

1222•2022  
**800**  
ANNI



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA

Università degli Studi di Padova

Facoltà di Ingegneria

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Meccanica e Meccatronica

# L'idrogeno: il futuro azzurro dell'automotive

**Candidato:** Zampedri Mattia

**Relatore:** Prof. Mirto Mozzon

Anno accademico 2021/2022

## **RINGRAZIAMENTI**

Ringrazio la mia famiglia e i miei amici che mi hanno dato la possibilità di fare questo percorso e mi hanno sempre sostenuto fino al completamento. Nonostante tutto ringrazio anche Trenitalia che nonostante qualche ritardo di troppo, mi ha permesso di arrivare in orario quasi sempre agli esami almeno. Nota di merito va alla mia Mini che mi ha sempre portato in ateneo senza mai lasciarmi a piedi.

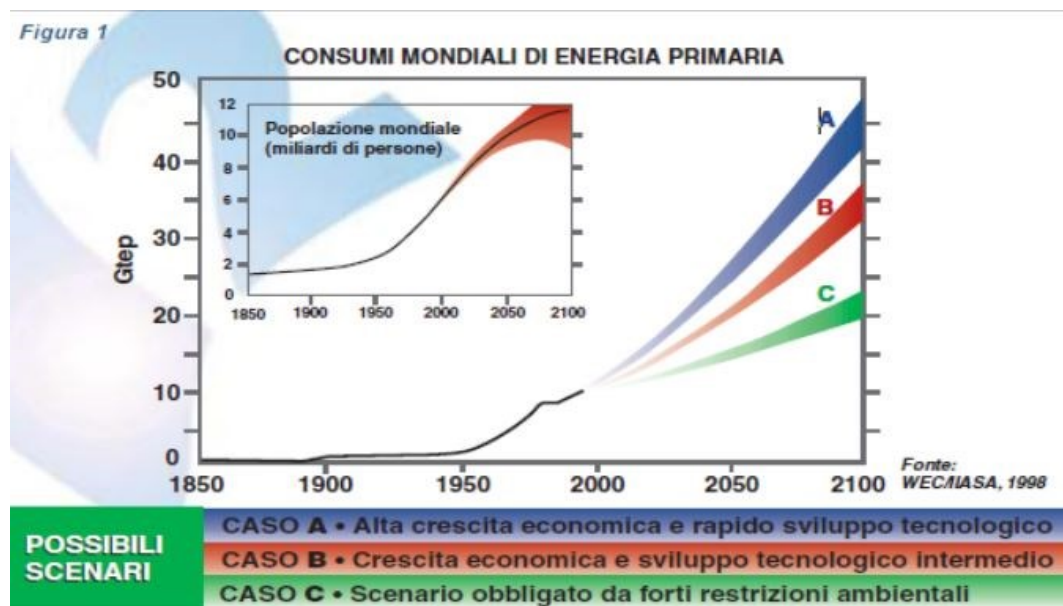
# INDICE

RINGRAZIAMENTI.....	II
INTRODUZIONE .....	V
1. Proprietà dell'idrogeno .....	1
2. Produzione dell'idrogeno.....	4
2.1. Steam reforming.....	6
2.2. Elettrolisi dell'acqua .....	8
2.3. Ossidazione parziale di idrocarburi (POX) (ATR) .....	10
2.4. Gassificazione del carbone.....	11
2.5. Pirolisi e gassificazione delle biomasse .....	11
2.6. Processi fotobiologici.....	12
2.7. Processi fotoelettrochimici.....	13
2.8. Sistemi avanzati a membrana ceramica .....	13
2.9. Il problema della purificazione dell'idrogeno .....	14
3. Stoccaggio e distribuzione .....	15
3.1. Compressione.....	15
3.2. Idrogeno allo stato liquido .....	17
3.3. Idruri metallici.....	18
3.4. Altri metodi .....	19
3.5. Valutazioni finali sui sistemi di stoccaggio .....	21
3.6. Distribuzione .....	22
3.7. La sicurezza.....	25
4. L'utilizzo dell'idrogeno e fuel cells.....	27
4.1. Celle a combustibile.....	29
4.2. Fuel cells PEM .....	33

5. Veicoli ad idrogeno.....	37
5.1. Sistema “on board” .....	38
5.2. Veicoli ibridi .....	39
5.3. Componenti.....	41
5.3.1. Il motore elettrico.....	42
5.3.2. I motori elettrici “in wheel” .....	42
5.3.3. Il Sistema di controllo.....	43
5.3.4. Sistema “Chopper” .....	44
5.3.5. Sistema “Inverter”.....	44
5.3.6. Le batterie .....	45
6. Confronti.....	46
6.1. Confronto economico benzina - elettrico .....	46
6.2. Confronto fuel cells – combustione interna .....	47
6.2.1. Upstream (well to tank) .....	47
6.2.2. Vehicle (tank to wheels) .....	48
6.2.3. Confronto finale.....	50
6.3. Su quale auto puntare oggi? .....	51
7. I modelli di veicolo ad idrogeno .....	54
7.1. Toyota Mirai 2020.....	54
7.2. Hyperion XP-1 .....	57
Conclusioni .....	59
INDICE DELLE FIGURE.....	60
INDICE DELLE TABELLE .....	62
BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA .....	63

# INTRODUZIONE

La crescita continua della popolazione mondiale, l'aspirazione naturale dei paesi in fase di sviluppo a raggiungere standard economici e tenori di vita sempre più elevati, sono le principali cause dell'aumento della richiesta di energia e del repentino incremento delle emissioni di gas serra, il più importante dei quali l'anidride carbonica.



**Figura 1:** Consumi di energia nel mondo

La sfida tecnologica di questo secolo, a detta degli esperti, sarà cercare di soddisfare questa domanda energetica, cercando di limitare il più possibile la produzione di questi gas dannosi per la salute dell'uomo, ma soprattutto pericolosi per il nostro pianeta, dato che sono i principali responsabili del surriscaldamento globale. Siamo giunti al punto che un innalzamento anche di 1,5-3°C potrebbe portare forti conseguenze sul clima di molte zone della terra, tra cui il Bel paese che rischierebbe la desertificazione.

La recente crisi derivata dalla pandemia del Covid-19 e dalla guerra Russa-Ucraina ha portato ad un ulteriore impenno dei costi dei combustibili fossili, evidenziando

ancora una volta la dipendenza che il sistema energetico dei paesi europei ha dai suddetti. Questa sfida può essere vinta solo aumentando l'efficienza dei sistemi di produzione d'energia, ampliando l'utilizzo di fonti a basso o addirittura nullo contenuto di carbonio (fonti rinnovabili, energia nucleare, gas naturale), cercando di separare la CO<sub>2</sub> prodotta nella trasformazione dei combustibili fossili e confinarla senza disperderla nell'atmosfera.

Questo scenario potrebbe essere basato su un vettore d'energia avente le seguenti caratteristiche:

- facilmente distribuibile tramite una rete;
- producibile da più fonti energetiche primarie, tra loro intercambiabili, disponibili su larga scala e durature nel tempo;
- d'impatto ambientale locale e globale quasi nullo.

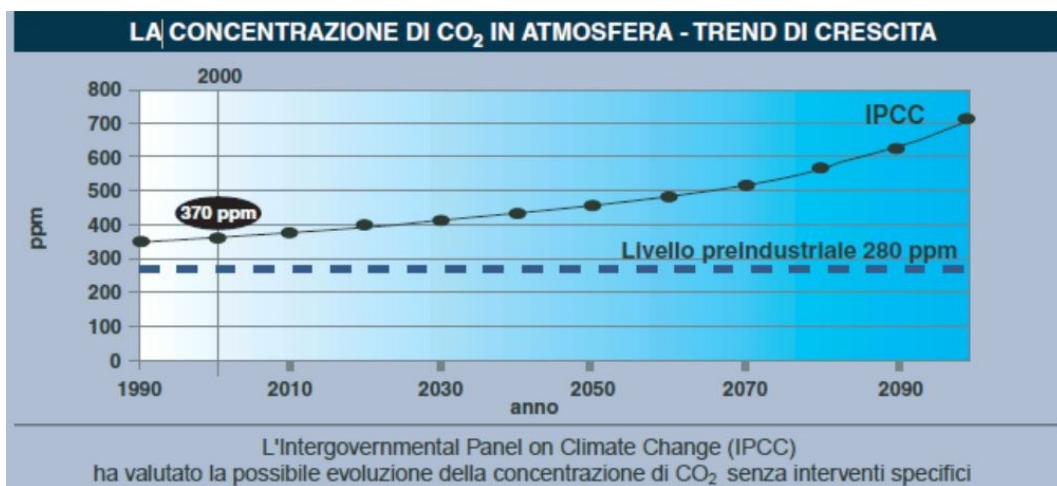
Un vettore energetico è tutto ciò da cui si può ricavare energia utile mediante conversione di fonti energetiche primarie (es.: carbone, elettricità, benzina, ecc.)

<b>SVILUPPO DI CO<sub>2</sub> NELLA COMBUSTIONE DI CARBONE, PETROLIO, GAS NATURALE</b>			
Combustibile (prodotto tipico)	Carbone	Petrolio	Gas Naturale
CO <sub>2</sub> Sviluppata [kg/kWh <sub>t</sub> ]	0,36	0,27	0,20

**Tabella 1.** Anidride carbonica sviluppata per unità di energia

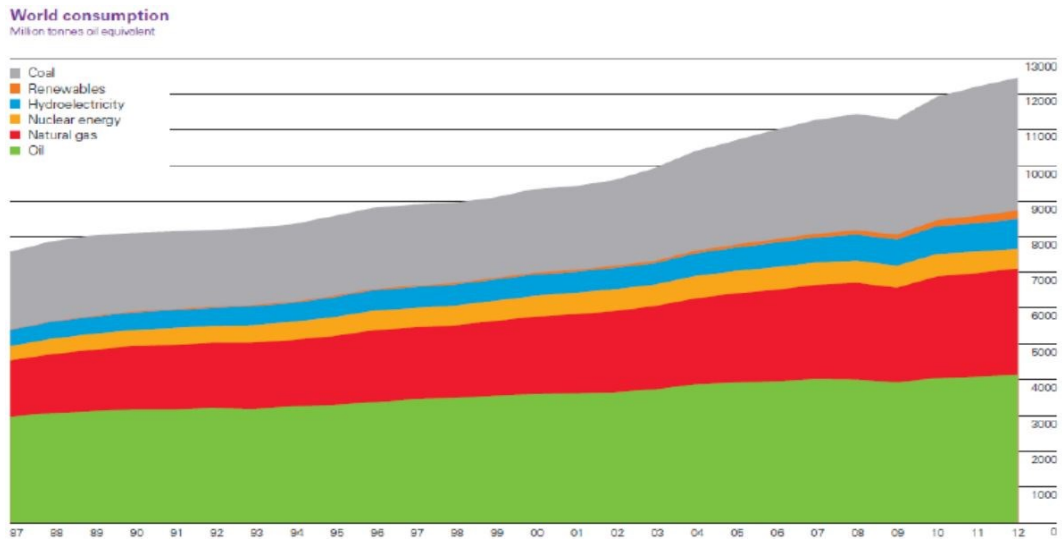
Nella tabella 1 sono riportate le produzioni di CO<sub>2</sub> derivate dai combustibili fossili più utilizzate nella produzione d'energia. La combustione di queste fonti fossili emette vari tipi di inquinanti, tra cui l'anidride carbonica in abbondanza, che costituisce di gran lunga la principale causa dell'effetto serra antropico. All'inizio

del secolo scorso la concentrazione della CO<sub>2</sub> nell'aria era pari a 300 parti per milione (ppm). Ora è di circa 380 ppm. A livello globale circa il 30% delle emissioni di CO<sub>2</sub> in atmosfera è causata dai trasporti. Le previsioni dei consumi di energia per il prossimo secolo indicano un continuo aumento delle emissioni di anidride carbonica e quindi della sua concentrazione in atmosfera, a meno che non si applichi un cambiamento sostanziale del sistema energetico.



**Figura 2.** Concentrazione di CO<sub>2</sub> in atmosfera

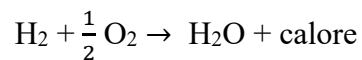
Nel grafico seguente si possono notare i consumi in termini di tonnellate equivalente di petrolio delle varie fonti di energia nel periodo compreso tra il 1997 e il 2012. Si nota come l'utilizzo del petrolio, carbone e del gas naturale sia predominante rispetto ad altre fonti di energia, mentre le fonti rinnovabili hanno subito un leggero aumento negli ultimi anni. Risulta necessario un cambio repentino nell'utilizzo di tali fonti inquinanti, in modo da ridurre le emissioni di sostanze nocive, indirizzando la produzione energetica sul rinnovabile e l'ecosostenibile.



**Figura 3.** Statistiche sui consumi per diverse forme di energia

L'idrogeno è un vettore in grado di soddisfare i requisiti precedentemente indicati, infatti:

- è un gas che brucia nell'aria secondo una semplice reazione: l'idrogeno si unisce all'ossigeno generando acqua più calore, dando quindi come unico prodotto di reazione acqua pura;



- può essere prodotto sfruttando l'energia prodotta dal nucleare, combustibili fossili e fonti rinnovabili;
- può essere distribuito in modo relativamente semplice e compatibile con le esigenze degli utenti finali e con lo sviluppo delle tecnologie di trasporto e di stoccaggio;
- può essere impiegato in diverse applicazioni (produzione di energia elettrica centralizzata o distribuita, generazione di calore, trazione) con un impatto locale nullo o estremamente ridotto.



# 1. Proprietà dell'idrogeno

L'idrogeno è il primo elemento della tavola periodica, ha il numero atomico 1, è il più leggero, e ha come simbolo H. Si trova principalmente nelle stelle e nei giganti gassosi, mentre sulla terra è presente nell'acqua (11.9%), in tutti i composti organici, organismi viventi, combustibili fossili, gas naturale. Si trova sotto forma di un gas biatomico avente formula H<sub>2</sub> nell'aria a temperatura ambiente (298 K) e a pressione atmosferica. È un gas inodore, incolore, non tossico, insapore ed altamente infiammabile. Gli isotopi principali dell'idrogeno sono riportati in figura 4: a sinistra il Prozio con 0 neutroni, in centro il Deuterio con 1 neutrone e a destra il Trizio con 2 neutroni. Il trizio è radioattivo.

## I tre isotopi dell'idrogeno

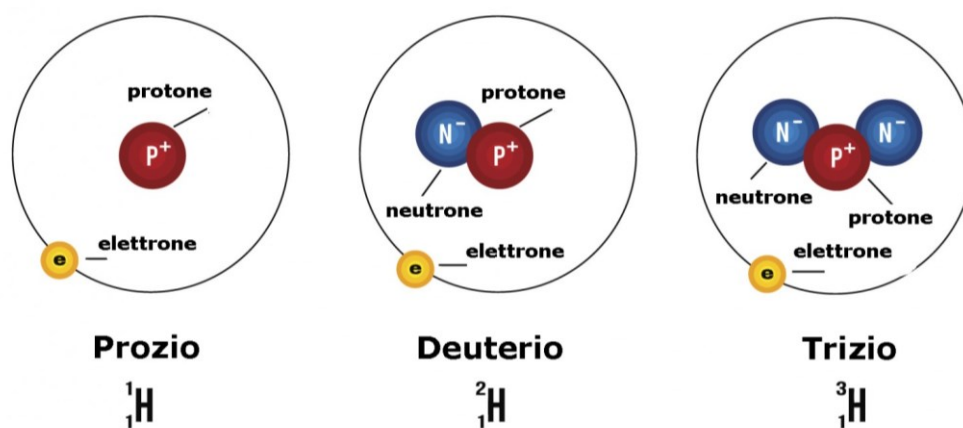
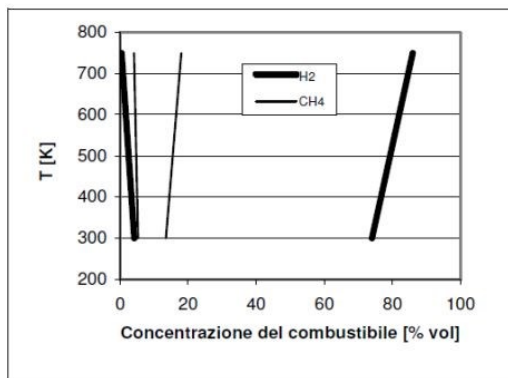


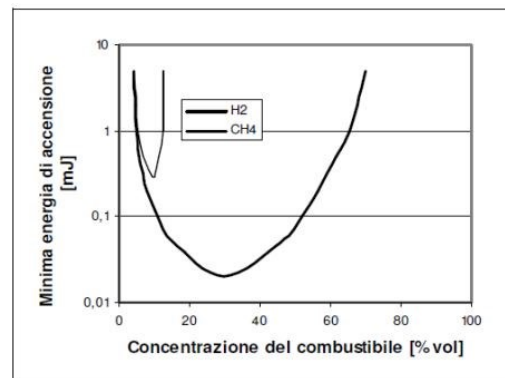
Figura 4. Isotopi dell'idrogeno

Rispetto ad altri combustibili ha un ridotto contenuto energetico per unità di volume, mentre ha il più alto contenuto energetico per unità di massa. Confrontando un litro di gasolio, possiede lo stesso contenuto energetico di 3,12 m<sup>3</sup> di idrogeno gassoso (in condizioni normali) e di 4,13 litri di idrogeno liquido. Potremmo dire che l'idrogeno è svantaggioso, ma la sua combustione ha un'efficienza più alta.

I rischi maggiori nell'uso dell'idrogeno sono rappresentati dalla possibilità d'incendio o di esplosione, dovuti alla più bassa energia di accensione e ai più ampi intervalli di infiammabilità rispetto ad altri combustibili. Però possiede anche una rapida velocità di diffusione nell'aria: questa proprietà permette al gas di disperdersi rapidamente in un ambiente aperto in caso d'incendio, raggiungendo così concentrazioni minori locali, abbassandone la possibilità di infiammabilità.



*Limiti di infiammabilità dell'idrogeno in aria e del metano in aria*



*Energia minima di accensione per miscele idrogeno-aria e metano-aria*

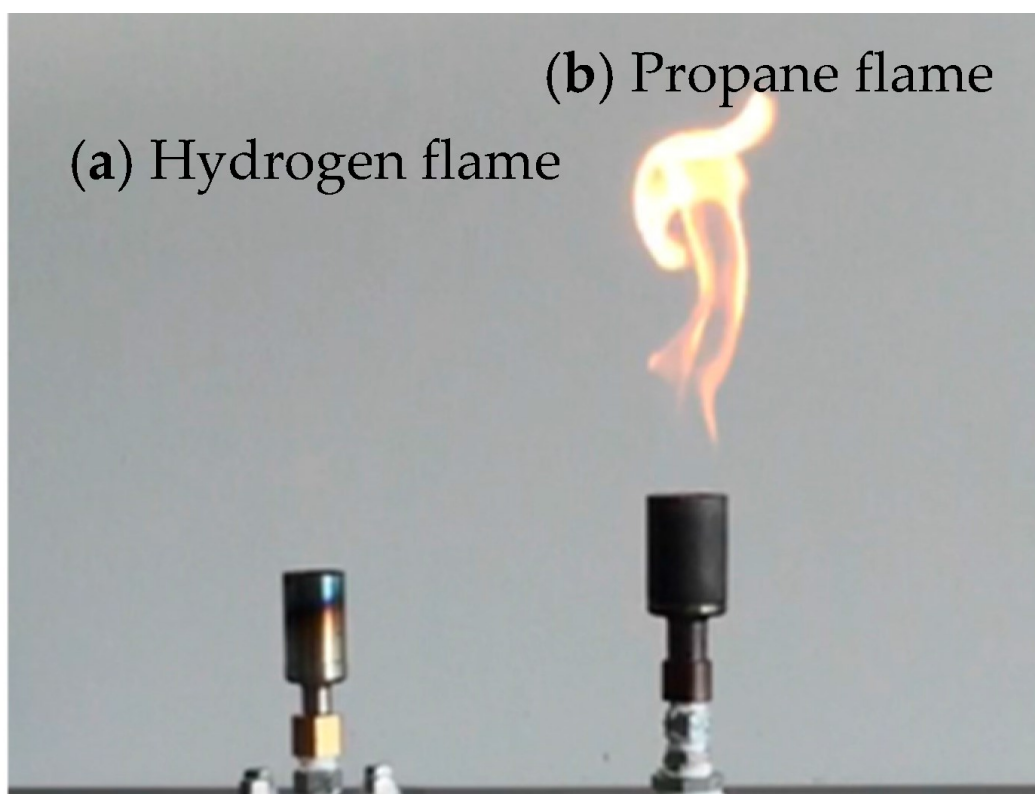
**Figura 5** Limiti di infiammabilità ed energia minima d'accensione

L'energia minima di accensione in senso pratico non è importante: basta una piccola scarica elettrostatica rilasciata dal corpo umano, che può raggiungere i 10 mJ, per accendere la miscela. Questo è un valore ben superiore a quello necessario per accendere tutti i tipi di combustibile considerati. Nella tabella seguente sono indicate le proprietà dell'idrogeno confrontate con quelle del metano e della benzina. L'idrogeno come già visto, tende a diffondersi rapidamente anche in aree chiuse, quindi è preferibile utilizzarlo in spazi aperti o in luoghi ben ventilati. Gli incendi sono difficili da individuare in quanto le fiamme create dalla combustione dell'idrogeno sono praticamente invisibili durante il giorno e irradiano poco calore; si utilizzano tecnologie che sfruttano i raggi ultravioletti ed infrarossi per individuarle durante il giorno.

Proprietà	Idrogeno	Metano	Benzina
Peso molecolare	2,016	16,043	~107,0
Punto di ebollizione normale NBP [K]	20,268	111,632	310÷478
Pressione critica [atm]	12,759	45,387	24,5÷27
Temperatura critica [K]	32,976	190,56	540÷569
Densità del liquido al NBP [g/cm <sup>3</sup> ]	0,0708	0,4226	~0,70*
Densità del vapore al NBP [g/cm <sup>3</sup> ]	0,00134	0,00182	~0,0045 <sup>2</sup>
Potere calorifico inferiore a 25°C [kJ/kg]	120000	50050	44000
Limiti di infiammabilità in aria [vol %]	4,0÷75,0	5,3÷15,0	1,0÷7,6
Energia minima di accensione in aria [mJ]	0,02	0,29	0,24
Diffusività in aria [cm <sup>2</sup> /s]	0,63	0,2	0,08

NBP = Punto normale di ebollizione; NTP=1 atm e 20°C; (\*) a 1 atm e 15,5°C

**Tabella 2.** Proprietà dell'idrogeno, metano e benzina



**Figura 6.** a) Fiamma d'idrogeno, b) Fiamma del propano

## 2. Produzione dell'idrogeno

Come abbiamo visto nel capitolo precedente, l'idrogeno non si trova allo stato puro in natura, ma solo all'interno di altre molecole ( $H_2O$ ,  $CH_4$  ecc..). Quindi è necessario fornire energia per poter rompere queste molecole, in modo da ottenere  $H_2$  pronto all'utilizzo energetico. Questa energia può essere ricavata sia da fonti rinnovabili che da fonti fossili. Lo sviluppo del vettore energetico richiede infrastrutture adeguate, per la produzione, il trasporto, lo stoccaggio, il confinamento della  $CO_2$  e l'utilizzo finale. Attualmente il principale metodo di produzione si ottiene dal cosiddetto Reforming del metano e in quantità minore per ossidazione parziale del petrolio (Diesel) e del carbone. Oggetto di studi e con buone prospettive future troviamo la gassificazione delle biomasse. Il problema di queste tecnologie è la produzione di sostanze inquinanti, cosa che non avviene nel caso di utilizzo di fonti nucleari, eoliche, solari e fotovoltaiche.

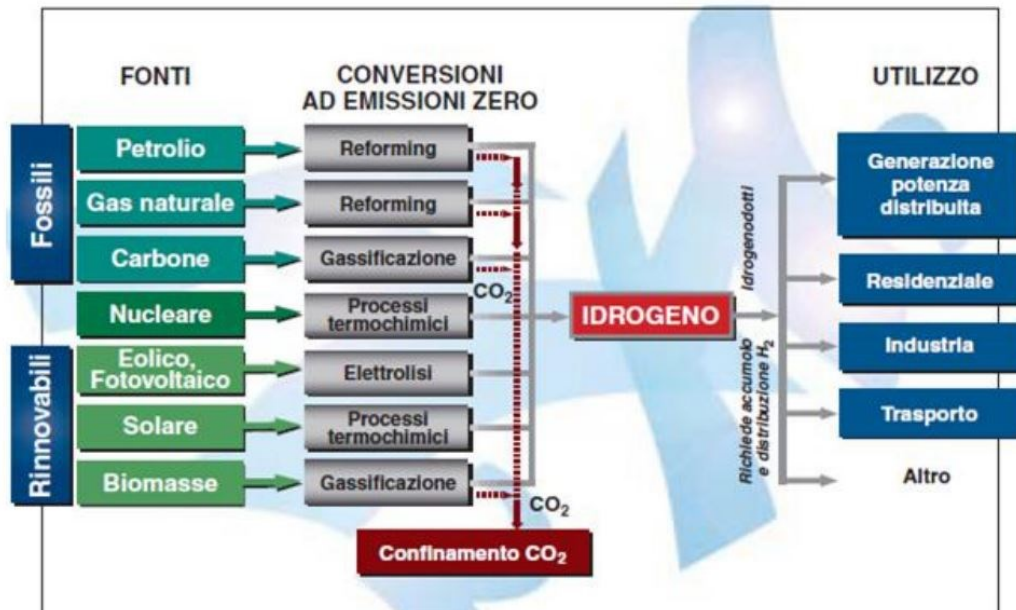


Figura 7. Produzioni e utilizzi dell'idrogeno

Nello schema precedente è rappresentata una sintesi dei vari processi di produzione del vettore energetico in questione, dove è facile evidenziare anche i vari usi e la

loro versatilità. Si nota facilmente che l'elettrolisi consente la produzione d'idrogeno tramite l'assorbimento d'energia elettrica, indipendentemente dalla fonte, con dei vantaggi evidenti lato emissioni nel caso si utilizzi energia proveniente da fonti rinnovabili. Un altro metodo di produzione da non sottovalutare è quello del reforming del metanolo, che nel settore automotive potrebbe ritagliarsi un ruolo importante. Nella tabella successiva vedremo la ripartizione della produzione d'idrogeno del 1999, con una quantità totale pari a 500 miliardi di normal metri cubi annui (Nm<sup>3</sup>/a).

<b>Fonte</b>	<b>[10<sup>9</sup> Nm<sup>3</sup>/a]</b>	<b>[10<sup>6</sup> t/a]</b>	<b>[%]</b>
Gas naturale	240	21,6	48
Petrolio	150	12,5	30
Carbone	90	8,1	18
Elettrolisi	20	1,8	4
Totale	500	45,5	100

**Tabella 3.** Fonti di produzione mondiale di idrogeno

La produzione da fonti fossili (anche la gassificazione delle biomasse), come già visto in precedenza, hanno uno svantaggio importante: l'emissione di ingenti quantità di CO<sub>2</sub>, che rilasciate in aria contribuirebbero in modo sostanziale all'effetto serra. Si utilizzano due metodi per confinarla:

- immissione negli acquiferi salini (cavità sotterranee contenenti acqua non utilizzabile per usi civili) o nei fondali oceanici a grandi profondità dove a causa delle elevate pressioni la CO<sub>2</sub> manterrebbe lo stato liquido;
- pompaggio dell'anidride carbonica nei giacimenti esauriti di petrolio e di gas naturale nel sottosuolo.

C'è un'altra produzione di circa 190 miliardi di normal metri cubi annui che deriva dal sottoprodotto dell'industria. Essa proviene dal processo di termocracking (un processo di raffinazione del petrolio), o dal processo di produzione del cloro tramite elettrolisi cloro-alcalina per ottenere il PVC. Vediamo ora più nel dettaglio il

metodo dello “Steam Reforming”, il più utilizzato per la produzione di idrogeno da fonti fossili.

## 2.1. Steam reforming

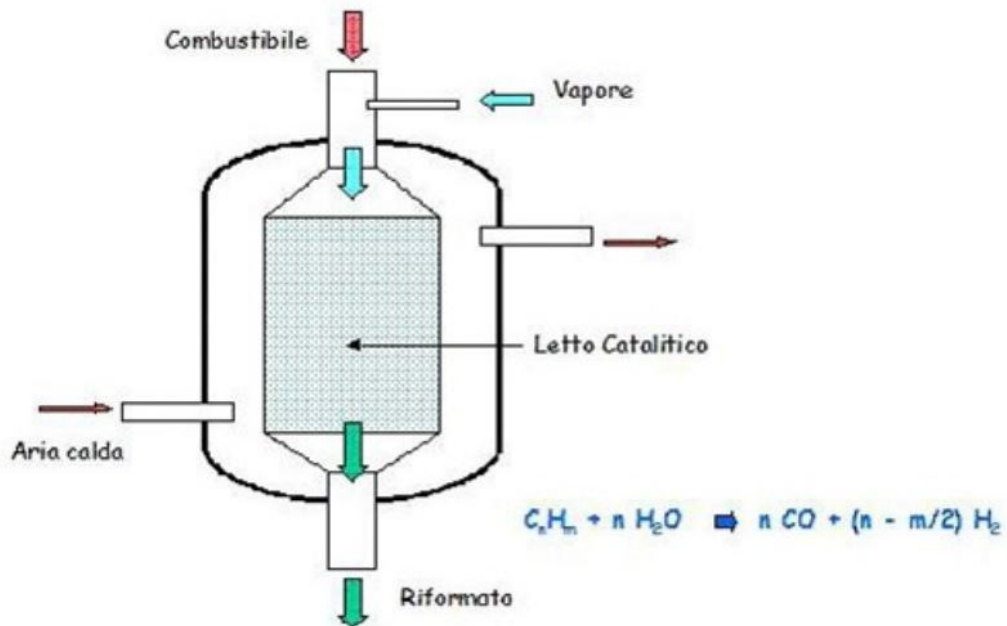
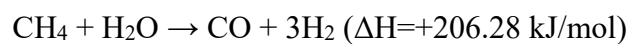


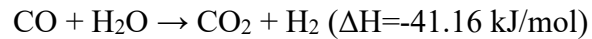
Figura 8. Schema impianto steam reforming

Circa il 50% dell'idrogeno prodotto al mondo viene ricavato dallo steam reforming del metano  $CH_4$ . Il Sistema è diffuso ovunque e si basa sulla sua reazione con il vapore acqueo.

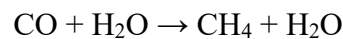
Come punto di partenza si utilizza il metano contenuto nel gas naturale. Questo processo consiste nella reazione chimica tra vapore d'acqua e metano alla temperatura di circa  $800^\circ C$  e ad una pressione di 2,5 Mpa in presenza di opportuni catalizzatori, di solito a base di nichel. La reazione ottenuta in questa prima fase è endotermica:



Il calore richiesto per l'attivazione della reazione è generalmente fornito dalla combustione di parte del metano. Nel secondo step la miscela contenente CO viene fatta reagire con altro vapore acqueo, a temperatura più bassa circa 400°C. In questa reazione si ottiene anidride carbonica ed ancora idrogeno. Viene definita shift reforming e viene rappresentata dalla reazione esotermica:



Si nota che dalla reazione appena citata si produce anidride carbonica che deve essere necessariamente eliminata. La "Metanizzazione" è il processo di eliminazione della CO<sub>2</sub> che consiste nella conversione di CO residuo e CO<sub>2</sub> in metano, in modo da poter ottenere un nuovo prodotto per produrre idrogeno (puro al 98%). La reazione chimica che avviene è:



Il rendimento totale del processo di steam reforming è di circa 65-70%, ma alcuni impianti innovativi raggiungono il 75-85%. Una versione migliorata dello steam reforming, denominata SER, produce l'idrogeno a temperatura più bassa. Il SER è abbinato ad un sistema di rimozione selettiva dell'anidride carbonica che elimina il costo dei sistemi di purificazione. Si stanno individuando nuovi materiali per l'assorbimento "on process" dello CO<sub>2</sub> prodotta da SER per facilitare il suo sequestro. I costi per produrre l'idrogeno per mezzo dello steam reforming sono minori di quelli degli altri sistemi di produzione del gas.

In conclusione, la spesa energetica media per produrre un Nm<sup>3</sup> di idrogeno con lo steam reforming è di circa 3,3-3,5 kWh (12-12,5 MJ).

## 2.2. Elettrolisi dell'acqua

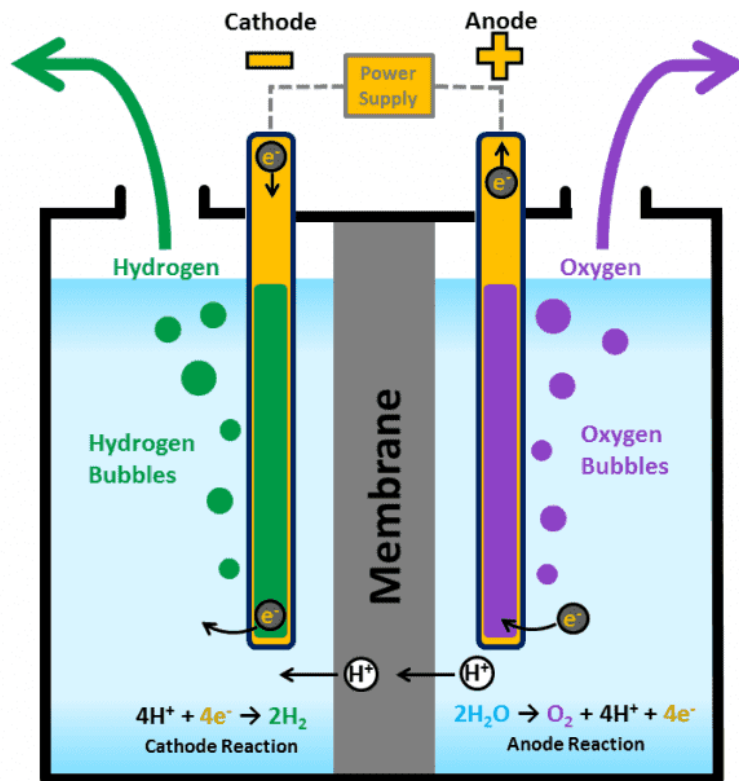
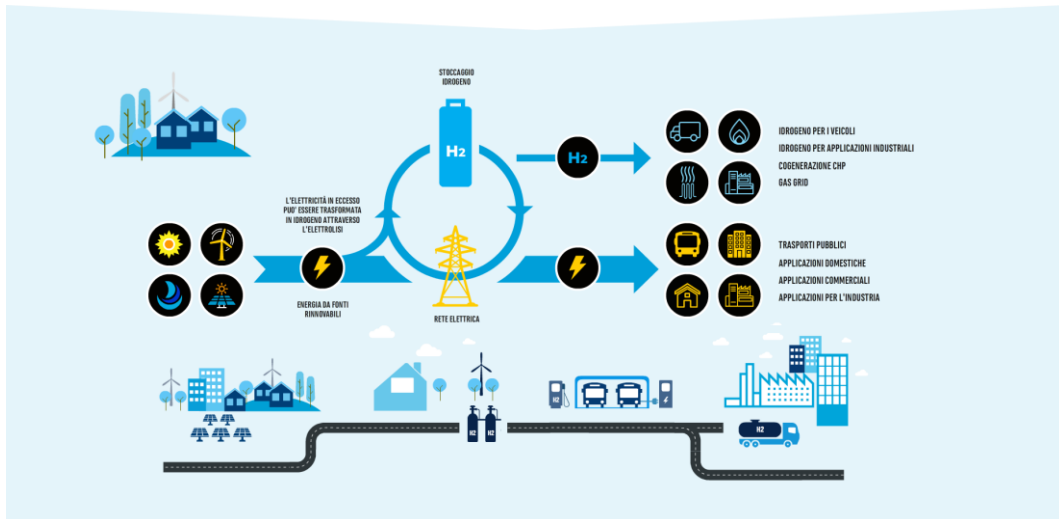


Figura 9. Elettrolisi dell'acqua

L'elettrolisi risulta essere molto interessante: partendo dalla molecola dell'acqua, il processo ottiene idrogeno in modo diretto e pulito senza produrre CO o CO<sub>2</sub> che andrebbero smaltiti. Per ora questa tecnologia contribuisce solo per il 5% della produzione mondiale di idrogeno. Nell'acqua vengono immersi due elettrodi uno positivo ed uno negativo. Il flusso di elettroni, che coincide con l'elettricità fornita al sistema, entra nella cella dell'elettrodo negativo e attraversa la soluzione acquosa che, svolge la funzione di elettrolita. Sotto l'azione del campo elettrico generato dagli elettrodi, l'idrogeno e l'ossigeno della molecola dell'acqua si separano chimicamente, diventano ioni e vengono divisi da un diaframma microporoso che può essere attraversato solo da ioni. L'idrogeno si accumula quindi dalla parte del catodo e l'ossigeno da quella dell'anodo. L'acqua consumata durante il processo di elettrolisi deve essere continuamente reintegrata. L'elettrolisi è un processo che richiede energia perché la divisione della molecola dell'acqua si ha grazie alla



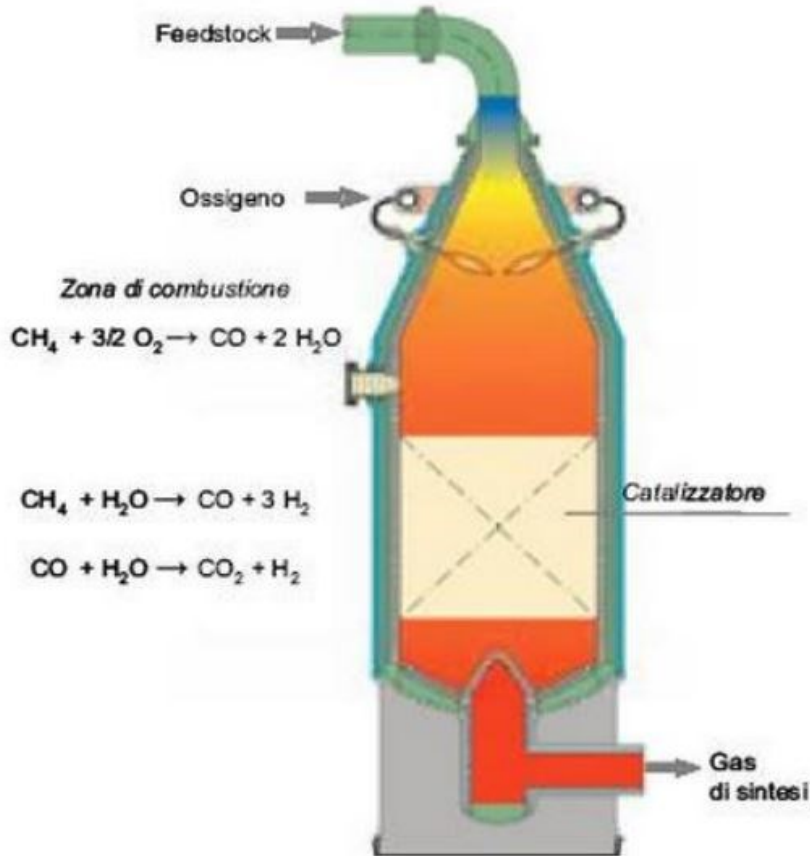
corrente elettrica che viene utilizzata nel processo. Il vero vantaggio dell'elettrolisi consiste nel produrre l'idrogeno praticamente puro nello stesso luogo di utilizzo, o di generarlo in un dato luogo e portarlo successivamente dove serve. La ricerca applicata sta andando verso la direzione d'ottimizzare dell'elettrolisi in modo da migliorarne il rendimento e contenere la spesa energetica per sostenerla.



**Figura 10.** Schema produzione e utilizzo dell'idrogeno da fonti rinnovabili

Per prima cosa si sta cercando di ottimizzare i materiali con cui si realizzano gli elettrodi, cercando così di facilitare i flussi di corrente all'interno di essi e ridurre le perdite elettriche. Altri studiosi stanno concentrando i loro sforzi per effettuare il processo ad una temperatura più alta (900°-1000°) per facilitarne la reazione elettrolitica e aumentarne anche la velocità. Questo porta ad un incrementando del rendimento di un 30% rispetto a quello standard. Ma il vero asso nella manica dell'elettrolisi è che può sfruttare la corrente elettrica prodotta da fonti rinnovabili (eolico, solare-fotovoltaico, idroelettrico, geotermico) per produrre idrogeno ad impatto ambientale zero. Ad esempio, si potrebbero sfruttare le centrali idroelettriche, che nel momento di una richiesta di energia più bassa dalla rete, possono dedicare parte della loro energia prodotta alla produrre dell'idrogeno tramite elettrolisi, producendolo in modo completamente pulito.

### 2.3. Ossidazione parziale di idrocarburi (POX) (ATR)



**Figura 11.** Processo di ATR (reforming autotermico)

Questo processo avviene ad una temperatura più elevata di quella dello steam reforming. Nonostante la sua efficienza si attesta solo intorno al 50%, risulta un processo interessante perché viene prodotta anche una certa quantità di nerofumo che può essere utilizzato per produrre alcuni tipi di gomma per pneumatici.

Nel caso in cui si parta dal metano, l'efficienza del processo diminuisce e non supera il 35%. Per ora nel mondo solo Shell, Exxon e Texaco possiedono impianti di grandi dimensioni per l'ossidazione parziale. La tecnologia POX è interessante perché viene utilizzata in ambito veicolare dai piccoli reformer, che ottengono l'idrogeno dai combustibili presenti nella rete di distribuzione come metanolo, etanolo, benzine, biomasse e altri liquidi di origine vegetale. Se si combina lo steam

reforming con la reazione di ossidazione parziale è possibile ottenere l'idrogeno senza dover aggiungere combustibile dall'esterno. Tale processo combinato si chiama reforming autotermico (ATR).

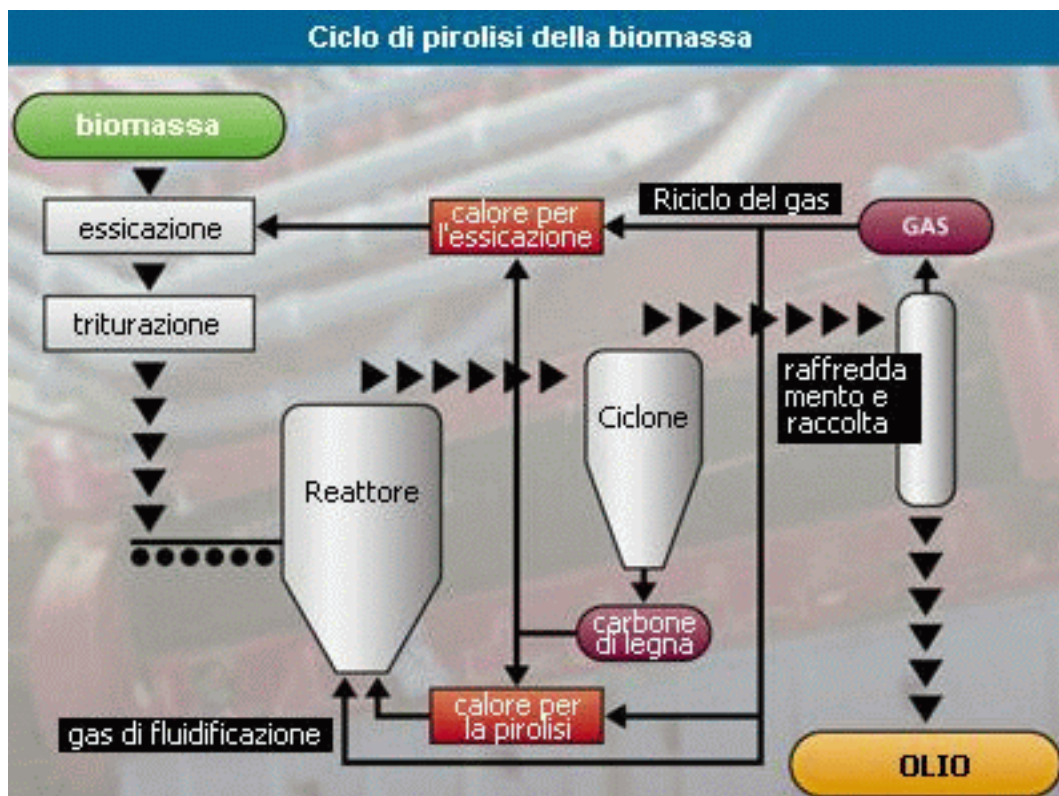
## **2.4. Gassificazione del carbone**

Consiste nella ossidazione parziale del carbone, che prima viene opportunamente ridotto in polvere e poi trasformato in un combustibile gassoso. Questo gas viene poi trasformato chimicamente in una miscela costituita da idrogeno e ossido di carbonio che viene trattata per isolare e purificare l'idrogeno. Le reazioni dei processi di gassificazione del carbone avvengono a temperature da 400°C a oltre 1200°C e utilizzano ossigeno o aria e vapore. Rispetto allo steam reforming del metano, questa tecnologia è meno diffusa. Essa è adottata soprattutto in Cina ed in Sud Africa dove la disponibilità di carbone è elevata.

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

Un metodo innovativo per la produzione d'energia è quello di ricavarla dai prodotti derivati dal trattamento delle biomasse originate dai rifiuti urbani, industriali e dalle sostanze di scarto della produzione agricola e zootecnica. Il 10% dell'energia mondiale viene prodotta dalle biomasse. Gli impianti italiani per la produzione di energia elettrica da biomasse sono oltre 45 e sviluppano una potenza totale installata di circa 1200MW. Le centrali di questo tipo si chiamano termovalorizzatori e bruciano soprattutto i rifiuti urbani. Sono impianti messi un po' in discussione perché non sempre smaltiscono i rifiuti in modo ecologicamente controllato. L'elettricità prodotta da questo processo può essere sfruttata anche per produrre idrogeno in modo localizzato per elettrolisi. È anche possibile ottenere il gas direttamente dalle biomasse come prodotto collaterale del processo di combustione e pirolisi. Le molecole delle sostanze contenute nelle biomasse sono formate dall'idrogeno legato con il carbonio. La pirolisi (piro=fuoco lisi=interrompere

quindi traducendo letteralmente significa dividere il fuoco) è un processo di gassificazione analogo a quello del carbone, che avviene ad elevate temperature circa 900°C. Le molecole delle sostanze organiche vengono spezzate negli elementi semplici che le costituiscono e si formano vari tipi di gas, fra cui l'idrogeno. La percentuale di idrogeno contenuta nelle biomasse, è di circa il 7%, quindi molto inferiore a quella contenuta nel gas naturale.



**Figura 12.** Produzione d'energia dalle biomasse

## 2.6. Processi fotobiologici

I processi fotobiologici si basano sull'attitudine di alcune alghe e batteri di produrre idrogeno in certe condizioni. Queste alghe, esposte al sole, assorbono l'energia solare attraverso dei pigmenti e grazie ad un enzima presente nelle loro cellule (idrogenasi), scindono l'acqua in idrogeno e ossigeno. L'efficienza di questi sistemi biologici fra i quali il più noto è il "Rhodospirillum rubrum", è intorno al 5%.

La ricerca genetica sta spingendo verso la separazione di ceppi di alghe con idrogenasi non condizionata dalla presenza di ossigeno (che di norma inibisce l'enzima) per trovare specie che possano durare per un periodo intorno ai 20-30 giorni, contro i circa 10 giorni delle specie attuali.

## **2.7. Processi fotoelettrochimici**

I sistemi fotoelettrochimici impiegano elettrodi semiconduttori per trasformare in modo diretto l'energia solare in idrogeno. Essi ottengono idrogeno illuminando un sistema di semiconduttori con la luce solare. Normalmente questi tipi di celle vengono messe alla luce del sole e allo stesso tempo “bagnate” con acqua. Per effetto dell'energia solare assorbita dai materiali semiconduttori, si attiva una circolazione di corrente che spezza la molecola dell'acqua in idrogeno e ossigeno. I risultati delle sperimentazioni più recenti indicano un'efficienza di conversione dell'energia solare in idrogeno del 12%.

## **2.8. Sistemi avanzati a membrana ceramica**

Infine, sono in fase di studio piccoli impianti di recente concezione che estraggono idrogeno partendo dal gas naturale, da utilizzare per i veicoli. Il sistema ITM (Ion Transport Membrane) permette di ottenere una miscela gassosa di idrogeno e CO direttamente dal gas naturale a costi contenuti. Il processo utilizza delle membrane di ceramica che sono in grado di separare l'ossigeno dall'aria e di convertire il gas naturale in idrogeno. L'aria viene pre-riscaldata a più di 600°C ed attraversa un reattore che separa l'ossigeno e lo convoglia verso un reticolo cristallino. L'ossigeno reagisce con i catalizzatori del reformer e favorisce la produzione della miscela di gas finale formata da idrogeno misto a CO. Essa viene poi purificata dal CO e l'idrogeno viene isolato. Il sistema è in fase di ottimizzazione per migliorare il processo di purificazione della miscela di gas contenente idrogeno e si stanno testando materiali per la membrana attiva più efficaci.

## 2.9. Il problema della purificazione dell'idrogeno

Per utilizzare l'idrogeno come combustibile per i sistemi stazionari e veicolari a fuel cells, esso deve essere sempre purificato perché la presenza di impurità riduce rapidamente l'efficienza delle celle a combustibile e ne accorcia anche la vita. Il processo di purificazione va effettuato prima che l'idrogeno venga compresso o liquefatto. Esistono sistemi di purificazione che agiscono già nelle fasi di produzione dell'idrogeno. Questi sistemi eliminano dall'idrogeno le impurità residue dovute ai processi scelti per produrlo. La purezza quasi assoluta dell'idrogeno si ottiene con il metodo dell'assorbimento a pressione discontinua PSA, basata sul passaggio dell'idrogeno attraverso materiali, normalmente a base di zeolite, che assorbono gas come l'anidride carbonica ( $\text{CO}_2$ ) e il monossido di carbonio (CO). L'idrogeno può essere purificato anche facendolo interagire con un filtro ai carboni attivi oppure con un reticolo di molecole di carbonio, che reagendo con i residui, lasciano passare solo il gas puro. La pressione viene regolata in funzione della purezza desiderata del gas in uscita. Ad intervalli regolari occorre rigenerare il filtro tramite una pulizia diretta. La ricerca avanzata si propone di utilizzare materiali molto più efficienti in modo da contenere i costi della purificazione dell'idrogeno. In particolare, si stanno studiando materiali speciali, di costo inferiore, per la realizzazione delle membrane di filtraggio.

### **3. Stoccaggio e distribuzione**

L'idrogeno può essere trasportato e accumulato in tre diverse forme: gassosa, liquida o adsorbito in materiali speciali ("adsorbimento" significa che un gas può diffondersi nel reticolo cristallino, precisamente negli spazi interstiziali di alcuni metalli e reagire reversibilmente con i loro atomi formando idruri metallici). A seconda del caso preso in esame si tende a preferire una forma ad un'altra, dato che ognuna presenta dei vantaggi ma anche degli svantaggi. Il problema richiede perciò ancora degli studi approfonditi per l'utilizzo su larga scala; facciamo l'esempio di una rete per il rifornimento delle automobili. Innanzitutto, è necessario:

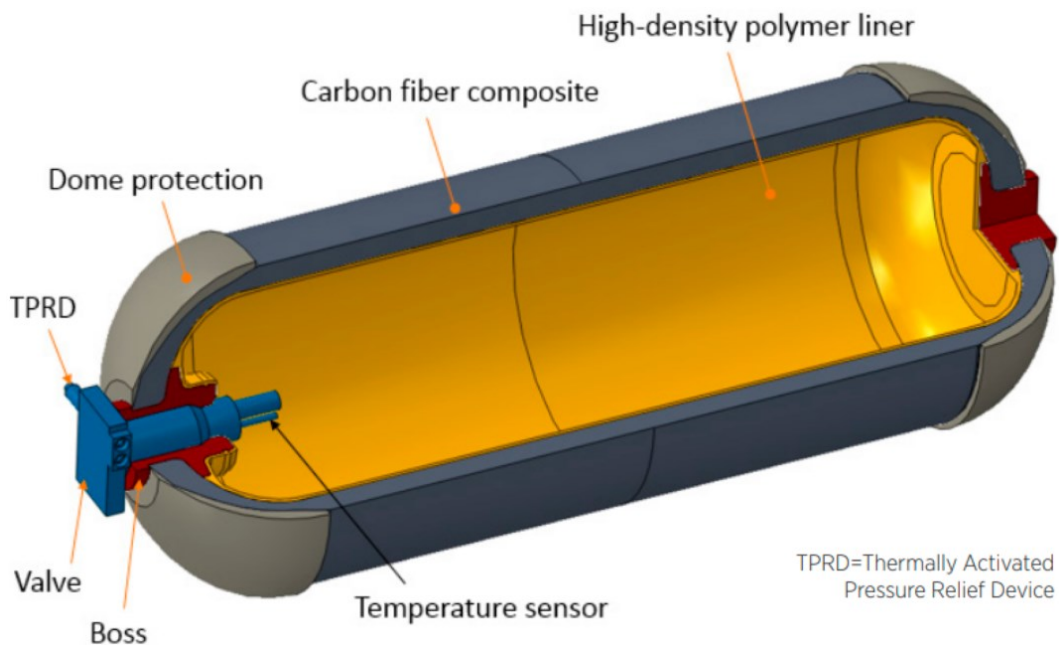
- poter operare a temperatura e pressione ambiente con piccole perdite;
- possedere grandi capacità di stoccaggio con volumi ridotti;
- avere delle tempistiche di rifornimento accettabili e garantire la sicurezza anche in caso di urti o incidenti.

I metodi che si utilizzano sia per applicazioni stazionarie che per gli autoveicoli sono la compressione, la liquefazione e l'utilizzo di idruri metallici. La fase di stoccaggio richiede sempre l'impiego di compressori per portare l'idrogeno al valore di pressione più adatto per il sistema di accumulo. Per il calcolo dell'efficienza dell'impianto totale andrà quindi presa in considerazione anche l'efficienza del compressore.

#### **3.1. Compressione**

È il metodo più semplice ed economico per immagazzinare l'idrogeno in forma gassosa, ma ha un grosso svantaggio: la bassa densità di energia per unità di volume di questo gas. Per aumentare tale densità si ricorre ad elevati valori di compressione, portando la pressione tra i 200 e i 250 bar. Moderni serbatoi realizzati in alluminio rinforzato con fibre di carbonio possono sopportare anche pressioni di 700 bar.

Più elevate sono le pressioni più le caratteristiche meccaniche del serbatoio devono essere adeguate, questo comporta ad un aumento sostanziale del peso, perdendo quindi il vantaggio del ridotto peso dell'idrogeno (il serbatoio rappresenta il 90% del peso del sistema). Per garantire un'autonomia soddisfacente e delle prestazioni adeguate, è necessario riuscire ad imbarcare dai 2 ai 4 kg. Per esempio, 4 kg di idrogeno a 700 bar sono contenuti in un serbatoio di 100 litri di volume geometrico, che occupa uno spazio ragionevole a bordo di un veicolo. L'incidenza maggiore dei costi di stoccaggio di questo processo è rappresentata dalla spesa di energia necessaria per la compressione. La sicurezza del sistema solitamente è molto elevata grazie alla robustezza dei serbatoi, all'introduzione di fusibili antiscoppio che si attivano in caso di incendio e di valvole di interruzione del circuito che agiscono in caso di urto. Per la compressione si usano tre tipi di compressori: alternativi a pistoni, rotanti e turbomacchine.

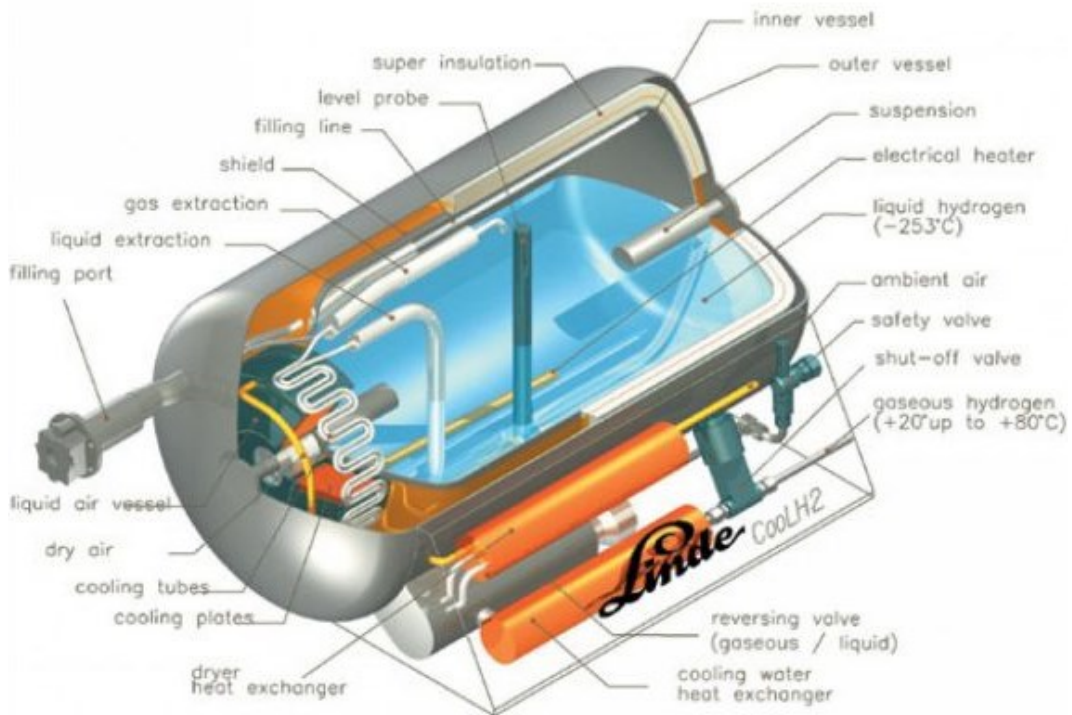


**Figura 13.** Bombola d'idrogeno d'ultima generazione



### 3.2. Idrogeno allo stato liquido

L'idrogeno allo stato liquido è un gas stabile alla temperatura di  $-253^{\circ}\text{C}$ , quindi per poter essere conservato, è necessario mettere a punto dei serbatoi speciali, chiamati criogenici (generatori di freddo), caratterizzati da una doppia parete, con un'intercapedine, nel quale viene fatto il vuoto.



**Figura 14.** Serbatoio per idrogeno liquido (Linde)

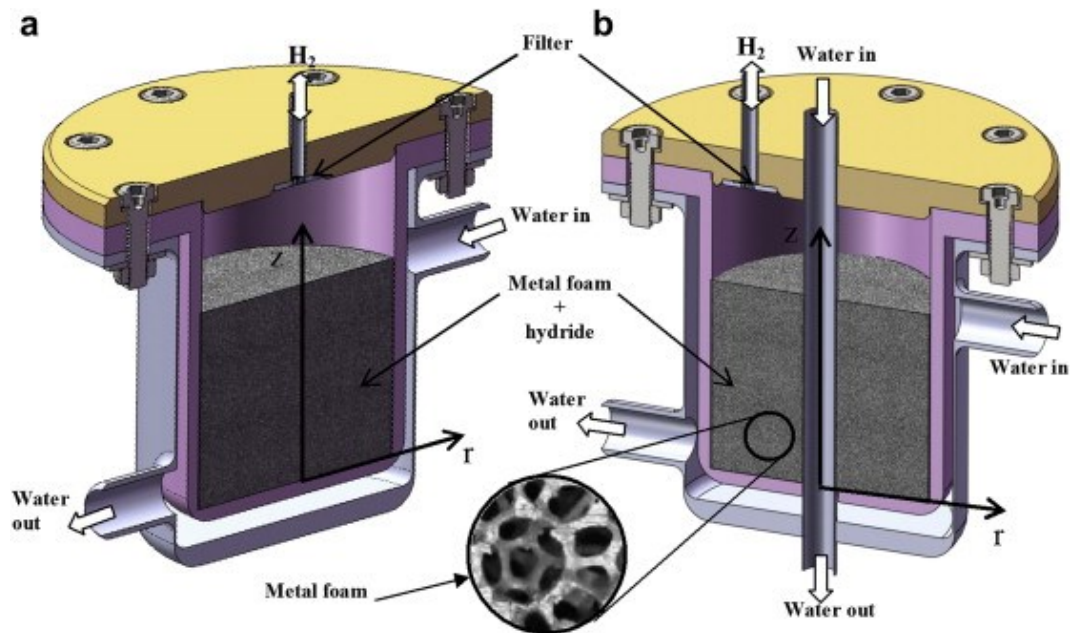
L'accumulo in forma liquida è forse la tecnologia che oggi meglio soddisfa le esigenze specifiche dell'automotive, perchè a parità di ingombro geometrico del serbatoio, permette di trasportare una quantità di energia nettamente superiore rispetto allo stato gassoso, riducendo il problema legato alla bassa densità. Questa tecnologia però ha dei limiti. È necessaria una maggiore complessità tecnologica per la gestione dell'idrogeno liquido, non solo a bordo del veicolo ma anche a terra, per la distribuzione e il rifornimento ed ha dei costi di gestione maggiori rispetto

alla soluzione “a idrogeno compresso”. Anche il costo energetico della liquefazione è considerevole: si stima che la spesa di energia per la liquefazione dell'idrogeno corrisponda a quasi il 30% del contenuto energetico del combustibile, rispetto al 6-8% per l'idrogeno compresso (a 350 bar). Bisogna aggiungere anche le perdite per evaporazione, provocate da un qualsiasi innalzamento, anche minimo, della temperatura interna. Recentemente l'architettura di speciali contenitori criogenici isolati termicamente ha risolto quasi del tutto questo problema. A parità di energia accumulata l'idrogeno liquido occupa più spazio di tutti gli altri combustibili (3,8 volte più della benzina) e pesa meno di tutti gli altri combustibili (2,7 volte meno della benzina). Ma questo vantaggio per le automobili viene annullato a causa del peso del super isolamento che si applica ai piccoli serbatoi per ridurre al minimo le perdite d'evaporazione. Alcuni modelli della BMW serie 7 a combustione interna, opportunamente modificati per essere alimentati ad idrogeno, utilizzano questi speciali serbatoi per immagazzinare il combustibile.

### **3.3. Idruri metallici**

Lo stoccaggio dell'idrogeno tramite idruri metallici si basa sulla sua proprietà di venire adsorbito nel metallo, formando dei legami chimici deboli: il gas penetra all'interno del reticolo cristallino, andando ad occupare gli spazi interatomici del metallo. Si tratta di un serbatoio contenente il materiale metallico in polvere per massimizzare la superficie di assorbimento. Ovviamente il composto risulta molto pesante per via degli idruri metallici, che nel caso di applicazioni mobili comporta ad un aumento dei consumi. Si può raggiungere a parità di volume una densità di idrogeno maggiore di quella del caso dello stoccaggio a liquido. Gli idruri metallici sono ottenuti con leghe di alluminio, magnesio, ferro o lantanio con all'interno dei composti (nichel, vanadio, titanio, cromo, terre rare) in grado di assorbire idrogeno nello spazio interatomico. Il processo di carica-rilascio è reversibile e si ottiene fornendo o asportando calore al sistema e variando la pressione. Normalmente la cinetica dei processi, ad esempio la velocità di rilascio dell'idrogeno, viene controllata regolando la quantità di calore trasferito all'idruro.

Il caricamento di un idruro è un processo esotermico e avviene aumentando la pressione del gas tramite un compressore, mentre il rilascio dell'idrogeno avviene con la somministrazione di calore all'idruro e diminuendo la pressione. Questo sistema risulta interessante per un uso automobilistico, in quanto non presenta particolari problemi dovuti alla sicurezza.



**Figura 15.** Sezione serbatoio ad idruri metallici

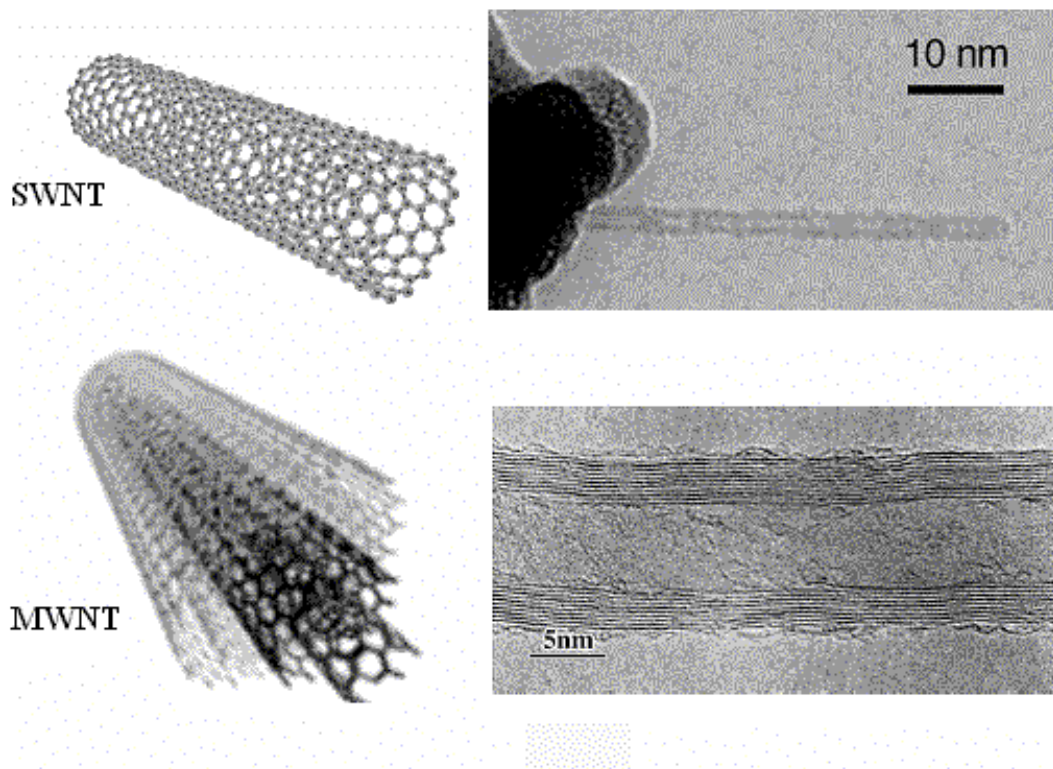
### 3.4. Altri metodi

Esistono altri metodi di stoccaggio che andremo solo ad accennare, in quanto trovano poco spazio in utilizzi automobilistici, ma di cui bisogna saperne l'esistenza. Il primo metodo che andremo a vedere è quello delle sfere speciali a reazione chimica. L'idrogeno viene trattenuto in sfere di plastica che contengono idruro di sodio ( $NaH$ ) in polvere. Quando queste sfere vengono rotte nell'acqua, la polvere di sodio reagisce chimicamente e viene rilasciato idrogeno, mentre il sodio viene recuperato sotto forma di idrossido di sodio. Per produrre 1 kg di  $H_2$  sono

necessari 12 kg di polvere di NaH; il rapporto tra l'idrogeno contenuto nelle sfere e il volume che esse occupano è paragonabile al metodo degli idruri metallici.

Il secondo metodo che affrontiamo è quello delle microsfele di cristallo: piccole sfere vuote di diametro molto piccolo (30-500 micron) e spessore di circa un micron. Portando queste sfere ad alta temperatura diventano permeabili e riescono ad assorbire l'idrogeno. Una volta raffreddate a temperatura ambiente possono essere trasportate e quando vi è la necessità di estrarre il gas vengono riportate ad alta temperatura. Possono essere riutilizzate più volte.

Il terzo metodo sfrutta delle nanostrutture di carbonio che si ottengono partendo dalla grafite, modificando opportunamente la disposizione degli atomi di carbonio, ottenendo particolari strutture simili a dei fogli ripiegati su sé stessi, dotati di interessanti caratteristiche. Le due strutture più interessanti sono i nanotubi e le nanofibre.



**Figura 16.** Nanotubi di carbonio

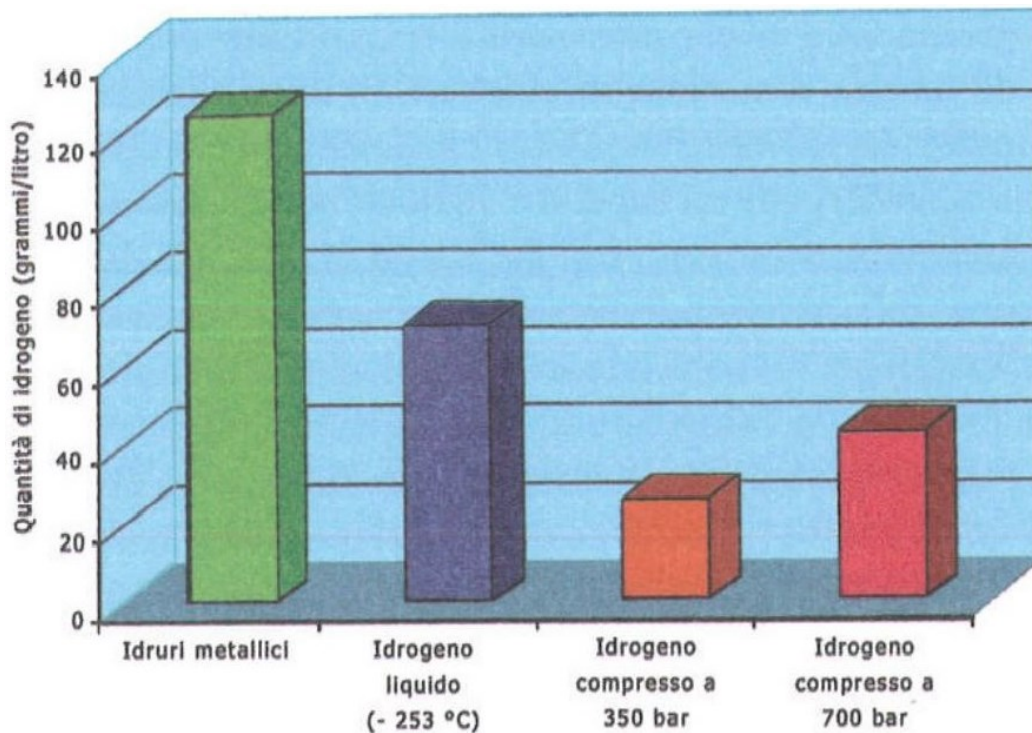
I primi sono insiemi di atomi dalla forma molto allungata e dimensioni di qualche micron, che hanno la proprietà di assorbire l'idrogeno a temperatura ambiente. Le nanofibre possono assorbire idrogeno con facilità e in quantità elevata, ma sono formate da materiali derivati dalla decomposizione di miscele contenenti idrocarburi. Queste due ultime tecnologie sembrano essere le più promettenti per un utilizzo veicolare, ma occorre risolvere ancora diversi problemi di gioventù e risultano acerbe.

Infine, vi sono gli idruri chimici, che vengono utilizzati principalmente per periodi di stoccaggio stagionali lunghi (>100 giorni). Si sfrutta una reazione reversibile di idrogenazione usando composti liquidi a temperatura e pressione ambiente. Tipicamente si usano metanolo, ammoniaca e metilcicloesano ottenuto dal toluene.

### **3.5. Valutazioni finali sui sistemi di stoccaggio**

L'individuazione del metodo migliore per immagazzinare l'idrogeno deve tenere conto di numerosi aspetti: l'utilizzo che si deve fare del gas, la quantità di energia per volume richiesta da un determinato impiego, i volumi disponibili, la vita in esercizio dei sistemi di accumulo, la durata dell'immagazzinamento, i problemi di sicurezza ed infine i costi. Il parametro fondamentale è la densità d'energia. I serbatoi a idruri di metallo per ora non appaiono ancora adatti per le applicazioni veicolari perché richiedono una corretta gestione del calore ed hanno ancora un peso molto elevato in relazione alla quantità di idrogeno immagazzinabile, mentre sono già indicati per le applicazioni stazionarie. Invece per trasportare una quantità di idrogeno relativamente bassa ad oggi si ricorre alla tecnologia di compressione. Quest'ultima è meno costosa rispetto all'idrogeno liquefatto e non presenta il problema delle perdite per evaporazione del gas. Essa però presenta dei rischi dovuti all'elevata pressione ed alle eventuali perdite di gas in caso di cricche o fessurazioni dei serbatoi. L'orientamento delle case automobilistiche è quello di stoccare l'idrogeno a bordo allo stato gassoso in pressione (da 300 a 700 bar). Qualche prototipo prevede invece l'accumulo del gas allo stato liquido.

Quest'ultima soluzione è stata adottata come già visto anche dalla BMW per le proprie vetture a idrogeno a combustione interna della serie 7.



**Figura 17.** Confronto a parità di volume geometrico della quantità di idrogeno immagazzinabile dalle diverse tecnologie

### 3.6. Distribuzione

Per la distribuzione dell'idrogeno ci si affida all'utilizzo degli idrogenodotti o al trasporto in serbatoi mobili su autotreni o treni, entrambe risultano valide tecnologie ma costose; quindi, si valuta attentamente caso per caso quale sia la soluzione migliore da applicare. Nel caso di un trasporto tramite serbatoi mobili il problema principale è il peso, in quanto come già detto in precedenza l'idrogeno compresso nelle bombole rappresenta solo una piccola percentuale del peso totale. Si utilizza solo per il trasporto di piccoli volumi di gas. Gli autotreni contenenti bombole d'acciaio trasportano idrogeno a pressioni tra i 15 e i 40 MPa.



**Figura 18.** Autotreno allestito per il trasporto d'idrogeno gassoso



**Figura 19** Autotreno allestito per il trasporto di idrogeno liquido

Gli idrogenodotti hanno una struttura molto simile a quella dei gasdotti, con alcune differenze nell'utilizzo del materiale impiegato e nei criteri di progettazione delle stazioni di pompaggio. L'idrogeno ha la proprietà di infragilire gli acciai portandoli a rottura. Vengono perciò scelti acciai al cromo o al molibdeno che hanno una migliore resistenza. Altre due differenze riguardano l'utilizzo di valvole adeguate e di una maggiore energia di compressione, dovute alla minore densità e alla maggiore diffusività dell'idrogeno rispetto al gas naturale. Nell'Europa del nord ci sono circa 1500 km di idrogenodotti, negli USA vi sono complessivamente 2000 km. Per il trasporto non si prendono in considerazione gli idruri metallici a causa del loro peso elevato. Nel caso del trasporto di idrogeno liquido le reti sono particolarmente costose e sono state utilizzate solo per applicazioni spaziali. L'idrogeno liquido non forma idruri metallici per via della bassa reattività chimica dovuta alle bassissime temperature, che causano inoltre l'infiammazione dei metalli. Si utilizzano quindi speciali leghe di alluminio, acciai a basso tenore di carbonio e acciai inossidabili, con buona duttilità a basse temperature.

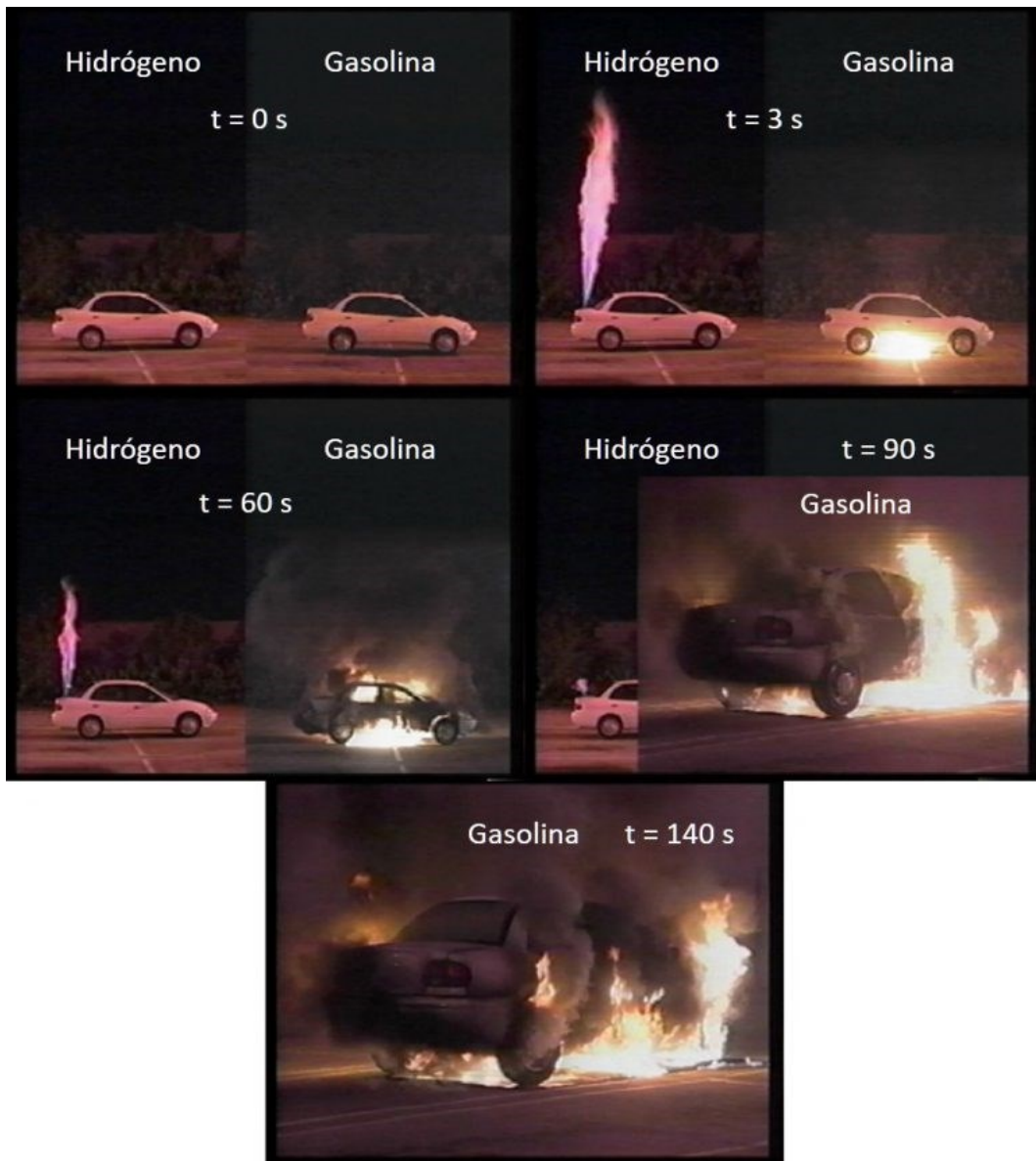


**Figura 20.** Idrogenodotto tra Germania-Norvegia in costruzione (03/2022)



### 3.7. La sicurezza

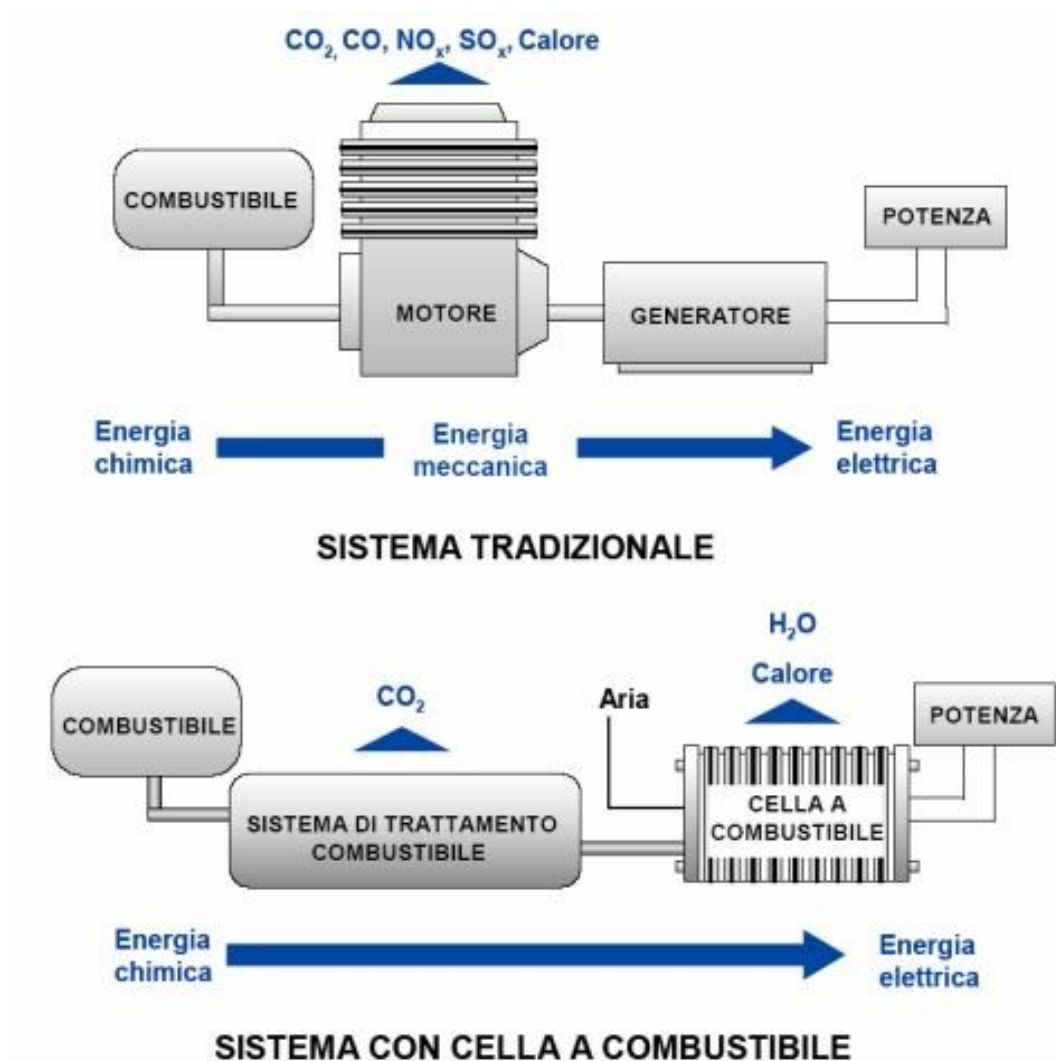
Dopo aver visto le proprietà dell'idrogeno nel capitolo precedente, è facile dedurre che il pericolo maggiore nello stoccaggio è rappresentato da eventuali incendi o detonazioni. L'idrogeno non è comunque più pericoloso di un qualsiasi altro combustibile. Una scintilla anche a basso valore di energia provoca l'accensione di qualsiasi tipo di combustibile, quindi l'innescò è un problema comune. Anche per questo gas, prendendo le adeguate precauzioni tramite sensori e sistemi di controllo continuo, si possono raggiungere livelli di sicurezza alla pari dei combustibili tradizionali. Esso tende a diffondersi rapidamente in luoghi aperti e quindi è molto difficile che si verifichino le condizioni per la detonazione; in ogni caso per evitare il rischio si installano nei veicoli dei sensori che ne rilevano l'eventuale presenza nell'abitacolo e se necessario vengono aperti i finestrini, permettendo così all'idrogeno di fuoriuscire in tempi brevi e in sicurezza. L'idrogeno non è un gas tossico, quindi in caso di fuoriuscita di gas e dispersione nell'atmosfera non vi è alcun pericolo di inquinamento. La sua temperatura di autoaccensione è di 550°C ed è meno infiammabile delle benzine che si autoaccendono fra i 230 e i 500°C. La combustione dell' $H_2$  tende a svilupparsi verso l'alto, perché l'idrogeno è più leggero dell'aria, a differenza della benzina, gpl, gasolio e metano che essendo più pesanti tendono a disporsi sotto il mezzo. In caso di incendio di un veicolo ad idrogeno, esso si esaurisce in uno o due minuti, con un volume di incendio ridotto; mentre nel caso dei combustibili tradizionali l'incendio interessa tutto il veicolo e può durare anche 20-30 minuti. La bassa radiazione termica fa sì che esistano poche possibilità che materiali vicini vengano incendiati.



**Figura 21.** Confronto fra incendio di un'auto ad idrogeno vs benzina

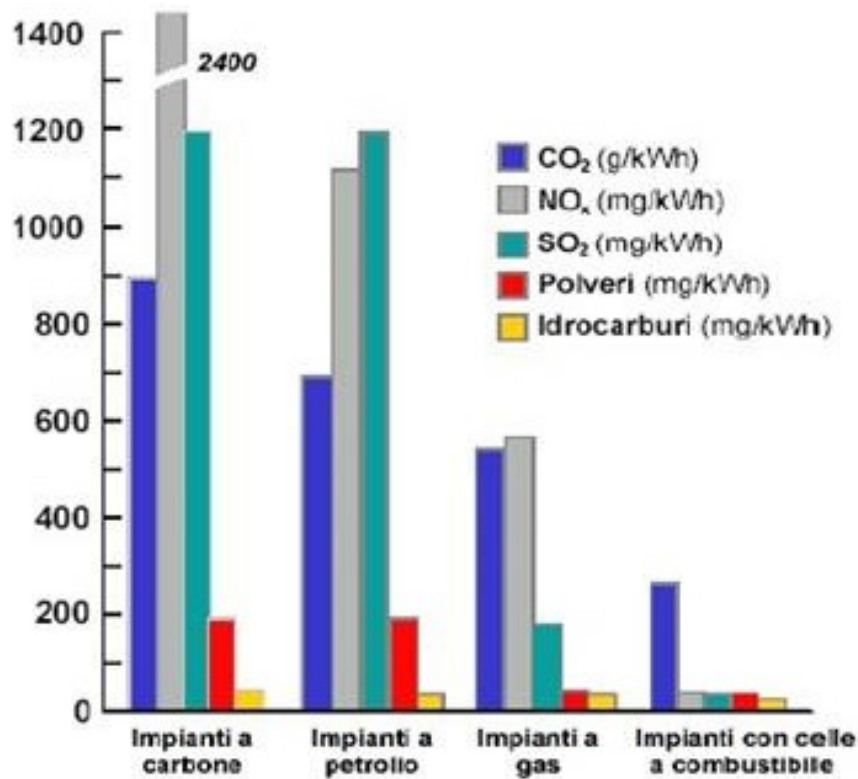
## 4. L'utilizzo dell'idrogeno e fuel cells

L'idrogeno nell'ambito dei trasporti viene utilizzato come combustibile per la produzione di energia elettrica. Esistono già impianti centralizzati per la produzione di energia elettrica e motori a combustione interna alimentati ad idrogeno, con emissioni molto minori degli impianti convenzionali.



**Figura 22.** Confronto fra un sistema tradizionale e un sistema con cella a combustibile

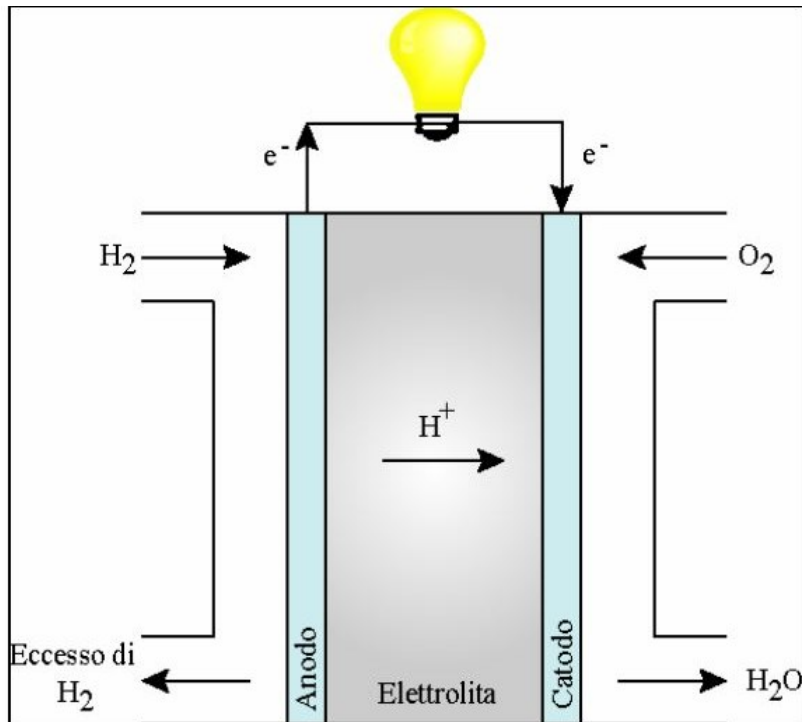
Questo vettore energetico diventa davvero interessante quando si parla di produzione elettrica attraverso un processo elettrochimico chiamato “celle a combustibile”, ad emissioni zero e in grado di funzionare finché al sistema viene fornito combustibile e ossidante per continuare le reazioni. Per ottenere generatori dalla potenza richiesta superiore a quella di una singola cella, possiamo combinare in “stack” più celle e a loro volta combinarle in moduli. Si ottiene così un dispositivo ad elevata efficienza di conversione energetica, flessibile nell’uso dei combustibili, silenzioso nel funzionamento e con basse emissioni.



**Figura 23.** Emissioni dei diversi impianti

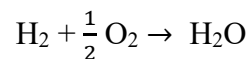
Si vede dalla figura 23 che negli impianti a celle a combustibile le uniche emissioni che si devono “controllare” sono quelle di anidride carbonica, prodotte dal sistema di trattamento del combustibile; ma come abbiamo visto anche nei capitoli precedenti la CO<sub>2</sub> si può “sequestrare”. Vediamo ora nel dettaglio questi dispositivi, in quanto sono di fondamentale importanza nel campo automobilistico.

## 4.1. Celle a combustibile



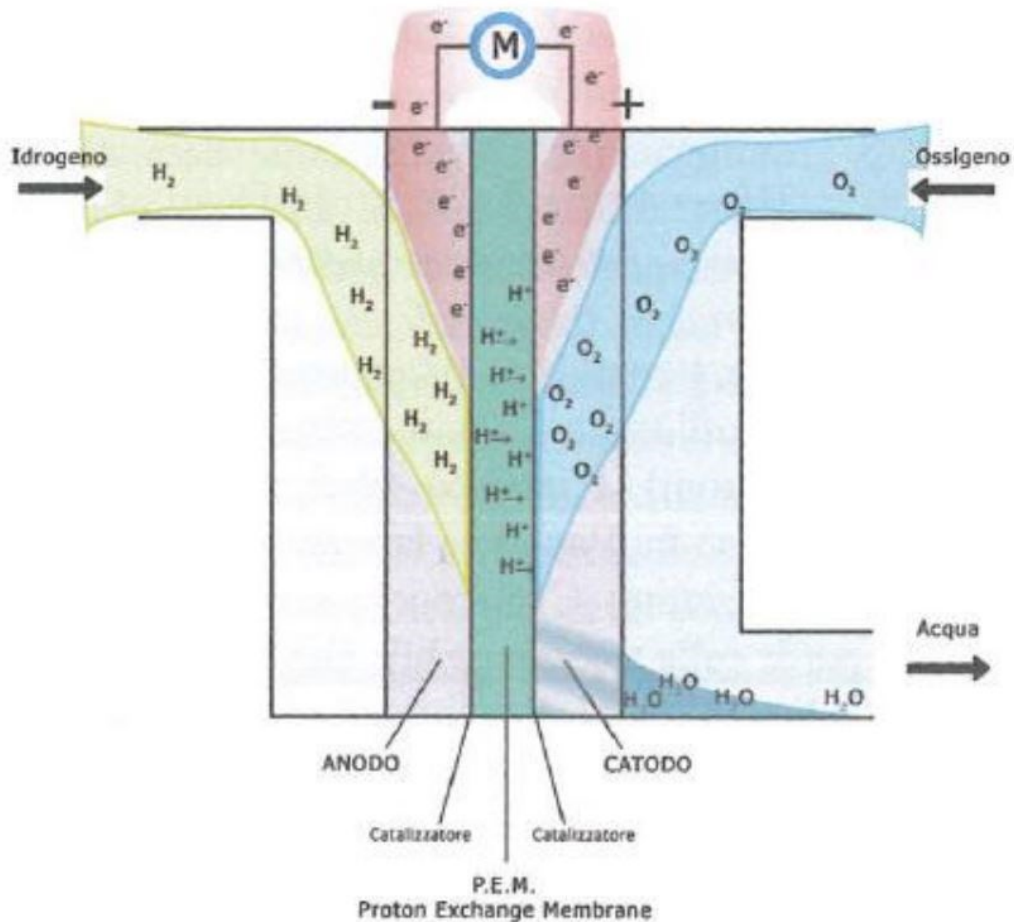
**Figura 24.** Schema di una generica cella a combustibile

Una cella a combustibile funziona grazie alla ossidazione di un combustibile (es.  $H_2$ ) con un comburente ( $O_2$ ), la quale produce energia elettrica e calore a temperatura variabile, a seconda del tipo di cella utilizzata. Quindi può funzionare anche in cogenerazione di energia elettrica e termica. Il risultato complessivo delle reazioni che avvengono è analogo alle classiche reazioni di ossidazione completa di un combustibile. Ad esempio, considerando l'idrogeno come combustibile ossidato e l'ossigeno come comburente, la reazione globale è:



Il prodotto della reazione è una mole d'acqua per ogni mole di idrogeno ossidata. Più celle in serie formano una pila a combustibile. Nella cella non vi sono parti in movimento e funzionano in regime permanente. Erogano energia elettrica finché alimentate e funzionando a rendimento elevato e pressoché costante alla variazione

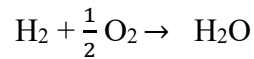
del carico. Il rendimento per un motore alimentato da una cella a combustibile PEM a temperatura di 80°C è del 45- 50%, e se viene utilizzato in modo cogenerativo si può aumentare ulteriormente tale valore; un normale motore a combustione interna invece si aggira su valori di rendimento intorno al 18% per il benzina e al 22% per il gasolio. Come esempio considero una cella P.E.M., a membrana polimerica a scambio protonico, rappresentata nella figura sottostante:



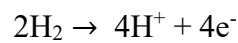
**Figura 25.** Fuel cell P.E.M (a membrana polimerica)

Principio di funzionamento: il combustibile entra nella cella in modo continuo, permea l'anodo poroso e nella zona di contatto con l'elettrolita (in verde) subisce l'ossidazione anodica con liberazione di elettroni che fluiscono nel circuito esterno, alimentando l'utilizzatore (M) e compiendo quindi del lavoro utile.

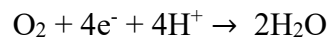
Dopodiché gli elettroni raggiungono il catodo dove il comburente viene ridotto. Il circuito si chiude con il flusso di ioni provenienti dall'anodo che attraversano l'elettrolita. Nel caso preso in considerazione in figura il combustibile ossidato è l'idrogeno e il comburente è l'ossigeno e formano la seguente reazione globale:



All'anodo avviene l'ossidazione che è facilitata dalla presenza del catalizzatore, di solito a base di platino, da cui si ottiene la divisione delle molecole di  $\text{H}_2$  in:



Il catalizzatore è fondamentale per le celle che funzionano a bassa temperatura (inferiore ai  $300^\circ\text{C}$ ), perché in tali condizioni l'energia messa a disposizione sarebbe troppo bassa per l'attivazione della reazione. Nel catodo poroso fluiscono gli elettroni provenienti dal carico elettrico, gli ioni che hanno attraversato l'elettrolita e le molecole di ossigeno comburente, formando la reazione:



Si ottiene come prodotto acqua calda distillata. Il potenziale elettrico ricavabile dipende dalla reazione elettrochimica fra combustibile e comburente, la tensione generata al carico è generata dalla differenza di potenziale fra l'anodo e il catodo. La corrente elettrica richiesta dall'utilizzatore è il parametro che lega il funzionamento delle celle: maggiore è la richiesta di potenza elettrica, maggiori sono i flussi scambiati; mentre in caso di richiesta nulla le reazioni non avvengono. Le celle possono essere costituite da diversi materiali, a seconda dell'applicazione considerata. Si classificano in base al tipo di elettrolita impiegato e sono riportate nella tabella a pagina seguente, dove sono indicate le reazioni che avvengono all'anodo e al catodo.

<b>Tipo di Fuel Cell</b>	<b>Reazione all'anodo</b>	<b>Reazione al catodo</b>
Alcaline(A-FC)	$H_2 + 2OH^- \rightarrow 2H_2O + 2e^-$	$\frac{1}{2} O_2 + H_2O + 2e^- \rightarrow 2OH^-$
Elettrolita polimero (PEM)	$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$	$\frac{1}{2} O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$
Metanolo diretto (DM)	$CH_3OH + H_2O \rightarrow CO_2 + 6H^+ + 6e^-$	$\frac{3}{2} O_2 + 6H^+ + 6e^- \rightarrow 3H_2O$
Acido fosforico (PA)	$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$	$\frac{1}{2} O_2 + CO_2 + 2e^- \rightarrow H_2O$
Carbonati fusi (MC)	$H_2 + CO_3 \rightarrow H_2O + CO_2 + 2e^-$	$\frac{1}{2} O_2 + CO_2 + 2e^- \rightarrow CO_3$
Ossidi solidi (SO)	$H_2 + O_2^- \rightarrow H_2O + 2e^-$	$\frac{1}{2} O_2 + 2e^- \rightarrow O_2^-$

**Tabella 4.** Reazioni delle varie tipologie di Fuel Cells

Nella tabella seguente vengono elencate le applicazioni più adatte per i vari tipi di Fuel Cells in base anche alla potenza richiesta:

<b>Applicazioni</b>	<b>Potenza(kW)</b>	<b>Tipologia di celle</b>
Trasporti	5-200	PEM
Impianti isolati	0,5-10	PEM
Residenziale	1-10	PEM SOFC (Ossidi solidi)
Commerciale o residenziale	50-250	PEM PAFC (Acido solforico)
Industriale con cogenerazione	200kW - 3MW	MCFC (Carbonati fusi) SOFC (Ossidi solidi)
Generazione di energia	2-40MW	MCFC (Carbonati fusi) SOFC (Ossidi solidi)

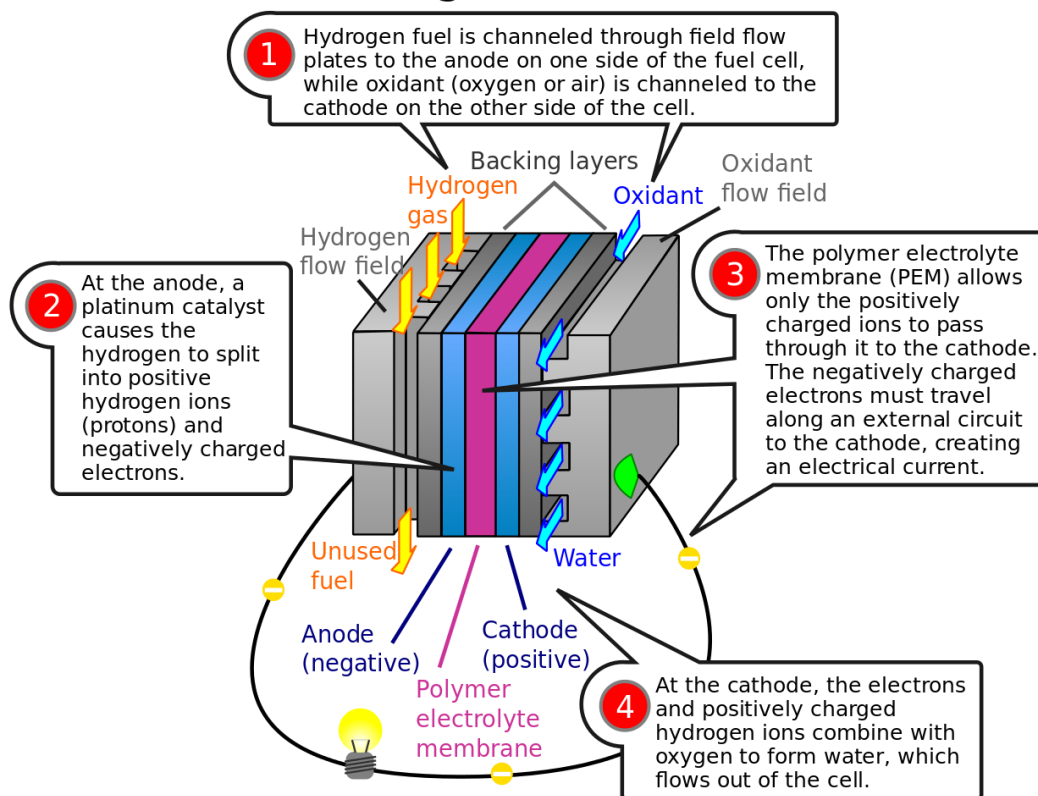
**Tabella 5.** Applicazioni dei vari tipi di fuel cells



Le celle PEM a bassa temperatura, sono le più interessanti per le applicazioni automobilistiche, visto che la potenza richiesta per un'automobile varia tra i 15 kW (per un'utilitaria) e gli 80 kW (per una berlina). Il problema principale per la loro diffusione è l'elevato costo degli stack, che non le rendono competitive con i moderni motori a combustione interna, anche se si stima che nei prossimi anni tale differenza andrà ad assottigliarsi.

## 4.2. Fuel cells PEM

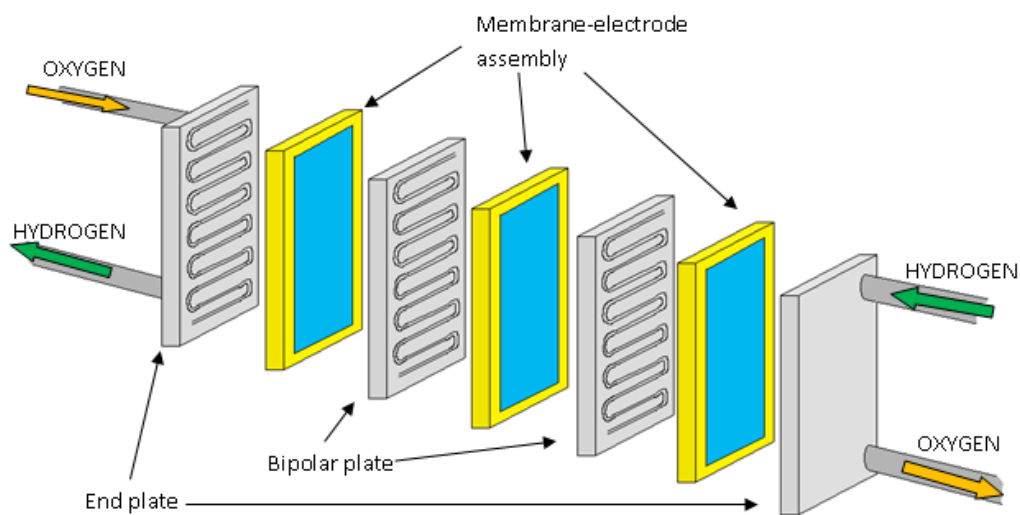
### Proton exchange membrane fuel cell



**Figura 26.** Fuel cell P.E.M

Gli elettrodi utilizzati nella cella sono generalmente di grafite porosa, mentre l'elettrolita è una membrana polimerica allo stato solido che può essere attraversata solo dagli ioni  $H^+$ , ma non dagli elettroni prodotti all'anodo. Nell'interfaccia tra gli

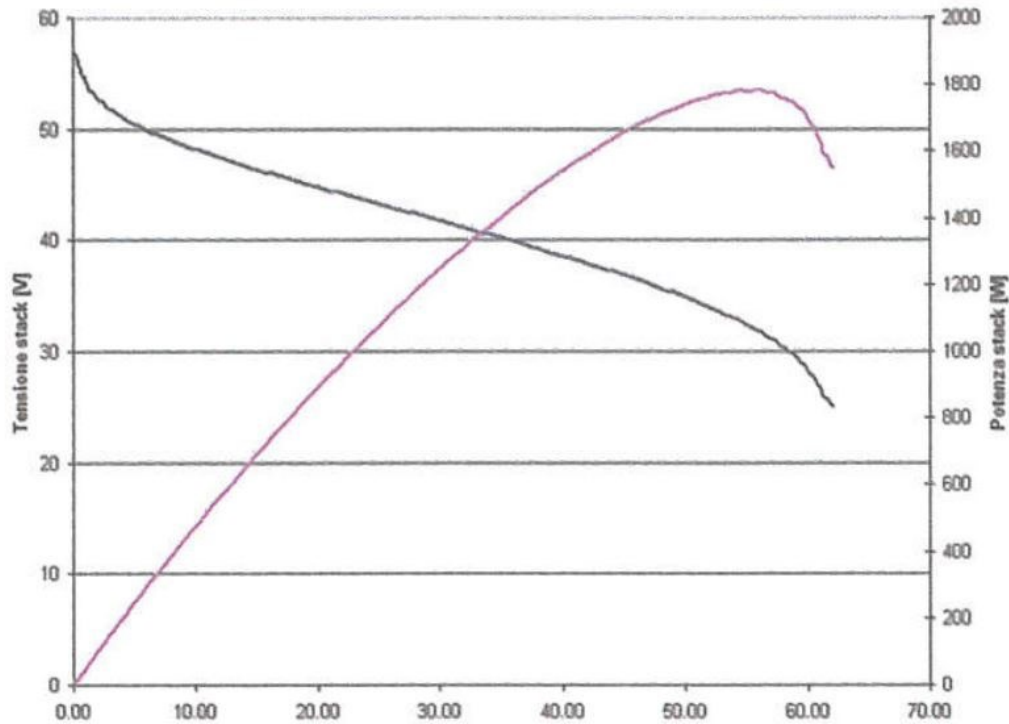
elettrodi e la membrana vi è sempre presente il catalizzatore, generalmente di platino, necessario per il funzionamento a basse temperature, per aumentare la velocità di reazione che altrimenti sarebbe troppo bassa. In passato le membrane erano costituite da polimeri fluoro-solfonici. Ad oggi quasi tutte le PEM sono a membrana di Nafion, un polimero sintetico alla vista simile a un foglio di plastica semitrasparente, con spessori che variano dai 70 ai 200 micron per le celle comuni, fino soli 20-25 micron per quelle più evolute. Vi è anche una piccola quantità d'acqua che mantiene umida la membrana, oltre a quella prodotta continuamente dal catodo che deve essere drenata. All'esterno dei due elettrodi sono presenti i cosiddetti piani di supporto in carta carbone o tessuto di carbone, con caratteristiche di elevata conduttività, che servono a garantire un ottimo flusso di elettroni e una porosità tale da consentire la diffusione dei gas. Servono anche a garantire il giusto grado di umidità nella membrana. All'esterno del piano di supporto vi è una piastra colletttrice in grafite o altro materiale a base metallica, con il compito di distribuire il gas all'interno della cella e di fungere da collettore della corrente elettrica prodotta.



**Figura 27.** Stack di fuel cells

Le piastre colletttrici sono quindi dotate di scanalature, ottenute previa lavorazione meccanica, con il compito di migliorare i flussi dei gas e regolare la distribuzione

dell'acqua, sia di quella che mantiene l'umidità della membrana sia di quella da drenare in eccesso. Nel caso di stack di celle le due piastre collettrici sono presenti solo all'estremità, mentre fra una cella e l'altra vi sono i cosiddetti piatti bipolari, che collegano la superficie di un catodo con la superficie attiva dell'anodo della cella successiva, oltre che a garantire l'impermeabilità ai gas. I piatti bipolari sono costituiti generalmente da grafite o da materiali più innovativi come compositi a base di grafite e altri di tipo polimerico. Le fuel cells di tipo PEM funzionano tipicamente a temperature comprese tra 80 e 100°C e, unite in uno stack, possono erogare da 1 a 250 kW di potenza. I sistemi che utilizzano questo tipo di celle sono molto leggeri e compatti, con potenza specifica molto elevata, il che li rendono molto indicati per l'utilizzo sui veicoli. La PEM mette a disposizione in linea teorica, a circuito utilizzatore aperto, una tensione di 1,18V che si riduce a 0,9V a causa di perdite di tipo elettrico. La tensione segue una curva, detta di polarizzazione, in funzione della densità di corrente, fino al valore di circa 0,2V. La curva di polarizzazione è decrescente e dipende dalle perdite; la densità di corrente è espressa in ampere su centimetro quadrato. Il punto di funzionamento migliore generalmente è intorno agli 0,6-0,8V a cui corrisponde una densità di corrente di 0,6-0,8 A/cm<sup>2</sup>. Tali valori forniscono una potenza dell'ordine di 0,5 W/cm<sup>2</sup> che, anche se rapportati alle dimensioni di una normale cella, non forniscono valori di potenza sufficienti per le normali applicazioni automobilistiche; perciò, bisogna ricorrere a uno stack di celle. La potenza fornita da uno stack dipende dal numero di celle e dalla superficie utile della membrana polimerica di ogni cella. La tensione di uno stack è la tensione di una singola cella moltiplicata per il numero di celle; invece, la corrente erogata dipende dalla superficie totale attiva di cella. Viene rappresentata nel grafico a pagina seguente la curva di polarizzazione (in nero) e la curva della potenza (in rosa) di uno stack di celle PEM.



**Figura 28.** Curva potenza, tensione, corrente di uno stack P.E.M

Vantaggi dello stack P.E.M:

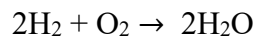
- non ci sono acidi, non c'è il problema di corrosione;
- Elettrolita è in polimero solido, che ostacola il trafilamento dei gas;
- buona resistenza strutturale;
- buona velocità di reazione;
- potenza elevata in relazione alla superficie della cella;
- tempi ridotti per l'avviamento a freddo.

Svantaggi stack P.E.M:

- necessita dell'utilizzo di idrogeno puro come combustibile;
- alto costo dell'elettrolita;
- alto costo dei materiali (es. platino);
- problemi di stabilità per la membrana a temperature superiori a 100°C;
- gestione dell'acqua prodotta dalla cella.

## 5. Veicoli ad idrogeno

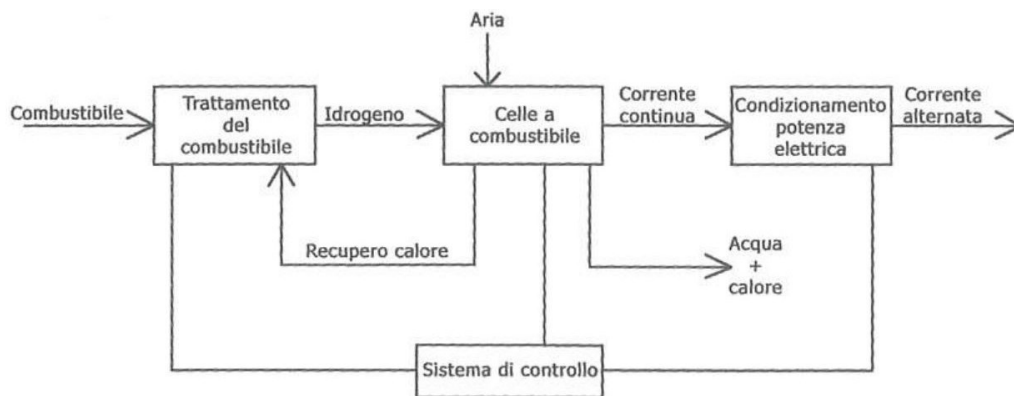
Tipicamente i veicoli che usano l'idrogeno come combustibile hanno un sistema di trazione combinato, formato da stack di celle a combustibile e batterie, che prende il nome di "architettura ibrida". Essa permette di ridurre a zero le emissioni di sostanze inquinanti. I motori a combustione interna raggiungono il loro rendimento massimo solo a determinati numeri di giri, le fuel cells invece operano costantemente al massimo rendimento. Un altro vantaggio consiste nell'eliminazione della trasmissione, utilizzando un accoppiamento diretto motore-ruota. Esistono poi alcuni veicoli a combustione interna, che sfruttano come combustibile l'idrogeno, tramite delle centraline modificate, valvole, guarnizioni e collettori speciali. La combustione dell'idrogeno avviene secondo questa reazione:



Avendo come prodotti acqua e calore. Questo tipo di motore ha un'efficienza molto inferiore alle celle a combustibile e non risolve il problema degli NO<sub>x</sub> che si formano dalla combustione ad alta temperatura della molecola N<sub>2</sub> presente nell'aria. Per usare l'idrogeno come combustibile in un veicolo si possono percorrere strade diverse. La prima è immagazzinare (ad esempio in bombole o in serbatoi criogenici) l'idrogeno che poi verrà utilizzato per far muovere il mezzo, ma si necessita di una rete di rifornimento adeguata come avviene ad esempio per le benzine. Il secondo metodo è quello di installare un piccolo reformer a bordo del veicolo, in grado di ricavarne idrogeno a partire dalla benzina, gas naturale o da un altro combustibile, sfruttandone la loro rete di distribuzione già presente e rodada.

## 5.1. Sistema “on board”

Un sistema di transizione, in attesa della creazione di una rete di distribuzione adeguata di idrogeno, è quello del “fuel processor”, ovvero l'utilizzo di un impianto per la produzione diretta dell'idrogeno a bordo veicolo. Si possono utilizzare come combustibili di partenza metano, gasolio, benzina o metanolo, reperibili facilmente nelle normali reti di distribuzione già esistenti. Gli impianti di trattamento del combustibile di questo tipo devono essere in grado di produrre idrogeno con un elevato livello di purezza, per garantire il corretto funzionamento delle fuel cells. Nella figura sottostante viene rappresentato uno schema a blocchi di un veicolo con sistema di produzione di idrogeno on-board con reformer e celle a combustibili.

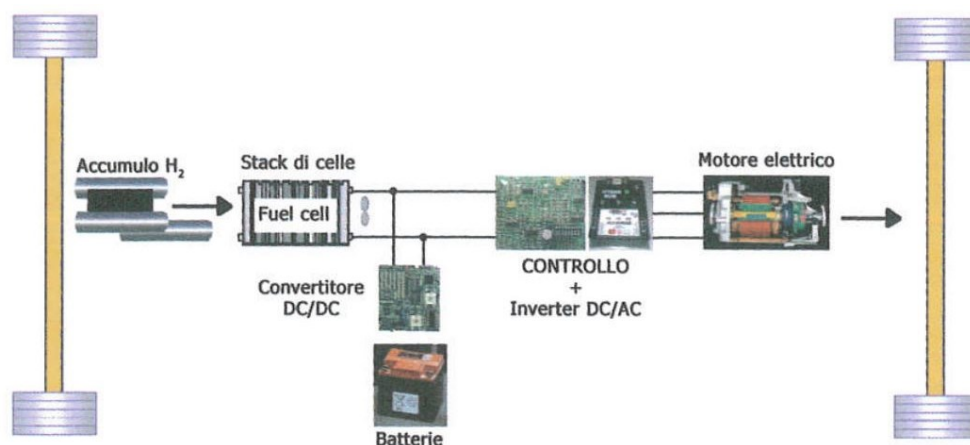


**Figura 29.** Schema a blocchi di un sistema a fuel cells per veicoli

Il trattamento del combustibile è realizzato appunto dal reformer. Come processi di produzione dell' $H_2$  si utilizza lo Steam Reforming o l'ossidazione parziale di idrocarburi pesanti. Nel caso di Steam Reforming, per esempio, sono necessari 0,45 metri cubi di metano per produrre un metro cubo di idrogeno. Questo sistema sfrutta molto meglio il combustibile fossile primario, grazie al rendimento elevato del reformer di bordo ed emettendo sostanze inquinanti ridotte rispetto ai motori tradizionali.

## 5.2. Veicoli ibridi

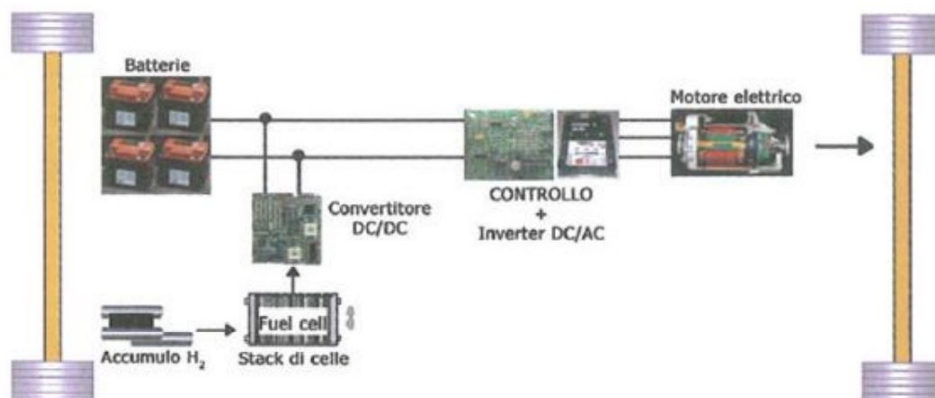
Il tipo di architettura di trazione di un veicolo va scelta in base all'utilizzo a cui è destinato il mezzo e al numero di batterie che si vuole installate a bordo. La potenza viene gestita dal controllo elettronico, interfacciato con il motore elettrico, che trasforma l'energia elettrica in energia meccanica. Nel caso di un utilizzo urbano sono molto più frequenti le fermate e le ripartenze rispetto a un utilizzo extraurbano. Le celle a combustibile funzionano meglio in condizioni stazionarie, senza brusche variazioni di carico; quindi, per i transitori si cercano di sfruttare al meglio le caratteristiche delle batterie. L'uso delle batterie garantisce buone coppie di spunto nei transitori, per esempio in accelerazione o in salita. Nel caso di una citycar destinata ad un utilizzo urbano, l'architettura migliore è la cosiddetta "ibrida fuel cells/batterie", costituita da un piccolo pacco di batterie e da uno stack di fuel cells di dimensioni ridotte, che garantisce una buona autonomia, spazi sufficienti a bordo e ottimi spunti di accelerazione. Se la potenza elettrica fornita dalle celle è di poco maggiore rispetto a quella fornita dalle batterie, si definisce la configurazione "load leveller". In questo sistema le celle si occupano di assicurare l'autonomia, caricando le batterie quando la condizione di marcia lo permette, mentre queste ultime si occupano dei transitori quando sono necessarie buone coppie di spunto.



**Figura 30.** Configurazione ibrida "load leveller"

In sostanza le batterie sono interfacciate sia al motore sia allo stack. Questa configurazione si adatta bene per un uso strettamente urbano. Generalmente non si collegano direttamente le fuel cells al motore elettrico, ma si preferisce installare le batterie nel mezzo, per allungare la vita dello stack.

Un'altra architettura chiamata "range extender" è caratterizzata da una potenza elettrica maggiore fornita al motore da parte delle batterie rispetto alle celle, dove quest'ultime danno un contributo di circa il 25%. Le celle a combustibile hanno solo il compito di ricaricare le batterie per incrementare l'autonomia del veicolo. Uno stack di potenza elevata è economicamente dispendioso, per cui si preferisce dimensionare il pacco di batterie per la potenza di picco, limitando così i costi dello stack di celle, permettendo ad esso di lavorare in modo continuativo e di allungare la sua durata. In questo modo le fuel cells non sono sottoposte ai transitori di funzionamento e sarà il sistema di controllo elettronico a gestire quale fonte utilizzare a seconda del tipo di richiesta.

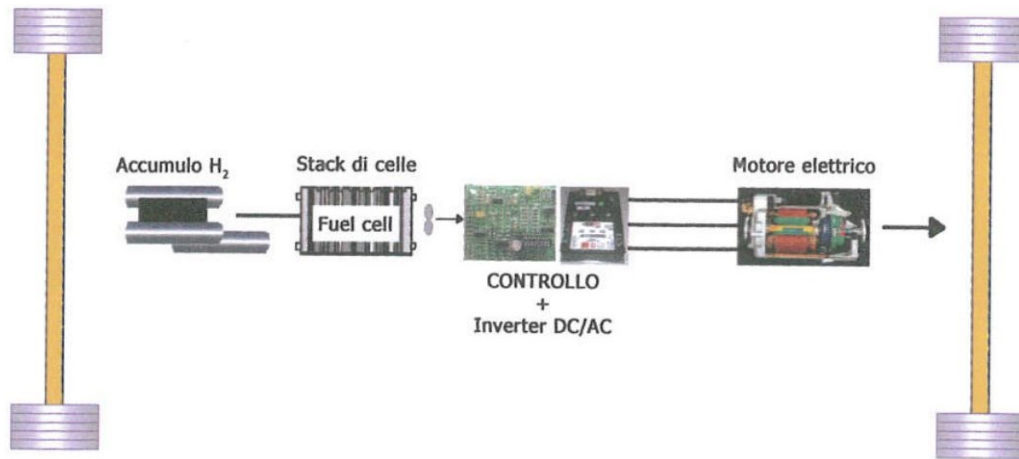


**Figura 31.** Configurazione ibrida "range extender"

L'ultima configurazione che vediamo è quella a fuel cells diretta, chiamata "full power". Viene utilizzata per i veicoli destinati all'utilizzo extraurbano dove sono richieste velocità elevate e i transitori sono ridotti. La potenza è fornita completamente (o quasi) dalle celle a combustibile in modo continuo, dato che l'erogazione di grandi potenze scarica le batterie velocemente e potrebbe portare anche ad un surriscaldamento delle stesse. Di solito è presente un pacco di batterie



destinato all'alimentazione degli ausiliari e al recupero di energia in frenata; può essere comunque previsto un certo grado di ibridazione di questo sistema.



**Figura 32.** Configurazione ibrida "full power"

### 5.3. Componenti

Un veicolo ad idrogeno a fuel cells è costituito da:

- un motore elettrico;
- il controllo del motore elettrico;
- il sistema a fuel cells, cioè lo stack e i controlli elettronici;
- un determinato numero di batterie;
- uno o più serbatoi di idrogeno;

Semplificando è un sistema elettrochimico accoppiato tramite dei collegamenti elettrici ad un impianto elettromeccanico.

### 5.3.1. Il motore elettrico

Questi veicoli possono utilizzare essenzialmente due tipi di motori: a corrente continua (DC) e a corrente alternata (AC). Questi motori sono molto versatili perché possono avere sia piccole potenze di qualche kW (come quelli degli scooter), sia discrete potenze dai 100 ai 250kW (come quelli degli autobus). La velocità di rotazione del motore elettrico è direttamente proporzionale alla tensione applicata ai suoi morsetti, mentre la coppia sviluppata è determinata dai valori di corrente elettrica assorbita. I motori AC sono più utilizzati, perché offrono un maggiore controllo e la possibilità di recuperare l'energia persa nelle frenate e nei rallentamenti. Di solito i motori in DC sono destinati al funzionamento "indoor" come per i carrelli elevatori, che hanno minori prestazioni e ridotte necessità di controllo. Questi motori possono essere sovrautilizzati per un breve periodo di tempo per avere spunti di accelerazione o di potenze maggiori.

### 5.3.2. I motori elettrici "in wheel"



Figura 33. Sistema "in wheel"

Un'altra tipologia di motore interessante è quello inserito direttamente nel cerchione e viene chiamato appunto “in wheel”. Esso ha il vantaggio di poter rimuovere tutti i dispositivi che si occupano della trazione meccanica, oltre che ridurre gli ingombri e aumentare l’abitabilità del veicolo. Per questo tipo di utilizzo sono di solito a corrente alternata. La coppia e la velocità di rotazione del motore sono gestite da un sistema di controllo che gestisce l’aderenza delle ruote e la tenuta laterale in curva, monitorando costantemente la velocità e la stabilità generale del veicolo. Questo sistema viene chiamato “drive by wire”; è innovativo perché permette degli spostamenti laterali, diagonali e perfino la possibilità per ciascuna ruota di fare un giro completo su sé stessa.

### **5.3.3. Il Sistema di controllo**

Il sistema di controllo gestisce la potenza prodotta dalle fuel cells e l’energia immagazzinata nelle batterie, per poter ottimizzare la trazione nelle diverse condizioni d’esercizio. La soluzione che si utilizza permette una gestione più regolare della tensione, evitando le variazioni “a gradini”. Viene chiamata nel caso CC “sistema Chopper” e nel caso AC “Inverter”. Questi sono i suoi compiti principali:

- adeguare la potenza elettrica alle esigenze di guida;
- cambiare la tensione di alimentazione dei motori elettrici secondo la logica necessaria in ogni condizione;
- controllare la corretta trasformazione dell’energia elettrica in energia meccanica;
- gestire il recupero d’energia in frenata e nelle decelerazioni;
- interfacciarsi con il sistema di guida del veicolo.

Il sistema di trazione di un'auto elettrica ad idrogeno richiede che la tensione erogata dallo stack abbia lo stesso valore di quella del sistema controllo-motore elettrico. Per ottenere ciò si tende ad inserire un convertitore CC/CC fra lo stack e il sistema di controllo. Bisogna fare attenzione al dimensionamento di questi controlli.

Ad esempio, un motore a corrente continua può lavorare per qualche minuto con intensità di corrente di 2,5-3 volte superiore a quello nominale, quindi bisogna porre attenzione a non sottodimensionare il convertitore.

#### **5.3.4. Sistema “Chopper”**

Si utilizza per sistemi con motori a corrente continua. Il pedale dell’acceleratore è collegato ad un potenziometro, tramite il quale il guidatore può regolare il moto del veicolo, trasformando l’informazione della posizione del pedale in un segnale elettrico. Tale segnale corrisponde alla quantità di tensione di alimentazione che il controllo deve fornire al motore in quell’istante. Quando il pedale è spinto completamente fino a fondo si fornirà la tensione massima al motore, mentre quando il guidatore rilascia il piede dal pedale e il pedale quest’ultimo torna nella posizione neutra, il valore di tensione fornito sarà nullo. Per tutte le posizioni intermedie il sistema di controllo “chopper” si occupa di “tagliare” la tensione in piccolissimi impulsi, in modo da generare un’onda quadra con una tensione media compresa fra 0V e il valore massimo.

#### **5.3.5. Sistema “Inverter”**

Il controllo prima di tutto converte la corrente continua in corrente alternata trifase. Il regolatore deve generare tre onde di tipo sinusoidale, pulsanti fra il valore nullo e un valore massimo, invertendo anche la polarità per un numero fra 0 e 300 volte al secondo. Esso si basa quindi su gruppi di transistor che devono pulsare e fornire la corretta polarità. È dotato anche di un sistema, come già detto, che consente il recupero dell’energia in frenata (recuperi del 7-10%), previa riconversione della corrente da AC in DC.

### 5.3.6. Le batterie

Le batterie possono essere di vario tipo a seconda dei materiali utilizzati per la loro costruzione. Le batterie più utilizzate sono del tipo piombo-gel, ma presentano diversi svantaggi:

- Capacità limitata: un pacco batterie composto da 20 moduli (peso totale di circa 500 kg) garantisce 15 kWh di energia elettrica, garantendo un'autonomia a un'automobile medio-piccola di circa 80 km;
- Peso elevato: ogni modulo pesa circa 20 kg, e come già detto per i problemi relativi alla capacità limitata, per avere più autonomia bisogna usare più batterie, aumentando così il peso. Per garantire una potenza di 32 kWh sono necessari 40 moduli, con un peso complessivo di 1000 kg;
- Ingombro: un modulo mediamente ha un volume di 4,275 litri;
- Ricarica lenta: mediamente le batterie hanno tempi di ricarica molto lunghi, dalle 3 alle 8 ore, in base alla tecnologia del sistema di ricarica;
- Durata: hanno una vita breve, tre-quattro anni o 400 cicli completi di carica/scarica;
- Costo: il costo è elevato in relazione al peso e ai chilometri che le batterie consentono di percorrere.

Le batterie ZEBRA (zero emission battery research activities) sono delle batterie particolari che sono sotto studio. Sono molto interessanti in ambito automobilistico perchè permettono ottime prestazioni pur avendo un ingombro contenuto. Le Batterie al litio nell'ultimo periodo stanno prendendo sempre più piede e sono montate sulla maggior parte delle Tesla, primo produttore di auto elettriche al mondo. Gli accumulatori agli ioni di litio sono un tipo di batterie molto diffuso; infatti, si può trovarne nei laptop e nei telefoni cellulari. Offrono un ottimo rapporto peso/potenza e per questo vengono impiegate anche nelle auto elettriche. Le batterie di questo tipo possono essere realizzate in diverse forme e dimensioni, così da poter riempire gli spazi disponibili nei dispositivi che le utilizzano. Non soffrono dell'effetto memoria, sopportano un buon numero di cicli di ricarica ed hanno un basso ritmo di auto-scarica mentre non vengono utilizzate.

## **6. Confronti**

### **6.1. Confronto economico benzina - elettrico**

Il costo dell'elettricità in Italia a causa degli ultimi avvenimenti è cresciuto fino ad arrivare a 0,5 €/kWh, questo significa che la ricarica completa di un pacco di batterie per una vettura di 15 kWh di potenza è di 7,5€. Supponendo che l'autonomia di tale veicolo sia di 90 km, per percorrere un chilometro si spendono circa 8 centesimi. Applicando lo stesso ragionamento per una macchina a benzina, un litro di combustibile costa circa 1,6 € e se un'autovettura a benzina percorre grosso modo 13-15 km con un litro, un chilometro percorso costa 0,12 €. Da questo ragionamento si deduce che andare a benzina costa di più rispetto alla trazione elettrica anche se ci troviamo in un periodo come questo dove il prezzo dell'elettricità è alle stelle. La nota negativa delle auto elettriche è il tempo di ricarica e la durata delle batterie. Per una macchina a benzina il rifornimento è di poco più di un minuto (in base alla capacità del serbatoio), mentre per una macchina elettrica bisogna aspettare ore per arrivare alla carica completa delle batterie. Tesla Motors ha realizzato delle colonnine Supercharger, cioè dei punti di ricarica che permettono di caricare le batterie dell'auto fino al 80 % in 30 minuti, grazie alla capacità di carico di 120 kW. La stessa casa produttrice però consiglia di usufruire di queste colonnine solo in caso di necessità, perché la vita delle batterie è inversamente proporzionale alla velocità di ricarica. Questo dato può essere confrontato con le automobili ad idrogeno, le quali impiegano pochi minuti per la ricarica completa del serbatoio, poco più delle vetture a benzina.

## 6.2. Confronto fuel cells – combustione interna

Si vuole verificare con un confronto approfondito, suddiviso in varie fasi, quale delle due soluzioni sia la migliore dal punto di vista energetico. Il metodo più diffuso è il “well to wheels”, che valuta le efficienze dal pozzo di estrazione della materia prima da cui derivano i combustibili fino alle ruote del veicolo considerato. Questo tipo di valutazione può essere divisa in altre due sottoanalisi: “well to tank”, denominata anche “upstream”, ovvero dal pozzo al serbatoio del veicolo e “tank to wheel”, denominata anche “vehicle”, cioè dal serbatoio alle ruote. All’interno delle due sezioni principali si distinguono alcuni sottoprocessi, per cui si andranno ad analizzare i loro rendimenti parziali secondo la seguente equazione:

$$\eta = \text{Energia in uscita} / \text{Energia primaria in ingresso}$$

### 6.2.1. Upstream (well to tank)

Nell’analisi upstream (dal pozzo al serbatoio) si prende in esame:

- estrazione e/o produzione dell’energia primaria
- trasporto e stoccaggio dell’energia primaria
- produzione del combustibile
- Trasporto, stoccaggio e distribuzione del combustibile.

#### **Benzina e Gasolio**

I combustibili tradizionali sono prodotti dalla raffinazione del petrolio. I valori dell’estrazione e del trasporto sono quindi uguali per entrambi. Invece la spesa di energia per la produzione della benzina (8%) è superiore a quella necessaria per ottenere il gasolio (5%) che è un prodotto meno raffinato. La distribuzione del combustibile raffinato invece è uguale. Quindi si ottiene un valore per la benzina di 87,5 % mentre per il gasolio di 90,3 %.

## Idrogeno gassoso

In questo momento la tecnologia più diffusa per la produzione dell'idrogeno è lo steam reforming dal metano. La produzione dell'idrogeno arriva al 81 % nel caso in cui la produzione sia centralizzata, mentre se è localizzata si ha una maggior perdita. Il valore finale si attesta a 62,7% con un rendimento maggiore nel caso della produzione localizzata, grazie ad un risparmio sul trasporto e distribuzione.

Carburanti	Estrazione materia prima	Trasporto	Produzione combustibile	Distribuzione	TOTALE [%]
Benzina	96,9	98,9	92	99,2	87,5
Gasolio	96,2	98,9	95	99,2	90,3
Idrogeno da steam reforming dal metano centralizzato	98	95,1	81	83	62,7
Idrogeno da steam reforming dal metano decentralizzato	98	95,1	72	95	63,7

**Tabella 6.** Analisi “upstream”

### 6.2.2. Vehicle (tank to wheels)

Nell'analisi vehicle (dal serbatoio alle ruote) si prendono in considerazione le dispersioni di energia dei vari sottosistemi necessari al funzionamento del veicolo. Per un veicolo a benzina l'efficienza interna si attesta al 17 %, mentre per una



macchina a gasolio si arriva a un valore leggermente più alto 21,6 %. Nelle macchine a idrogeno, considerando il rifornimento diretto, quindi senza reformer a bordo, si arriva al 37 %.

	<b>Fuel processor</b>	<b>Fuel cell</b>	<b>Motore o motore elettrico</b>	<b>Trasmissione</b>	<b>Totale</b>
benzina	/	/	18,5	92	17
Diesel	/	/	23,5	92	21,6
H <sub>2</sub> rifornimento diretto	/	48	82	95	37
H <sub>2</sub> reformer a bordo da metanolo	80	43	82	95	26,8
H <sub>2</sub> reformer da benzina	75	41	82	95	24

**Tabella 7.** Analisi “vehicle”

Nel caso di reforming del metanolo si opera a temperature più basse e si produce idrogeno di maggior qualità, andando ad aumentare l’efficienza delle fuel cells rispetto al caso a benzina. Per la trasmissione si considera il caso con un solo riduttore meccanico, ma come abbiamo visto per questi veicoli, si può utilizzare la trasmissione “in wheel”, riducendo a zero le perdite di trasmissione.

### 6.2.3. Confronto finale

Per calcolare il valore di efficienza totale, bisogna moltiplicare fra loro i valori dei rendimenti “vehicle” e “upstream” analizzati in precedenza.

$$\eta \text{ (dal pozzo alle ruote)} = \eta \text{ (upstream)} \times \eta \text{ (downstream)}$$

Confronto finale	UPSTREAM	VEHICLE	TOTALE [%]
<b>Motori termici a combustione interna</b>			
benzina	87,5	17	14,9
gasolio	90,3	21,6	19,5
<b>Auto a idrogeno a fuel cells</b>			
H <sub>2</sub> compresso (da gas naturale)	63,7	37	23,5
H <sub>2</sub> reformer da benzina a bordo	87,5	24	21
H <sub>2</sub> reformer da metanolo a bordo metanolo	62,7	26,8	16,8
H <sub>2</sub> liquido da gas naturale	36,5	37	13,5
Auto elettrica a batterie d'ultima generazione, elettricità ricavata dal petrolio (2021)	25,3	82	20,5

**Tabella 8.** Analisi Complessiva

Si nota subito che la soluzione più conveniente è l'idrogeno compresso, grazie alla sua alta efficienza nel processo “upstream” e dal rendimento buono delle fuel cells impiegate del 48%. Purtroppo, non è ancora disponibile una vera rete di distribuzione quindi si vira sulla soluzione con reformer a bordo. Risulta assente dal nostro ragionamento il caso di produzione dell'idrogeno tramite elettrolizzatore. Questa tipologia richiede uno studio a parte; si potrebbe utilizzare l'energia prodotta in eccesso dalle centrali idroelettriche, eoliche, fotovoltaiche nelle ore dove la

domanda energetica è ridotta. Il basso rendimento dell'elettrolizzatore sarebbe compensato dalla riduzione della spesa di estrazione e di trasporto della materia prima.

### **6.3. Su quale auto puntare oggi?**

In questo capitolo ci metteremo nei panni di un acquirente in cerca di una nuova auto. Prenderemo in considerazione le principali motorizzazioni disponibili (benzina, diesel, ibrida, idrogeno ed elettrica) per capire quale tipo di vettura è più conveniente al momento e quale risulta essere più "green". In questo confronto si ipotizza che l'idrogeno sia facilmente reperibile da una rete di distribuzione ad un costo di 10€/kg, considerato come una media del prezzo di vendita mondiale attuale dell'idrogeno. Le vetture a benzina, gasolio e idrogeno non necessitano di lavori di sostituzione di componenti durante il loro utilizzo, mentre per le vetture elettriche è necessario sostituire le batterie ogni 8 anni per garantire un'autonomia accettabile. Quindi poniamo 8 come anni di utilizzo, per poter fare un confronto alla pari. Sono state considerate nel confronto auto berline a 5 porte utilizzare per una percorrenza annua di 20.000 km e potenza erogata fino ai 240 kW. Non vengono considerate altre spese come le tasse di possesso, circolazione o utilizzo perché variano da stato a stato. Vengono prese in esame cinque automobili:

- Tesla model S (2020),
- Mercedes c400 (2018)
- BMW 535d (2018)
- Toyota Corolla (2022)
- Toyota Mirai (2020)

l'anno annotato tra parentesi è riferito all'anno di produzione del modello preso in considerazione.

	<b>TESLA S (2020)</b>	<b>Mercedes c400 (2018)</b>	<b>Bmw 535d (2018)</b>	<b>Toyota COROLLA (2022)</b>	<b>Toyota MIRAI (2020)</b>
	elettrica	benzina	diesel	Ibrida/benzina	idrogeno
Costo [€]	100000	62000	65000	38000	66000
Potenza [kW]	240	245	230	135	134
trazione	AWD	AWD	AWD	FWD	RWD
Lunghezza [m]	5	4,7	4,9	4,65	4,9
Emissioni CO <sub>2</sub> [g/km]	0	170	147	122	0
Consumo l/100km (ciclo misto)	/	7,3	5,6	5,4	0,79 <i>kg</i> 100km
Autonomia [km]	650	904	1250	796	650
Capacità serbatoio	95kWh	66 l	70 l	43 l	5,6kg
Costo Carburante	0.5€/kWh	1,6€/l	1,8€/l	1,6€/l	10€/kg
€/100km	<b>7,30</b>	<b>11,68</b>	10,08	8,64	8,61
€/anno	<b>13.960</b>	10086	10141	<b>6478</b>	<b>9972</b>

AWD = trazione integrale, FWD = trazione anteriore, RWD = trazione posteriore

**Tabella 9.** Confronto per le automobili prese in considerazioni. Evidenziati in verde i dati migliori, in rosso quelli peggiori.

Dalla tabella è facile notare che la macchina più conveniente al momento è la Toyota Corolla, grazie anche al suo prezzo di listino vantaggioso. Quest'auto è stata inclusa in questa valutazione grazie al ventennio d'esperienza della casa nipponica nella realizzazione di auto ibride, che la porta ad essere considerata l'ibrida più efficiente e collaudata sul mercato. Escludendo il prezzo d'acquisto iniziale, l'auto

meno costosa da mantenere, considerato il solo consumo e costo del carburante, è la Tesla, tallonata da vicino dalle due Toyota. Questo fa capire come le case nel breve termine stiano puntando molto sull'ibridazione. Se ci soffermiamo sulle emissioni, viene evidenziato come le uniche alternative completamente ecologiche in marcia siano quella della Tesla model S elettrica e della Toyota Mirai ad idrogeno. Quest'ultima ha un ulteriore vantaggio sulla sua avversaria completamente elettrica: avendo un pacco batterie più piccolo, una volta esauritosi, sarà più semplice da smaltire o riciclare. Guardando il futuro non si può che pensare che le alternative più interessanti risultino le auto ad idrogeno e quelle elettriche. I prezzi per la realizzazione cominceranno ad abbassarsi grazie all'economia di scala, ci saranno più produttori e quindi più concorrenza che farà abbassare i prezzi di listino, favorendo il consumatore finale; inoltre aumentando la produzione dell'idrogeno avrà un calo di prezzo alla "pompa". Bisogna però fare una considerazione sui dati rilasciati dalle case automobilistiche relativi alle prestazioni delle proprie vetture dopo lo scandalo del "Dieselgate". I valori sono indicativi, i test fatti per calcolare le prestazioni sono effettuati in laboratorio in condizioni ideali e stazionarie.

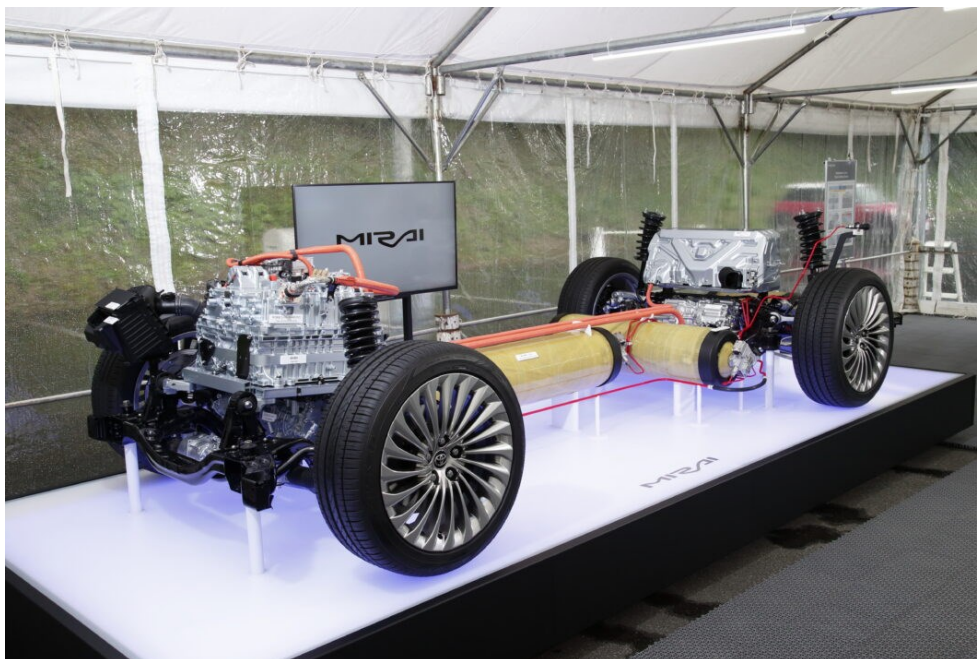
## 7. I modelli di veicolo ad idrogeno

### 7.1. Toyota Mirai 2020



**Figura 34.** Toyota mirai 2020

Questa è la seconda generazione dell'auto a 4 porte a idrogeno che aveva fatto il suo debutto al salone di Ginevra nel 2014. Rispetto alla precedente ha assunto delle forme da berlina di lusso e un design dinamico. La piattaforma modulare GA-L a trazione posteriore su cui è basata, è stata adattata per poter inserire anteriormente la pila a combustibile, mentre i serbatoi e le batterie si trovano rispettivamente dietro e al centro dell'abitacolo.

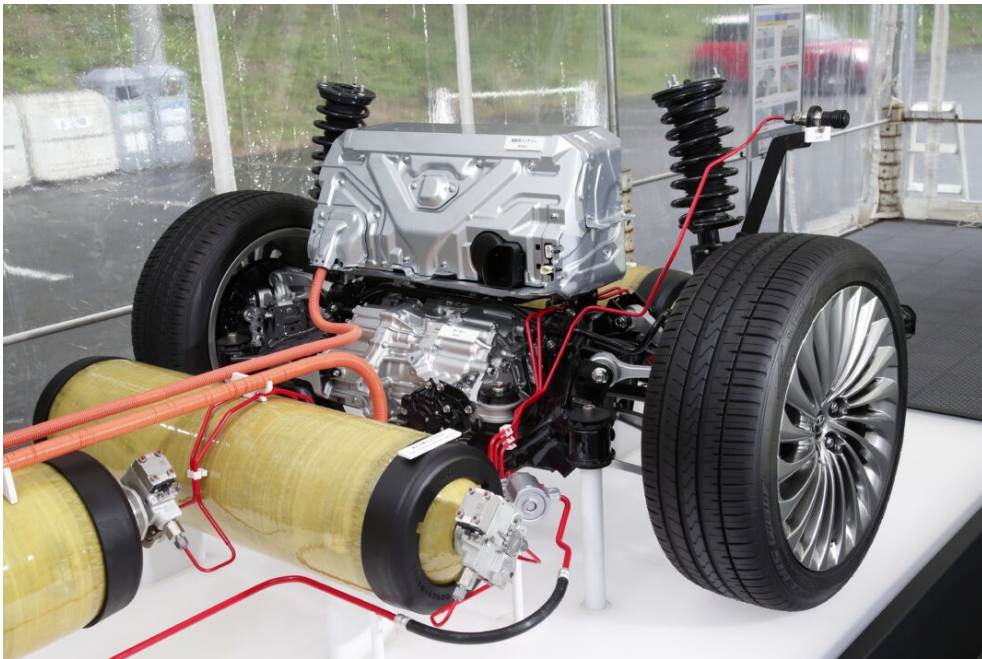


**Figura 35.** Piattaforma GA-L

Il risultato è un ideale bilanciamento dei pesi, unito a un'elevata rigidità torsionale. Elementi, questi, che, insieme con lo schema multi-link su entrambi gli assi delle sospensioni, favoriscono il piacere di guida e il confort a bordo. Il motore elettrico sincrono a magneti permanenti può erogare 182 CV, mentre la tecnologia fuel cell ne garantisce fino a 174 CV. Lo stack che si trova nella parte anteriore del veicolo è di tipo P.E.M. ed è formato da 330 celle connesse in serie, che hanno un peso di 52 kg. Degno di nota è che questo gruppo rinnovato stabilisce un nuovo record per la densità di potenza specifica di 5,4 kW/l. Le batterie sono agli ioni di litio a 84 celle, con una capacità di 4Ah e un peso di 44,6 kg. La velocità massima è di 175km/h. Il suo peso di marcia è di 2400kg, ha 5 posti e ospita al suo interno un serbatoio con una capacità massima di 142,2l o 5,6 kg di idrogeno. La Toyota prevede di sfruttare l'energia delle batterie in fase di partenza del veicolo, ricorrendo poi al solo sistema di celle a combustibile durante la guida normale e unendo insieme le due fonti di energia nel momento in cui vengono richieste le massime prestazioni. Secondo le stime l'autonomia varia dai 650 ai 750 km. La vettura ha inoltre una presa sotto il cofano per poterla utilizzare come generatore di corrente d'emergenza ed è in grado di erogare fino a 9 kW.



**Figura 36.** Spaccato della Mirai



**Figura 37.** Pacco batteria posizionato dietro i sedili posteriori



## 7.2. Hyperion XP-1



**Figura 38.** Hyperion XP-1

La Hyperion XP-1 è una delle prime supercar ad idrogeno e ha una scheda tecnica impressionante. Il motore alimentato dall'idrogeno a celle di combustibile con tecnologia derivata dalla NASA, da cui provengono alcuni dei progettisti dell'auto, permette a quest'ultima di produrre oltre 1500 CV con un peso di solo 1248kg, grazie al telaio in monoscocca in carbonio e in titanio. Ha la trazione integrale e utilizza una trasmissione a 3 rapporti. Secondo quanto afferma la società l'XP-1 raggiungerebbe una velocità di 335 Km/h, mettendola nell'Olimpo dei modelli più prestanti. L'auto sarà in grado di passare da 0 a 100 Km/h in tempi rapidissimi, meno di 2,2 secondi. Hyperion afferma che l'XP-1 sarà in grado di offrire fino a 1.600 Km di autonomia da un singolo pieno di idrogeno, grazie ai suoi serbatoi in fibra di carbonio. Un'autonomia molto superiore a quella di qualsiasi auto elettrica attualmente disponibile. Una volta che il serbatoio dell'idrogeno è vuoto, sarà possibile ricaricarlo in meno di cinque minuti. L'azienda sta sviluppando insieme all'auto anche una stazione di produzione e ricarica d'idrogeno mobile per poter permettere ai proprietari di ricaricare la loro auto in qualsiasi momento.



**Figura 39.** Caravan per la produzione e distributore d'idrogeno Hyperion

Parte del design unico della Hyperion XP-1 è dato dal suo alettone posteriore articolato e rivestito di pannelli solari in fibra di carbonio, che scende sul lato del veicolo, abbracciandolo. Sebbene i pannelli solari non possano produrre energia sufficiente per alimentare l'auto, ne forniscono a sufficienza per alimentare l'elettronica di bordo del veicolo, per diminuire la necessità di idrogeno e migliorandone i consumi.

## Conclusioni

Per capire il futuro dell'idrogeno nel campo dell'automotive bisogna ripercorre e capire la storia del petrolio e dei suoi derivati. Fino agli albori del XX secolo veniva utilizzato il carbone come combustibile primario, sia nelle fabbriche che per il trasporto, principalmente ferroviario e navale. Durante la Prima guerra mondiale venne sostituito dalla benzina nei veicoli e nelle prime automobili, perché forniva maggiore energia in rapporto al volume. Negli anni della rivoluzione industriale il carbone veniva estratto dalle miniere presenti all'interno dei confini nazionali, risultandone anche il fulcro per la nascita di industrie attorno alla quale nacquero vere e proprie città. Con l'arrivo delle benzine si rese necessario il trasporto del combustibile da zone molto più lontane, a causa della sua scarsa presenza in Europa. Arrivando ai giorni nostri, il petrolio che utilizziamo in Italia arriva da zone remote. Dagli anni 50 c'è stata un'incredibile crescita della rete di distribuzione e del mercato che si è sviluppato attorno al greggio. Il problema principale, escludendo per un attimo la componente ambientale, è: come potrebbe fare uno stato come l'Italia a far proseguire la produzione industriale e a garantire i servizi indispensabili ai propri cittadini, se per qualche ragione questa rete di distribuzione si interrompesse? Qualche segnale c'è già stato lanciato quest'anno, dopo l'inizio della guerra Russa-Ucraina, con il panico scoppiato nel mercato Europeo. Il petrolio e i suoi derivati sono alla base della nostra vita e ne siamo totalmente dipendenti, ma la soluzione non è cambiare "fornitore", ovvero assicurarsi approvvigionamenti da altri paesi, come l'Algeria che anch'essa ha una situazione geo-politica non proprio stabile. L'obiettivo è raggiungere l'indipendenza dai combustibili fossili. Ora come ora per raggiungere l'autosufficienza energetica basterebbe investire nel nucleare e ampliare l'utilizzo delle energie rinnovabili, come è stato fatto negli ultimi anni, per la produzione di corrente elettrica e destinarne una parte alla produzione di idrogeno. Il processo per realizzare questa transizione sarà lungo e molto costoso, ma la storia ci insegna che lo Stato che arriverà prima, godrà dei maggiori benefici ambientali, economici e politici, garantendo così un futuro sostenibile anche per le future generazioni.

## INDICE DELLE FIGURE

Figura 1: Consumi di energia nel mondo.....	VI
Figura 2. Concentrazione di CO <sub>2</sub> in atmosfera .....	VIII
Figura 3. Statistiche sui consumi per diverse forme di energia .....	IX
Figura 4. Isotropi dell'idrogeno .....	1
Figura 5 Limiti di infiammabilità ed energia minima d'accensione.....	2
Figura 6. a) Fiamma d'idrogeno, b) Fiamma del propano.....	3
Figura 7. Produzioni e utilizzi dell'idrogeno .....	4
Figura 8. Schema impianto stream reforming .....	6
Figura 9. Elettrolisi dell'acqua.....	8
Figura 10. Schema produzione e utilizzo dell'idrogeno da fonti rinnovabili .....	9
Figura 11. Processo di ATR (reforming autotermico).....	10
Figura 12. Produzione d'energia dalle biomasse .....	12
Figura 13. Bombola d'idrogeno d'ultima generazione.....	16
Figura 14. Serbatoio per idrogeno liquido (Linde).....	17
Figura 15. Sezione serbatoio ad idruri metallici .....	19
Figura 16. Nanotubi di carbonio .....	20
Figura 17. Confronto a parità di volume geometrico della quantità di idrogeno immagazzinabile dalle diverse tecnologie .....	22
Figura 18. Autotreno allestito per il trasporto d'idrogeno gassoso.....	23
Figura 19 Autotreno allestito per il trasporto di idrogeno liquido.....	23
Figura 20. Idrogenodotto tra Germania-Norvegia in costruzionee (03/2022).....	24
Figura 21. Confronto fra incendio di un'auto ad idrogeno vs benzina.....	26
Figura 22. Confronto fra un sistema tradizionale e un sistema con cella a combustibile.....	27
Figura 23. Emissioni dei diversi impianti.....	28
Figura 24. Schema di una generica cella a combustibile.....	29
Figura 25. Fuel cell P.E.M (a membrana polimerica) .....	30
Figura 26. Fuel cell P.E.M.....	33
Figura 27. Stack di fuel cells .....	34

Figura 28. Curva potenza, tensione, corrente di uno stack P.E.M.....	36
Figura 29. Schema a blocchi di un sistema a fuel cells per veicoli .....	38
Figura 30. Configurazione ibrida “load leveller” .....	39
Figura 31. Configurazione ibrida "range extender" .....	40
Figura 32. Configurazione ibrida “full power” .....	41
Figura 33. Sistema “in wheel” .....	42
Figura 34. Toyota mirai 2020 .....	54
Figura 35. Piattaforma GA-L.....	55
Figura 36. Spaccato della Mirai .....	56
Figura 37. Pacco batteria posizionato dietro i sedili posteriori.....	56
Figura 38. Hyperion XP-1 .....	57
Figura 39. Caravan per la produzione e distributore d'idrogeno Hyperion .....	58

## INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1. Anidride carbonica sviluppata per unità di energia .....	VII
Tabella 2. Proprietà dell'idrogeno, metano e benzina .....	3
Tabella 3. Fonti di produzione mondiale di idrogeno.....	5
Tabella 4. Reazioni delle varie tipologie di Fuel Cells.....	32
Tabella 5. Applicazioni dei vari tipi di fuel cells.....	32
Tabella 6. Analisi “upstream” .....	48
Tabella 7. Analisi “vehicle” .....	49
Tabella 8. Analisi Complessiva .....	50
Tabella 9. Confronto per le automobili prese in considerazioni. Evidenziati in verde i dati migliori, in rosso quelli peggiori. ....	52

## BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

- Enzo Rossi, 2006, Andare ad Idrogeno. I motivi, la tecnologia e i prototipi delle auto che guideremo, MEDIA 3000, 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
- Marco Noro, 2010, Celle a Combustibile. Tecnologia e possibilità applicative, Flaccovio Dario, Italia
- <https://www.hyperion.inc/xp1-car>
- <https://www.linde.com>
- <https://www.quattroruote.it>
- <https://supercarblondie.com/supercars/hyperion-xp1-hypercar-hydrogen-speed-technology-performance/>
- <https://www.toyota.it/gamma/nuova-mirai>