale, notevoli quantitativi d'idrogeno, cercano la loro risposta nelle nanostrutture al carbonio. Le due nanostrutture al carbonio che rivestono maggiore interesse sono i nanotubi isolati singolarmente e le nanofibre di grafite.

- I primi sono delle microscopiche strutture cilindriche filiformi dal diametro di pochi micron, composte da pochi atomi di carbonio che assorbono idrogeno a temperatura ambiente. È stato riscontrato che i nanotubi di carbonio hanno la capacità di adsorbire<sup>7</sup> grandi quantità di idrogeno, questo implica in pratica che, a parità di volume occupato, la quantità di idrogeno adsorbita dai nanotubi è maggiore rispetto a quella che può essere introdotta per mezzo di una compressione. Questo avviene perché i nanotubi raccolgono le molecole dell'idrogeno sulle loro superfici facendogli raggiungere una densità superiore a quella che hanno nel gas compresso. Le condizioni per realizzare l'accumulo nei nanotubi tipicamente richiedono o alte pressioni o basse temperature o entrambe.
- Le seconde sono costituite da materiali derivanti dalla decomposizione di miscele contenenti idrocarburi e caratterizzate da nanocristalli estremamente ordinati. Una delle caratteristiche più rilevanti di queste strutture è la presenza di un grande numero di bordi che costituiscono siti adatti alle interazioni chimiche e fisiche e in particolare all'adsorbimento.

I valori registrati, relativi alla capacità di adsorbimento e alla densità di energia, sono estremamente variabili, dall'1% al 70%, con l'assunzione di un valore di riferimento del 20%. Per i valori più elevati tale tecnologia permetterebbe di stivare 4 kg di idrogeno in un serbatoio di soli 6,5 kg e la renderebbe potenzialmente la migliore per le applicazioni in campo veicolare, anche se attualmente essa è legata solamente al campo sperimentale.

---

<sup>7</sup> Adsorbimento: adesione o concentrazione di sostanze disciolte o disperse sulla superficie di un corpo. Fenomeno superficiale che si verifica nello strato che separa due mezzi di natura differente.



**Figura 8.** *Nanotubi di carbonio*<sup>8</sup>.

#### *2.2.6. Considerazioni sul sistema di stoccaggio*

La scelta di un sistema d'immagazzinaggio varia in base a numerosi fattori legati all'idrogeno quali le applicazioni successive, la densità d'energia, la quantità ed il periodo d'immagazzinaggio, e fattori propri dei sistemi, quali la manutenzione, l'affidabilità e la sicurezza, oltre alla disponibilità d'energia. La densità d'energia, espressa rispetto al volume o al peso, risulta essere un parametro fondamentale. Valutando i diversi parametri in gioco si vede come l'immagazzinaggio sotterraneo dell'idrogeno compresso risulti il più delle volte il metodo più conveniente poiché i costi per la compressione sono indipendenti dal volume immagazzinato o dalla durata dell'immagazzinaggio. Gli idruri di metallo invece, sono poco competitivi a causa dei costi ancora elevati delle leghe di metallo impiegate. Rispetto all'immagazzinaggio in contenitori pressurizzati, la liquefazione dell'idrogeno risulta conveniente all'aumentare della quantità d'idrogeno e del periodo d'immagazzinaggio. L'unica via per rendere più conveniente la compressione sarebbe l'aumento della pressione e la conseguente riduzione delle dimensioni dei contenitori, il che comporterebbe però un aumento dei rischi legati a tale sistema.

---

<sup>8</sup> *Image's copyright: Swiss Nanoscience Institute*

### 2.3.Trasporto

Il trasporto è un altro dei punti fondamentali nell'ottica di sviluppo e utilizzo dell'idrogeno, e ne impone la scelta dello stato fisico, funzione delle distanza da percorrere e degli utilizzi previsti nel luogo di destinazione. Per cui la scelta sarà fortemente condizionata principalmente dalla forma liquida o gassosa dell'idrogeno in base alla quale avverrà la valutazione del trasporto tramite gasdotti o tramite mezzi stradali, ferroviari o navali.

#### *2.3.1.Trasporto su strada*

In generale si preferisce lo stato gassoso quando le distanze sono brevi e le quantità limitate, mentre in caso contrario la scelta ricade per un trasporto allo stato liquido. E' il metodo di trasporto più usato e relativamente a basso costo. Si utilizzano bombole contenenti idrogeno allo stato gassoso alla pressione di 200 bar trasportate in carri bombolai, con una capacità di trasporto fino a 4200 m<sup>3</sup> di idrogeno. In un ottica di maggior rapidità di trasporto e aumento della quantità trasportata si può attuare un trasporto allo stato liquido in serbatoi criogenici. Un serbatoio di questo tipo può contenere sino a 45.000 litri di idrogeno liquido, i quali risultano tuttavia problematici dal punto di vista della sicurezza. Per questi motivi si preferisce utilizzare tali serbatoi per trasporto navale o su rotaia. Una tecnologia emergente utilizza idruri metallici all'interno di autocisterne per un trasporto che risulterebbe migliore sia dal punto di vista degli ingombri sia della sicurezza. Tale tecnica purtroppo è ancora in fase di studio.

#### *2.3.2.Gasdotti*

L'idrogeno, essendo un aeriforme, può essere gestito, con opportune precauzioni, in strutture analoghe a quelle usate per il gas naturale, ma con delle caratteristiche particolari dovuti alle proprietà fisiche specifiche dell'idrogeno. L'idrogenodotto, in alcuni casi particolari, con un aumento della capacità di trasporto della linea, e per brevi tratti, può essere percorso da gas allo stato liquido. La criticità del trasporto è legata alla temperatura necessaria, problematica sia per la stabilità stessa dell'idrogeno che per la struttura del materiale a contatto. Fenomeni di infragilimento e riduzione della resilienza impongono l'impiego di materiali speciali e accorgimenti specifici. È necessario inoltre prevedere sistemi, visivi ed olfattivi, per l'individuazione di eventuali fughe, e le ovvie precauzioni per evitare inneschi di combustione dati i caratteri chimico-fisici di facile innesco a combustione di questo gas.

## CAPITOLO 3:Le fuel cells

Fu l'avvocato e fisico gallese Sir William Robert Grove (1811- 1896), nel 1839, a realizzare la prima cella a combustione della storia, intuendo la possibilità di produrre corrente facendo reagire idrogeno e ossigeno. Una pila a combustibile è un dispositivo che sfrutta un processo elettrochimico per convertire, in modo diretto, energia chimica in energia elettrica. Il motore a combustione interna si basa, invece, sulla reazione esotermica della combustione, ossia la reazione di un carburante con un comburente, normalmente aria. Tale reazione molto veloce produce energia sotto forma di calore, una parte del quale viene trasformato in energia meccanica attraverso un ciclo termodinamico, utilizzata per la trazione o per la conversione in energia elettrica. Il processo di trasformazione dell'energia è dunque quello indiretto "energia chimica-calore-lavoro". Al di là di un evidente sovradimensionamento rispetto al reale utilizzo, il limite più stringente per motori tradizionali a combustione interna, risiede nel fatto che essi possono lavorare al massimo del rendimento solo per un determinato intervallo di giri, peraltro molto ristretto. Differentemente, le fuel cell possono funzionare a rendimento elevato e praticamente costantemente, per temperature ridotte (70-80 °C).

I vantaggi principali sono:

- Possibilità di ottenere una vasta gamma di potenza elettrica;
- Emissioni acustiche quasi nulle e manutenzione ridotta per la quasi totale assenza di organi meccanici in movimento;
- Rendimento più alto rispetto agli impianti tradizionali di produzione di energia;
- Possibilità di sfruttare il calore generato per riscaldare ambienti se si tratta di acqua o per produrre energia elettrica se si tratta di vapore;
- Ridottissimo impatto ambientale.

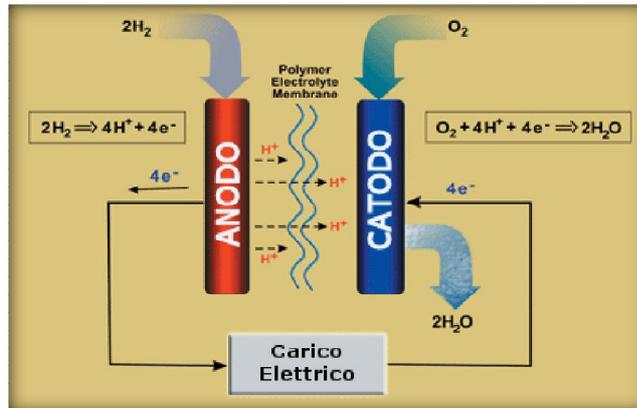
I limiti sono:

- Costo elevato dovuto alla ridotta commercializzazione su larga scala;
- Affidabilità e caratteristiche da migliorare;
- Reticenza alla novità da parte della massa.

### 3.1.Struttura e funzionamento

Si tratta, semplificando, di due superfici piane realizzate con materiali conduttori a struttura porosa, separati da una lamina di materiale che può presentarsi allo stato liquido o allo stato solido (membrana). Tale materiale deve possedere una caratteristica indispensabile per il funzionamento di un fuel cells, ossia la capacità di essere facilmente attraversabile da alcuni tipi di ioni. Questa proprietà si definisce

elettrolitica e il materiale elettrolita. Presso l'anodo vengono prodotti elettroni per ossidazione dell'idrogeno, i quali vanno poi a reagire nell'altro elettrodo (catodo) con l'ossigeno fornito dal sistema e gli ioni di idrogeno che attraversano la membrana.



**Figura 9.** Struttura e reazioni

La faccia più interna dell'anodo, raggiunta dal flusso di gas ( $H_2$ ), è sede di una reazione di ossidazione, facilitata dalla presenza di un catalizzatore, normalmente platino. La molecola d'idrogeno viene scomposta negli ioni  $H^+$  e nell'equivalente numero di elettroni che vengono rilasciati liberi, secondo la reazione:



L'energia chimica potenziale dell'idrogeno genera una corrente elettrica che può essere utilizzata direttamente. Il catalizzatore facilita l'innescio e il mantenimento della reazione, inoltre risulta assolutamente necessario per il funzionamento della cella a bassa temperatura ( $60-100^\circ C$ ), fornendo energia, altrimenti insufficiente, per l'innescio della reazione. Il suo impiego evita anche la formazione di residui che potrebbero danneggiare gli elettrodi, quando l'idrogeno non è perfettamente puro. Al catodo ha luogo la seconda reazione. Gli elettroni si combinano con gli ioni  $H^+$ , che hanno attraversato direttamente l'elettrolita, e l'ossigeno ( $O_2$ ) fornito dall'esterno, generando acqua:



Si ottiene così una tensione ai capi della cella pari al valore della differenza tra il potenziale elettrico anodico e quello catodico. Tale valore è solo teorico, poiché è influenzato anche da fattori che interessano la struttura degli elettrodi e le proprietà dei

materiali che vengono usati nelle celle. Nel complesso, l'energia potenziale contenuta nell'idrogeno, grazie alla conversione elettrochimica appena descritta, viene trasformata direttamente in elettricità pur con piccole dispersioni energetiche, in parte sotto forma di calore in parte come dissipazioni elettriche. Il sistema eroga energia elettrica fino a che si dispone di idrogeno nel serbatoio, poi cessa di funzionare. Se la potenza richiesta dall'utilizzatore è elevata i flussi attraverso l'elettrolita sono maggiori e le reazioni si mantengono attive; se invece la corrente richiesta è nulla (veicolo fermo), il flusso elettrolitico è nullo e le reazioni non avvengono, con notevole risparmio di combustibile. Tutte le pile a combustibile hanno la stessa configurazione di base: un elettrolita e due elettrodi. Ma vi sono diversi tipi di pile a combustibile, in base al tipo di elettrolita che utilizzano. Sono possibili anche molte combinazioni di carburante e ossidante, tuttavia, la maggior parte delle pile a combustibile in uso oggi, utilizzano idrogeno e ossigeno come sostanze chimiche.

### 3.2. Tipi di celle a combustibile

La scelta di impiegare un certo tipo di cella a combustibile dipende dalle condizioni operative e dalle applicazioni. La classificazione, eseguita solitamente in base all'elettrolita usato nelle fuel cells, individua sei famiglie:

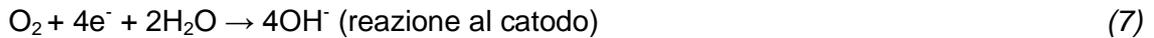
- Ad elettrolita alcalino (A-FC)
- A membrana polimerica a scambio protonico (PEM-FC)
- Ad alimentazione diretta di metanolo (DM-FC)
- Ad acido fosforico (PA-FC)
- A carbonati fusi (MC-FC)
- Ad ossidi solidi (SO-FC)

#### *3.2.1. Fuel cells ad elettrolita alcalino (A-FC)*

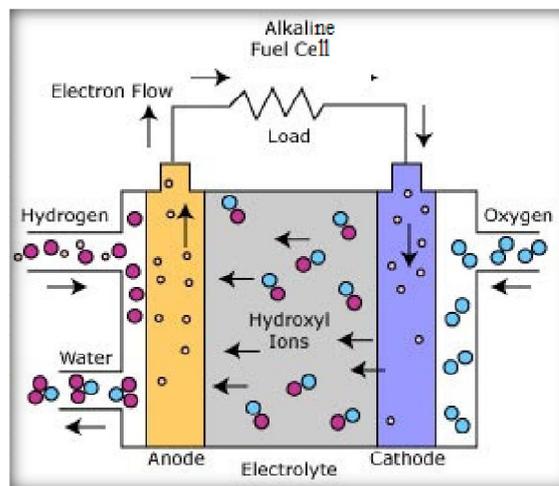
Operanti normalmente a temperature tra i 60°C e i 120°C, utilizzano come elettrolita una soluzione alcalina di idrossido di potassio (KOH), in concentrazioni che variano dai 33% fino all'85%, per temperature più elevate. Lo ione mobile è un idrossido a carica negativa OH<sup>-</sup>. Tali ioni reagiscono all'anodo con l'idrogeno di alimentazione rilasciando elettroni e producendo acqua, secondo la relazione:



Gli elettroni si dirigono dunque al catodo e si combinano con ossigeno e l'acqua presente nell'elettrolita. Si formano altri ioni OH<sup>-</sup> secondo la relazione:



Finché viene assicurata l'alimentazione, vi è il movimento di carica dall'anodo al catodo e il passaggio di ioni OH<sup>-</sup> attraverso l'elettrolita. Il limite di tali sistemi è dato dalla necessità di utilizzare idrogeno e ossigeno puri per la trasformazione energetica, perché minime impurità degradano la cella. Per l'uso normale, la cella A-FC è dunque poco appropriata, perché la necessaria purezza dei gas rende il sistema molto costoso, trovando invece, ancora oggi impiego nella tecnologia spaziale e nei motori di sottomarini.

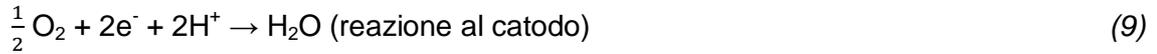


**Figura 10.** Schema di fuel cells ad elettrolita alcalino.

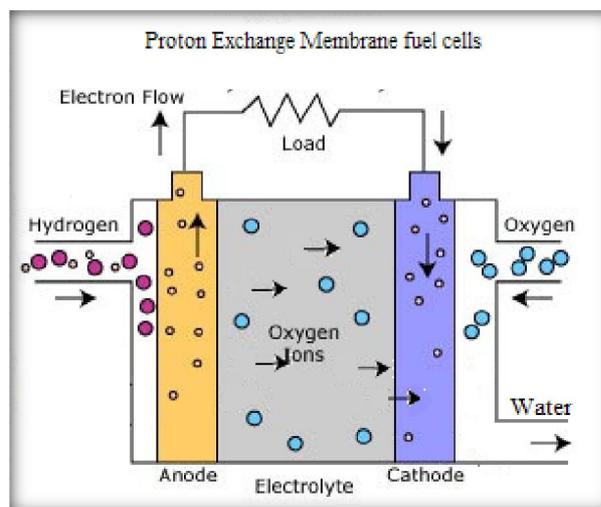
### 3.2.2. Fuel cells con elettrolita a membrana polimerica a scambio protonico (PEM-FC)

Particolarmente interessanti nelle applicazioni veicolari, questo tipo di celle operano a temperature comprese tra gli 80°C e i 100°C, con un elettrolita allo stato solido. La membrana elettrolitica, realizzata in Nafion<sup>®</sup>, è semimpermeabile: consente, cioè, il passaggio dei soli ioni positivi e crea un isolamento elettrico. È necessario garantire alla membrana il giusto livello di umidità ai fini del corretto funzionamento, stando attenti che un eccesso d'acqua, tuttavia, potrebbe risultare dannoso. A tale proposito si impiega un sistema ausiliario di umidificazione dei gas, che assicura alla membrana il giusto livello di idratazione.

Le reazioni all'anodo e al catodo sono rispettivamente:



All'anodo la molecola d'idrogeno ( $\text{H}_2$ ) viene scissa dal catalizzatore, generando due ioni  $\text{H}^+$  e due elettroni. Gli ioni positivi attraversano la membrana e raggiungono la parte del catodo, investito dall'ossigeno. La reazione al catodo porta alla formazione di acqua. Purché non contenga CO, questo tipo di celle richiedono idrogeno che non dovrà essere necessariamente purissimo e non richiedono l'aggiunta di liquidi, se non acqua. Il monossido di carbonio porta infatti all'avvelenamento del catalizzatore e al rapido deperimento della cella. I vincoli legati alle celle PEM rimangono comunque ridotti, inoltre associando il fatto che sono molto leggere e vantano una potenza specifica maggiore rispetto alle altre fuel cells, si intuisce la ragione per la quale sono molto considerate per eventuali applicazioni in ambito automobilistico.

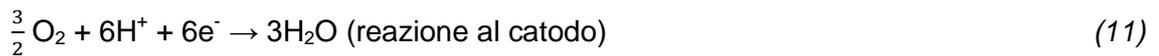


**Figura 10.** Fuel cells con elettrolita a membrana polimerica a scambio protonico.

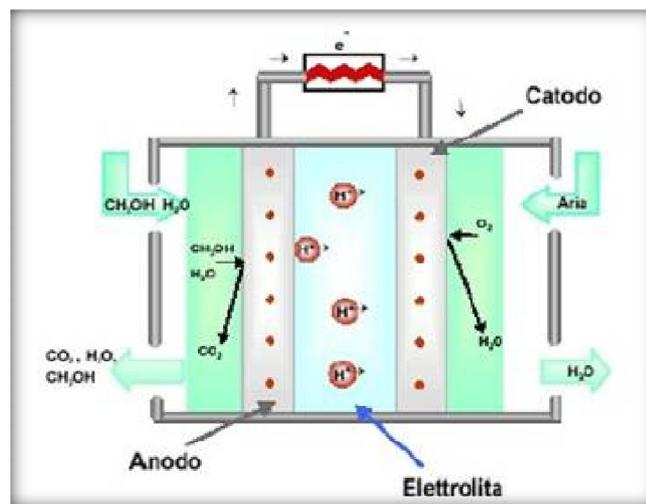
### 3.2.3. Fuel cells ad alimentazione diretta di metanolo (DM-FC)

Le celle, caratterizzate da una membrana polimerica come nel caso delle precedenti, vengono alimentate direttamente con metanolo e non con idrogeno. Richiedono una quantità maggiore di materiale catalizzatore rispetto alle PEM, per l'attivazione e il mantenimento delle reazioni:





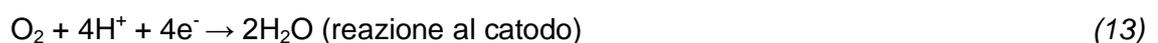
All'anodo la reazione produce energia elettrica ( $\text{e}^-$ ) e protoni  $\text{H}^+$  oltre a  $\text{CO}_2$ . La formazione tra i prodotti anche di  $\text{CO}_2$ , se pur minima, dovrà essere controllata e può essere ridotta, con un post trattamento, grazie a un catalizzatore che la diminuisce del 20%. Con un'eliminazione totale si otterrebbe un processo interessante anche dal punto di vista ambientale, in aggiunta all'attenzione rivolta per un utilizzo in campo veicolare dato dalle temperature operative ridotte, 60-80°C.



**Figura 11.** Fuel cells ad alimentazione diretta di metanolo

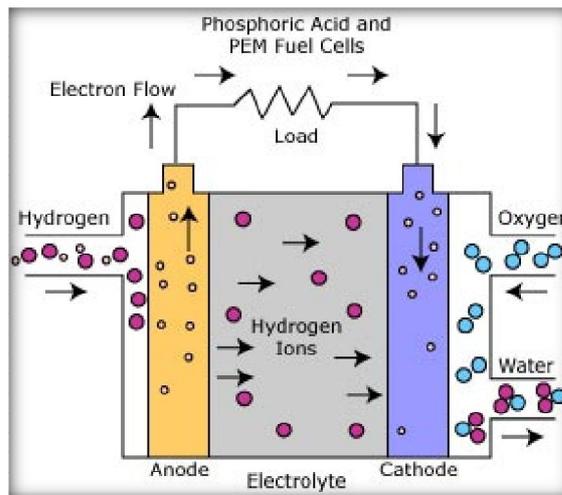
#### 3.2.4. Fuel cells ad acido fosforico (PA-FC)

Queste celle hanno un impiego prevalente negli impianti stazionari, mentre non sono indicate per trasporti veicolari. Caratterizzate da una soluzione ad elevata concentrazione (95%) di acido fosforico ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ) come elettrolita, le fuel cells operano a medio-alte temperature (200°C) e utilizzano come combustibile l'idrogeno. Le reazioni sono le seguenti:



Data la temperatura di funzionamento, vi è il rischio che l'elettrolita evapori. Per questa ragione si prevede un sistema di raffreddamento, basato sul circolo di un fluido di raffreddamento all'interno delle piastre, quale acqua, aria o olio. Lo sfruttamento di tale

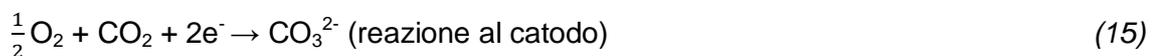
temperatura ci permette di realizzare un recupero energetico rigenerativo, con un'efficienza globale della fuel cells del 80-85%, ridotto al 45-48% per la sola efficienza di conversione dell'energia chimica in energia elettrica. Le fuel cells perdono d'efficienza se il platino catalizzatore entra in contatto con il CO o con composti dello zolfo. Quindi sarà necessario un processo di desolforazione del combustibile di partenza. Nonostante un'elevata vita utile e l'affidabilità raggiunta, esse non incontrano un'adeguata commercializzazione dovuta principalmente al costo elevato e in parte alle aspettative di maggior efficienza riposte nelle celle PEM.



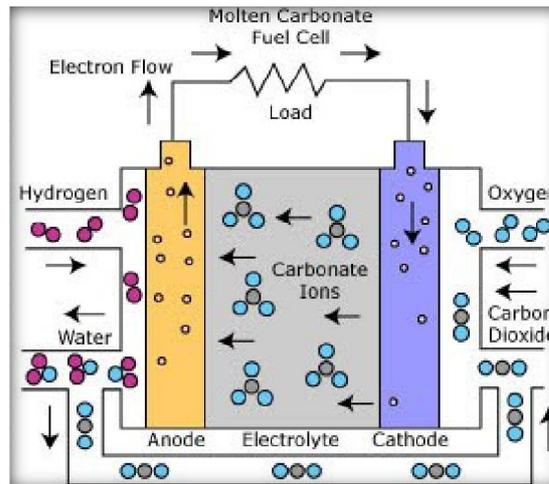
**Figura 12.** Fuel cells ad acido fosforico

### 3.2.5. Fuel cells a carbonati fusi (MC-FC)

Grazie alla flessibilità delle celle MC nell'utilizzo dei combustibili di alimentazione, esse risultano buoni sistemi per produrre energia elettrica a livello stazionario. Si utilizza una miscela di sali alcalini quale elettrolita, che alla temperatura elevata di funzionamento (600-680 °C), formano un sale fuso adatto al passaggio degli ioni carbonato ( $\text{CO}_3^{2-}$ ). Per trattenere la miscela di carbonati vi è una matrice ceramica porosa come l'alluminio di litio ( $\text{LiAlO}_2$ ). I due elettrodi sono porosi, l'anodo è di nichel al 10% di cromo e il catodo è di ossido di nichel con il 2% di litio. Non sono necessari catalizzatori nobili, in quanto è l'elevata temperatura di esercizio che sostiene le reazioni:



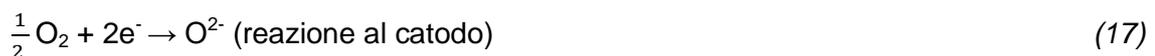
Si può notare come, oltre alla corrente elettrica e all'acqua, all'anodo si genera  $\text{CO}_2$ , necessaria alla formazione degli ioni carbonato  $\text{CO}_3^{2-}$ , sulla quale si basa il funzionamento della cella. La miscela comburente dovrà dunque contenere aria e  $\text{CO}_2$ , la quale se non fosse sufficiente si dovrebbe integrarla mediante una sorgente esterna. Si ottengono rendimenti energetici netti superiori al 65%, se poi si sfrutta anche il calore prodotto tramite un processo di cogenerazione, si può arrivare a rendimenti del 90%.



**Figura 13.** Fuel cells a carbonati fusi

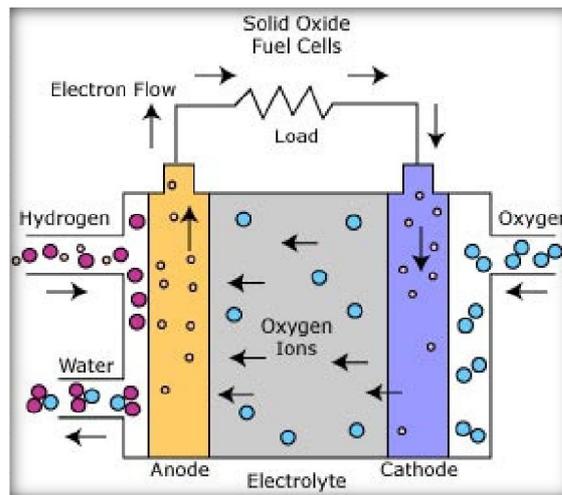
### 3.2.6. Fuel cells a ossidi solidi (SO-FC)

In questa tipologia di celle le temperature in gioco sono molto elevate, raggiungendo i  $1000^\circ\text{C}$ . Per questa ragione non necessitano di catalizzatore, e devono lavorare con un elettrolita molto resistente dal punto di vista termico costituito da ossido di zirconio stabilizzato con ossido di ittrio. Non essendovi presenza di fase liquida, ma solo di fase solida e gassosa, saranno assenti fenomeni corrosivi. L'anodo è costituito da un composito ceramico-metallico e il catodo è costituito da manganito di lantanio drogato di stronzio. Le reazioni sono:



L'idrogeno viene utilizzato come combustibile e l'ossigeno come comburente, ottenendo come prodotto di reazione all'anodo un vapor d'acqua. Posso abbinare a questo tipo di cella un ciclo termodinamico che sfrutta un'aliquota di calore, raggiungendo rendimenti globali del 70%, mentre con la cogenerazione i rendimenti

globali sono del 92%. Queste celle sono poco sensibili alle impurezze e possono usare come combustibile il CO, prodotto ad esempio nella prima fase del ciclo di steam reforming. Esse, tuttavia, non sono sollevate da alcuni problemi tecnologici legati principalmente alle elevate temperature di esercizio e alla conseguente scelta dei materiali, con obbligo di materiali ceramici. Il loro impiego prevalentemente stazionario, dati i costi di produzione ed esercizio non troppo alti, risulta essere il più interessante.



**Figura 14.** Fuel cells ad ossidi solidi

### 3.2.7. Considerazioni riguardanti le diverse tecnologie

La valutazione viene in ragione della disponibilità del combustibile, della diversa finalità, dei costi e delle problematiche ad esse legate. L'assunzione della temperatura, quale parametro valido per una scelta adeguata della cella, mostra come i fattori in gioco siano numerosi e spesso contrastasti. Le celle a basse temperature, come le PEM-FC, le A-FC e le DM-FC, possiedono minori vincoli tecnologici e la possibilità di impiego di materiali meno sofisticati. I rendimenti sono, tuttavia, minori (45% - 55%), con difficoltà di riutilizzo del calore prodotto, in quanto fornito a bassa temperatura e la necessità di utilizzo di un catalizzatore nobile per facilitare le reazioni, aumentandone i costi. Le applicazioni principali di queste celle sono quelle veicolari in quanto hanno bisogno di ridotti sistemi di raffreddamento, che non complicano il sistema e non compromettono la sicurezza. Le celle a media-alta temperatura, quali le SO-FC, le MC-FC, e le PA-FC, hanno peculiarità opposte a quelle precedenti e si adoperano prevalentemente ad uso stazionario per impianti di taglia maggiore con rendimenti del 50% - 65%, che raggiungono valori del 70% - 90% nel caso di cogenerazione. Vi è assenza di catalizzatori costosi, ma non di problemi tecnologici, legati alle temperature, ai materiali e alla sicurezza.

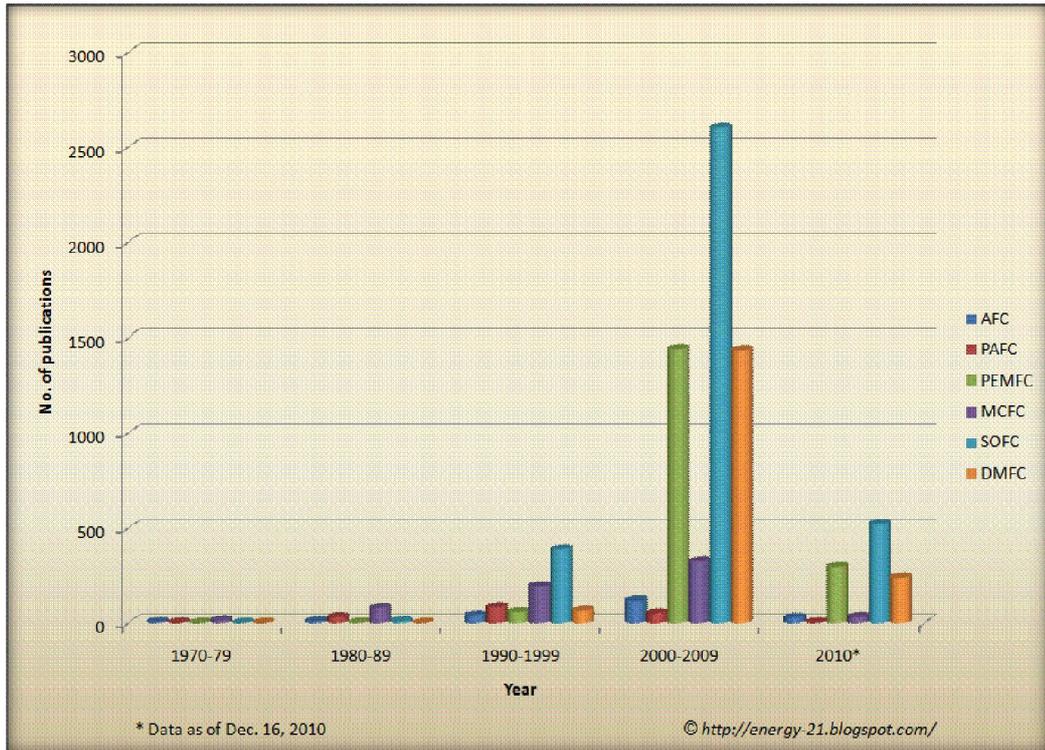


Figura 15. Il trend di pubblicazioni di ricerca sulle varie tecnologie fuel cells.

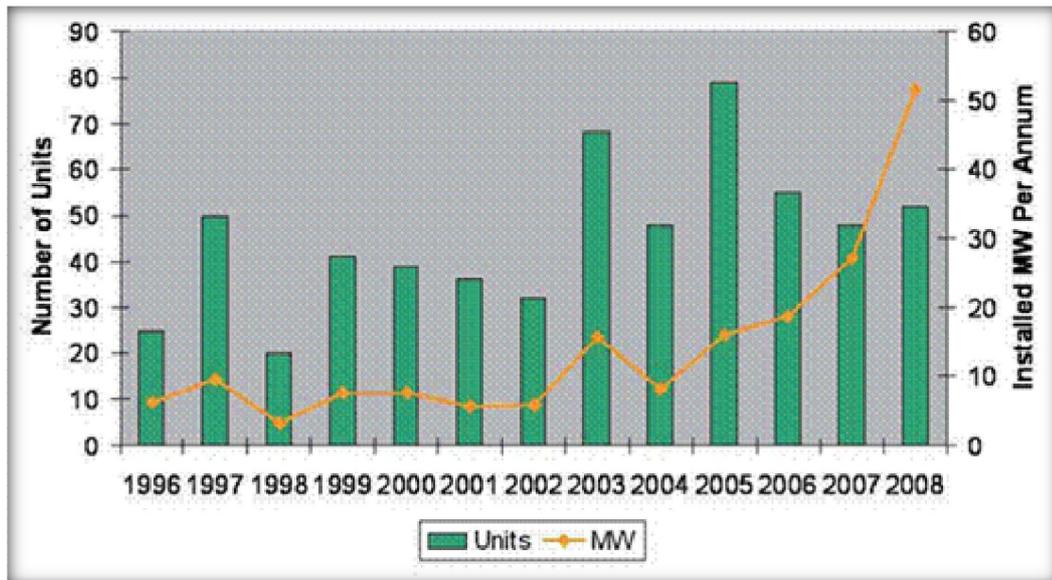


Figura 16. Numero di celle combustibili nel tempo e potenza installata.

## CAPITOLO 4: I veicoli ad idrogeno

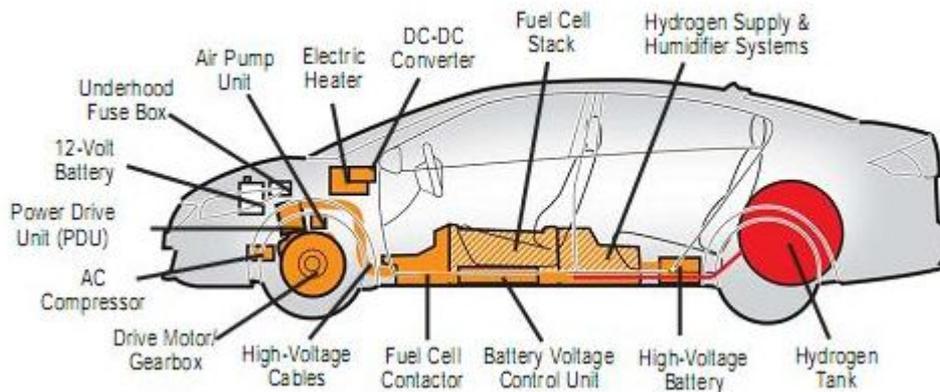
A livello globale circa il 30% delle emissioni di CO<sub>2</sub>, principale responsabile del fenomeno dell'effetto serra, è causato dai trasporti. In aggiunta al tentativo di operare sull'efficienza dei veicoli tradizionali e cercare di utilizzare combustibili più puliti, appare opportuno sviluppare la tecnologia del veicolo elettrico e, fra le varie soluzioni, quella più promettente a medio-lungo termine è basata sull'uso dell'idrogeno in veicoli equipaggiati con celle a combustibile. La trazione elettrica è nota da tempo, inizi '900, ma la diffusione di massa di tali veicoli è stata notevolmente ostacolata da problematiche, quali l'ingombro massiccio del pacco batterie e i lunghi tempi di ricarica. L'adozione del sistema di trazione a idrogeno e fuel cells consente di eliminare entrambi i problemi. Normalmente questi veicoli presentano un'architettura di trazione ibrida, che si avvale simultaneamente di fuel cells e batterie tradizionali. La potenza viene coordinata da un controllo elettronico interfacciato ad un motore elettrico che trasforma la corrente in energia meccanica per muovere il mezzo. L'architettura di trazione di un veicolo ad idrogeno viene scelta in base all'uso che si vuole fare del mezzo e del numero di batterie che si tollerano a bordo. Esistono essenzialmente tre tipi di powertrain:

- Load leveller: la potenza elettrica fornita dalle fuel cells si presenta poco prevalente rispetto a quella fornita dalle batterie. L'energia elettrica delle batterie viene utilizzata quando sono necessarie buone coppie di spunto, in particolare nei transitori, e vengono caricate quando le condizioni di marcia lo permettono o da sistemi di recupero energia durante la frenata. In sostanza, il sistema fuel cells assicura l'autonomia energetica necessaria, mentre il pacco di batteria si fa carico di seguire i transitori.
- Range extender: la potenza elettrica fornita dallo stack di fuel cells, destinato soprattutto al caricamento delle batterie, è minore del 25%. E' una configurazione che permette l'aumento dell'autonomia consentendo maggiori percorrenze o a parità di autonomia di ridurre l'ingombro del pacco batterie. E' la miglior configurazione per i veicoli di grosse dimensioni destinati al trasporto di persone o cose.
- Full power: la potenza viene fornita totalmente o quasi dalle fuel cells. Rappresenta una configurazione destinata al funzionamento extraurbano, che prevede lunghe percorrenze e transitori ridotti. Le batterie, presenti ma di dimensioni contenute, possono essere usate per il recupero dell'energia elettrica in frenata e per funzioni di servizio.

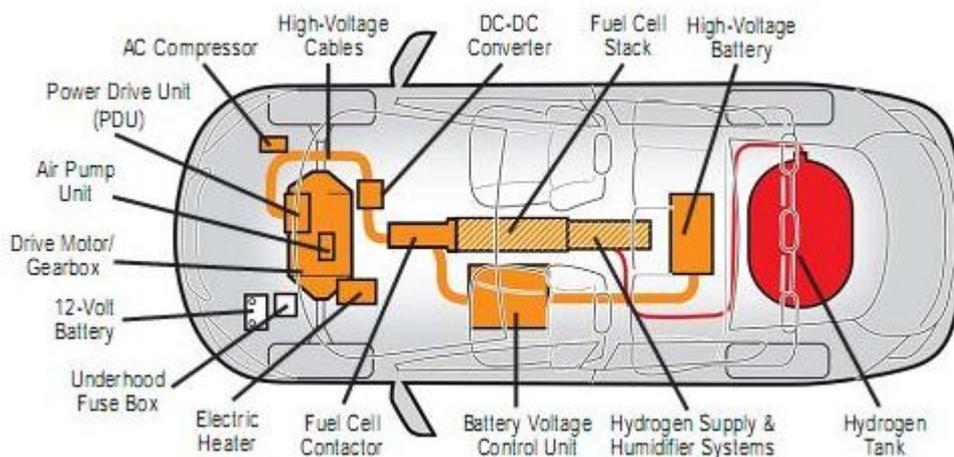
#### 4.1. Componenti di un'auto a fuel cells

Il cuore di un veicolo a fuel cells è formato da un impianto elettrochimico connesso, attraverso allacciamenti elettrici, ad un impianto elettromeccanico che comprende un motore elettrico. I diversi elementi che troviamo all'interno di un veicolo elettrico a fuel cells sono:

- Il sistema a fuel cells;
- Un motore elettrico;
- Il controllo del motore elettrico;
- Un determinato numero di batterie;
- Uno o più serbatoi di idrogeno o di combustibile (in questo caso ci sarà un reformer on-board per la generazione di idrogeno).



**Figura 17.** Schema di un veicolo fuel cells (vista laterale)



**Figura 18.** Schema di un veicolo fuel cells (vista da sopra)

## 4.2.Motore elettrico

Per quanto riguarda i motori elettrici utilizzati nei veicoli a idrogeno è possibile distinguere fondamentalmente due tipi: a corrente continua (CC o DC) oppure a corrente alternata (CA o AC). In ambo i casi la velocità di rotazione è direttamente proporzionale alla tensione applicata ai capi del motore, mentre la coppia dipende dai valori di corrente. Il range delle potenze generate va da poche centinaia di watt fino a qualche kW, con valori compresi tra 15 e 90 kW per le vetture pensate per percorsi extraurbani e valori compresi tra 100 e 250 kW per gli autobus. La scelta del tipo di motore elettrico dipende da diversi fattori tra i quali il costo, le prestazioni richieste al veicolo e il tipo di impiego a cui esso è destinato.

### *4.2.1.Motore a corrente continua*

Il motore a corrente continua per funzionare necessita di un'alimentazione con tensione e corrente costante. Agisce generalmente con valori di tensione compresi fra 48 e 192 Volt, e nel caso più frequente a 96 Volt. Un motore di questo tipo è portato in rotazione attraverso la trasformazione continua di un campo magnetico, grazie ad un collettore a lamelle che striscia sulle "spazzole" del motore. Con lo scopo di superare i valori di tensione così ottenuti si può ricorrere ad un sovradimensionamento oppure ad un motore del tipo brushless, ossia senza spazzole. Trovano impiego specialmente per applicazioni interne, come i carrelli elevatori che hanno minori prestazioni e ridotte necessità di controllo. Una proprietà rilevante è la possibilità di un sovrutilizzo, per spunti particolarmente onerosi, fornendo picchi di potenza fino a tre volte quella nominale. L'intervallo di tempo permesso è comunque ridotto, pena il surriscaldamento e il danneggiamento del motore. Il sistema di controllo risulta essere meno complicato e costoso rispetto a quello dei motori a corrente alternata. Nonostante questo vantaggio non sono in grado di recuperare energia in fase di frenata se non mediante l'installazione di un determinato apparato.

### *4.2.2.Motore a corrente alternata*

I motori a corrente alternata, alimentati da tensioni trifase con valori compresi tra 48 e 240 V, sono la tipologia più usata nei veicoli. Rispetto ad un motore a corrente continua sono più controllabili e permettono di recuperare energia durante le fasi di frenatura e decelerazione, senza l'obbligo di apparati esterni. Hanno, però, un costo maggiore rispetto ai motori a corrente continua.

#### 4.3.Sistema di controllo del motore

Il sistema di controllo è il dispositivo che controlla la potenza elettrica prodotta dalle fuel cells e l'energia accumulata nelle batterie per far funzionare correttamente un motore elettrico.

Le funzioni alle quali deve assolvere un controllo elettronico sono principalmente:

- Adeguare la potenza del motore alle esigenze della guida;
- Commutare la tensione di alimentazione dei motori elettrici secondo la logica necessaria per il corretto funzionamento del motore in ogni condizione;
- Controllare la corretta trasformazione dell'energia elettrica in energia meccanica;
- Interfacciarsi con il sistema di guida del veicolo;
- Gestire il recupero dell'energia meccanica resa disponibile in frenata e in accelerazione per trasformarla in energia elettrica per la ricarica delle batterie.

Un sistema di controllo efficiente dovrà modulare la potenza fornita in uscita, variando in progressione il valore medio della tensione della corrente in uscita. Le celle a combustibile di un veicoli erogano sempre la potenza elettrica in corrente continua. Tra le fuel cells e il controllo-motore si è soliti inserire un convertitore CC/CC, che ha la funzione di portare la tensione della corrente elettrica continua proveniente dalle celle al livello a cui lavora il sistema di controllo, conseguenza del fatto che il sistema di trazione richieda che la tensione erogata dallo stack abbia lo stesso valore di quella a cui lavora il sistema controllo-motore elettrico. Tale sistema di conversione arriva ad assorbire fino al 10% della potenza erogata dallo stack, che andrà dimensionato a seconda delle esigenze del veicolo.

#### 4.4.Le batterie

Esse ricoprono un ruolo importante nei veicoli ad idrogeno. Le batterie possono essere di vario tipo e sono classificate a seconda del materiale da cui sono costituite.

##### *4.4.1.Batterie al Piombo gel*

La batteria a piombo gel è stata per lungo tempo la dominatrice degli accumulatori energetici nel settore automobilistico. Molti però i punti a sfavore che hanno segnato il suo inevitabile declino. Tra gli svantaggi principali troviamo: densità energetica ridotta, peso elevato, sensibilità ad escursioni termiche e smaltimento problematico del piombo.

#### *4.4.2. Batterie al NiMH (Nichel - Idruri di metallo)*

Batteria di recente progettazione e attualmente tra le favorite per alimentare veicoli elettrici e ibridi di nuova generazione, è la batteria in dotazione alla Toyota Prius. Gli elementi che le pongono in rilievo sono: un'alta densità energetica, un ridotto effetto memoria, una resistenza elevata ai cicli di carica con ridotta sensibilità alle scariche totali. Tuttavia il costo relativamente elevato, la tendenza a scaricarsi anche nel non utilizzo, l'elevata sensibilità alle basse temperature, sono elementi critici per la scelta di tali sistemi.

#### *4.4.3. Batterie agli ioni di Litio*

Tali batterie risultano, attualmente, le più promettenti e sono interessanti sia in campo automobilistico che per le tecnologie portatili. Sono contraddistinte da un'alta densità energetica, peso ridotto, longevità, tempi brevi di ricarica e possibilità di ricariche parziali. D'altro canto presentano diversi svantaggi, quali: un costo elevato (400-600 €/kW), la necessità di caricatori particolari e possibili danni alla batteria in seguito a scariche totali.

#### *4.4.4. Batterie Zebra (Zero Emission Battery Research Activity)*

Sono batterie prodotte in esclusiva dalla MES-DEA di Stabio. Particolarmente adatte alle applicazioni automobilistiche poiché caratterizzate da elevate prestazioni ed ingombri contenuti, non sono però ancora disponibili di serie a causa della richiesta di temperature considerevoli di esercizio di circa 260 °C e la tendenza a scaricarsi totalmente nel giro di 5-8 giorni.

#### 4.5. Confronto economico fra propulsione elettrica e benzina

L'autorità per l'energia elettrica e il gas indica un prezzo dell'energia elettrica per un consumatore domestico tipo (fornitura per una famiglia con 3 kW di potenza impegnata e 2.700 kWh di consumo annuo) pari a 0,19 €/kWh. Considerando un'autonomia di percorrenza compresa tra i 70 - 90 km e quantificando una spesa poco superiore ad un euro per la ricarica di un pacco di batterie, che garantisca una potenza di 15 kW, il costo per chilometro su questi dati risulterà poco superiore al centesimo di euro. Se prendiamo in considerazione una piccola utilitaria a benzina, con un'autonomia media di circa 18 km per litro di carburante, il cui costo viene stimato all'incirca 1,8 €/l, si ottiene un costo al km di 0,10 €. Il beneficio appare evidente, senza considerare in aggiunta i materiali di consumo (olio, revisione delle componenti in movimento soggette ad usura) e che il prezzo della benzina continuerà ad essere sicuramente soggetto ad ulteriori crescite. Nel caso del motore elettrico, nondimeno, è necessario

conteggiare anche il costo delle batterie, ottenendo una spesa su unità chilometrica di 0,06 €, che rimane pur sempre interessante. Il reale ostacolo per la diffusione di veicoli elettrici sono i lunghi tempi di rifornimento che vanno dalle 5 alle 10 ore contro un tempo dell'ordine del minuto per rifornirsi di carburante. Per queste ragioni le fuel cells accendono l'interesse dei più garantendo con minori ingombri, pesi, tempi di rifornimento, maggiore durata ed autonomia. Senza dimenticare l'impatto ambientale nullo se la fonte di produzione sarà rinnovabile e l'elevata efficienza con rendimenti del sistema circa doppio rispetto a quello dei motori a combustione interna.

#### 4.6. Confronto di efficienza

L'indice well-to-wheel, generalmente abbreviato in WTW, letteralmente "dal pozzo alla ruota", è un indicatore nato per analisi strettamente energetiche. Tale indice mira a rendere comparabili tra loro diverse tecnologie propulsive e carburanti, sia dal punto di vista dell'efficienza del mezzo di trasporto, sia del rendimento della tecnologia che permette di ottenere il carburante ed il vettore energetico usato per trasportarlo e/o immagazzinarlo. Esso consiste nel prendere in considerazione tutto quello che succede, in termini di efficienza, dall'estrazione della materia prima da cui derivano i diversi combustibili fino alla conversione in trazione dell'energia. L'indice è di norma suddiviso in due sottoindici: il well-to-tank (WTT o "upstream", dal pozzo al serbatoio) e il tank-to-wheel (TTW o "vehicle", dal serbatoio alla ruota), per consentire di differenziare i costi energetici strettamente legati alla fonte primaria da quelli legati alla tecnologia propulsiva. Essendo equivalente a due sistemi in serie il rendimento globale è dato da:

$$\eta(\text{totale}) = \eta(\text{dal pozzo al serbatoio}) * \eta(\text{dal serbatoio alle ruote}) \quad (18)$$

I rendimenti sono uguali al rapporto fra energia utile in uscita ed energia in ingresso.

##### *4.6.1. Analisi upstream*

Il WTT considera l'ammontare di energia necessario per rendere disponibile un carburante dalla fonte energetica primaria fino al rifornimento del serbatoio del veicolo. I processi che lo costituiscono sono:

- estrazione e/o produzione della sorgente di energia primaria dalla quale si ottiene il combustibile;
- trasporto e stoccaggio del combustibile primario fino al luogo di raffinazione e lavorazione;
- produzione del combustibile adatto alla trazione;

- trasporto, stoccaggio e distribuzione del combustibile di trazione.

A base dell'analisi si colloca una stima delle perdite avute durante la fase o le fasi di produzione dei combustibili. Per ognuno dei quali viene individuato il valore percentuale del potere calorifico dissipato per portarli, dal punto di estrazione, fino al serbatoio dell'auto.

<b>CARBURANTI CLASSICI</b>	<b>Estrazione materia prima</b>	<b>Trasporto</b>	<b>Produzione Combustibile</b>	<b>Distribuzione Totale</b>	<b>TOTALE [%]</b>
Benzina	96,9	98,9	92	99,2	87,5
Gasolio	96,9	98,9	95	99,2	90,3
<b>GAS NATURALE</b>	<b>Estrazione materia prima</b>	<b>Trasporto</b>	<b>Compressione</b>		<b>TOTALE [%]</b>
Gas naturale	98	95,1	95,4		88,9
<b>METANOLO DA GAS NATURALE</b>	<b>Tecnologia di produzione</b>	<b>Produzione</b>		<b>Trasporto</b>	<b>TOTALE [%]</b>
Metanolo	Steam reforming	62,4		99	61,8
Metanolo	SR con iniezione di CO <sub>2</sub>	64,2		99	63,5
Metanolo	Autotermico	67,1		99	66,4
<b>IDROGENO GASSOSO</b>	<b>Estrazione materia prima</b>	<b>Trasporto</b>	<b>Produzione Combustibile</b>	<b>Compressione</b>	<b>TOTALE [%]</b>
Idrogeno da SR del metano (centralizzato)	98	95,1	81	83	62,7
Idrogeno da SR del metano (decentralizzato)	98	95,1	72	95	63,7
<b>IDROGENO LIQUIDO</b>	<b>Estrazione materia prima</b>	<b>Trasporto</b>	<b>Produzione+ Compressione +Liquefazione</b>	<b>Rifornimento</b>	<b>TOTALE [%]</b>
Idrogeno da SR (centralizzato)	98	95,1	45	95	39,8

**Tabella 1.** Efficienze dell'upstream per diverse fonti energetiche

Il processo maggiormente diffuso per la generazione di idrogeno risulta essere lo steam reforming, considerato distintamente nei casi in cui la produzione sia

centralizzata oppure decentralizzata. La produzione centralizzata risulta più conveniente di quella localizzata perché permette di recuperare in parte anche l'energia prodotta collateralmente dallo stesso processo di reforming. Il vantaggio della produzione localizzata, invece, consiste nelle minori spese di trasporto e di compressione poiché l'idrogeno prodotto da un lato è più vicino all'utenza e dall'altro risulta avere una maggiore pressione a fine ciclo. Le efficienze complessive sono quindi molto simili, ma la soluzione decentralizzata offre migliori prospettive future, dato che risulterebbe più semplice sviluppare una rete capillare di distribuzione. In generale inoltre, si nota come la produzione allo stato gassoso sia molto più conveniente, dal punto di vista del rendimento, rispetto allo stato liquido. Ad incidere negativamente sono i processi necessari per portare l'idrogeno ad alta pressione e a temperature prossime allo zero assoluto, che richiedono determinate spese energetiche.

#### 4.6.2. Analisi vehicle

Il TTW considera l'ammontare di energia usato per muovere un veicolo per una determinata distanza, dipendente dalla combinazione del carburante e dalla tecnologia propulsiva impiegata. Considera i rendimenti dei processi che avvengono nel veicolo, ossia come viene trasformata l'energia del combustibile in potenza effettiva erogata dal motore.

<b>MOTORI A COMBUSTIONE INTERNA</b>	<b>Motore</b>	<b>Trasmissione</b>	<b>TOTALE [%]</b>		
Benzina	18,5	92	17		
Diesel	23,5	92	21,6		
Metano	19,1	92	17,6		
<b>MOTORI AD IDROGENO CON FUEL CELL</b>	<b>Fuel processor</b>	<b>Fuel cell</b>	<b>Motore elettrico</b>	<b>Trasmissione</b>	<b>TOTALE [%]</b>
H <sub>2</sub> da reformer a bordo da benzina	75	41	82	95	24
H <sub>2</sub> da reformer a bordo da metanolo	80	43	82	95	26,8
Idrogeno rifornimento diretto	–	48	82	95	37

**Tabella 2.** Efficienze della parte vehicle per le diverse forme di alimentazione

Il rendimento dei motori a combustione interna si presenta limitato a causa delle perdite irreversibili derivanti dalle trasformazioni energetiche. Una certa dispersione, dovuta al sistema di controllo elettronico, incide anche sull'efficienza dei motori elettrici. L'unità di produzione della potenza viene analizzata nei due casi di veicolo con o senza reformer a bordo. Nel primo caso lo stack di fuel cells viene rifornito di idrogeno puro dall'esterno, nel secondo viene prodotto nel veicolo, con un'efficienza complessiva indubbiamente maggiore. Per la produzione di idrogeno a bordo si utilizzano principalmente combustibili liquidi quali la benzina o il metanolo, quest'ultimo preferibile date le minori perdite energetiche e la migliore qualità dell'idrogeno stesso. La soluzione dello stoccaggio dell'idrogeno a bordo del veicolo, oltre ad essere più vantaggiosa in termini di efficienza, risulta potenzialmente soggetta ad ulteriori miglioramenti. Da un lato attraverso la scelta di soluzioni progettuali più evolute e materiali innovativi per le fuel cells, dall'altro per mezzo di una riduzione delle perdite elettriche e meccaniche della parte del sistema di trazione interposta fra lo stack e le ruote.

#### 4.6.3. Confronto di efficienza globale nel sistema "well-to-wheel"

Individuati i valori di efficienza "upstream" e "vehicle" per le varie forme di alimentazione e propulsione, si può calcolare il rendimento totale teorico come il prodotto di tali indici.

CONFRONTO FINALE (WTW)	UPSTREAM (WTT)	VEHICLE (TTW)	TOTALE [%]
<b>Motori termici a combustione interna</b>			
Benzina	87,5	17	14,9
Diesel	90,3	21,6	19,5
Metano	88,9	17,6	15,6
<b>Auto a idrogeno e fuel cells</b>			
H <sub>2</sub> compresso (da gas naturale)	63,7	37	23,5
H <sub>2</sub> da reformer benzina a bordo	87,5	24	21
H <sub>2</sub> da reformer metanolo a bordo	62,7	26,8	16,8
H <sub>2</sub> liquido (da gas naturale)	36,5	37	13,5
Auto elettriche a batterie (ricarica con elettricità da petrolio)	25,3	77,9	19,7

**Tabella 3.** Efficienza complessiva well-to-whells

I dati sperimentali evidenziano come la soluzione migliore sia quella del veicolo a fuel cells alimentato con idrogeno puro allo stato gassoso da un serbatoio in pressione. Le ragioni sono essenzialmente due:

- L'idrogeno che viene stoccato a bordo viene ottenuto mediante un ciclo "upstream" che presenta un'efficienza piuttosto elevata;
- La catena "vehicle" è basata su un rendimento di stack certamente ottimo.

Questo spiega la tendenza da parte delle Case automobilistiche a realizzare prototipi fuel cells e idrogeno in prevalenza senza reformer a bordo. Ciò nonostante, una distribuzione capillare dell'idrogeno ancora non esiste quindi, nel breve periodo, potranno avere un ruolo importante anche i veicoli ad idrogeno con reformer a bordo (da benzina o da metanolo). Nel caso della generazione di idrogeno per mezzo del processo di elettrolisi, sfruttando la corrente pulita prodotta da centrali idroelettriche o eoliche, non si ha nessuna estrazione di materie prime e l'idrogeno potrebbe essere prodotto sfruttando la corrente in eccesso delle centrali durante le ore notturne. Con l'eventuale diffusione di centrali di taglia medio-piccola su tutto il territorio, inoltre, i costi e le inefficienze legate al trasporto calerebbero notevolmente e, sebbene il rendimento sia più basso, risulta comunque una soluzione interessante.

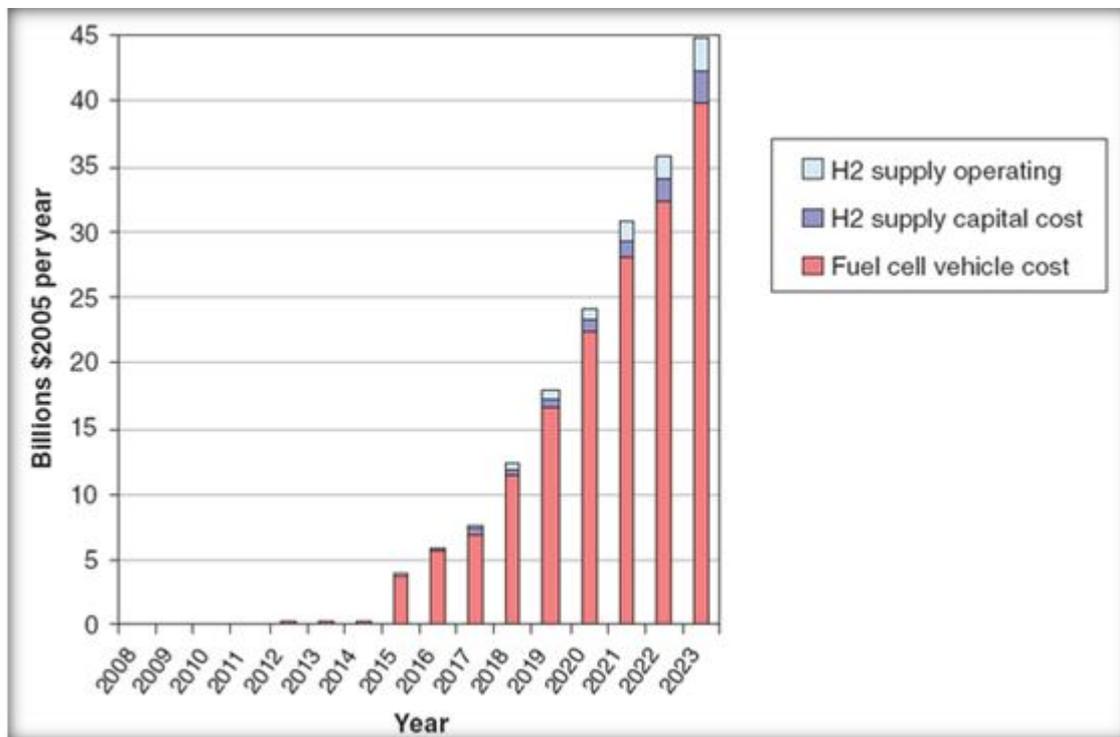
L'analisi "well-to-whells" è esclusivamente energetica e non tiene in considerazione delle perdite ambientali. Il sistema dei trasporti incide per il 30% sull'effetto serra. In quest'ottica l'idrogeno risulta essere il miglior combustibile, assicurando un livello di emissioni su strada se non nullo prossimo allo zero. Se in aggiunta l'idrogeno fosse ottenuto attraverso un elettrolizzatore capace di sfruttare la corrente prodotta da centrali idroelettriche o eoliche, non si avrebbero, come già detto, spese di estrazione di materie prime e, nel caso in cui le centrali fossero situate nei pressi delle stazioni di rifornimento, non si avrebbero nemmeno spese di trasporto. La realizzazione di questa rete richiede molto tempo, ed è per questo che per ora si privilegiano veicoli con reformer a bordo in grado di sfruttare la già diffusa rete di distribuzione del gas naturale.

#### 4.7. Grandezza dell'investimento necessario al nuovo sistema

Il Consiglio Nazionale delle Ricerche degli Stati Uniti (NCR) ha pubblicato un rapporto alla fine del 2008 in cui sono stati stimati gli investimenti, il tempo e le azioni di governo necessarie per realizzare la transizione da un sistema fondato sui combustibili a un nuovo sistema, basato sull'idrogeno, al fine di ridurre sia la propria dipendenza dal petrolio sia le emissioni di CO<sub>2</sub>. Gli impegni finanziari e i progressi tecnici compiuti dal settore automobilistico, dagli imprenditori privati e dal NCR suggeriscono che i veicoli a

idrogeno a celle combustibili (HFCVs) e le tecnologie di produzione dell'idrogeno stesso potrebbero essere pronti per la commercializzazione tra il 2015 e il 2020. Tuttavia i veicoli non saranno probabilmente competitivi nei costi almeno fino al 2020, anche se entro il 2050 però tali veicoli potrebbero rappresentare più del 80% dei nuovi mezzi di trasporto. Una transizione accelerata richiederebbe alle Case automobilistiche di far decollare la produzione di veicoli a celle a combustibile a costi molto più elevati rispetto a veicoli convenzionali. Per di più, gli investimenti dovrebbero essere rivolti anche alla costruzione e alla gestione delle stazioni di rifornimento d'idrogeno dato che il mercato per l'idrogeno è ancora limitato. Sostanzialmente le azioni e l'assistenza del governo sarebbero necessarie per sostenere un passaggio rapido entro il 2020, anche in presenza di rapidi progressi sulle tecnologie per le celle a combustibile e sulla produzione di idrogeno. La commissione ha confrontato in un contesto di alti prezzi del petrolio i veicoli ad idrogeno con i veicoli convenzionali. Lo stimolo per investire quindi in una rapida transizione sarebbe basso, nonostante i prezzi del petrolio alti, le risorse limitate, e l'influenza di fattori geopolitici. In queste condizioni i veicoli ad idrogeno potrebbero diventare competitivi con veicoli a benzina, in termini di ciclo di vita, entro il 2023, purché gli obiettivi della ricerca e dello sviluppo siano soddisfatti e le economie di scala, associate all'andamento di produzione assunto, siano raggiunte. Anche se il costo dovesse rimanere più elevato rispetto ai veicoli convenzionali, tali mezzi offrirebbero minori costi operativi a causa della loro alta efficienza. Le stime della commissione del 2008, per sostenere una transizione ai veicoli a idrogeno a celle combustibili, prevedevano approssimativamente una spesa di 55 miliardi di dollari fino al 2023. Questi finanziamenti prevedevano 5 miliardi per una concreta attività di ricerca e sviluppo e 40 miliardi per la dimostrazione e la distribuzione dei veicoli. Il governo degli Stati Uniti e il Dipartimento dell'Energia investono attualmente circa 300 milioni di dollari all'anno per la ricerca e lo sviluppo di combustibili alternativi. Se 2 milioni di veicoli a idrogeno dovranno essere prodotti entro il 2020, gli investimenti per la ricerca e lo sviluppo necessitano di un incremento di almeno il 20% nei prossimi anni. La spesa pubblica annuale dovrebbe essere molto più alta per sostenere la produzione commerciale dei veicoli, stimata di 3 miliardi di dollari nel 2015, crescendo a 8 miliardi nel 2023. Dopo il 2023, sarebbe necessario continuare i programmi di ricerca e sviluppo per ridurre i costi dei veicoli a celle a combustibile e dell'idrogeno. Inoltre, ulteriori sovvenzioni possono essere necessarie per indurre più persone ad acquistare tali veicoli. Il settore privato dovrebbe investire nello stesso periodo molto più del governo, quasi 145 miliardi di dollari in ricerca e sviluppo, nella produzione dei mezzi di trasporto e nelle infrastrutture per l'idrogeno. Una transizione verso i veicoli a idrogeno con celle combustibili negli Stati Uniti richiederà secondo le stime circa 200 miliardi di

dollari per oltre 16 anni. L'investimento necessario è indubbiamente notevole dal punto di vista economico, ma non si deve dimenticare come l'abbandono dell'attuale sistema industriale non solo è doveroso ma sarà necessario.



**Figura 19.** Spese annuali totali per i veicoli e la fornitura di idrogeno

## **CAPITOLO 5: Le Case automobilistiche**

L'idrogeno, come reale alternativa ai combustibili fossili nel settore automotive, è stato preso in considerazione in particolar modo a partire dalla seconda metà degli anni 90. Le azioni in questo settore sono volte allo sviluppo sia di motori a combustione interna, sia di motori a fuel cells, questi ultimi essenziali per un sistema di trasporto a minimo impatto ambientale. Nel primo caso si prende in considerazione un motore con cilindri e pistoni, che consuma idrogeno invece di benzina o gasolio e non impone a rivedere la tecnologia dei motori a scoppio. Nel secondo caso si sfrutta una tecnologia in cui le celle a combustibile producono corrente e alimentano dei motori elettrici. Pressoché tutte le Case automobilistiche, in stretto contatto con le aziende produttrici o distributrici di idrogeno, hanno assegnato una parte del proprio budget alla ricerca e all'acquisizione di nuove conoscenze nello sviluppo di veicoli ad idrogeno e fuel cells. La potenzialità è grande e i vantaggi derivanti dall'uso di celle a combustibile per la trazione di veicoli sono numerosi, a partire dal loro rendimento energetico. La percentuale che risulta concretamente utilizzabile per il movimento del veicolo è di oltre il 50% dell'energia prodotta dal carburante mentre, nei motori a combustione, si raggiunge al massimo un 40% e solo per un ristretto intervalli di giri del motore stesso. Nel traffico urbano il rendimento energetico dei veicoli ad idrogeno risulta circa il doppio di quello delle auto classiche, con emissioni costituite da solo vapore acqueo per un impatto ambientale pressoché nullo. Le peculiarità delle celle a combustibile consentono oltre a ciò la realizzazione di veicoli con taglie anche molto diverse con la stessa tecnologia e con caratteristiche di prestazioni, consumi ed impatto ambientale equivalenti. I problemi legati allo sviluppo dei veicoli a idrogeno sono molteplici: oltre a quello della produzione di tale combustibile, si ha la mancanza di una rete di distribuzione e di rifornimento per questo gas. Nonché problemi tecnologici, tra i quali uno dei più critici è il sistema di accumulo dell'idrogeno a bordo, che condiziona pesantemente l'autonomia del veicolo. Tali veicoli rimangono dunque ancora a livello di prototipi, i cui costi per ora sono proibitivi per il mercato delle utenze.

### **5.1 primi esemplari**

#### 5.1. Scooter a idrogeno

Il mercato delle due ruote è una piazza importante del settore dei trasporti e per questa ragione la ricerca si estende anche in questa direzione. A tale proposito nel 2003 Aprilia e Mes Dea, un'azienda specializzata nelle tecnologie per la trazione elettrica, hanno esibito uno tra i primi modelli di scooter ad idrogeno e fuel cells. Il prototipo, chiamato Aprilia SR50 Fuel Cell, è ideale per l'utilizzo in aree in cui l'impatto acustico

debba essere nullo e nelle zone urbane ad alto tasso di inquinamento, essendo le emissioni ridotte al minimo se non praticamente annullate. Il veicolo deve essere alimentato con idrogeno puro ed presenta un'autonomia di circa 70 km considerando il ciclo urbano. Il sistema di celle combustibili, che si contraddistingue per una grande compattezza, un minimo ingombro e un peso contenuto, assicura al motore elettrico la potenza necessaria di 3 kW. Lavorando a temperature contenute di circa 60 °C l'efficienza complessiva indicata è del 50%.

All'inizio del 2004 la collaborazione tra le due aziende porta alla luce un secondo modello ad idrogeno di cilindrata maggiore chiamato Atlantic 125 Zero Emission. Il motore elettrico di 4 kW è accompagnato da un generatore fuel cells ad idrogeno da 6 kW, che non richiede la presenza di sistemi ausiliari quali umidificatori e compressori. In questa configurazione si ha inoltre un aumento sia della potenza sia dell'autonomia. A tale proposito, il nuovo prototipo eroga 6 kW di potenza e 12 Nm di coppia rispetto ai 9 kW e i 9,7 Nm del modello Atlantic 125 a benzina, con un autonomia di 150 km.



**Figura 20.** Atlantic 125 Zero Emission

Aprilia non è l'unica Casa che è impegnata nello sviluppo e nella costruzione di nuovi prototipi ad idrogeno, Honda e Suzuki si affiancano ad essa nella ricerca di nuove soluzioni. In particolare Suzuki in collaborazione con l'azienda inglese Intelligent Energy ha sviluppato e presentato nel corso del 2010 il primo modello omologabile sulle strade europee. Il nuovo scooter unisce il sistema di raffreddamento ad aria marchiato Intelligent Energy e la tecnologia fuel cells con il massimo carryover dei componenti e il sistema di marcia di uno scooter convenzionale. Lo scooter è alimentato da una bombola di idrogeno, che può essere ricaricata in pochi minuti e offre un'autonomia di guida di 350 km.



**Figura 21.** Suzuki Burgman Fuel Cell

## 5.2. Automobili a idrogeno

### *5.2.1. La Fiat*

Il Centro Ricerche Fiat ha intrapreso lo studio della tecnologia delle celle a combustibile a partire dal 1998. Fiat Seicento Elettra H<sub>2</sub> fuel cell è la prima risposta da parte del Gruppo italiano al bisogno di auto dotate di sistemi di movimento alternativi, capaci di annullare del tutto le emissioni. La sua presentazione, avvenuta nel 2001, costituiva l'evoluzione del progetto iniziato con Seicento Elettra. Rispetto a quest'ultimo modello il numero di moduli-batteria è stato limitato ed è stato aggiunto un sistema fuel cells con uno stack a membrana polimerica da 7 kW, con la funzione di aumentare l'autonomia del veicolo. Il sistema di trazione fuel cells permette di mantenere una velocità continua di 60 km/h che, con il contributo delle batterie al piombo-gel, sale a 100 km/h. Il tempo di rifornimento è rapido, circa 10 minuti, contro le 4-8 ore necessarie per ricaricare le batterie della Seicento Elettra e infine dispone di un'autonomia di 100 km, assicurata dalle bombole di idrogeno sistemate a bordo.

La Fiat Seicento Hydrogen, presentata nel 2003, rispetto al primo prototipo, vanta un incremento della velocità massima che passa da 100 km/h a 130 km/h, dovuto al potenziamento del sistema di alimentazione a idrogeno a pressione e a ossigeno contenuto nell'aria. Il prototipo può ospitare fino a quattro persone, anziché due come in precedenza, e ha un'autonomia che passa significativamente da 100 km ad oltre 220 km.

Il sistema di alimentazione ad idrogeno e fuel cells, già sperimentato sulla Fiat Seicento Elettra H<sub>2</sub> Fuel Cell e successivamente sulla Seicento Hydrogen, viene ripresentato attraverso un nuovo modello, la Panda Hydrogen. Essa è il risultato del lavoro congiunto di Fiat Auto, del Centro Ricerche Fiat e di Fiat Powertrain Research & Technology, con il supporto dei Ministeri della Ricerca e dell'Ambiente. Diversamente

dai prototipi a fuel cells presentati nel passato, la Panda Hydrogen ha un'architettura di tipo full power, con il nuovo Fuel Cell System in grado di erogare tutta la potenza necessaria, privata dunque di batterie di trazione per l'accumulo dell'energia elettrica. Il sistema di generazione di energia elettrica è alimentato con idrogeno alla pressione di circa 1,5 bar e con ossigeno contenuto nell'aria e produce energia elettrica con elevata efficienza che raggiunge il 60% già dal 20% della potenza massima. Il motore elettrico di trazione, di tipo asincrono trifase a corrente alternata, e la trasmissione sono collocati nel vano motore insieme ai vari ausiliari necessari al funzionamento dell'intero sistema. L'idrogeno è invece contenuto, alla pressione di 350 bar, in un serbatoio di materiale composito installato sotto il pianale posteriore, senza così stravolgere l'abitacolo né tanto meno l'abitabilità per quattro persone. A piena potenza, il propulsore eroga 60 kW, consentendo alla vettura di raggiungere una velocità massima di oltre 130 km/h, con un'accelerazione da 0 a 50 km/h in 5 secondi. La capienza del serbatoio di idrogeno assicura un'autonomia di oltre 200 km nel ciclo urbano, con un tempo di rifornimento rapido ed inferiore a 5 minuti, paragonabile a quello di una vettura a metano.

Il Centro Ricerche Fiat ha presentato inoltre un'interessante concept chiamato Fiat Panda Hybrid Fuel Cell, proseguendo quindi la sperimentazione di auto ad idrogeno iniziata con i prototipi Hydrogen del 2003 e del 2006. Realizzata con la partecipazione del produttore americano di batterie Quallion LLC, tale modello è equipaggiata con un motore elettrico alimentato da un pacco batterie agli ioni di litio che impiega tecnologie proprietarie Matrix e HAM, pensate per aumentarne l'affidabilità e ridurne i costi a lungo termine.

CARATTERISTICHE	
• Veicolo a celle combustibili	
• Celle combustibili PEM (80 kW)	
• Pacco di batterie innovativo	
• Alta efficienza del motore elettrico	
• Serbatoio in fibre di carbonio	
DATI TECNICI	
• Posti a sedere	4
• Accelerazione (0-50 Km/h)	5s
• Velocità massima	140 Km/h
• Tempo rifornimento	5 min
• Autonomia	250 Km



**Figura 22.** Fiat Panda Hybrid Fuel Cell

### *5.2.2. Mercedes-Benz*

La Casa tedesca, in seguito all'esperienza precedente con la Classe A F-CELL, sviluppa la seconda generazione di auto a idrogeno attraverso la Classe B F-Cell, la prima Mercedes-Benz a trazione elettrica con celle a combustibile prodotta in serie. Il cuore della Classe B F-Cell è il motore elettrico con celle a combustibile, in cui l'idrogeno allo stato gassoso reagisce con l'ossigeno atmosferico alla pressione di 700 bar per generare energia elettrica. I componenti principali del gruppo propulsore, ospitati nel vano motore e sotto il pavimento, sono riparati in caso di incidente e offrono il minimo ingombro, assicurando la piena disponibilità dello spazio nell'abitacolo e nel bagagliaio. Il sistema di celle a combustibile è più piccolo di circa il 40% rispetto a quello della Classe A F-Cell del 2004, ma assicura una potenza superiore del 30% e consumi ridotti del 30%. Lo stack di celle a combustibile della Classe B F-Cell ha una capacità di avviamento che si spinge fino a temperature di -25 °C. Il sistema è dotato di un nuovo umidificatore a fibre vuote che, al contrario della cella a combustibile di prima generazione, impedisce all'acqua di congelarsi e di ostacolare la partenza a freddo. Grazie a una speciale strategia di funzionamento, lo stack raggiunge la temperatura di esercizio ottimale di circa 80 °C a ogni avviamento e permette di mantenere questa temperatura ideale in qualsiasi condizione di esercizio. Il combustibile necessario per il funzionamento della cella a combustibile viene accumulato nei tre serbatoi della vettura con una pressione di 700 bar. Grazie all'elevato grado di compressione dell'idrogeno, l'autonomia raggiunta è di 400 chilometri, più del doppio rispetto alla Classe A F-Cell, con un tempo di rifornimento di meno di tre minuti. Il motore elettrico fornisce una potenza massima di 100 kW-136 CV e una coppia massima di 290 Nm, con consumi ridotti. L'accumulatore di corrente è una potente batteria agli ioni di litio con tecnologia ad alto voltaggio, che ha un tenore energetico di 1,4 kWh e viene raffreddata attraverso il circuito di climatizzazione. Per la batteria della Classe B F-Cell, Mercedes-Benz si è avvalsa della tecnologia agli ioni di litio, che offre dimensioni compatte e potenza nettamente maggiore rispetto a quelle al nichel-metallo idruro (NiMH), con una densità energetica superiore del 30% e una densità di potenza del 50%. Inoltre, questo tipo di batteria si distingue per un'elevata efficienza di ricarica e una lunga durata.



**Figura 23.**Mercedes-Benz Classe B F-Cell

Più concettuale si presenta la Mercedes F125 che esordisce nel 2011, con le portiere ad ali di gabbiano e un propulsore a zero emissioni che sfrutta l'idrogeno. Questo modello utilizza quattro motori elettrici alimentati dall'energia generata da pile a combustibile, con una potenza totale di 231 CV, che le permette di toccare i 220 km/h e di scattare da 0 a 100 km/h in 4,9 secondi. A dispetto di tali parametri l'autonomia di percorrenza arriva fino a 1.000 km con un pieno di idrogeno (0,79 kg/100 km). Scocca e carrozzeria del nuovo prototipo sono realizzati con una tecnica mista che utilizza alluminio, materie plastiche e fibra di carbonio, utilizzata anche per il serbatoio che contiene l'idrogeno ad una pressione di 700 bar in un volume ridotto. Il pacco batterie al litio da 10 kWh permette alla F125 di viaggiare per 50 chilometri senza attivare le fuel cells. Un'auto d'élite per il prossimo futuro.



**Figura 24.**Mercedes-Benz F125

### 5.2.3.Audi

Anche Audi punta decisamente sulla cosiddetta mobilità del futuro e investe nel suo centro ricerca e sviluppo impegnato nello studio della mobilità elettrica e in un progetto parallelo con celle a combustibile alimentate ad idrogeno, che prevede lo sviluppo del modello Q5 HFC concept, per ora allo stadio di prototipo. Al momento si tratta solo di un programma affiancato che studia il potenziale delle fuel cells a livello veicolare e sfrutta numerose componenti già sperimentate sui modelli ibridi come la Q5, dove le tre lettere stanno appunto per Hybrid Fuel Cell. La strumentazione deriva da quella della Q5 Hybrid ed è quindi curata anche nei minimi dettagli, così come il resto dell'auto. Il SUV sperimentale ha trazione puramente elettrica e fa affidamento su batterie agli ioni di litio da 1,3 kWh, alimentate dalla pila a combustibile PEM con membrana a scambio protonico in grado di esprimere 98 kW (133 CV). La spinta alle ruote è fornita da due motori elettrici che assieme arrivano a sviluppare una potenza massima di 90 kW (122 CV) e una coppia di 420 Nm. L'idrogeno che alimenta il sistema è contenuto in forma gassosa in due speciali serbatoi alla pressione di 700 bar e il suo utilizzo all'interno della cella a combustibile ha un'efficienza dichiarata superiore al 50% nella maggior parte delle condizioni di guida. Secondo i costruttori questa soluzione consentirebbe di viaggiare in modalità elettrica anche su distanze d'oltre 400 km. I tempi necessari al rifornimento sono ridotti, equivalenti alle auto a metano, a differenza della ricarica delle batterie che richiede parecchi minuti, senza la possibilità di frequenti ricariche rapide a causa del degradamento della batteria stessa. La stessa Casa tedesca sottolinea comunque che prima di ipotizzare la produzione in serie della Q5 HFC occorre superare una serie di problemi tecnici, commerciali, economici e politici che coinvolgono la produzione, il trasporto e lo stoccaggio dell'idrogeno.



**Figura 25.**Audi Q5 HFC

#### 5.2.4.BMW

BMW presenta la Hydrogen 7, la prima berlina di lusso alimentabile ad idrogeno. Modello impostato sulla Serie 7, è in grado di funzionare indifferentemente a benzina o ad idrogeno, con l'utilizzo del quale le emissioni consistono praticamente in solo vapore acqueo. La scelta tra l'alimentazione a benzina e quella ad idrogeno, grazie alla trazione bivalente, conferisce flessibilità senza differenza in termini di prestazioni. I due serbatoi combinati offrono una autonomia di quasi 700 chilometri: quasi 500 km grazie ai 74 litri del serbatoio di benzina e circa 200 km grazie agli 8 kg di capienza del serbatoio di idrogeno, immagazzinato allo stato liquido. Il serbatoio, realizzato con l'utilizzo di due gusci con superisolamento a vuoto per avere il minimo trasferimento di calore possibile, mantiene l'idrogeno a temperature criogeniche a circa  $-250\text{ }^{\circ}\text{C}$ . L'automobile è trasportata da un motore V12 da 6 litri, con iniezione diretta della benzina e immissione diretta dell'idrogeno nel collettore d'aspirazione per essere bruciato nei cilindri del motore. È in grado di erogare una potenza di 191 kW pari a 260CV e 390 Nm di coppia pari a 4300 rpm. Il passaggio 0-100 km/h avviene in 9.5 secondi e la velocità massima risulta essere limitata elettronicamente a 230 km/h. Nonostante i buoni risultati ottenuti con una decisione che ha sorpreso il mondo dell'automobile, la BMW ha annunciato di voler sospendere le sue ricerche nel campo dell'alimentazione a idrogeno di motori a combustione interna. I riflettori per i prossimi anni sembrano infatti più orientati alla tecnologia elettrica, presentando la X6, la Serie 1 e la Serie 7 ActiveHybrid. La rinuncia di ulteriori sperimentazioni su motori a scoppio alimentati a  $\text{H}_2$  da parte della BMW nasce principalmente per il mancato sviluppo in parallelo del sistema di distribuzione e rifornimento, tra i principali problemi della realizzazione di una nuova economia ad idrogeno.



**Figura 26.**BMW Hydrogen 7

### 5.2.5.Honda

La Casa nipponica si rivolge al mondo dell'idrogeno con lo sviluppo di una vettura a celle combustibili: la FCX Clarity, derivata dalla concept FCX. È un'auto di dimensioni generose, 4,83 m, che ospita quattro persone in una berlina piuttosto elegante, filante e bassa da terra. La FCX Clarity è spinta da un motore elettrico da 129 CV alimentato dalla corrente prodotta da un gruppo di fuel cells da 100 kW, dove l'idrogeno si combina con l'ossigeno dell'aria e l'energia derivante dalla reazione è trasformata in elettricità utilizzata per muovere il veicolo. L'energia in eccesso viene immagazzinata in un pacchetto di batterie agli ioni di litio, utilizzato per recuperare l'energia prodotta durante i processi di frenata e decelerazione, recuperando fino al 57% di energia dissipata dalla frenata. La batteria funziona poi parallelamente allo stack di celle per alimentare il veicolo nelle fasi di ripresa. L'unità fuel cells è del 20% più piccolo e del 30% più leggero rispetto a quello precedente, eppure produce 14 kW in più. L'idrogeno è conservato alla pressione di 350 atmosfere in un serbatoio da oltre 170 litri, che garantisce un'autonomia dichiarata di 430 km. La velocità massima è di circa 160 km/h.



**Figura 27.***Honda FCX Clarity*

### 5.2.6.General Motors

Evoluzione della concept car Hy-wire che aveva impressionato per le soluzioni ardite di nuova concezione nel campo dei materiali utilizzati, l'ampio uso di controlli elettronici e la propulsione a fuel cell alimentate ad idrogeno, la Sequel rappresenta la prima concept car SUV di General Motors alimentata a idrogeno. È un prototipo di auto alimentata ad idrogeno dotata di tre motori elettrici alimentati dalla corrente generata dalle fuel cells, che per funzionare necessitano di aria e idrogeno. Le dimensioni sono più che considerevoli ma sembrano non pesare eccessivamente sulle prestazioni in termini di accelerazione, che da 0 a 100 km/h, è compiuta in circa 10 secondi, con velocità massima di 160 km/h. Per provvedere alla relativa lentezza di risposta delle

fuel cells, la Sequel le abbina ad un pacco di batterie agli ioni di litio altamente potenti (65 kW) che hanno il compito di erogare o assorbire nelle frenate potenze elettriche elevatissime. Inutile dire che le batterie litio-ioni sono molto potenti, ma hanno una scarsa capacità energetica, che si traduce in pochissima autonomia di marcia elettrica. L'autonomia totale dichiarata è di 480 km, frutto di tre voluminosi bomboloni che immagazzinano l'idrogeno gassoso alla pressione di 700 bar. Considerato che le celle a combustibile devono essere raffreddate con molta aria per evitare il surriscaldamento, nella parte anteriore e posteriore della vettura sono integrate delle canalette di areazione che sono divenute parte integrante del design. Per contenere ulteriormente il peso e incrementare la potenza, i designer hanno utilizzato la stessa tecnica di trasmissione del segnale "Fly-by-Wire", adottata nei moderni jet. Questo permette di sostituire i componenti tradizionali con elementi a fibra ottica comandati elettronicamente, in modo che le caratteristiche di guida e frenatura possano essere perfettamente adeguate alle preferenze individuali del rispettivo automobilista.



**Figura 28.**GM Sequel

L'ultima generazione di vetture a idrogeno sviluppate da GM prende il nome di GM HydroGen4, versione a fuel cells della Chevrolet Equinox. Per svilupparla, gli scienziati e gli ingegneri dei centri fuel cells GM hanno utilizzato la mole di informazioni raccolte con i test del prototipo precedente, presentato nel 2002, la HydroGen3. Di quest'ultimo erano state realizzate due varianti: una ad idrogeno liquido alla temperatura di  $-253^{\circ}\text{C}$  ed una ad idrogeno gassoso compresso. Gli sforzi si sono concentrati su quest'ultima, a causa di problematiche legate alla gestione del liquido che finiva inevitabilmente per evaporare. Il veicolo è dotato di tre serbatoi di fibra di carbonio che contengono in totale 4,2 kg di idrogeno compresso alla pressione di 700 bar, che garantiscono un'autonomia di oltre 300 km. L'idrogeno viene trasformato dalle 440 celle a

combustibile in corrente elettrica, che alimenta il motore da 73 kW, circa 100 CV, e 320 Nm di coppia. Il nuovo sistema dispone anche di una batteria di compensazione al nichel-metallo-idruro che permette di utilizzare l'energia frenante recuperata: quando si frena o si sorpassa, il motore elettrico diventa un generatore ed utilizza l'elettricità che si sviluppa durante la frenata per caricare la batteria. A dispetto di una massa non indifferente, con oltre 2000 kg, accelera da 0 a 100 in 12 secondi e raggiunge una velocità massima di 160 km/h. Il tempo di rifornimento si aggira sui 4-5 minuti, con un immissione nei serbatoi circa di un chilo di gas al minuto.



**Figura 29.** GM HydroGen4

#### 5.2.7. Ford

Anche Ford punta sull'idrogeno presentando la Ford Focus C-MAX H<sub>2</sub> ICE con motore ibrido a combustione interna a idrogeno. La macchina è un prototipo che nasce dal Centro Ricerca Ford di Aachen, in Germania, e punta ad analizzare il suo potenziale tecnico ed ambientale. La base è un motore quattro cilindri a benzina di 2.3 litri capace di sviluppare 110 CV (82 kW). Il veicolo in collaudo sfrutta idrogeno gassoso compresso stoccato in tre serbatoi a una pressione di 350 bar. Due serbatoi sono sistemati nel bagagliaio, il terzo nel sottoscocca. Globalmente, i tre serbatoi hanno una capacità di 119 litri, che equivale a 2.75 kg di idrogeno e garantiscono un'autonomia di 200 km. A differenza del modello tradizionale la batteria è stata spostata dal vano motore al di sotto del sedile posteriore, con l'aggiunta in più di speciali sistemi di sicurezza e sensori per adattarsi alla differente tecnologia del serbatoio combustibile. Il propulsore richiede inoltre alcuni sistemi elettrici aggiuntivi e altri componenti, in particolare due intercooler. Le prestazioni del prototipo non discostano in modo significativo rispetto al corrispondente motore a benzina grazie all'utilizzo di un compressore, il quale aumenta la massa della miscela del carburante nella camera di

combustione. Durante la fase di compressione l'aria viene dapprima riscaldata e poi raffreddata nei due intercooler, per essere infine inviata nel motore per combinarsi con l'idrogeno nei cilindri.



**Figura 30.** Ford Focus C-MAX H<sub>2</sub> ICE

La ricerca sull'idrogeno come carburante del futuro prosegue in Casa Ford presentando la Focus FCV Hybrid, una versione ibrida che combina un sistema a celle combustibili con un pacchetto di batterie elettriche da 300 volt. Il veicolo è alimentato da uno stack di fuel cell PEM, Mark 902 della Ballard, che permette di disporre di una potenza specifica più alta (potenza in rapporto al carburante). La vettura, dotata di un serbatoio di idrogeno pressurizzato a 345 bar, rilascia H<sub>2</sub> nella pila di celle a combustibile in cui viene temporaneamente separato in protoni ed elettroni, producendo elettricità, e poi unito con l'ossigeno dell'aria per produrre come unico sottoprodotto del veicolo vapore acqueo. La Ford Focus FCV è alimentata da un motore elettrico e riceve la sua energia elettrica da due fonti, che garantiscono un'autonomia di circa 150-200 km e una velocità massima di 130 km/h. La prima è direttamente ricavata dalla cella a combustibile, mentre la seconda fonte è data da un pacco di batterie nichel-metallo idruro, NiMH. Quest' unità da 216 volt serve non solo come batteria d'avviamento per l'intero sistema, ma assicura anche una spinta aggiuntiva durante l'accelerazione. Insieme, sviluppano una potenza più alta di quella che ci si potrebbe attendere dal limite di potenza massima di 92 CV (68 kW). L'efficienza delle fuel cells rappresenta un elemento importante di questa tecnologia, garantendo per un'ampia gamma di operazioni a carico parziale, un' efficienza termodinamica di circa il 60%, con valori di picco temporanei che salgono fino all'80%, a basso carico. Con lo scopo di incrementare ulteriormente l'efficienza assoluta, sono stati adottati due accorgimenti supplementari: un sistema di frenata rigenerativa e componenti leggeri. In particolar modo la frenata rigenerativa del veicolo, che

comprende un sofisticato sistema di freni a filo, consente di usare fino al 95% delle azioni frenanti per generare energia elettrica che viene rinviata alla batteria del sistema. Questo permette non solo di ridurre l'usura del sistema frenante, ma anche di aumentare l'efficienza energetica.



**Figura 31.** Ford Focus FCV

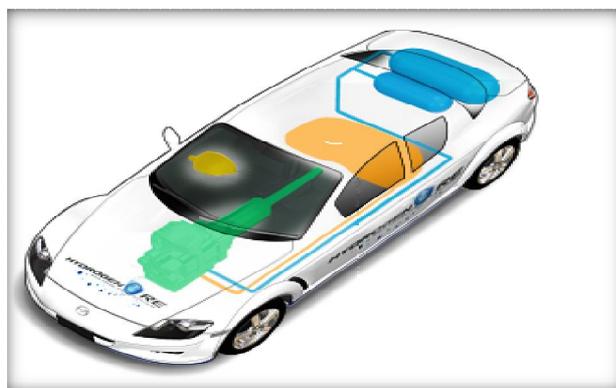
La Casa statunitense realizza un nuovo passo nella sperimentazione sul sentiero della mobilità a idrogeno con il modello Ford Edge Plug-In Hybrid con HySeries Drive. Il modello vede l'integrazione di due motori elettrici da 176 CV complessivi, un serbatoio a idrogeno di 4,5 kg e una presa per la corrente, attraverso la quale è possibile ricaricare le speciali batterie a ioni di litio sfruttando il sistema elettrico domestico. L'autonomia garantita è di 40 km con una singola ricarica, ma quando la capacità delle batterie scende sotto il 40%, entra in gioco l'idrogeno, immagazzinato a 350 bar in un serbatoio lungo 2 m ubicato sotto la cellula passeggeri. L'impianto fuel cells trasforma l'idrogeno in elettricità conferendo alla Ford Edge ibrida un'ulteriore autonomia di 320 km, fungendo da range extender e fornendo dunque energia elettrica quando le batterie esauriscono la loro carica di origine. Centrale per l'unità HySeries è il pacco di batterie agli ioni di litio di 336 V che alimenta appunto i motori elettrici in ogni momento. L'energia elettrica dalla rete e dalle celle a combustibile non viene trasferita alle ruote senza passare prima attraverso questo pacchetto di batterie. Le celle e le batterie si dicono agire in serie. Tale configurazione risulta piuttosto innovativa, essendo che nella maggior parte degli ibridi odierni, le batterie e motori funzionano in parallelo. Il vantaggio è la semplicità. Operando in serie si ottimizza il processo, eliminando hardware supplementari e software di gestione complessi dei due sistemi di propulsione a favore di un singolo flusso di corrente.



**Figura 32.** Ford Edge Plug-In Hybrid

#### 5.2.8. Mazda

Gli studi in questa direzione della Casa giapponese hanno portato allo sviluppo il modello RX8. La RX8 Hydrogen RE è dotata di un sistema a doppia alimentazione in cui il propulsore 1.3 Wankel Renesis è in grado di funzionare sia alimentato a benzina che a idrogeno. Il serbatoio di idrogeno da 105 litri, che occupa il vano bagagli, permette un'autonomia limitata a 100 km, mentre in modalità a benzina si raggiungono i 549 km. L'idrogeno è contenuto allo stato gassoso in un serbatoio a 350 bar di pressione massima. Il motore di RX-8 Hydrogen RE, in comune con l'ibrida benzina-idrogeno-elettrico Premacy Hydrogen RE Hybrid, è derivato dal Renesis della normale RX-8 con due rotori da 654 cc ciascuno. Rispetto a quest'ultimo è però decisamente depotenziato, passando da 211 CV a 109 CV, con una coppia massima che scende da 211 a 140 Nm. . Per la massima sicurezza la vettura incorpora sensori nel bagagliaio, nell'abitacolo e nel vano motore che rilevano eventuali fughe di idrogeno. La RX8 è un'auto scelta come banco di prova per una serie di sperimentazioni in Giappone e Norvegia essenzialmente per ragioni pratiche, legate al fatto che già integrava il motore rotativo.



**Figura 33.** Mazda RX-8 Hydrogen RE

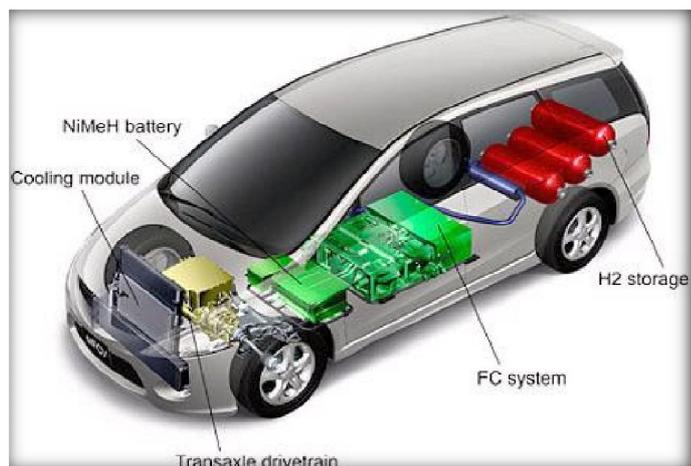
Mazda Premacy Hydrogen RE Hybrid, erede della tecnologia mostrata per la prima sulla Mazda RX8 RE Hybrid, è una monovolume che monta una evoluzione del motore rotativo, capace di funzionare sia a benzina che ad idrogeno. Il sistema ibrido della RE converte l'energia dalla combustione dell'idrogeno in elettricità, per poi alimentare il motore elettrico. Rispetto alla Mazda RX-8 Hydrogen RE, il nuovo modello offre una potenza superiore del 40% e un'autonomia di viaggio a idrogeno essenzialmente raddoppiata, da 100 a circa 200 km. Nel modello Premacy comunque, il motore rotativo non muove direttamente il veicolo ma fornisce energia invece a un generatore che carica un piccolo pacco di batterie a ioni di litio ed agevola il motore elettrico di 110 kW. Altra nota della Premacy è la capacità di ospitare cinque passeggeri, uno in più rispetto alla RX.



**Figura 34.** Mazda Premacy Hydrogen RE Hybrid

#### *5.2.9. Mitsubishi*

Le ricerche nel campo sperimentale della trazione ad idrogeno hanno portato Mitsubishi Motors Corporation (MMC) a presentare il modello Mitsubishi FCV1. Il modello deriva dal minivan Grandis ed utilizza il più recente sistema a cella combustibile di DaimlerChrysler, che ricorre a celle combustibili e modulo di alimentazione della Ballard Power System. Il sistema adotta celle a combustibile ad elettrolita polimerico PEMFC da 68kW, accoppiate a un gruppo di batterie Nichel-Idrogeno. Il serbatoio, contenente idrogeno compresso a 350 bar, presenta una capacità di 117L che garantisce un'autonomia di circa 150km. Il motore asincrono a corrente alternata sviluppa una potenza massima di 65 kW, una coppia di 210Nm e permette una velocità che tocca i 140 km/h.



**Figura 35.**Mitsubishi FCV

#### 5.2.10.Nissan

Il progetto dell'auto a idrogeno è portato avanti da Nissan con la X-Trail FCV. La vettura, con un'autonomia di 500 km, utilizza un serbatoio da 700 bar rivestito in alluminio, situato tra il bagagliaio e i sedili posteriori che risultano rialzati rispetto a quelli anteriori per ottenere maggiore spazio disponibile per lo stoccaggio dell'idrogeno e la cella a combustibile. Il pacco di celle a combustibile firmato Nissan sviluppa 90 kW di potenza, sufficiente per una velocità massima di 150 km/h. L'energia elettrica prodotta dalle celle combustibili alimenta il motore del veicolo, separato da quest'ultime dal sistema di batterie al litio, altamente efficienti e ultracompatte. Le batterie si ricaricano anche per mezzo dell'energia spesa nelle fasi di frenaggio, recuperata e reintrodotta negli accumulatori. I miglioramenti apportati al nuovo stack di celle a combustibile includono una riduzione del volume del 60 %, il raddoppiamento della durata della pila e l'estensione del range di temperatura operative. Performance, potenza, velocità e accelerazione sono state riscontrate identiche sia nei modelli a benzina sia in quelli a idrogeno.



**Figura 36.**Nissan X-Trail FCV

### 5.2.11. Hyundai

La Casa coreana si affaccia al mercato dei veicoli ad idrogeno con il modello Tucson IX FCEV, la variante a idrogeno della sua IX35. Il nuovo SUV a fuel cells, rappresenta la terza generazione di veicoli di questo tipo per Hyundai. Grazie all'utilizzo di due serbatoi di idrogeno contenenti 5,6 kg di idrogeno compresso a 700 bar, la Tucson può vantare un'ottima autonomia pari a 650 km. Tale valore è uno dei migliori tra gli odierni prototipi a fuel cells, e assume un significato ancora più comprensibile se confrontato con quello delle Hyundai a idrogeno di precedente generazione, che non andavano oltre i 370 km. Mentre la versione precedente aveva un super condensatore di 100 kW, il nuovo modello è dotato di una batteria di 21 kW per l'accumulo di energia a breve termine. Il volume complessivo del sistema a celle a combustibile è stato ridotto del 20% grazie alla modularizzazione del gruppo di celle a combustibile, dell'equilibrio di pianta (BOP), dell'inverter e del box di giunzione ad alta tensione. I consumi, pari all'equivalente di 28 km con un litro di benzina, sono stati ridotti del 15% rispetto alla precedente generazione, e la velocità massima registrata è di 160 km/h.



**Figura 37.** Hyundai Tucson IX FCEV

## Conclusioni

Domanda energetica in continuo aumento, riserve di combustibili fossili in diminuzione, crescita dei prezzi di acquisto, instabilità economica e geopolitica, aumento delle emissioni e della concentrazione in atmosfera di CO<sub>2</sub> e altre sostanze inquinanti quali NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, HC. Queste sono e saranno le realtà che la società dovrà affrontare se non viene compiuta una scelta in direzione di un sistema complessivo sostenibile. La civiltà moderna è basata totalmente sui combustibili fossili: industria, trasporti, riscaldamento, edilizia, illuminazione, comunicazioni, agricoltura, farmaceutica, petrolchimica. La transizione verso un'era senza combustibili fossili sarà molto gravosa, sia in termini economici che sociali. È sbagliato vedere nell'idrogeno la soluzione a tutti i problemi, ciò nonostante il percorso verso un nuovo sistema energetico appare indispensabile. L'idrogeno può offrire una soluzione valida. Le critiche verso la visione dell'idrogeno come futuro non mancano, sono forti e sono tecnologiche, strutturali, economiche, normative e di accettazione sociale.

L'idrogeno non è una fonte di energia e deve essere dunque prodotto a partire da altre fonti di energia, siano esse combustibili fossili o fonti rinnovabili. Oggi tuttavia quasi tutto l'idrogeno prodotto industrialmente viene ottenuto a partire da fonti di energia fossili, formalmente in contrasto con gli aspetti ambientali alla base della scelta di tale elemento. Di tutti i consumi energetici mondiali poi le fonti rinnovabili forniscono un minimo sostegno, poco significativo. L'ottica di una produzione integrale a partire da fonti rinnovabili risulta allo stato attuale delle cose poco fattibile, non dimenticando il fatto che ogni conversione da una forma di energia ad un'altra ha un costo energetico, tanto più significativo quanto minore è l'efficienza della trasformazione. Elementi quali il sistema di accumulo dell'idrogeno a bordo, che condiziona fortemente l'autonomia del veicolo rispetto ai concorrenti convenzionali, la difficoltà nella scelta del tipo di trasporto e la capacità di individuare opzioni di stoccaggio praticabili, con l'obiettivo di aumentare la densità energetica sia in volume che in peso, sono fattori critici dal punto di vista tecnologico.

Gli ostacoli strutturali sono senza dubbio legati all'imponente investimento in termini di infrastrutture e di energia necessaria per costruirle che la creazione di un'economia basata sull'idrogeno richiederebbe. L'assenza di una rete capillare di distribuzione o per lo meno di piani concreti della sua realizzazione, non permette lo sviluppo di piani industriali per una produzione seriale di veicoli. La rete distributiva dei carburanti è attualmente in mano alle compagnie petrolifere, le quali non trovano ancora convenienza economica nell'investimento in altre competenze che non siano legate al petrolio o in generale ai combustibili fossili.

I costi di un veicolo a fuel cells, connessi principalmente ai costi delle celle (uno stack di fuel cell completo da 20 kW può arrivare a costare 100.000 €) sono fuori dal mercato concorrenziale. Si ha poi un circolo vizioso che da un lato coinvolge le Case automobilistiche, titubanti nell'affacciarsi al mercato a causa dell'incertezza rispetto alla redditività dell'investimento in mancanza di una domanda ben quantificabile e a causa dei ridotti investimenti per la creazione della rete distributiva necessaria da parte delle società energetiche. Dall'altro lato le società energetiche, le quali non ritengono opportuno investire ingenti somme di denaro per creare un'infrastruttura diffusa finché non vi sarà in circolazione un volume sufficiente di consumatori. Risulta necessario il supporto da parte di degli enti pubblici al fine di sciogliere tale nodo, attraverso consistenti finanziamenti governativi.

Un ulteriore elemento che per alcuni aspetti risulta essere critico è l'accettazione da parte della massa, la quale ha la tendenza a privilegiare l'uso delle tecnologie consolidate percepite più sicure e più convenienti. La sua diffusione non potrà dunque non essere accompagnata da una campagna di informazione e sensibilizzazione tendente a ridurre le barriere, che fanno leva sul carattere infiammabile e reattivo dell'idrogeno come combustibile, attraverso l'accentuazione dei vantaggi ad esso connessi.

Gli impedimenti come si è visto non mancano, ma la ricerca è solita progredire con il tempo. Gli attuali problemi tecnici, economici e sociali saranno superati in un'ottica senz'altro futura. Alcune tecnologie per uno sviluppo di una nuova strada ad idrogeno sono ancora in fase sperimentale, altre invece sono già reali. Le potenzialità sono grandi: emissioni nocive nulle, silenziosità del veicolo, tempi di rifornimento adeguati, autonomie accettabile e possibilità di produrre l'idrogeno con energia proveniente da fonti rinnovabili. Questi ultimi fondamentali aspetti risulteranno l'ago della bilancia per lo sviluppo o meno di una futura economia ad idrogeno.

L'ultima riflessione da fare è che la società dovrà accettare che i tempi sono cambiati, la recessione c'è e si percepisce in tutti i settori. Appare opportuno e doveroso concretizzare un'uscita dal modello economico corrente, che vede nella crescita continua della produzione di beni e servizi una condizione essenziale per lo sviluppo del genere umano.

## BIBLIOGRAFIA

- Enzo Rossi, 2006, Andare ad Idrogeno, MEDIA 3000, Italia
- Karl-Heinz Tetzlaff, 2009, Idrogeno verde, Editoriale Delfino, Italia
- Felicia Anna Savino, 1999/2000, Prospettive nella produzione di energia: aspetti merceologici ed economici. Il caso dell'idrogeno, Relatrice Prof.ssa Valeria Spada, Tesi di Laurea, Università degli studi di Foggia
- Peter Whoriskey, 2009, No more U.S. aid needed, says GM chief, The Washington Post, Thursday, October 29
- Crane Alan, 2010, New National Research Council Report: Transitions to Alternative Transportation Technologies: A Focus on Hydrogen, TRB, pp 28-30
- Emilio Martines, 2003, L'idrogeno, "rivoluzione" sulla carta, Il Manifesto, pag 13, 9 Mar
- Ruberti E., 2000, Idrogeno: energia per il futuro, Le Scienze, 385, 94, 01 Set
- Agenzia Nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile, Idrogeno energia del futuro, 2000

Siti consultati:

- BP Global, (<http://www.bp.com>), 3 Agosto 2012
- Ente Nazionale Idrocarburi, ([www.eni.com](http://www.eni.com)), 3 Agosto 2012
- Eniscuola, (<http://www.eniscuola.net>), 3 Agosto 2012
- Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio, (<http://www.minambiente.it>), 3 Agosto 2012
- Skeptical Science, (<http://www.skepticalscience.com>), 4 Agosto 2012
- Federchimica, ([www.federchimica.it/](http://www.federchimica.it/)), 4 Agosto 2012
- Dipartimento di Fisica Tecnica Unipd, (<http://www.dftunipd.org>), 4 Agosto 2012
- Portale Idrogeno – Federchimica, ([idrogeno.assogastecnici.federchimica.it](http://idrogeno.assogastecnici.federchimica.it)), 5 Agosto 2012
- Idrogeno come vettore energetico per il futuro, ([idrogenovettore.altervista.org](http://idrogenovettore.altervista.org)), 5 Agosto 2012
- Energy for Sustainable Future, ([energy-21.blogspot.com](http://energy-21.blogspot.com)), 6 Agosto 2012
- Museo energia, (<http://www.museoenergia.it>), 6 Agosto 2012
- ErgoClub, ([www.ergoclub.it](http://www.ergoclub.it)), 6 Agosto 2012
- MiniWatt, ([www.miniwatt.it/](http://www.miniwatt.it/)), 7 Agosto 2012
- Tuttogreen, ([www.tuttogreen.it](http://www.tuttogreen.it)), 8 Agosto 2012
- Intelligent Energy, ([www.intelligent-energy.com](http://www.intelligent-energy.com)), 9 Agosto 2012
- Ecoage, ([www.ecoage.it](http://www.ecoage.it)), 9 Agosto 2012

- Motoblog, (www.motoblog.it), 12 Agosto 2012
- La Repubblica.it,(www.repubblica.it), 13 agosto 2012
- Corriere della sera, (www.corrieredellasera.it), 13 Agosto 2012
- Le Scienze, (www.lescienze.it), 16 Agosto 2012
- Motori.it, (www.motori.it), 17 Agosto 2012
- Quattroruote, (www.quattroruote.it/), 19 Agosto 2012
- OmniAuto, (www.omniauto.it), 20 Agosto 2012
- BMW, (www.bmw.com), 22 Agosto 2012
- Chevrolet, (www.chevrolet.it/), 22 Agosto 2012
- Mitsubishi, (www.mitsubishi-motors.com), 23 Agosto 2012
- LSWN, (www.lswn.it/), 24 Agosto 2012
- Autoblog, (www.autoblog.it), 24 Agosto 2012
- H<sub>2</sub>IT, (www.h2it.org), 25 Agosto 2012
- Il Giornale dell'Ingegnere, (www.giornaleingegnere.it), 26 Agosto 2012
- ENEA, (www.enea.it), 27 Agosto 2012