

**UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA**

Dipartimento di Tecnica e Gestione dei Sistemi Industriali

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Meccatronica

**CELLE A COMBUSTIBILE:**

**INNOVAZIONE PER UN FUTURO SOSTENIBILE**

*Relatore: Prof. Mirto Mozzon*

*Laureando: Stefano Zenere*

*2021935*

Anno Accademico 2023/2024



# Indice

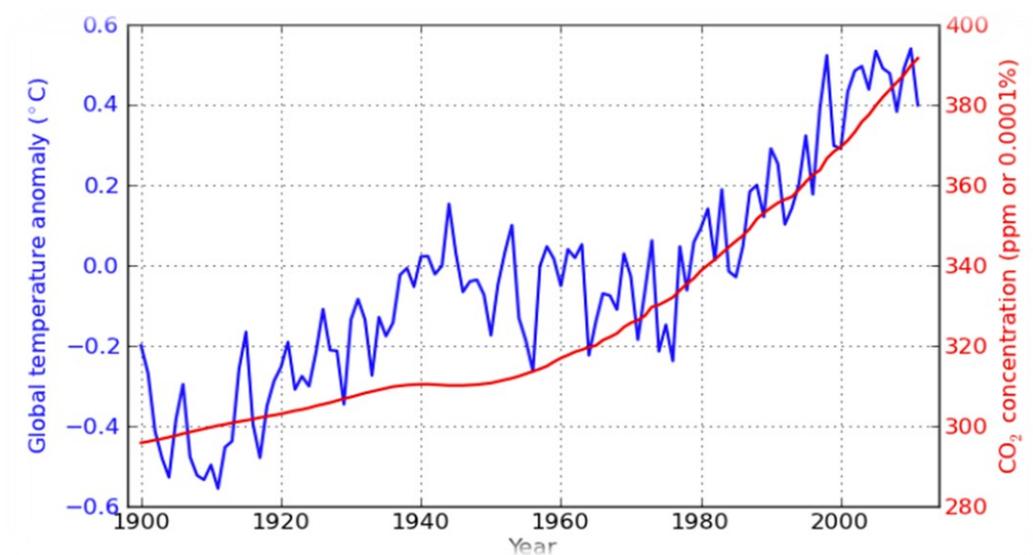
Introduzione .....	3
1. Evoluzione storica delle celle a combustibile .....	5
2. Le celle a combustibile .....	9
2.1. Descrizione generale .....	9
2.2. Elementi che compongono le celle a combustibile .....	10
2.3. Principio di funzionamento .....	12
2.4. Rendimento delle celle a combustibile .....	14
2.5. Tipologie di celle a combustibile .....	16
2.5.1. Celle alcaline .....	17
2.5.2. Celle a membrana a scambio protonico .....	19
2.5.3. Celle a metanolo diretto .....	20
2.5.4. Celle ad acido fosforico .....	21
2.5.5. Celle a carbonati fusi .....	23
2.5.6. Celle a ossidi solido .....	24
3. L'idrogeno: Proprietà, vantaggi e sicurezza .....	27
4. Produzione dell'idrogeno .....	29
4.1. Produzione da fonti non rinnovabili .....	29
4.1.1. Steam reforming .....	29
4.1.2. Ossidazione parziale di idrocarburi (ATR) .....	30
4.1.3. Gassificazione del carbone .....	32
4.1.4. Sistemi avanzati a membrana ceramica .....	32
4.2. Produzione da fonti rinnovabili .....	33
4.2.1. Elettrolisi dell'acqua .....	33
4.2.2. Pirolisi e gassificazione delle biomasse .....	34
4.2.3. Processi fotobiologici .....	36
4.2.4. Processi fotoelettrochimici .....	36
4.3. Problema della purificazione dell'idrogeno .....	36
5. Stoccaggio e distribuzione .....	39
5.1. Compressione .....	39
5.2. Liquefazione dell'idrogeno .....	40

5.3.	Idruri metallici.....	42
5.4.	Altri metodi .....	43
5.5.	Valutazioni finali sul sistema di stoccaggio .....	44
5.6.	La sicurezza dello stoccaggio. ....	45
6.	Veicoli ad idrogeno .....	49
6.1.	Sistema del Fuel processor.....	50
6.2.	Veicoli ibridi.....	51
6.2.1.	Il motore elettrico.....	51
6.2.2.	Controllo del motore elettrico, l’inverter .....	52
6.2.3.	Batterie .....	53
6.2.4.	Architettura dei veicoli ibridi .....	54
6.3.	Veicoli ibridi prodotti: .....	57
6.2.3.	BMW iX5 Hydrogen (2023) .....	57
6.2.4.	Toyota Mirai 2020.....	58
6.2.5.	Honda e GM.....	59
6.3.1.	Settore navale .....	60
	Conclusioni .....	61
	Bibliografia .....	63
	Sitografia.....	64
	Ringraziamenti.....	65

# Introduzione

Negli anni recenti, l'esigenza di identificare alternative ai combustibili fossili è diventata sempre più pressante. Il sistema energetico e dei trasporti mondiale si basa in larga misura sul petrolio, ma le riserve di petrolio non sono infinite. La scoperta di nuovi giacimenti sta rallentando, mentre la domanda di energia continua a crescere. Di fronte alla prospettiva di un esaurimento delle riserve esistenti, si sono esplorate diverse opzioni per i combustibili alternativi, come il petrolio estratto dalle sabbie bituminose, i petroli sintetici e i biocombustibili. Nonostante rappresentino delle valide alternative, tali soluzioni sono spesso meno efficienti e più costose, portando anche a un incremento delle emissioni di  $CO_2$  sia durante la produzione che durante la combustione.

Un altro grave problema legato ai combustibili fossili è la loro contribuzione alla produzione di gas serra, rilasciati nell'atmosfera e responsabili di danni ambientali significativi, come l'incremento dell'effetto serra. Questo fenomeno ha causato un aumento della temperatura atmosferica globale di circa  $1^\circ C$  nell'ultimo secolo, con un'accelerazione dell'incremento negli ultimi decenni. Tale tendenza, se non invertita, potrebbe portare a un ulteriore aumento della temperatura globale di un grado entro il 2040, secondo le previsioni del Comitato Intergovernativo sui cambiamenti climatici delle Nazioni Unite (IPCC).



**Figura 1: Scostamento della temperatura media globale (in blu) e andamento della concentrazione di  $CO_2$  nell'atmosfera (in rosso), dal 1900 ad oggi.**

Gli impatti dei gas serra sono evidenti: fusione dei ghiacciai, innalzamento del livello del mare e intensificazione di fenomeni climatici estremi, che causano danni irreversibili all'ecosistema e alla biodiversità, oltre a influenzare negativamente la salute umana attraverso l'emissione di inquinanti

pericolosi come i composti di azoto ( $NOx$ ), gli ossidi di zolfo ( $SOx$ ), le particelle sottili (PM10 e PM2,5) e il particolato liquido.

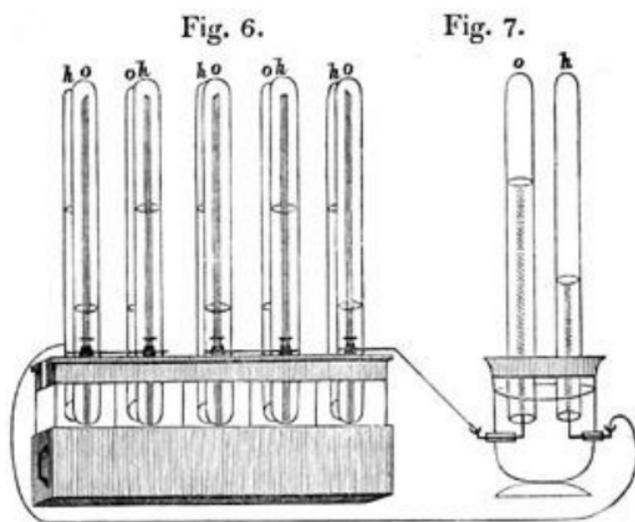
Questa tesi esplora una promettente alternativa all'uso dei combustibili fossili: la tecnologia delle celle a combustibile, note anche come Fuel Cells. Le celle a combustibile trasformano l'energia chimica di combustibili come l'idrogeno direttamente in energia elettrica, acqua e calore, attraverso un processo di ossidazione elettrochimica. Questo sistema è notevolmente efficiente e produce un impatto ambientale praticamente nullo, elementi che fino a poco tempo fa facevano apparire la sua applicazione su larga scala come un miraggio tecnologico.

Recentemente, questa tecnologia ha iniziato a trovare applicazioni concrete nel settore civile, particolarmente nella produzione energetica e nei trasporti. Con l'aumento delle pressioni ambientali e la necessità di ridurre le emissioni di gas serra, le celle a combustibile stanno emergendo come una soluzione vitale per un futuro sostenibile. I vantaggi principali includono l'alta efficienza energetica rispetto ai motori a combustione interna tradizionali e la capacità di operare con emissioni zero quando alimentati da idrogeno prodotto da fonti rinnovabili.

Oltre agli aspetti tecnologici, questa tesi esaminerà anche le sfide attuali che limitano l'adozione diffusa delle celle a combustibile, come il costo elevato delle tecnologie, la necessità di una più ampia infrastruttura di rifornimento di idrogeno, e gli ostacoli tecnici legati alla durata e alla densità energetica. Analizzeremo inoltre quali saranno i futuri passi che andranno a contribuire a superare queste barriere, delineando una roadmap per l'evoluzione futura delle tecnologie a celle a combustibile, che spazierà dall'innovazione materiale alla politica energetica, allo scopo di pavimentare la strada verso una società a basse emissioni di carbonio.

# 1. Evoluzione storica delle celle a combustibile

Le celle a combustibile, nonostante sembrano una tecnologia emergente grazie alle promettenti applicazioni future, possiedono una storia sorprendentemente lunga. Questa tecnologia risale al 1839, quando Sir William Robert Grove, un avvocato inglese con una forte passione per la scienza, presentò alla comunità scientifica il primo concetto di cella a combustibile a idrogeno. La sua iniziativa fu influenzata dalle ricerche di Christian Friedrich Schönbein, un professore presso l'Università di Basilea, che aveva studiato l'elettrolisi, ovvero la decomposizione dell'acqua in idrogeno e ossigeno mediante elettricità, una tecnica scoperta all'inizio del 1800. Fu Grove a scoprire praticamente il processo: disponendo due elettrodi di platino con una estremità di ciascuno immersa in un contenitore di acido solforico e le altre estremità sigillate separatamente in contenitori di ossigeno e di idrogeno, fluiva una corrente costante fra gli elettrodi. Grove osservò anche che il livello dell'acqua nei contenitori aumentava man mano che la corrente scorreva, indicazione della produzione di acqua. Successivamente, aumentò la tensione combinando più coppie di elettrodi in serie, sviluppando quello che originariamente denominò una batteria a gas, che rappresenta di fatto la primissima forma di cella a combustibile. Questo apparato di Grove era formato da 50 celle singole, ciascuna contenente due elettrodi di platino di 31,75 mm, capaci di generare una corrente di 12 A a 1.8 V.



**Figura 2: Rappresentazione di un sistema sperimentale di batterie a gas di Grove, pubblicato nel "Philosophical Magazine and Journal of Science", 1843.**

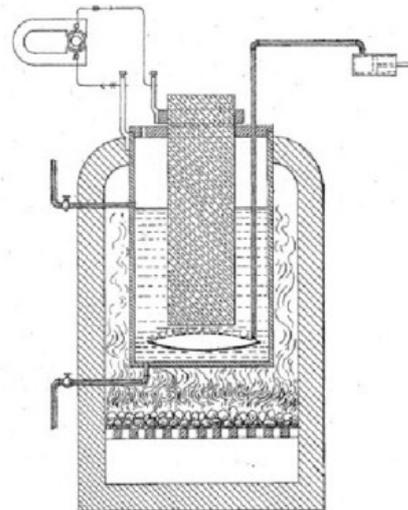
In quel periodo, la conoscenza riguardante l'elettricità, così come i concetti di voltaggio, corrente e potenza, erano ancora poco definiti. Solo nel 1893, grazie ai lavori di Friedrich Wilhelm Ostwald, ritenuto il fondatore della chimica fisica, si ottennero chiarimenti significativi sul funzionamento della cella a gas di Grove. Questo lavoro pose le basi per ulteriori ricerche nel settore. Ostwald, dopo aver esaminato le connessioni tra i componenti della cella, ipotizzava che l'idrogeno potesse diventare un combustibile diffuso tanto quanto il carbone, prevedendo che il ventesimo secolo avrebbe inaugurato "L'era della Combustione Electrochimica".

Durante la prima metà del ventesimo secolo, le ricerche sulle celle a combustibile continuarono

intensamente ma senza sfociare in applicazioni concrete e pratiche.

Diversamente dalle ipotesi iniziali di Groove, che prevedevano l'uso esclusivo di idrogeno puro, Ludwig Mond e Carl Langer dimostrarono che anche il carbone poteva essere un efficace produttore di idrogeno. Utilizzando una combinazione di idrogeno e monossido di carbonio derivata dal trattamento ad alta temperatura di vapore acqueo e carbone, generarono corrente a 0.73 volt per decimetro quadrato.

Risultati migliori furono ottenuti da William W. Jacques, un ingegnere elettrochimico americano, la cui passione era la propulsione delle navi. Nel 1896, Jacques produsse energia elettrica direttamente dal carbone, collegando in serie 100 celle, iniettando aria nell'elettrolita alcalino riscaldato (a circa 400-500° C) che andava a reagire con un elettrodo di carbonio (egli pensava). Nonostante un rendimento dell'appena 8% (si trattava di una conversione termoelettrica e non elettrochimica come si credeva), questo fu il primo sistema di celle ad elevata potenza: Jacques misurò una corrente di 16 A a 90 V, corrispondente a circa 1.5 kW.

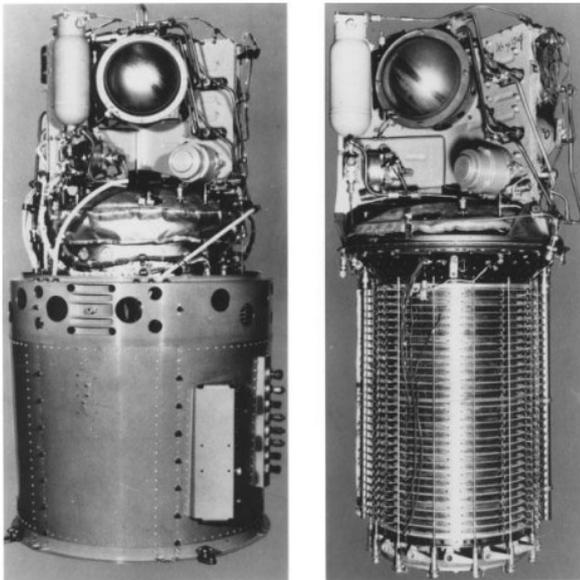


**Figura 3: La cella a carbone di William Jacques, "The Electrical Review", 1896**

Nei primi anni del nuovo secolo invece, gli studi di Emil Baur, lo condussero alla realizzazione della prima cella a combustibile a carbonati fusi (1921), utilizzando elettrodi fusi ed operando ad alta temperatura.

Thomas Francis Bacon, un ingegnere meccanico britannico, segnò un punto di svolta nella storia delle celle a combustibile introducendo per la prima volta una tecnologia praticamente utilizzabile. Durante gli anni '30, Bacon, partendo da prototipi simili a quelli di Grove, si concentrò sullo sviluppo delle celle a combustibile alcaline (AFC), una tecnologia già esplorata all'inizio del secolo da J. H. Reid. Modificò l'elettrolita utilizzato, passando dall'acido solforico a una soluzione meno corrosiva di idrossido di potassio. Nel 1939, realizzò una cella innovativa con elettrodi porosi di nichel che favorivano una migliore diffusione dei gas e operava ad alte pressioni per prevenire l'ostruzione dei pori, un problema causato dall'acqua generata dalla reazione elettrochimica. Questa cella, progettata come un sistema bipartito in cui una unità produceva idrogeno e l'altra fungeva da cella effettiva, inizialmente funzionava a 220 bar e 100°C, producendo 13 mA/cm<sup>2</sup> a 0.89 V. Con il passare degli anni, furono apportati miglioramenti significativi che permisero di lavorare a temperature fino a 200°C e a pressioni ridotte di 50 bar, grazie all'evoluzione dei materiali e delle tecnologie per la produzione degli elettrodi. Nel 1959, con il supporto della Marshall Aerospace, Bacon presentò una

cella da 5 kW con un'efficienza del 60%, composta da 40 unità con elettrodi di 25,4 mm di diametro. Nonostante l'alto costo di produzione, il progetto catturò l'attenzione della Pratt & Whitney, un importante produttore aerospaziale americano, che acquistò i brevetti e poco dopo dotò le navette spaziali del programma Apollo di queste tecnologie. Le AFC si dimostrarono ideali per l'uso spaziale, essendo più leggere delle batterie tradizionali e beneficiando della presenza di serbatoi di ossigeno nelle missioni con equipaggio, dove anche l'acqua prodotta poteva essere riutilizzata. Le navicelle che portarono gli astronauti sulla Luna erano equipaggiate con celle a combustibile dotate di elettrodi



**Figura 4: Sistema di celle alcaline per il programma Apollo (Pratt & Whitney, modulo da 1.12 kW di 31 celle)**

di 2 mm di spessore e 20 cm di diametro, realizzati in nichel sinterizzato e ricoperti da uno strato doppio di platino attivato. Operavano a temperature tra i 200 e i 230°C e i contenitori in nichel, rinforzati con fluoropolimeri per garantire sigillatura e isolamento, mantennero il sistema in pressione a 3.3 bar. Questo sistema di celle, dal peso totale di 810 kg, forniva 500 kWh per la durata di 10 giorni di missione, con una densità energetica di 620 Wh/kg.

Durante quel periodo, le celle a combustibile dimostrarono le loro potenzialità non solo in applicazioni spaziali ma anche in ambito terrestre. Un esempio significativo è il trattore prodotto nel 1959 da Allis-Chalmers, equipaggiato con uno stack di 1008

celle a combustibile, che erogava una potenza di 15 kW e aveva la capacità di sollevare fino a 1400 kg. Il combustibile utilizzato era una miscela principalmente di propano e idrogeno compresso. Gli anni '60 videro una serie di altri sviluppi innovativi, tra cui spiccano i progetti di Karl Kordesh. Nel 1966, Kordesh introdusse la prima automobile alimentata a idrogeno, una Austin A40 Sedan equipaggiata con uno stack alcalino da 6 kW e supportata da batterie al piombo per migliorare l'accelerazione. Questa automobile vantava un'autonomia di 300 km. L'anno seguente, il suo interesse si spostò sui veicoli a due ruote, realizzando una motocicletta alimentata da celle alcaline che utilizzavano idrazina e aria. Questo mezzo riuscì a percorrere 500 km con una velocità massima di 40 km/h e un impressionante consumo di 90 km/l di idrazina.



**Figura 5: Il trattore a celle a combustibile realizzato da Allis-Chalmers, 1959**



**Figura 6: La Austin A40 Sedan a celle a combustibile di Karl Kordesch**

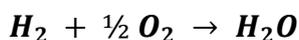
Durante gli anni '60, emersero significative innovazioni nelle tecnologie delle celle a combustibile. Queste includevano le celle polimeriche a scambio protonico (PEM), adottate dalla NASA per il progetto Gemini, e le celle ad acido fosforico, che potevano operare con aria normale anziché ossigeno puro. Si svilupparono anche le celle a carbonati fusi e quelle ad ossidi solidi. Nei decenni successivi, si è assistito a un progresso costante nella tecnologia delle fuel cells, con particolare attenzione alla riduzione dei costi dei catalizzatori e al miglioramento delle loro prestazioni e durata. Oggi, le celle a combustibile non hanno ancora trovato un'applicazione diffusa nel quotidiano, ma molte industrie stanno lavorando per integrarle in vari settori. L'uso più comune è quello stazionario: servono come generatori di elettricità in situazioni critiche, come nei picchi di richiesta energetica o quando la fonte primaria non è efficiente. Questo ruolo era tradizionalmente svolto dalle batterie, ma le fuel cells, sempre più competitive, stanno gradualmente prendendo il loro posto, specialmente per applicazioni che richiedono potenze tra 1 e 5 kW. Attualmente, ci sono oltre 2500 impianti di fuel cells installati globalmente in ospedali, rifugi, hotel e edifici situati in aree remote o isolate, lontane dalla rete elettrica convenzionale.

Nel settore dei trasporti, il primo veicolo di serie alimentato a celle a combustibile è stato introdotto da Honda nel 2007: un'auto capace di percorrere 570 km con una ricarica e di raggiungere una velocità massima di 160 km/h. Marchi come Toyota e Hyundai hanno seguito l'esempio, lanciando sul mercato globale vari modelli di auto a idrogeno. Nonostante ciò, la diffusione di tali veicoli è stata ostacolata dalla scarsità di infrastrutture di rifornimento. Tuttavia, nel settore del trasporto pubblico, le fuel cells hanno avuto maggior successo, con un notevole numero di autobus operativi in diverse città del mondo, incluse Milano e Bolzano in Italia. Vi sono applicazioni interessanti anche nel settore delle tecnologie portatili. Un esempio è la sostituzione dei generatori diesel utilizzati in campeggio, noti per essere sia inquinanti che rumorosi, con opzioni più pulite e silenziose basate su fuel cells.

## 2. Le celle a combustibile

### 2.1. Descrizione generale

Ma cos'è una cella a combustibile? È un dispositivo che genera energia elettrica sfruttando una forza elettromotrice, prodotta da una reazione elettrochimica. Partendo da particolari sostanze (idrogeno e ossigeno) e facendole reagire, senza che avvenga nessun processo di combustione termica, otteniamo elettricità. Tale reazione elettrochimica, attua una conversione diretta dell'energia, combinando idrogeno e ossigeno, formando, come prodotto, l'acqua:



Questa modalità di generazione di energia elettrica posiziona le celle a combustibile in una categoria unica di batterie, spesso riferite come pile a combustibile. Una caratteristica distintiva di questi dispositivi è la loro capacità di stoccare i reagenti all'interno di serbatoi, eliminando così la necessità di ricarica continua e permettendo un funzionamento costante fino all'esaurimento dei reagenti forniti.

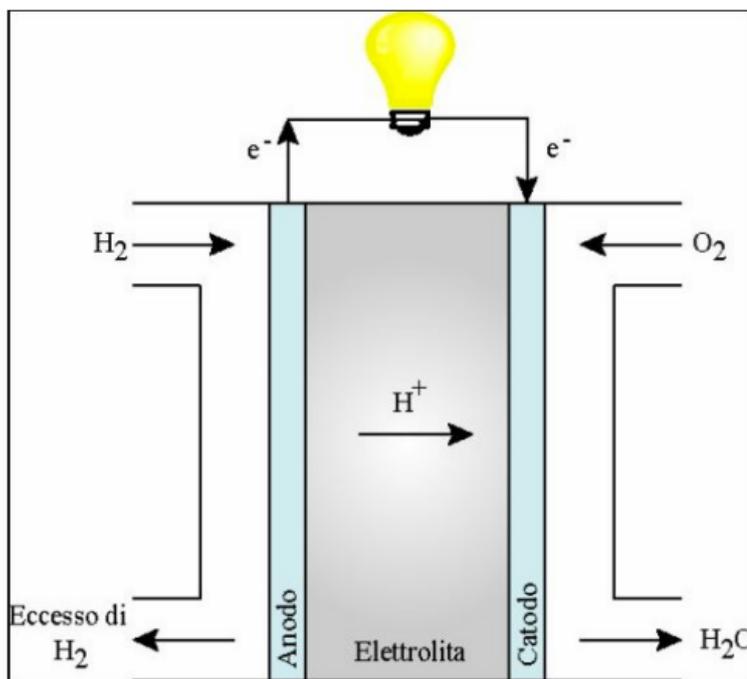


Figura 7: Rappresentazione schematica del funzionamento di una fuel cell.

Come illustrato nella figura 7, il processo vede un ingresso continuo di idrogeno  $H_2$  come combustibile e ossigeno  $O_2$  come ossidante, mentre l'acqua  $H_2O$ , prodotto dalla reazione, insieme a eventuali residui di reagenti in eccesso, viene espulso dalla cella.

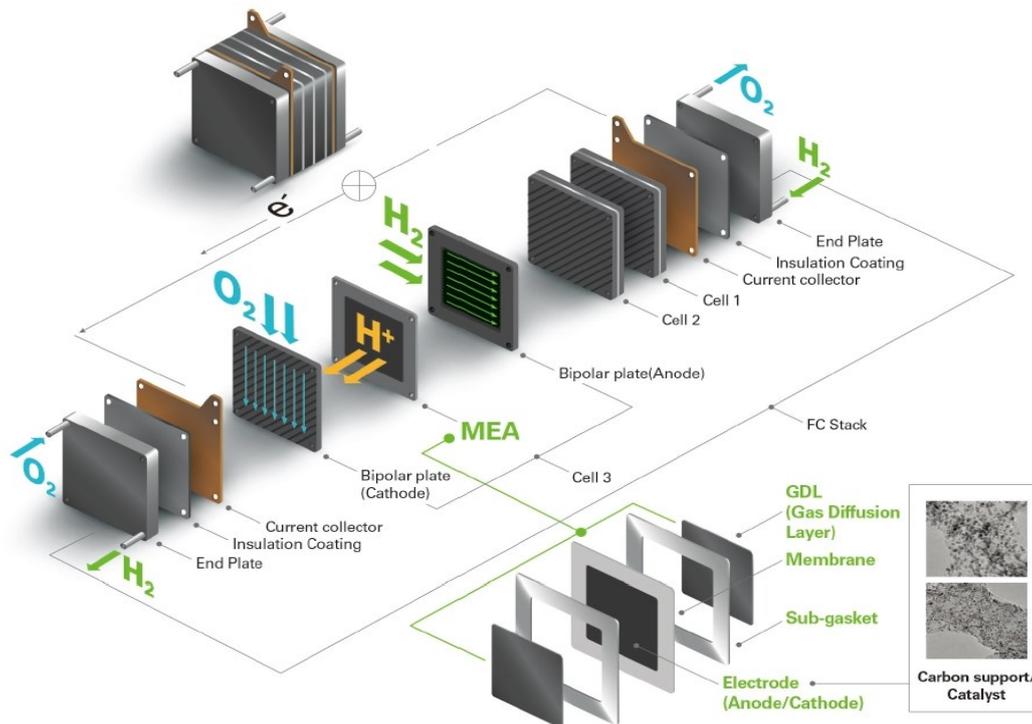


Figura 8: Assemblaggio celle a combustibile in stack

La struttura fondamentale di una cella a combustibile riflette quella di una batteria convenzionale, includendo due elettrodi conduttivi e porosi che sono separati da un elettrolita. Queste celle sono spesso disposte in una configurazione laminare, caratterizzata da strati sottili, che offre notevoli vantaggi in termini di prestazioni. Gli elettrodi piatti, ad esempio, massimizzano l'area di contatto, aumentando così l'efficienza della reazione elettrochimica. Inoltre, il design compatto e sottile facilita l'assemblaggio degli stack, ovvero gruppi di celle collegate in serie, ottimizzando l'output energetico e l'efficienza complessiva del sistema.

## 2.2. Elementi che compongono le celle a combustibile

Una cella a combustibile è composta da diversi elementi chiave che lavorano insieme per convertire l'energia chimica del combustibile in energia elettrica:

- **Anodo:** Qui avviene la reazione di ossidazione, dove il combustibile (idrogeno) viene separato in ioni positivi ed elettroni. Spesso è rivestito da un catalizzatore per aumentare l'efficacia della reazione.

- **Catodo:** I protoni attraversano la cella raggiungono il catodo, dove si combinano con l'ossigeno e gli elettroni per formare acqua. Anche qui si utilizza un catalizzatore per facilitare la reazione di riduzione.
- **Elettrolita:** Permette il passaggio di ioni (protoni), ma non di elettroni, mantenendo separati gli elettrodi e completando il circuito elettrico. Può essere una membrana polimerica, come nel caso delle celle PEM, o materiali ceramici, come nelle celle SOFC.
- **Interconnessioni/Bipolar Plates:** Collegano le celle tra loro per formare uno stack, distribuendo i gas ai rispettivi elettrodi e conducendo gli elettroni dal circuito esterno. Generalmente fatti di materiali conduttivi come il grafite o metalli trattati per resistere alla corrosione.
- **Catalizzatore:** Facilita le reazioni chimiche sia all'anodo che al catodo senza essere consumato. Spesso platino o leghe di platino, ma si stanno ricercando alternative meno costose.
- **Separatori/Gas Diffusion Layers:** Questi strati aiutano a distribuire uniformemente il combustibile e l'ossidante sugli elettrodi, e permettono la diffusione dei gas mentre bloccano il passaggio dei liquidi. Spesso composti da materiali porosi che favoriscono la diffusione del gas e gestiscono l'acqua prodotta.

Ogni componente è fondamentale per assicurare che la cella a combustibile funzioni efficientemente, trasformando il combustibile in energia elettrica con basse emissioni di inquinanti.

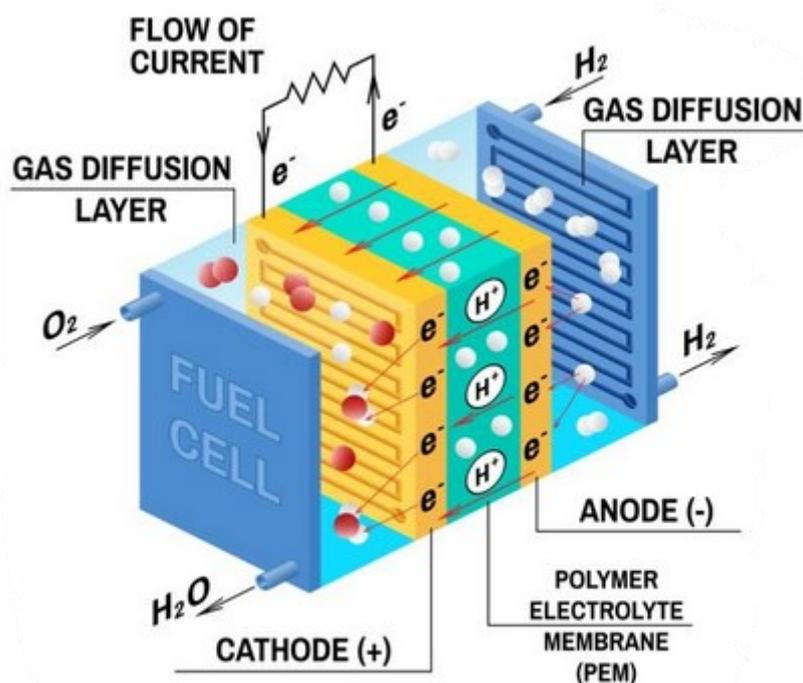


Figura 9: Elementi costitutivi di una Fuel Cell

## 2.3. Principio di funzionamento

I due elettrodi sono differenti l'un l'altro e la reazione a cui corrisponde è diversa: l'anodo è dove avviene una reazione di ossidazione, mentre nel catodo avviene quella di riduzione. L'idrogeno (il combustibile della nostra cella) fluisce in ingresso nell'anodo; qui, grazie alla presenza di un catalizzatore, si ossida, ovvero il numero di ossidazione della specie chimica aumenta, che, detto in termini pratici, significa perdere elettroni. L'idrogeno  $H_2$  arriva all'anodo, che è un elettrodo poroso. Qui, le molecole di idrogeno si separano in protoni (ioni  $H^+$ ) ed elettroni  $e^-$ . I protoni passano

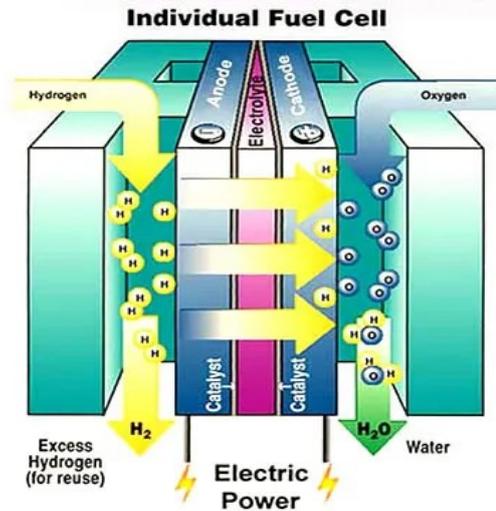
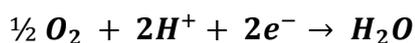


Figura 10: Funzionamento di una fuel cell

attraverso l'elettrolita, mentre gli elettroni rimangono sulla superficie dell'anodo, che è un materiale conduttore. Questo accumulo di elettroni sull'anodo crea una differenza di potenziale tra l'anodo e il catodo. A causa della forza elettrostatica, si forma una "doppia carica" tra l'anodo e l'elettrolita. Man mano che il processo continua, questo gradiente di potenziale cresce fino a raggiungere un equilibrio. La reazione elettrochimica che avviene all'anodo può essere rappresentata dalla seguente equazione:



Gli ioni idrogeno vengono poi trasportati attraverso l'elettrolita, fino al catodo; l'elettrolita infatti è un conduttore di seconda specie, ovvero capace di condurre corrente, tramite lo spostamento di ioni, e non degli elettroni, come invece avviene nei comuni conduttori di prima specie. Perciò con l'avvenire della reazione precedentemente descritta, aumenta la concentrazione degli ioni nella soluzione, i quali si spostano raggiungendo il catodo. Qui abbiamo in ingresso l'ossigeno, che a contatto con l'elettrodo si riduce, acquisendo elettroni (diminuzione del numero di ossidazione), e lega con gli ioni positivi di idrogeno, formando così l'acqua.



Affinché la reazione possa avvenire, è necessario che gli elettroni si spostino dall'anodo al catodo attraverso un circuito esterno, generando così una corrente elettrica proporzionale alla velocità della reazione.

Il funzionamento di una cella a combustibile è simile a quello di una batteria tradizionale, con la differenza fondamentale che in una cella a combustibile l'energia non è immagazzinata al suo interno,

ma è piuttosto convertita direttamente dall'energia chimica dei reagenti. Ciò richiede uno stoccaggio esterno dei combustibili, come l'idrogeno in un serbatoio, permettendo alla cella di operare continuamente, a differenza delle batterie che, una volta scaricate, necessitano di essere ricaricate, processo che può comportare perdite di tempo.

Le celle a combustibile offrono un importante vantaggio grazie all'assenza di componenti meccanici in movimento. Questa caratteristica le rende silenziose rispetto ai sistemi di generazione di energia tradizionali, come i motori a combustione interna o i generatori diesel, che producono rumore a causa delle parti mobili e delle vibrazioni.

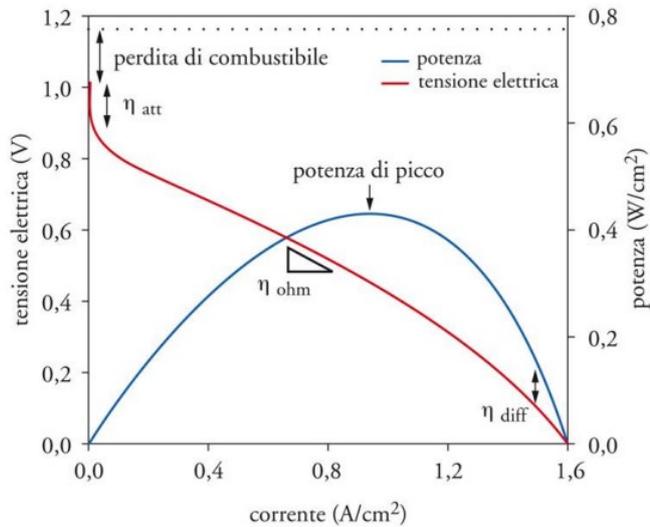
Inoltre, l'assenza di parti mobili riduce drasticamente l'usura e il rischio di guasti meccanici. Nei sistemi tradizionali, le componenti come pistoni, cuscinetti e ingranaggi si deteriorano nel tempo e richiedono manutenzione o sostituzione. Le celle a combustibile, invece, non hanno parti soggette a usura meccanica, il che ne migliora l'affidabilità e ne prolunga la vita utile.

Questa affidabilità è particolarmente vantaggiosa in applicazioni critiche o in ambienti difficili, dove la manutenzione frequente è complessa o costosa.

Per questo motivo, infatti, le celle a combustibile sono ideali per alimentare dispositivi e infrastrutture che richiedono un funzionamento continuo e senza interruzioni, come telecomunicazioni, sistemi di emergenza, veicoli elettrici e applicazioni spaziali. Inoltre, queste celle non emettono sostanze inquinanti come gli ossidi di azoto ( $NO_x$ ) e di zolfo ( $SO_x$ ), risultando in emissioni praticamente nulle.

Le celle a combustibile rappresentano una sintesi dei vantaggi delle batterie (zero emissioni locali e alta efficienza energetica) e dei motori a combustione interna (autonomia e possibilità di rapido rifornimento). Tuttavia, il loro impiego su larga scala è ancora limitato da costi elevati, dovuti a materiali costosi e tecnologie di produzione avanzate, che le relegano principalmente a settori specializzati come l'automotive a idrogeno e l'aerospaziale. Un ulteriore limite è la densità di potenza relativamente bassa rispetto ad altre tecnologie, che varia a seconda del tipo di cella a combustibile utilizzata. Nonostante i progressi tecnologici abbiano recentemente migliorato la potenza e l'efficienza delle celle a combustibile, il loro uso quotidiano è ancora confinato a nicchie di mercato specifiche.

## 2.4. Rendimento delle celle a combustibile



**Figura 11: Grafico corrente-tensione (in rosso) e grafico corrente-potenza (in blu) di una cella a combustibile**

Le prestazioni di una cella a combustibile possono essere rappresentate efficacemente attraverso un grafico corrente-tensione. Questo grafico illustra la tensione che la cella può sviluppare a specifici livelli di corrente, che sono normalizzati per l'area dato che celle di dimensioni maggiori tendono a produrre correnti più elevate. In teoria, una cella ideale sarebbe in grado di erogare una quantità illimitata di corrente mantenendo una tensione costante. Nella pratica, la corrente erogata è proporzionale alla quantità di combustibile

consumato, questo perché ogni molecola di combustibile rilascia una quantità definita di elettroni.

Ovviamente nella realtà ci sono delle limitazioni: infatti, il massimo della corrente la otteniamo al valore minimo di tensione, restringendo, di conseguenza, anche il valore massimo di potenza totale che può essere fornita. La potenza erogata (che nel grafico è intesa per unità di area, ovvero densità di potenza) è definita da:

$$P = iV$$

Quindi la tensione può essere considerata come misura dell'efficienza di una fuel cell, perché più alto è il valore del voltaggio sopportato dalla cella, maggiori saranno le correnti e le potenze erogate. Purtroppo, tale operazione è complicata essendo presenti anche diversi tipi di perdite, che vanno a diminuire la tensione effettiva della cella.

Le tre principali cause sono:

- **Perdite di attivazione:** legate all'energia necessaria per avviare le reazioni chimiche all'interno della cella.
- **Perdite ohmiche:** dovute alla resistenza interna della cella che ostacola il flusso di elettroni.
- **Perdite di concentrazione:** che si verificano quando la concentrazione di reagenti nella cella diminuisce, limitando la reazione chimica in corso.

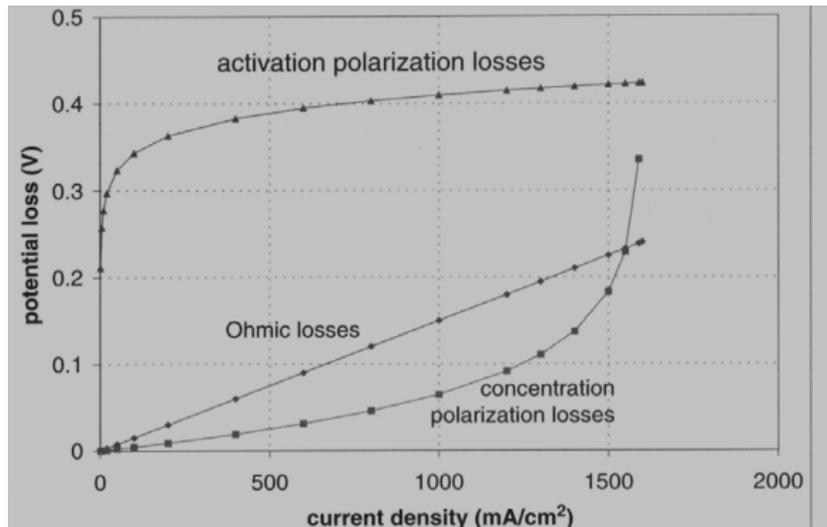


Figura 12: Grafico delle perdite di tensione in funzione della corrente

Le Perdite di attivazione si manifestano nei primi istanti di accensione della cella, quando la corrente ha ancora valori prossimi allo zero: la cella è appena uscita dallo stato di equilibrio, elettrodi e l'elettrolita si devono ancora polarizzare. Questo processo causa una sovratensione negativa, fino al raggiungimento di un equilibrio, che sarà quello operativo della cella, seguendo la legge di Tafel:

$$\Delta V = A \ln \left( \frac{i}{i_0} \right)$$

Essendo A una costante determinata sperimentalmente e  $i_0$  la densità di corrente di scambio, ovvero la corrente ideale se la sovratensione fosse nulla, abbiamo la caduta di tensione in funzione della corrente.

Le perdite ohmiche, invece, sono attribuibili alla resistenza incontrata dagli ioni e dagli elettroni durante il loro movimento all'interno della cella. Questi movimenti sono inizialmente aleatori ma diventano direzionali quando si stabilisce una differenza di potenziale, causando collisioni e, di conseguenza, un flusso di cariche.

Le perdite per concentrazione nelle celle a combustibile sono causate da limitazioni nel trasporto di massa all'interno della cella, cioè dalla difficoltà di rifornire continuamente le aree attive dell'elettrodo con i reagenti necessari (come l'idrogeno o l'ossigeno). Queste limitazioni riducono l'efficienza complessiva del sistema a livello macroscopico. Nonostante queste perdite, le celle a combustibile vantano un'efficienza elettrica che varia dal 40% al 60%, a seconda del tipo di cella e delle condizioni operative.

Tuttavia, alcune configurazioni avanzate, come quelle che utilizzano la cogenerazione (chiamata anche CHP, "Combined Heat and Power"), possono raggiungere efficienze totali di conversione

energetica fino all'80%. La cogenerazione sfrutta il calore residuo generato durante la produzione di elettricità per riscaldare ambienti, fornire acqua calda o alimentare processi industriali. Ciò permette di utilizzare in modo più completo l'energia del combustibile, riducendo gli sprechi e migliorando significativamente l'efficienza complessiva del sistema. Questo rende le celle a combustibile particolarmente efficaci per applicazioni in cui sia l'energia termica che quella elettrica sono utili, come negli edifici residenziali, nelle strutture commerciali e nelle industrie.

Per confronto, i motori a combustione interna hanno un'efficienza molto più bassa: al massimo il 30% per i motori a benzina e circa il 40% per quelli diesel. Pertanto, le celle a combustibile, specialmente quando utilizzano la cogenerazione, possono offrire vantaggi significativi in termini di efficienza energetica complessiva rispetto alle tecnologie di generazione di energia tradizionali.

## 2.5. Tipologie di celle a combustibile

Le diverse categorie di celle a combustibile si distinguono per i materiali impiegati e le reazioni chimiche che ne determinano l'operatività, influenzando così le specifiche condizioni di uso. Questa variazione si traduce in particolari vantaggi e svantaggi per ogni categoria, rendendo alcune più adatte di altre a specifiche applicazioni. Si possono identificare sei principali famiglie di celle a combustibile, ognuna classificata in base all'elettrolita che utilizzano:

- **Celle alcaline (AFC):** Utilizzano elettroliti alcalini come idrossido di potassio.
- **Celle a membrana a scambio protonico (PEMFC):** Impiegano una membrana polimerica come elettrolita.
- **Celle a metanolo diretto (DMFC):** Sfruttano il metanolo come combustibile diretto, attraverso un elettrolita polimerico.
- **Celle ad acido fosforico (PAFC):** Utilizzano acido fosforico come elettrolita.
- **Celle a carbonati fusi (MCFC):** Operano con un elettrolita di carbonati fusi.
- **Celle a ossidi solidi (SOFC):** Caratterizzate dall'uso di un elettrolita ceramico solido.

	PEMFC	SOFC	PAFC	AFC	MCFC
<b>Elettrolita</b>	Membrana polimerica	Ceramico	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> liquido	KOH liquido	Carbonati fusi
<b>Portatori di carica</b>	H <sup>+</sup>	O <sup>2-</sup>	H <sup>+</sup>	OH <sup>-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>
<b>Temperatura di esercizio</b>	80 °C	600-1000 °C	200 °C	60-200 °C	650 °C
<b>Elettrodo</b>	Platino	Ceramico	Platino	Platino	Nickel
<b>Combustibile</b>	H <sub>2</sub> , metanolo	H <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , CO	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub>

Ogni tipo di cella ha caratteristiche distintive che influenzano le loro applicazioni pratiche, dalla generazione di energia stazionaria alla propulsione di veicoli, proseguendo le vedremo in modo più approfondito.

### 2.5.1. Celle alcaline

Nel panorama delle tecnologie di generazione di energia, le celle alcaline (Alkaline Fuel Cells, AFC) rappresentano una soluzione di spicco, sviluppata originariamente per le missioni Apollo e successivamente per gli Space Shuttle. Queste celle utilizzano una soluzione di idrossido di potassio (*KOH*) come elettrolita, che facilita il trasporto di ioni  $OH^-$ . A seconda dell'applicazione, la concentrazione di *KOH* varia dal 30-35% per applicazioni a bassa temperatura fino all'85% per quelle a temperatura moderata.

Le AFC operano efficacemente a temperature che variano dai 70 ai 80°C, ottimizzando così la conducibilità ionica senza incrementare il rischio di corrosione, che sarebbe più pronunciato a temperature superiori. In contesti spaziali, dove sono richieste prestazioni superiori, le temperature possono salire fino a 250°C. La cella è progettata per iniziare a produrre energia elettrica a temperatura ambiente, raggiungendo l'efficienza massima intorno ai 70°C.

Gli elettrodi, comunemente realizzati da un substrato poroso di carbonio con una rete di nickel e un rivestimento esterno di PTFE per impedire la migrazione dei gas, utilizzano una quantità limitata di platino come catalizzatore (circa 0.3 mg/cm<sup>2</sup>). Questo basso contenuto è sufficiente grazie alla maggiore efficacia della riduzione dell'ossigeno in ambiente alcalino rispetto a quello acido.

Le reazioni agli elettrodi per il funzionamento delle AFC sono:

- **Anodo:**  $2 H_2 + 4 OH^- \rightarrow 4 H_2O + 4 e^-$
- **Catodo:**  $O_2 + 2 H_2O + 4 e^- \rightarrow 4 OH^-$

Queste celle raggiungono densità di corrente fino a 120 mA/cm<sup>2</sup> a 70°C e sono state migliorate per gestire fino a 200 mA/cm<sup>2</sup> con l'uso di elettrodi che integrano argento e nickel, offrendo una maggiore resistenza alla degradazione anche in presenza di reagenti contaminati da CO.

Le AFC sono apprezzate per l'elevato rendimento ottenuto con modeste quantità di catalizzatore, risultando in un costo di produzione contenuto tra i 50 e i 150 dollari per kW. L'utilizzo di un elettrolita liquido permette la regolazione della temperatura attraverso la circolazione, assorbendo il calore generato dalle reazioni esotermiche. Tuttavia, questo sistema richiede attenzioni particolari per evitare perdite, complicando la progettazione e richiedendo sistemi avanzati per la gestione dell'acqua.

Nonostante la loro efficacia, le AFC presentano limitazioni, inclusa una durata operativa relativamente breve, sensibilità agli ossidi di carbonio come la CO<sub>2</sub> e la necessità di mantenere sequenze precise di operazioni per prevenire l'ostruzione dei passaggi di gas o disuniformità nelle pressioni, influenzando negativamente le prestazioni generali della cella. Questi aspetti rendono le AFC particolarmente adatte a settori altamente specializzati e controllati come quello spaziale, dove possono essere gestite con rigore e precisione.

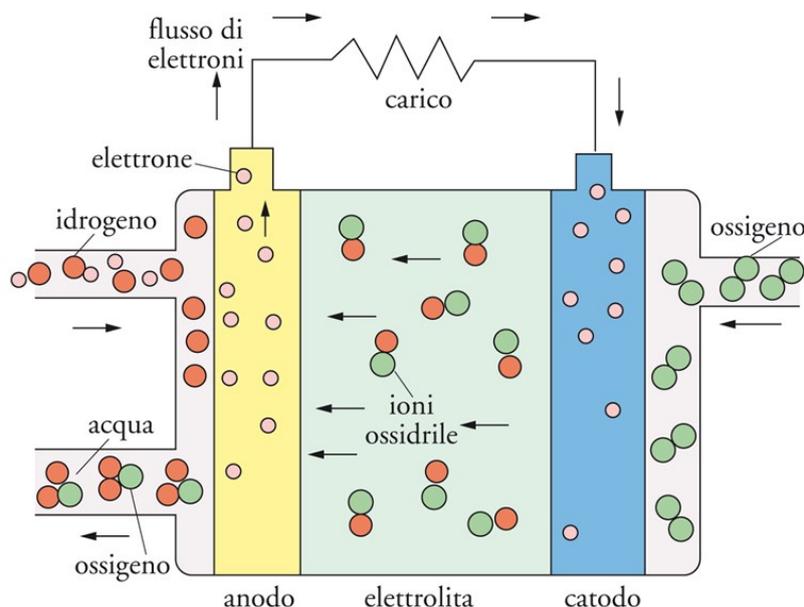


Figura 13: Schema di funzionamento di una cella alcalina

## 2.5.2. Celle a membrana a scambio protonico

Le celle a membrana a scambio protonico (Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC) furono inizialmente adottate durante il programma spaziale Gemini negli anni '60, rappresentando una diretta evoluzione delle celle alcaline, con cui condividono numerose caratteristiche. La principale distinzione tra le due risiede nell'uso di una membrana solida polimerica come elettrolita al posto di una soluzione liquida. Le prime versioni delle celle PEM impiegavano polistirene solfonato, un materiale che mostrava una notevole instabilità e richiedeva un alto contenuto di platino negli elettrodi, limitando il loro sviluppo fino alla metà degli anni '80.

Oggi, le celle PEM utilizzano una membrana a scambio ionico fatta di polimero acido solfonico clorurato (Nafion 117), collocata tra due elettrodi porosi saturi di platino. Questi elettrodi sono trattati esternamente con un rivestimento di Teflon per renderli idrorepellenti, facilitando così la diffusione dei gas e assicurando che l'acqua rimanga in contatto con la membrana. Le celle operano tipicamente a una temperatura di circa 80°C e a pressioni comprese tra 2 e 4 atmosfere, e sono configurate in stack sovrapposti in disposizione catodo-elettrolita-anodo.

Le reazioni che avvengono all'interno delle celle PEM sono le seguenti:

- **Anodo:**  $H_2 \rightarrow 2 H^+ + 2 e^-$
- **Catodo:**  $\frac{1}{2} O_2 + 2 H^+ + 2 e^- \rightarrow H_2O$

Le celle PEM si distinguono per le prestazioni superiori rispetto ad altre tecnologie, raggiungendo densità di corrente che possono arrivare fino a 2 A/cm<sup>2</sup>. Questo permette di realizzare celle più leggere e compatte, capaci di gestire rapidamente avvii e variazioni di carico. La mancanza di un elettrolita alcalino riduce significativamente i rischi di corrosione, essendo l'acqua l'unico liquido presente. Tuttavia, è fondamentale minimizzare la presenza di monossido di carbonio che può avvelenare i catalizzatori. La combinazione di costosi catalizzatori e la necessità di una membrana specializzata giustifica l'alto costo di produzione delle celle PEM, che varia tra i 500 e i 2000 dollari per kW. È essenziale anche mantenere la membrana adeguatamente idratata per facilitare il trasferimento efficiente di protoni. Le irregolarità nella distribuzione dell'acqua all'interno della cella possono provocare l'essiccazione dell'anodo, aumentando la resistenza elettrica e la temperatura, con il rischio di danneggiare irreversibilmente la membrana. Al contrario, un accumulo eccessivo di acqua al catodo può ridurre la reattività dei gas, ostacolando le reazioni elettrochimiche.

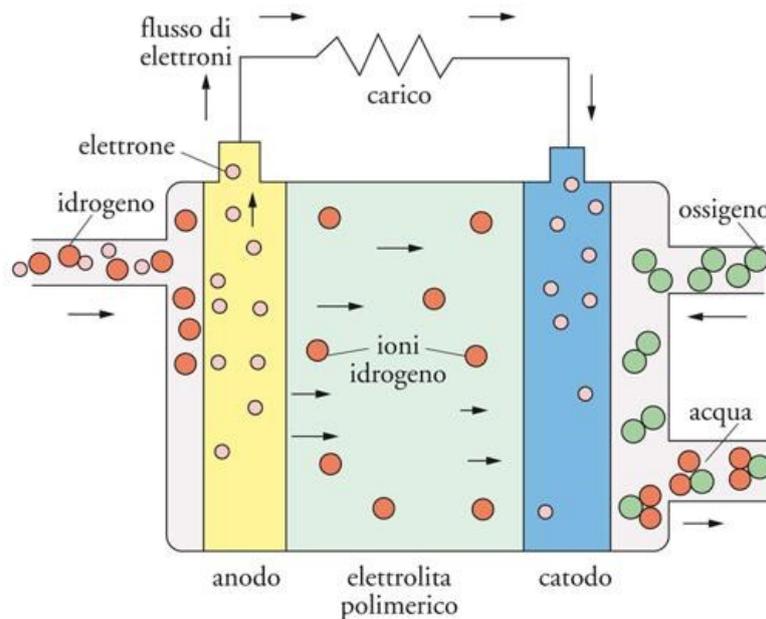


Figura 14: Schema di funzionamento di una cella PEMFC

### 2.5.3. Celle a metanolo diretto

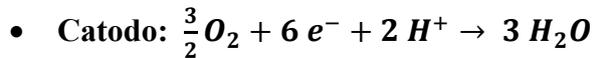
Le celle a metanolo diretto (Direct Methanol Fuel Cell, DMFC) rappresentano una categoria innovativa di celle a combustibile che utilizzano come combustibile una soluzione liquida, specificamente una miscela di acqua e metanolo. Questa tecnologia è stata originariamente sviluppata negli anni '90 dal Jet Propulsion Laboratory della NASA in collaborazione con l'Università della Southern California. Attualmente, queste celle sono ancora oggetto di ricerca e sviluppo per ottimizzare il loro rendimento e affidabilità.

Simili nelle loro basi tecnologiche alle celle a membrana a scambio protonico (PEM), le DMFC impiegano un elettrolita polimerico solido ma si distinguono per l'utilizzo del metanolo come fonte di energia. Questa scelta consente alle DMFC di operare efficacemente in dispositivi portatili come smartphone e laptop, offrendo potenzialità per sostituire le batterie tradizionali grazie alla loro durata estesa e alla facilità di ricarica attraverso la sostituzione delle cartucce di combustibile.

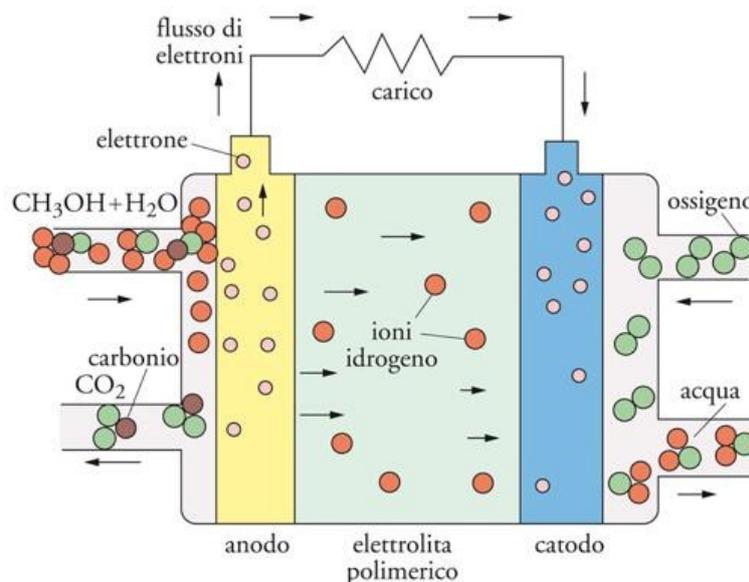
Operano tipicamente a temperature comprese tra 60 e 80°C e a pressioni basse, circa 1.5 bar, ma il loro rendimento ottimale, che si aggira attorno al 40%, si verifica a temperature di 110-130°C. La reazione elettrochimica all'anodo vede la decomposizione del metanolo e dell'acqua in anidride carbonica, elettroni e ioni idrogeno, secondo la seguente equazione:



I catalizzatori utilizzati sono solitamente una lega di platino e rutenio per prevenire l'avvelenamento da monossido di carbonio, con un carico catalitico sull'anodo di circa 1 mg/cm<sup>2</sup>. Al catodo, l'ossigeno reagisce con gli ioni idrogeno e gli elettroni per formare acqua:



Nonostante il promettente rendimento energetico, le DMFC devono ancora superare significative sfide tecniche e di costo. La produzione delle celle è ancora costosa, e la densità di potenza non è sufficientemente elevata per competere con le tecnologie di accumulo energetico più consolidate. Inoltre, la permeazione del metanolo attraverso la membrana polimerica riduce l'efficienza della cella, con conseguenze dirette sulla reazione al catodo e potenziale avvelenamento da metanolo non reagito.



**Figura 15: Schema di funzionamento di una cella a metanolo diretto**

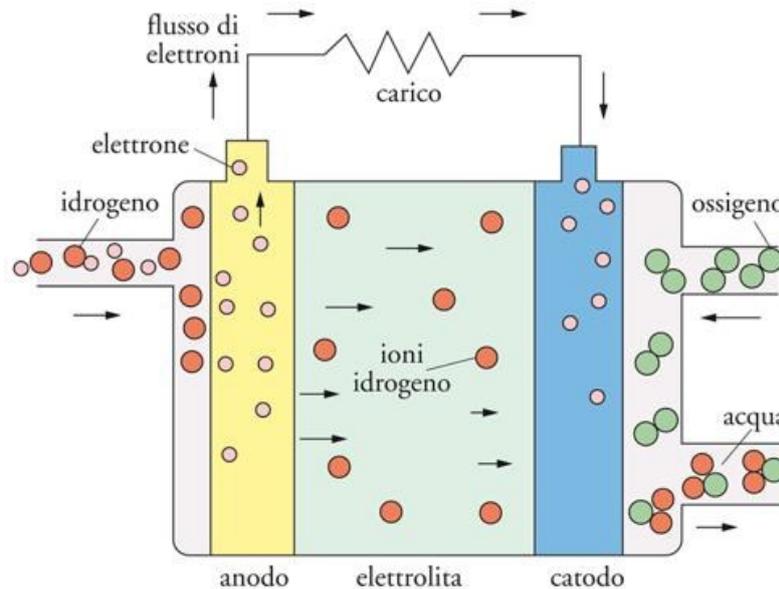
#### 2.5.4. Celle ad acido fosforico

Le celle a combustibile ad acido fosforico (Phosphoric Acid Fuel Cells, PAFC) utilizzano un elettrolita di acido fosforico al 95% mantenuto in una matrice di carburo di silicio, funzionando a temperature comprese tra 150 e 200°C, classificandole come celle a media temperatura. Sviluppate per la prima volta nel 1961 da G.V. Elmore e H.A. Tanner, le PAFC hanno trovato ampia diffusione in applicazioni stazionarie grazie alla loro efficacia e affidabilità.

Queste celle hanno un'efficienza di conversione energetica del 40% per la produzione di energia

elettrica, che può aumentare fino all'85% quando il calore residuo viene recuperato in applicazioni di cogenerazione. Le reazioni chimiche all'interno della cella sono simili a quelle delle celle PEM, all'anodo, l'idrogeno si decompone liberando elettroni e ioni idrogeno, mentre al catodo, l'ossigeno reagisce con gli elettroni e gli ioni idrogeno per produrre acqua:

- **Anodo:**  $2 H_2 \rightarrow 4 H^+ + 4 e^-$
- **Catodo:**  $O_2 + 4 H^+ + 4 e^- \rightarrow 2 H_2O$



**Figura 16: Schema di funzionamento di una cella ad acido fosforico**

Un aspetto cruciale delle PAFC è l'utilizzo di catalizzatori di platino, con un carico di 0.1 mg/cm<sup>2</sup> all'anodo e 0.5 mg/cm<sup>2</sup> al catodo. La configurazione della cella include piatti bipolari di grafite che collegano le celle individuali in stack per incrementare la potenza complessiva. Tra i principali vantaggi delle PAFC figurano l'elevata tolleranza a contaminanti come CO<sub>2</sub> e CO, che possono rispettivamente raggiungere concentrazioni fino al 30% e 2% senza impattare significativamente le prestazioni.

Le alte temperature di operazione non solo favoriscono il recupero efficiente del calore ma accelerano anche le reazioni chimiche, riducendo le perdite di polarizzazione e migliorando il rendimento globale. Tuttavia, l'acido fosforico usato come elettrolita è altamente corrosivo e tende a solidificare a temperature inferiori a 42.4°C, necessitando di un sistema di riscaldamento anche quando la cella non è attiva. La pesantezza e l'ingombro di queste celle limitano il loro uso a sistemi stazionari.

### 2.5.5. Celle a carbonati fusi

Nelle celle a combustibile a carbonati fusi MCFC, l'elettrolita è composto da una miscela di sali alcalini, specificamente carbonati di litio, potassio e sodio. Questa miscela è contenuta all'interno di una matrice ceramica porosa e inerte, fatta di alluminato di litio  $LiAlO_2$ . Le MCFC operano a temperature particolarmente elevate, generalmente tra i  $600^\circ\text{C}$  e i  $700^\circ\text{C}$ . Tale riscaldamento serve a mantenere i carbonati in uno stato fuso, il che li rende permeabili agli ioni carbonato  $CO_3^{2-}$ , facilitando così il movimento degli ioni attraverso l'elettrolita durante il processo di generazione di energia. Le reazioni agli elettrodi sono:

- **Anodo:**  $H_2 + CO_3^{2-} \rightarrow CO_2 + H_2O + 2 e^-$
- **Catodo:**  $\frac{1}{2} O_2 + CO_2 + 2 e^- \rightarrow CO_3^{2-}$

Le celle a combustibile a carbonati fusi (MCFC) sfruttano l'altezza delle temperature operative, che raggiungono i  $600-700^\circ\text{C}$ , per eliminare la necessità di usare metalli nobili come catalizzatori. Gli elettrodi in queste celle sono costituiti principalmente da nickel, con aggiunte di cromo all'anodo e di litio al catodo, rendendo il sistema economicamente più vantaggioso con costi di produzione stimati tra 1000 e 1500 dollari per kilowatt. Questa configurazione riduce non solo i costi, ma rende anche le celle immuni all'avvelenamento da monossido di carbonio ( $CO$ ), aumentando così la loro flessibilità nell'utilizzo di vari tipi di combustibili.

L'alto grado di calore generato può essere utilizzato in sistemi di cogenerazione, migliorando significativamente l'efficienza complessiva, che può raggiungere fino al 90%, con una efficienza elettrica del 65%. Inoltre, la temperatura elevata facilita l'implementazione di un processo di reforming interno, permettendo la produzione di idrogeno direttamente dal metano senza trattamenti preliminari.

Tuttavia, le elevate temperature introducono anche sfide significative. La corrosività dell'elettrolita e l'alta temperatura accelerano l'usura dei componenti della cella, limitando la loro durata operativa a circa 4000 ore. Gli elettrodi, in particolare, subiscono non solo una riduzione delle prestazioni a causa della corrosione, ma anche deformazioni meccaniche dovute ai carichi di compressione, dato che la pressione operativa è leggermente superiore a quella atmosferica. Questi fattori richiedono attenzione particolare nella progettazione e manutenzione delle MCFC per massimizzare la loro durata ed efficienza.

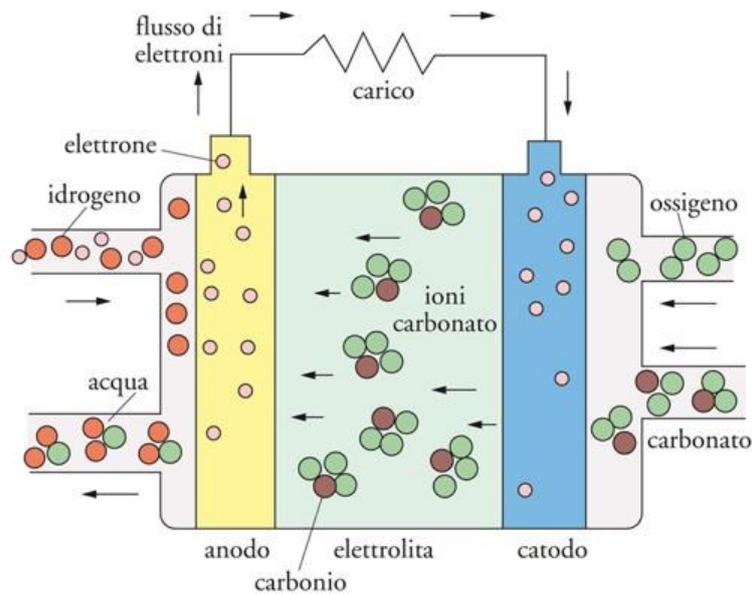


Figura 17: Schema di funzionamento di una cella a carbonati fusi

### 2.5.6. Celle a ossidi solido

Le celle a combustibile ad ossido solido (SOFC) utilizzano un elettrolita costituito da ossido di zirconio stabilizzato con ossido di ittrio, un materiale ceramico che diventa sufficientemente conduttore solo a temperature molto elevate, circa 1000°C. Questa temperatura operativa è persino superiore a quella delle celle a carbonati fusi (MCFC), e rende superfluo l'uso di platino come catalizzatore, grazie alle già elevate velocità di reazione a queste condizioni.

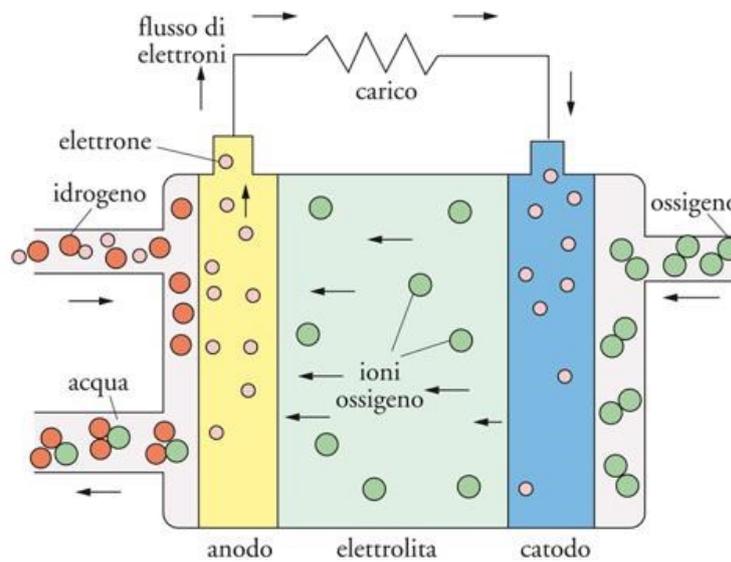
Gli elettrodi nelle SOFC, che devono essere adeguatamente porosi (con una porosità compresa tra il 20% e il 40%), sono solitamente realizzati con ossidi di zirconio dopati con cobalto o nickel per l'anodo, e magnetite di lantanio drogata con stronzio per il catodo. Le reazioni elettrochimiche che avvengono sono:

- **Anodo:**  $H_2 + O_2 \rightarrow H_2O + 2 e^-$
- **Catodo:**  $\frac{1}{2} O_2 + 2 e^- \rightarrow O^{2-}$

Un significativo vantaggio delle SOFC è la presenza di sole due fasi, solida e gassosa, il che semplifica la gestione dell'elettrolita e riduce i problemi di corrosione. L'elevata temperatura operativa permette anche di evitare l'avvelenamento da CO e CO<sub>2</sub>, che in questo contesto agiscono invece come combustibili. Inoltre, è possibile integrare un sistema di reforming interno, che consente di produrre idrogeno direttamente da metano o altri idrocarburi pesanti, come il carbone gassificato.

L'efficienza elettrica delle SOFC può raggiungere il 70%, e fino al 90% in cogenerazione, utilizzando il calore di scarto in un ciclo combinato con gas-vapore. Tuttavia, l'avvio delle SOFC è lento a causa delle alte temperature richieste, il che ne limita l'uso a applicazioni stazionarie, anche per via del loro peso.

È cruciale assicurare la stabilità termochimica dei materiali utilizzati, che devono garantire non solo una lunga durata operativa, ma anche la sicurezza degli operatori. Attualmente, la ricerca si sta concentrando sullo sviluppo di SOFC che possano operare a temperature più basse, intorno agli 800°C, anche se queste celle presentano attualmente un'efficienza inferiore rispetto a quelle tradizionali.



**Figura 18: Schema di funzionamento di una cella ad ossidi solidi**



### 3. L'idrogeno: Proprietà, vantaggi e sicurezza

L'idrogeno, simbolo  $H$  e numero atomico 1, è il primo elemento della tavola periodica, nonché l'elemento più leggero e abbondante dell'universo. Si presenta principalmente sotto forma di molecola biatomica ( $H_2$ ), un gas che, a temperatura ambiente e pressione atmosferica, è incolore, inodore e insapore, oltre ad essere altamente infiammabile. Con la densità più bassa tra tutti i gas conosciuti, il suo stoccaggio e trasporto rappresentano una sfida ingegneristica significativa, spesso affrontata attraverso compressione a pressioni elevate o liquefazione a temperature criogeniche, con la liquefazione che avviene a 20,3 K (-252,87 °C) e la solidificazione a 14,03 K (-259,12 °C).

Dal punto di vista chimico, l'idrogeno è estremamente reattivo a causa del legame relativamente debole tra i suoi atomi, che facilita la dissociazione in protoni ed elettroni, un processo essenziale per il funzionamento delle celle a combustibile. Questa reattività si mantiene anche a basse temperature, inferiori a 300 °C, rendendolo un combustibile molto efficiente elettrochimicamente. Inoltre, l'idrogeno brucia in modo pulito: quando reagisce con l'ossigeno, produce solo acqua ( $H_2O$ ), senza emettere inquinanti come ossidi di azoto ( $NOx$ ) o ossidi di zolfo ( $SOx$ ).

L'idrogeno ha un elevato coefficiente di diffusione, il che significa che, in caso di perdita, si disperde rapidamente nell'aria. Questa caratteristica riduce il rischio di accumulo di gas, che potrebbe portare a incendi o esplosioni. Data la rapida diffusione richiede precauzioni speciali durante lo stoccaggio e la manipolazione, soprattutto in spazi chiusi o poco ventilati. In questi ambienti, infatti, l'idrogeno potrebbe non disperdersi rapidamente, aumentando il rischio di concentrazioni pericolose. Per questo motivo, è fondamentale adottare misure di sicurezza adeguate, nei veicoli, ad esempio, vengono installati sensori per rilevare eventuali fughe di idrogeno, in caso di perdita, i finestrini si aprono automaticamente per facilitare la dispersione del gas.

Nonostante i numerosi vantaggi, l'uso dell'idrogeno come combustibile presenta alcune criticità. A causa della sua bassa densità volumetrica, è difficile da stoccare e trasportare in grandi quantità; per farlo in modo efficiente, sono necessarie tecnologie avanzate, come la compressione a pressioni elevate o la liquefazione a temperature molto basse (criogenia). La produzione di idrogeno, anche quando effettuata con metodi sostenibili come l'elettrolisi dell'acqua utilizzando fonti rinnovabili, richiede molta energia. Questo alto consumo energetico può ridurre i vantaggi ambientali, a meno che l'energia utilizzata per la sua produzione provenga interamente da fonti rinnovabili. Per massimizzare i benefici ecologici dell'idrogeno, è quindi fondamentale garantire che l'intero processo, dalla produzione allo stoccaggio, sia alimentato da energie sostenibili.

Dal punto di vista della sicurezza quindi, il principale rischio associato allo stoccaggio dell'idrogeno riguarda la possibilità di incendi o esplosioni. Tuttavia, non è intrinsecamente più pericoloso di altri combustibili, dato che anche altri carburanti possono essere innescati da una scintilla di bassa energia. Con le dovute precauzioni, come l'uso di sensori e sistemi di monitoraggio costante, l'idrogeno può essere gestito con livelli di sicurezza comparabili a quelli dei combustibili tradizionali.

Un altro vantaggio dell'idrogeno è la sua non tossicità: se rilasciato nell'atmosfera, non provoca inquinamento ambientale né rappresenta un pericolo per la salute umana. Questo lo rende un'opzione sicura rispetto ad altri combustibili, che possono rilasciare sostanze nocive o inquinanti in caso di dispersione.

L'idrogeno ha una temperatura di autoaccensione di circa 550 °C, che è superiore a quella di molti combustibili tradizionali come la benzina, che si autoaccende tra i 230 e i 500 °C. Questo lo rende meno infiammabile in alcune circostanze. Inoltre, la sua leggerezza fa sì che, in caso di incendio, tenda a bruciare verso l'alto, diversamente da altri combustibili come benzina, GPL, gasolio e metano, che tendono a raccogliersi sotto i veicoli. Di conseguenza, in caso di incendio di un veicolo alimentato a idrogeno, il fuoco di solito si estingue entro uno o due minuti, e la ridotta radiazione termica dell'idrogeno limita il rischio di propagazione nelle aree circostanti.

Attraverso queste caratteristiche è possibile definire l'idrogeno come un vettore energetico molto promettente per il futuro delle tecnologie energetiche, grazie alla sua alta reattività, alla combustione pulita e all'assenza di emissioni inquinanti. Tuttavia, le sfide ingegneristiche legate allo stoccaggio, alla manipolazione e alla produzione sostenibile di questo gas richiedono ulteriori sviluppi tecnologici per renderne l'uso su larga scala una soluzione praticabile ed efficiente.

## 4. Produzione dell'idrogeno

L'idrogeno, pur essendo l'elemento più abbondante sulla Terra, non si trova naturalmente in forma molecolare singola ( $H_2$ ). Per poterlo utilizzare, è necessario estrarlo da altre sostanze che lo contengono, come l'acqua o i combustibili fossili. Attualmente, la maggior parte dell'idrogeno viene prodotta direttamente da utilizzatori come raffinerie e industrie chimiche, spesso come sottoprodotto di vari processi industriali.

Al momento, non esiste un settore specifico dedicato alla produzione sistematica dell'idrogeno su larga scala. Di conseguenza, i primi passi per l'adozione diffusa di questa tecnologia dipendono ancora dai metodi di produzione tradizionali, che utilizzano principalmente fonti fossili. Tuttavia, l'obiettivo a lungo termine è sviluppare sistemi di produzione sempre più orientati verso l'uso di energie rinnovabili, riducendo la dipendenza dai combustibili fossili e migliorando la sostenibilità dell'idrogeno come vettore energetico.

Nel proseguo, analizzeremo le tecniche più comuni per la produzione di idrogeno, sia da fonti non rinnovabili sia, soprattutto, da fonti rinnovabili.

### 4.1. Produzione da fonti non rinnovabili

#### 4.1.1. Steam reforming

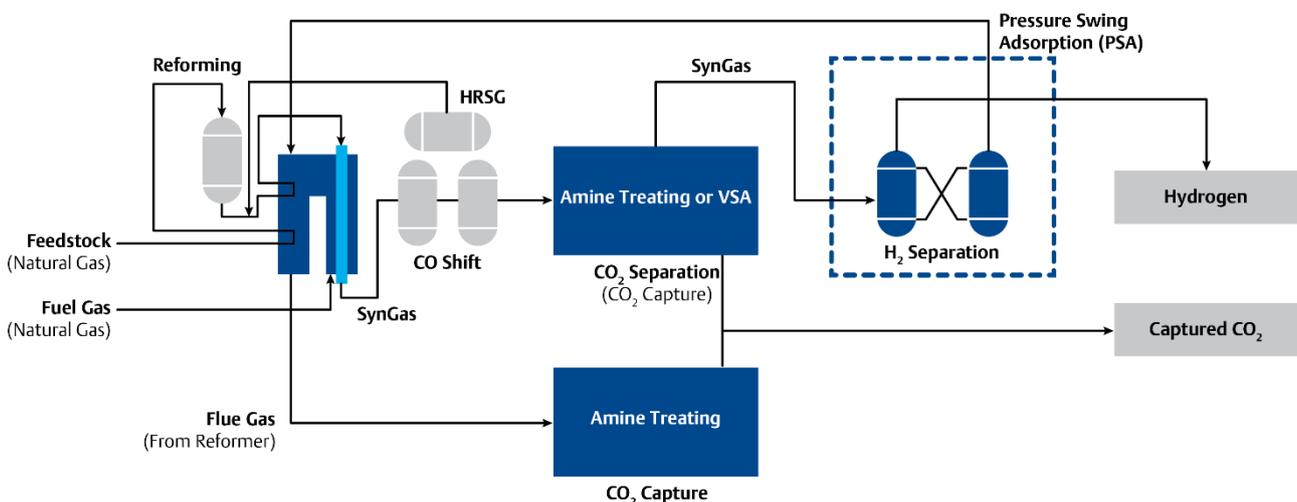
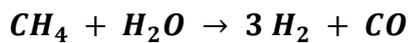
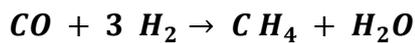
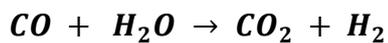


Figura 19: Ciclo di steam reforming

Il metodo attualmente più economico e quindi maggiormente utilizzato, che copre circa il 50% della produzione globale, è lo steam reforming. Questo processo è applicabile solo agli idrocarburi leggeri, come il metano, poiché la loro vaporizzazione non genera depositi carboniosi. Le principali fasi del processo includono la generazione del gas di sintesi, la reazione di shift e la purificazione del gas. Inizialmente, il gas subisce una desolforazione per rimuovere lo zolfo, che viene convertito in acido solforico. Successivamente, il gas passa attraverso il reformer, un dispositivo costituito da un sistema di tubi in acciaio contenenti un catalizzatore a base di nickel. In questa fase, a una temperatura superiore a 800° C e una pressione di 35 bar, avviene la reazione di reforming:



Il metano e il vapore acqueo reagiscono formando una miscela di idrogeno e monossido di carbonio, che è tossico e deve essere rimosso. A questo scopo, si procede con la reazione di shift reforming e la metanizzazione:



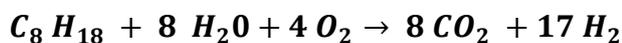
A differenza della fase precedente, in cui il calore necessario viene fornito bruciando parte del metano, queste reazioni sono esotermiche e avvengono spontaneamente a temperature inferiori (500° C nella prima fase e 200° C nella seconda). Tuttavia, l'anidride carbonica prodotta è difficile da gestire e non può essere liberata nell'ambiente. Per questo motivo, si procede al "sequestro" della  $CO_2$ , che viene successivamente immagazzinata in giacimenti petroliferi esauriti. Il prodotto finale di questo complesso processo è idrogeno con una purezza del 98%. Il reforming del metano è un processo relativamente efficiente e ben collaudato, che consente di produrre grandi quantità di idrogeno a costi relativamente bassi rispetto ad altre tecniche. È attualmente la tecnologia dominante per la produzione di idrogeno su larga scala. Uno degli svantaggi principali del reforming è che genera anidride carbonica ( $CO_2$ ) come sottoprodotto, contribuendo alle emissioni di gas serra. Per ridurre l'impatto ambientale, sarebbe necessario combinare il processo con tecnologie di cattura e stoccaggio del carbonio (CCS).

#### 4.1.2. Ossidazione parziale di idrocarburi (ATR)

L'ossidazione parziale è un metodo che consente di ottenere idrogeno dai residui di lavorazione del petrolio greggio e dagli idrocarburi pesanti, come la benzina. Questo processo utilizza un reattore in cui gli idrocarburi vengono fatti reagire con vapore acqueo e ossigeno, permettendo di produrre

idrogeno e anidride carbonica direttamente, senza la necessità di catalizzatori aggiuntivi, a differenza dello steam reforming. Proprio per questo motivo si parla di "ossidazione parziale".

Una reazione tipica dell'ossidazione parziale di un idrocarburo, come l'ottano, può essere rappresentata dalla seguente equazione chimica:



L'ossidazione parziale sfrutta la conversione autothermal, un processo in cui una parte del combustibile in ingresso viene bruciata per fornire l'energia necessaria alla reazione. Questo significa che il calore richiesto per la produzione di idrogeno viene generato internamente, rendendo il processo indipendente da fonti di energia esterne. Le reazioni avvengono a temperature molto elevate, generalmente tra i 1300 °C e i 1500 °C, condizioni che favoriscono la conversione degli idrocarburi in idrogeno e anidride carbonica.

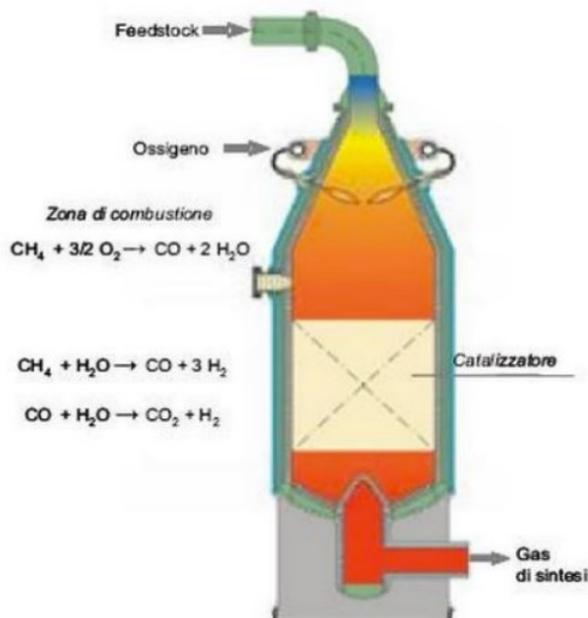
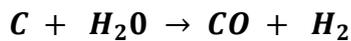


Figura 20 Processo di ATR (reforming autotermico)

Nonostante l'efficienza di conversione relativamente bassa (circa il 50%), l'ossidazione parziale è largamente utilizzata dalle grandi compagnie petrolifere per la produzione su larga scala di idrogeno. Questa scelta è dovuta alla capacità del processo di trattare idrocarburi pesanti e residui di raffinazione, che sono facilmente disponibili come sottoprodotti dell'industria petrolifera. Pertanto, il processo rappresenta una soluzione pratica ed economicamente vantaggiosa per produrre idrogeno, anche se richiede la gestione delle elevate emissioni di anidride carbonica prodotte. Guardando al futuro, esiste la prospettiva di miniaturizzare questa tecnologia per integrarla direttamente nei veicoli, permettendo loro di produrre idrogeno in loco utilizzando combustibili tradizionali, come benzina o gasolio. Questa innovazione potrebbe ridurre significativamente la dipendenza dalle infrastrutture di rifornimento di idrogeno, come le stazioni di servizio, e aumentare l'autonomia energetica dei mezzi di trasporto. I veicoli potrebbero, infatti, trasformare il combustibile disponibile in idrogeno al bisogno, rendendo più flessibile l'utilizzo di tecnologie a idrogeno e facilitandone la transizione.

### 4.1.3. Gassificazione del carbone

Il carbone, costituito principalmente da carbonio, oltre a idrocarburi pesanti e cenere, può essere utilizzato per produrre gas attraverso un processo noto come gassificazione. Questa reazione endotermica coinvolge il riscaldamento di carbone polverizzato a temperature elevate, tipicamente tra 800°C e 1200°C, in presenza di una quantità limitata di ossigeno o aria e vapore d'acqua. Il risultato di questa reazione è un gas di sintesi, composto principalmente da idrogeno ( $H_2$ ) e monossido di carbonio ( $CO$ ):



Per garantire una conversione completa del carbone senza la formazione di residui indesiderati, è essenziale controllare il tempo di permanenza delle sostanze all'interno del reattore e mantenere le alte temperature necessarie. Sebbene la gassificazione sia più complessa e costosa rispetto ad altri metodi, risulta particolarmente utile in regioni come la Cina e il Sudafrica, dove le risorse di metano sono limitate.

### 4.1.4. Sistemi avanzati a membrana ceramica

Recentemente, sono stati sviluppati piccoli impianti innovativi progettati per estrarre idrogeno dal gas naturale, destinati all'uso nei veicoli. Uno di questi sistemi, il Membrana di Trasporto Ionico (ITM), consente di produrre una miscela di gas contenente idrogeno e monossido di carbonio ( $CO$ ) direttamente dal gas naturale, mantenendo i costi di produzione relativamente bassi. Questo processo utilizza membrane ceramiche speciali in grado di separare l'ossigeno dall'aria e di convertire il gas naturale in idrogeno. L'aria viene riscaldata a temperature superiori a 600°C e immessa in un reattore che isola l'ossigeno, facendolo migrare attraverso una struttura cristallina. L'ossigeno così separato reagisce con i catalizzatori del reformer, facilitando la produzione di una miscela di gas contenente idrogeno e  $CO$ . La miscela gassosa risultante viene poi purificata per rimuovere il monossido di carbonio, isolando l'idrogeno puro.

Attualmente, il sistema è in fase di ottimizzazione per migliorare l'efficienza del processo di purificazione e si stanno testando nuovi materiali per aumentare le prestazioni delle membrane attive

## 4.2. Produzione da fonti rinnovabili

### 4.2.1. Elettrolisi dell'acqua

L'elettrolisi è un metodo molto promettente per la produzione di idrogeno, poiché consente di ottenerlo in modo diretto e pulito a partire dalla molecola dell'acqua, senza generare monossido di carbonio ( $CO$ ) o anidride carbonica ( $CO_2$ ), che richiederebbero ulteriori trattamenti per essere smaltiti. Attualmente, questa tecnologia rappresenta solo il 5% della produzione mondiale di idrogeno.

Il processo di elettrolisi si basa sull'immersione di due elettrodi — uno positivo (anodo) e uno negativo (catodo) — in una soluzione acquosa che funge da elettrolita. La corrente elettrica fornita al sistema genera un flusso di elettroni che attraversa la soluzione, causando la dissociazione chimica dell'acqua in idrogeno e ossigeno. Sotto l'effetto del campo elettrico, l'acqua si separa in ioni, che vengono poi separati da un diaframma microporoso permeabile solo agli ioni. L'idrogeno si accumula nella zona del catodo, mentre l'ossigeno si raccoglie nell'anodo. Durante il processo, l'acqua consumata deve essere continuamente reintegrata.

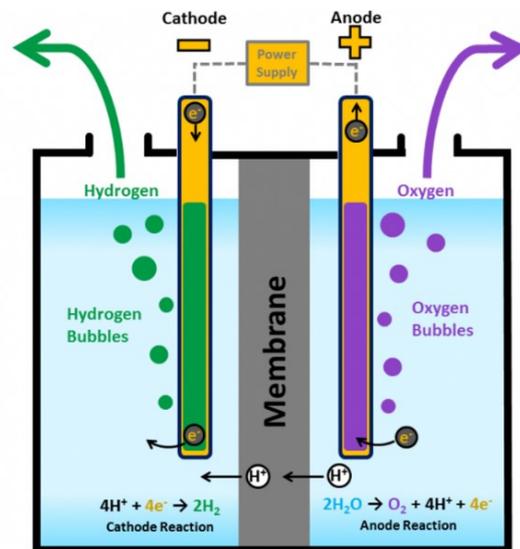


Figura 21: Schema di funzionamento dell'elettrolisi dell'acqua

Le reazioni saranno quindi:

- **Anodo:**  $2 H_2O \rightarrow O_2 + 4 H^+ + 4 e^-$
- **Catodo:**  $4 H_2O + 4 e^- \rightarrow 2 H_2 + 4 OH^-$
- **Complessivamente:**  $2 H_2O \rightarrow 2 H_2 + O_2$

L'elettrolisi richiede un apporto energetico significativo, poiché la separazione della molecola d'acqua avviene grazie alla corrente elettrica. Tuttavia, il principale vantaggio di questa tecnologia è la

possibilità di produrre idrogeno puro direttamente nel luogo di utilizzo o di generarlo in un sito specifico per poi trasportarlo dove necessario.

La ricerca nell'ambito dell'elettrolisi si concentra in modo significativo sull'ottimizzazione dei materiali utilizzati per gli elettrodi, poiché questi componenti giocano un ruolo cruciale nell'efficienza del processo. Migliorare la qualità dei materiali degli elettrodi consente di aumentare il flusso di corrente e ridurre le perdite elettriche, che sono fattori chiave per minimizzare l'energia necessaria alla scissione dell'acqua in idrogeno e ossigeno. L'uso di materiali avanzati, come quelli a base di metalli rari o rivestimenti speciali, potrebbe portare a una maggiore conduttività e durabilità, riducendo i costi operativi e migliorando le prestazioni complessive del sistema di elettrolisi.

Parallelamente, la ricerca esplora la possibilità di condurre l'elettrolisi a temperature più elevate, tra 900°C e 1000°C, un approccio noto come elettrolisi ad alta temperatura. A queste temperature, l'energia necessaria per separare la molecola d'acqua diminuisce, rendendo la reazione più facile e aumentando la velocità del processo. Questo può migliorare l'efficienza del processo fino al 30% rispetto ai metodi di elettrolisi tradizionali, poiché una parte dell'energia necessaria viene fornita sotto forma di calore. Questo approccio potrebbe essere particolarmente vantaggioso in combinazione con fonti di calore disponibili, come il calore di scarto industriale, rendendo l'elettrolisi una tecnologia più efficiente e praticabile.

Un ulteriore vantaggio dell'elettrolisi è la possibilità di utilizzare energia elettrica proveniente da fonti rinnovabili, come eolico, solare-fotovoltaico, idroelettrico e geotermico, per produrre idrogeno senza impatti negativi sull'ambiente. Questo rende l'elettrolisi una tecnologia di produzione di idrogeno a "emissioni zero", in linea con gli obiettivi globali di sostenibilità e riduzione delle emissioni di gas serra. Ad esempio, le centrali idroelettriche potrebbero sfruttare l'eccesso di energia prodotto durante i periodi di bassa domanda, convertendolo in idrogeno attraverso l'elettrolisi. Ciò permetterebbe di utilizzare al meglio l'energia prodotta, riducendo lo spreco e fornendo una fonte di idrogeno pulito e sostenibile per vari usi, inclusi i trasporti e l'industria.

#### 4.2.2. Pirolisi e gassificazione delle biomasse

Un approccio innovativo per la produzione di energia prevede l'utilizzo delle biomasse, che derivano dai rifiuti urbani, industriali e dagli scarti delle attività agricole e zootecniche. Le biomasse sono una fonte rinnovabile di energia e attualmente contribuiscono al 10% della produzione energetica mondiale. In Italia, ad esempio, esistono oltre 45 impianti dedicati alla produzione di

energia elettrica da biomasse, con una potenza installata complessiva di circa 1200 MW. Molti di questi impianti, noti come termovalorizzatori, bruciano principalmente rifiuti solidi urbani per generare energia. Tuttavia, l'uso dei termovalorizzatori è spesso oggetto di dibattito, poiché, pur permettendo di ridurre la quantità di rifiuti destinati alle discariche, non sempre garantiscono un trattamento ecologicamente sostenibile. Il processo di combustione, infatti, può produrre emissioni di gas serra e inquinanti se non gestito correttamente.

Oltre alla generazione di elettricità, questi impianti possono fornire energia per l'alimentazione del processo di elettrolisi. Inoltre, l'idrogeno può essere ottenuto direttamente dalle biomasse come sottoprodotto dei processi di combustione e pirolisi. Le biomasse, infatti, contengono molecole organiche in cui l'idrogeno è legato al carbonio. La pirolisi, un processo che avviene in

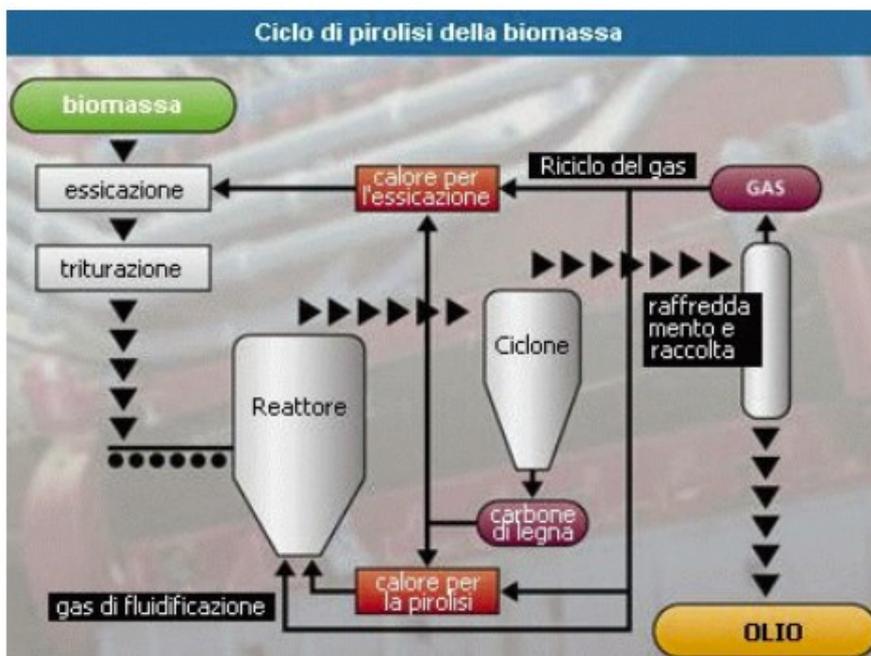


Figura 22: Ciclo di pirolisi delle biomasse

assenza di ossigeno a temperature elevate (circa 900°C), scompone queste molecole nei loro elementi di base, generando vari gas, tra cui appunto l'idrogeno. La pirolisi è una forma di gassificazione simile a quella utilizzata per il carbone, ma applicata a materiali organici. Tuttavia, la quantità di  $H_2$  recuperabile dalle biomasse è relativamente bassa, circa il 7% in peso, molto inferiore rispetto a quella ottenibile dal gas naturale.

Nonostante questa limitazione, l'utilizzo delle biomasse per produrre energia e idrogeno rappresenta un'opportunità significativa per ridurre la dipendenza dai combustibili fossili e contribuire alla transizione verso un sistema energetico più sostenibile. La combinazione di diverse tecnologie, come l'elettrolisi alimentata da energia rinnovabile e la pirolisi delle biomasse, può fornire una strada concreta per ridurre l'impatto ambientale della produzione di energia.

### 4.2.3.Processi fotobiologici

I processi fotobiologici sfruttano la capacità di alcune alghe e batteri di produrre idrogeno utilizzando l'energia solare. Questi organismi, esposti alla luce del sole, assorbono energia tramite pigmenti fotosintetici e utilizzano un enzima, l'idrogenasi, per scindere l'acqua in idrogeno e ossigeno. Un esempio noto è il "Rhodospirillum rubrum". Tuttavia, l'efficienza di questi processi è attualmente bassa, circa il 5%.

La ricerca è rivolta a sviluppare ceppi di alghe con idrogenasi che non siano inibite dall'ossigeno, permettendo una produzione di idrogeno più lunga e sostenibile, da 20 a 30 giorni, rispetto agli attuali 10 giorni.

### 4.2.4.Processi fotoelettrochimici

I sistemi fotoelettrochimici utilizzano elettrodi semiconduttori per convertire l'energia solare in idrogeno. Il funzionamento di questi dispositivi avviene quando i semiconduttori, immersi in acqua, vengono esposti alla luce solare. La luce solare viene assorbita dai semiconduttori, i quali generano una corrente elettrica. Questa corrente scinde l'acqua nei suoi componenti: ossigeno e idrogeno. Con un'efficienza che può raggiungere il 12%, questa tecnologia rappresenta un'opzione promettente e sostenibile per produrre "idrogeno verde". Si sfrutta, infatti, la luce solare come fonte di energia pulita e rinnovabile. Attualmente, la ricerca è focalizzata sull'aumento dell'efficienza e sulla praticabilità di questo metodo per renderlo una soluzione sempre più vantaggiosa per la produzione di energia.

## 4.3. Problema della purificazione dell'idrogeno

Per utilizzare l'idrogeno come combustibile nei sistemi stazionari e nei veicoli a celle a combustibile, è essenziale un rigoroso processo di purificazione. Questo è particolarmente importante quando l'idrogeno viene prodotto da fonti non rinnovabili, poiché potrebbe contenere impurità come monossido di carbonio ( $CO$ ) e anidride carbonica ( $CO_2$ ). Queste impurità possono compromettere l'efficienza delle celle a combustibile e ridurre la durata, possono infatti avvelenare i catalizzatori all'interno delle celle, bloccando le reazioni necessarie per generare energia.

La purificazione dell'idrogeno deve avvenire prima della compressione o liquefazione per assicurare la massima purezza. Un metodo efficace è l'assorbimento a pressione discontinua (PSA), che utilizza materiali a base di zeolite per separare il gas dalle impurità. Le zeoliti sono materiali microporosi che intrappolano efficacemente gas indesiderati come  $CO$  e  $CO_2$ , lasciando passare solo  $H_2$ . Questo processo permette di ottenere un'idrogeno con purezza molto elevata, essenziale per il funzionamento ottimale delle celle a combustibile.

Altri metodi di purificazione includono l'uso di filtri ai carboni attivi o di reticoli di molecole di carbonio. Questi filtri funzionano catturando le impurità attraverso interazioni chimiche, consentendo il passaggio esclusivo dell'idrogeno. La regolazione della pressione del gas in uscita e la rigenerazione periodica dei filtri tramite pulizia garantiscono una purezza costante.

La ricerca avanzata si concentra sull'ottimizzazione dei materiali per ridurre i costi e migliorare l'efficienza del processo di purificazione. In particolare, lo sviluppo di nuove membrane di filtraggio a basso costo e altamente performanti potrebbe aumentare la competitività dell'idrogeno come fonte di energia pulita. Questi progressi potrebbero rendere l'idrogeno una soluzione energetica ancora più sostenibile, supportando la transizione globale verso energie rinnovabili e riducendo l'impatto ambientale delle emissioni da combustibili fossili.



## 5. Stoccaggio e distribuzione

L'idrogeno può essere trasportato e immagazzinato in tre principali modalità: in forma gassosa, liquida o adsorbito su materiali speciali (l'adsorbimento si riferisce alla capacità di alcuni materiali di assorbire gas all'interno del loro reticolo cristallino, formando idruri metallici attraverso reazioni reversibili con gli atomi del metallo). La scelta della forma più adeguata dipende dal contesto di utilizzo, poiché ciascuna modalità presenta vantaggi e svantaggi specifici. Il trasporto e l'accumulo dell'idrogeno su larga scala richiedono ulteriori studi approfonditi, soprattutto per infrastrutture come le reti di rifornimento per veicoli. I requisiti chiave per un sistema di rifornimento efficiente includono:

- Operare a temperatura e pressione ambiente minimizzando le perdite.
- Garantire grandi capacità di stoccaggio con volumi ridotti.
- Offrire tempistiche di rifornimento accettabili garantendo la sicurezza anche in caso di urti o incidenti.

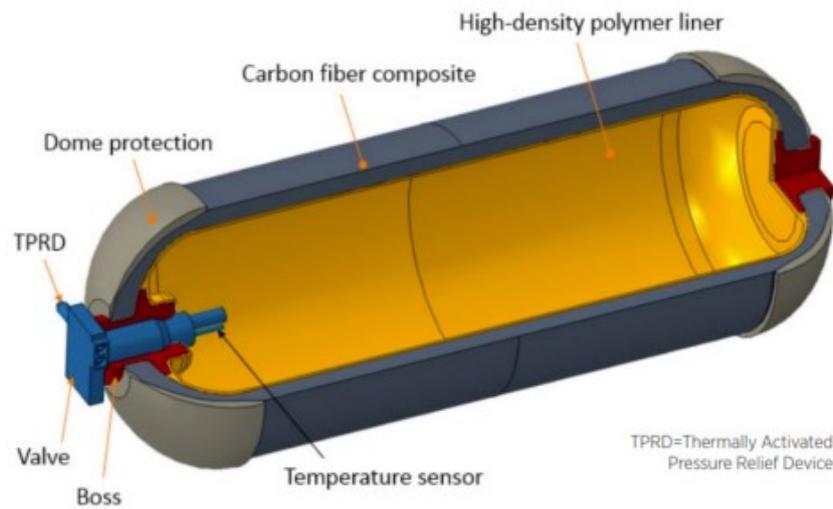
Attualmente, i metodi utilizzati per lo stoccaggio e il trasporto dell'idrogeno, sia in applicazioni stazionarie che per autoveicoli, includono la compressione, la liquefazione e l'impiego di idruri metallici. In ogni caso, la fase di stoccaggio richiede l'uso di compressori per portare l'idrogeno a pressioni adatte al sistema di accumulo scelto. Pertanto, nel calcolo dell'efficienza complessiva di un impianto, va considerata anche l'efficienza del compressore utilizzato.

### 5.1. Compressione

La compressione e l'immagazzinamento dell'idrogeno in bombole cilindriche rappresentano il metodo più comune di stoccaggio. Questo processo richiede generalmente più fasi di compressione per ottimizzare il consumo energetico, e le tecnologie maggiormente utilizzate includono compressori alternativi a pistoni, compressori rotativi e turbomacchine (sia centrifughe che assiali). I serbatoi per lo stoccaggio sono solitamente costituiti da tre strati:

- Strato interno di polimero ad alta massa molecolare, che impedisce la permeazione dell'idrogeno gassoso
- Strato intermedio, realizzato in fibra di carbonio o vetro, che fornisce resistenza meccanica all'elevata pressione

- Strato esterno in acciaio o alluminio, che protegge il serbatoio da urti.



**Figura 23: Struttura di un serbatoio per l'idrogeno compresso**

Le pressioni di stoccaggio sono molto elevate, data la bassa densità dell'idrogeno, e possono variare da 200 bar fino a 700 bar, tipiche del settore automobilistico. I principali svantaggi di questo metodo riguardano la sicurezza, a causa delle alte pressioni, i volumi considerevoli dei serbatoi e i costi, che dipendono significativamente dalle pressioni iniziali e finali richieste.

Il lavoro di compressione, per un processo teoricamente isotermico, è definito dalla seguente equazione:

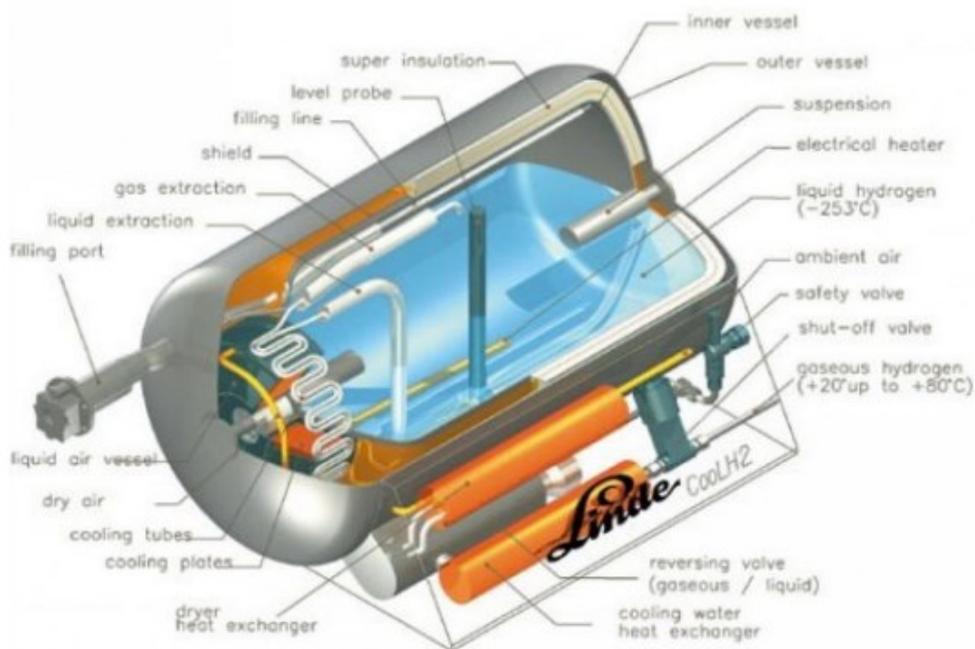
$$L = R_{H_2} \cdot T \cdot Z \cdot \ln \left( \frac{p_2}{p_1} \right)$$

dove  $R_{H_2}$  è la costante del gas per l'idrogeno,  $T$  la temperatura assoluta,  $Z$  il fattore di comprimibilità, e  $p_1$ ,  $p_2$  rappresentano rispettivamente le pressioni iniziale e finale del gas.

## 5.2. Liquefazione dell'idrogeno

L'idrogeno liquido è mantenuto stabile a una temperatura estremamente bassa di  $-253^\circ\text{C}$ , il che richiede l'uso di serbatoi criogenici speciali per la sua conservazione. Questi serbatoi sono caratterizzati da una doppia parete con un'intercapedine che viene messa sottovuoto per garantire l'isolamento termico necessario.

L'accumulo di idrogeno in forma liquida è una tecnologia che, al momento, risponde meglio alle esigenze del settore automobilistico, in quanto consente di trasportare una quantità di energia significativamente superiore rispetto all'idrogeno gassoso, riducendo così il problema della bassa densità energetica. Tuttavia, questa tecnologia presenta alcune limitazioni significative. La gestione dell'idrogeno liquido richiede una maggiore complessità tecnologica, sia a bordo del veicolo che nelle infrastrutture di terra per la distribuzione e il rifornimento, con costi di gestione superiori rispetto alla soluzione "a idrogeno compresso". Inoltre, il processo di liquefazione dell'idrogeno comporta un elevato consumo energetico: si stima che la liquefazione richieda circa il 30% del contenuto energetico dell'idrogeno stesso, a fronte del 6-8% necessario per comprimere l'idrogeno a 350 bar.



**Figura 24: Struttura di un serbatoio Linde per l'idrogeno liquido**

Un altro svantaggio dell'idrogeno liquido è rappresentato dalle perdite per evaporazione, che si verificano anche con lievi aumenti di temperatura interna. Recentemente, l'uso di serbatoi criogenici con isolamento termico avanzato ha ridotto significativamente questo problema. Tuttavia, a parità di energia accumulata, l'idrogeno liquido occupa più spazio rispetto a tutti gli altri combustibili (3,8 volte più della benzina) e pesa meno (2,7 volte meno della benzina). Questo vantaggio viene però in parte annullato dal peso aggiuntivo dell'isolamento necessario per ridurre al minimo le perdite di evaporazione nei serbatoi di piccole dimensioni. Alcuni modelli in fase di concept della BMW, modificati per funzionare con idrogeno, utilizzano questi serbatoi speciali per immagazzinare il combustibile.

### 5.3. Idruri metallici

Lo stoccaggio dell'idrogeno mediante idruri metallici sfrutta la capacità di alcuni metalli di adsorbire il gas, formando legami chimici deboli. L'idrogeno penetra nel reticolo cristallino del metallo, occupando gli spazi interatomici, e viene immagazzinato in un serbatoio contenente il metallo in polvere, per massimizzare la superficie di assorbimento. Questo metodo, sebbene efficace, risulta pesante a causa della natura degli idruri metallici, il che può comportare un aumento dei consumi in applicazioni mobili. Tuttavia, rispetto allo stoccaggio dell'idrogeno liquido, si può ottenere una densità di idrogeno maggiore a parità di volume.

Gli idruri metallici vengono realizzati utilizzando leghe di alluminio, magnesio, ferro o lantanio, arricchite con elementi come nichel, vanadio, titanio, cromo e terre rare, che sono capaci di assorbire idrogeno negli spazi interatomici. Il processo di carica e rilascio dell'idrogeno è reversibile e si controlla variando la temperatura e la pressione del sistema. La velocità di rilascio dell'idrogeno, per esempio, è regolata attraverso il controllo del calore trasferito all'idruro.

Il caricamento di un idruro è un processo esotermico che si realizza aumentando la pressione del gas tramite un compressore, mentre il rilascio dell'idrogeno avviene somministrando calore all'idruro e riducendo la pressione. Questo sistema è particolarmente interessante per l'uso automobilistico, poiché non presenta significativi problemi di sicurezza, rendendolo una soluzione potenzialmente efficace per lo stoccaggio e l'utilizzo dell'idrogeno nei veicoli. D'altra parte però risulta di difficile implementazione in quanto richiederebbe l'utilizzo di piccoli impianti abbastanza complessi a bordo dei veicoli. Comportando un incremento dei costi e un maggiore ingombro a bordo.

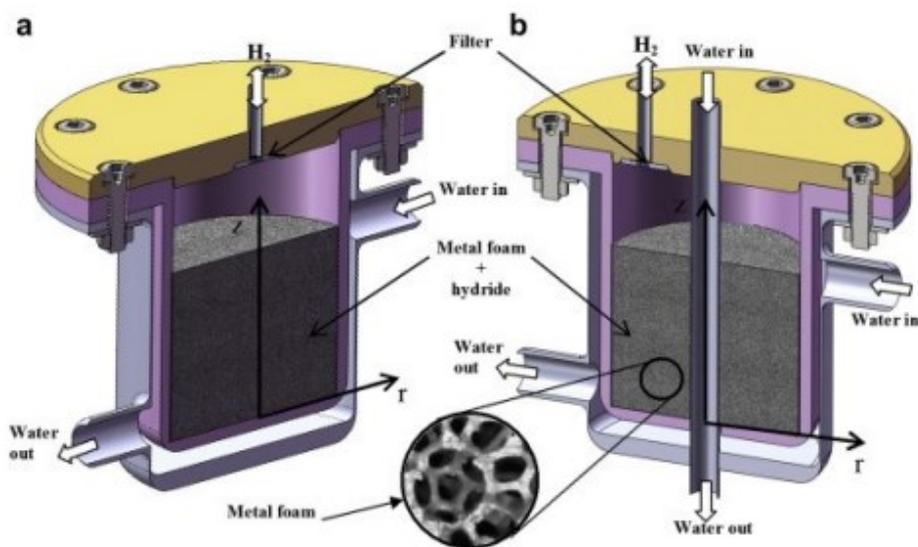


Figura 25: Struttura di un serbatoio ad idruri metallici

## 5.4. Altri metodi

Oltre ai metodi di stoccaggio tradizionali, esistono altri approcci che, sebbene non siano ancora largamente applicati in ambito automobilistico, meritano di essere menzionati per la loro potenziale innovazione:

- Il primo metodo riguarda l'uso di sfere speciali a reazione chimica. In questo caso, l'idrogeno viene immagazzinato all'interno di sfere di plastica contenenti idruro di sodio ( $NaH$ ) in polvere. Quando queste sfere sono immerse in acqua e si rompono, la polvere di sodio reagisce chimicamente rilasciando idrogeno, mentre il sodio residuo si trasforma in idrossido di sodio, che può essere recuperato. Tuttavia, per ottenere 1 kg di idrogeno sono necessari 12 kg di polvere di  $NaH$ , rendendo il rapporto tra l'idrogeno immagazzinato e il volume delle sfere simile a quello degli idruri metallici.
- Il secondo metodo implica l'uso di microsfele di cristallo, minuscole sfere vuote con un diametro compreso tra 30 e 500 micron e uno spessore di circa un micron. Queste sfere, quando portate ad alta temperatura, diventano permeabili e assorbono idrogeno. Una volta raffreddate, possono essere trasportate in sicurezza e, quando è necessario estrarre il gas, basta riscaldarle nuovamente. Queste microsfele possono essere riutilizzate più volte, offrendo un metodo di stoccaggio flessibile.
- Il terzo metodo sfrutta le nanostrutture di carbonio, ottenute modificando la disposizione degli atomi di carbonio nella grafite. Questo processo produce strutture particolari, come nanotubi e nanofibre di carbonio, che presentano caratteristiche uniche per l'assorbimento e lo stoccaggio dell'idrogeno. Queste nanostrutture offrono un potenziale significativo per applicazioni future, grazie alla loro capacità di immagazzinare grandi quantità di idrogeno in uno spazio relativamente ridotto.

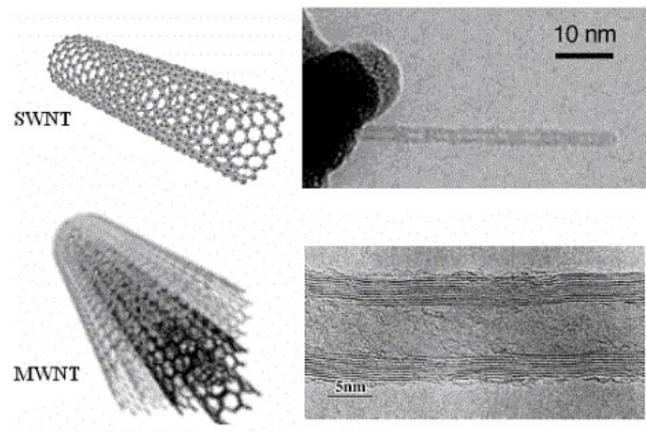
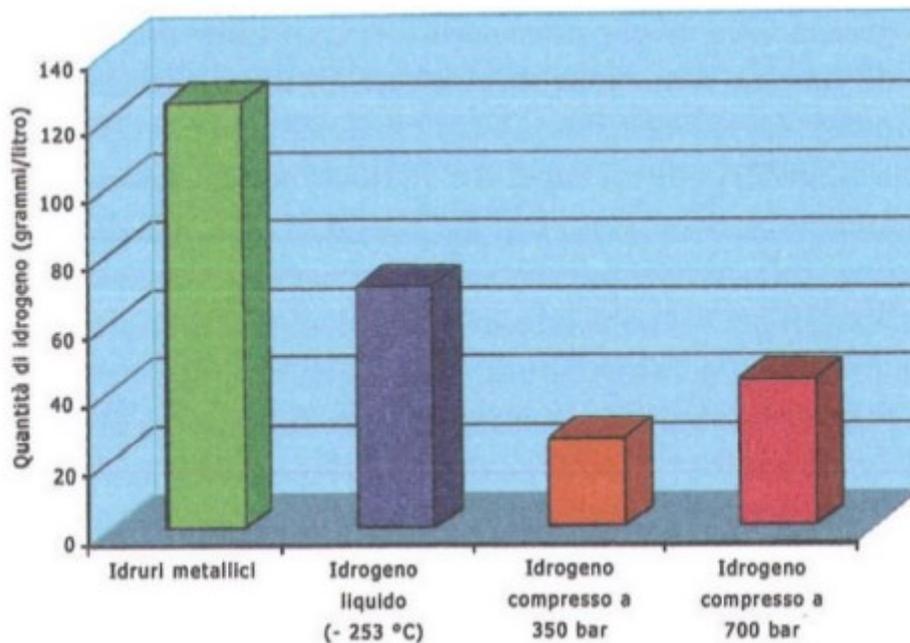


Figura 26: Nanotubi di carbonio

## 5.5. Valutazioni finali sul sistema di stoccaggio

La scelta del metodo più adatto per immagazzinare l'idrogeno deve considerare diversi fattori cruciali:

- l'uso previsto del gas
- la densità energetica richiesta per specifiche applicazioni
- gli spazi disponibili
- la durata e l'affidabilità dei sistemi di accumulo
- le problematiche legate alla sicurezza
- i costi.



**Figura 27: Confronto a parità di volume geometrico della quantità di idrogeno immagazzinabile dalle diverse tecnologie**

Un parametro chiave in questa valutazione diventa quindi la densità energetica. Attualmente, i serbatoi a idruri metallici non risultano ancora idonei per le applicazioni veicolari a causa della complessa gestione termica richiesta e dell'elevato peso rispetto alla quantità di idrogeno che possono immagazzinare. Tuttavia, questi serbatoi sono già impiegati con successo in applicazioni stazionarie. Per il trasporto di quantità relativamente piccole di idrogeno, la tecnologia di compressione rimane la scelta prevalente. Questa opzione è meno costosa rispetto alla liquefazione dell'idrogeno e non presenta il problema delle perdite per evaporazione. Tuttavia, comporta rischi associati all'elevata pressione, come potenziali perdite di gas in caso di fessurazioni o difetti nei serbatoi.

La tendenza attuale delle case automobilistiche è quella di stoccare l'idrogeno a bordo dei veicoli in

forma gassosa a pressioni che variano tra i 300 e i 700 bar. Alcuni prototipi, tuttavia, prevedono l'accumulo dell'idrogeno allo stato liquido. Questa soluzione per esempio è stata adottata, da BMW per il modello Serie 7 che è stato in produzione dal 2006 al 2008, un'auto ad idrogeno con motorie a combustione interna.

## 5.6. La sicurezza dello stoccaggio.

La sicurezza nello stoccaggio dell'idrogeno rappresenta una sfida cruciale e multifattoriale, essendo influenzata dalle caratteristiche intrinseche delle diverse modalità di accumulo. La compressione, pur essendo una tecnologia consolidata e relativamente economica, comporta rischi significativi legati alle alte pressioni, con potenziali perdite o esplosioni in caso di guasti strutturali. La liquefazione, nonostante permetta di trasportare maggiore energia in volumi ridotti, richiede un controllo rigoroso delle temperature criogeniche, con il rischio di perdite per evaporazione. Gli idruri metallici, sebbene offrano un profilo di sicurezza più elevato grazie alla bassa pressione di esercizio, pongono sfide in termini di peso e gestione termica. In tutti i casi, l'implementazione di sistemi di monitoraggio avanzati e la scelta di materiali resistenti sono essenziali per garantire la sicurezza operativa, minimizzando i rischi per l'utente finale e l'ambiente circostante.

Attualmente, la sicurezza nello stoccaggio dell'idrogeno viene migliorata attraverso una combinazione di tecnologie avanzate, materiali innovativi, e sistemi di monitoraggio e controllo sofisticati. Ecco alcuni dei principali approcci adottati:

- **Materiali ad alta resistenza:** I serbatoi di stoccaggio per idrogeno gassoso sono realizzati con materiali avanzati, come fibre di carbonio o vetro, che offrono un'elevata resistenza meccanica e sono in grado di sopportare le altissime pressioni (fino a 700 bar) senza rischio di rottura. Lo strato interno di polimero ad alta massa molecolare impedisce la permeazione del gas, riducendo il rischio di perdite.
- **Isolamento termico avanzato:** Per lo stoccaggio di idrogeno liquido, vengono utilizzati serbatoi criogenici con doppie pareti e intercapedini sottovuoto, che offrono un'eccellente isolamento termico. Questo riduce il rischio di evaporazione e le perdite di idrogeno, minimizzando il pericolo di incendi o esplosioni.
- **Sistemi di monitoraggio e sensori:** I moderni sistemi di stoccaggio sono dotati di sensori avanzati che monitorano costantemente parametri come la pressione, la temperatura, e l'integrità strutturale dei serbatoi. Questi sensori possono rilevare perdite o anomalie in tempo

reale, attivando allarmi e sistemi di sicurezza per prevenire incidenti.

- **Sistemi di valvole di sicurezza:** I serbatoi sono equipaggiati con valvole di sicurezza che rilasciano automaticamente l'idrogeno in caso di pressioni eccessive, evitando esplosioni. Queste valvole sono progettate per funzionare anche in condizioni estreme, garantendo la sicurezza del sistema.
- **Rivestimenti anti-permeazione:** Per impedire la fuoriuscita dell'idrogeno, vengono utilizzati rivestimenti speciali all'interno dei serbatoi che riducono la permeazione del gas attraverso le pareti. Questi rivestimenti sono fondamentali per mantenere la sicurezza a lungo termine, specialmente nei serbatoi ad alta pressione.
- **Sviluppo di idruri metallici sicuri:** Nello stoccaggio tramite idruri metallici, la sicurezza è aumentata grazie alla natura chimicamente stabile degli idruri, che riducono il rischio di fuoriuscite improvvise di gas. Inoltre, la gestione termica controllata dei sistemi di idruri consente un rilascio graduale dell'idrogeno, migliorando la sicurezza complessiva.
- **Protocolli di sicurezza rigorosi:** Le operazioni di stoccaggio e trasporto dell'idrogeno seguono protocolli di sicurezza stringenti, che includono ispezioni regolari, manutenzione dei serbatoi e formazione specifica per il personale, al fine di minimizzare il rischio di incidenti.



**Figura 28: Area di servizio di Via Orlanda Loc. San Giuliano, 30170 Venezia**

Nelle stazioni di servizio più avanzate, come quella di San Giuliano a Venezia, dove è presente un deposito significativo di idrogeno, sono state adottate misure di sicurezza specifiche per gestire potenziali fuoriuscite o incendi. In queste strutture, l'area destinata allo stoccaggio dell'idrogeno è circondata da muri in cemento armato ed è priva di soffitto. Questa configurazione ha due vantaggi principali: in caso di fuoriuscite o incendi, l'idrogeno, essendo un gas leggero, tende a

risalire rapidamente verso l'alto, dissipandosi nell'atmosfera. I muri in cemento armato, invece, sono progettati per contenere eventuali esplosioni, minimizzando il rischio di danni alle aree circostanti e aumentando la sicurezza complessiva della stazione.

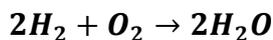


## 6. Veicoli ad idrogeno

I veicoli alimentati a idrogeno adottano tipicamente un sistema di trazione ibrido, composto da stack di celle a combustibile e batterie, noto come "architettura ibrida". Questo approccio consente di eliminare completamente le emissioni di sostanze inquinanti. A differenza dei motori a combustione interna, che raggiungono il loro massimo rendimento solo a determinati regimi di giri, le celle a combustibile tendono a operare a un rendimento più elevato e stabile su un'ampia gamma di condizioni operative. Tuttavia, anche le celle a combustibile hanno una curva di efficienza che varia in base alla potenza erogata, sebbene questa variazione sia generalmente meno pronunciata rispetto ai motori a combustione interna. Un ulteriore vantaggio di questa tecnologia è l'eliminazione della trasmissione tradizionale, grazie all'accoppiamento diretto tra motore elettrico e ruota.

Esistono anche veicoli con motori a combustione interna modificati per utilizzare l'idrogeno come combustibile. Questi motori richiedono componenti specifici, come centraline elettroniche, valvole, guarnizioni e collettori progettati per gestire le caratteristiche uniche dell'idrogeno, che è più leggero e più reattivo rispetto ai combustibili tradizionali.

La combustione dell'idrogeno in questi motori avviene secondo la reazione:



In questa reazione, l'idrogeno ( $H_2$ ) reagisce con l'ossigeno ( $O_2$ ) presente nell'aria, producendo vapore acqueo ( $H_2O$ ) come unico sottoprodotto, rendendo la combustione dell'idrogeno una soluzione potenzialmente più pulita rispetto ai carburanti fossili tradizionali. Tuttavia, l'efficienza di questi motori è inferiore rispetto alle celle a combustibile e non risolvono il problema degli ossidi di azoto ( $NOx$ ), che si formano a causa delle alte temperature di combustione del nitrogeno presente nell'aria.

Per l'utilizzo dell'idrogeno come combustibile in un veicolo, ci sono due approcci principali:

- Il primo metodo consiste nell'installare un piccolo reformer a bordo del veicolo, capace di produrre idrogeno a partire da benzina, gas naturale o altri combustibili, sfruttando le reti di distribuzione già esistenti e consolidate.
- Il secondo approccio, che risulta sicuramente preferito, prevede lo stoccaggio dell'idrogeno in bombole o serbatoi criogenici, che alimentano direttamente il motore del veicolo. Questo richiede una rete di rifornimento dedicata, simile a quella delle benzine.

Analizzeremo successivamente questi metodi in modo più approfondito.

## 6.1. Sistema del Fuel processor

Un'opzione di transizione verso un'adozione più ampia dell'idrogeno come combustibile, in attesa di una rete di distribuzione adeguata, è rappresentata dal **Fuel processor**. Questo sistema consente la produzione diretta di idrogeno a bordo del veicolo utilizzando combustibili facilmente reperibili come metano, gasolio, benzina o metanolo, che sono già disponibili attraverso le reti di distribuzione esistenti. Gli impianti di questo tipo devono garantire la produzione di idrogeno con un elevato grado di purezza per assicurare il corretto funzionamento delle celle a combustibile.

Il processo di produzione dell'idrogeno per i veicoli può avvenire direttamente a bordo attraverso un dispositivo chiamato "reformer", che svolge un ruolo essenziale nel convertire il combustibile in idrogeno. I principali metodi utilizzati per produrre idrogeno sono lo Steam Reforming (reforming a vapore) e l'ossidazione parziale di idrocarburi pesanti. Nel caso dello Steam Reforming, il metano ( $CH_4$ ) viene fatto reagire con vapore acqueo ad alta temperatura, producendo idrogeno e anidride carbonica ( $CO_2$ ).

Per generare un metro cubo di idrogeno, sono necessari circa 0,45 metri cubi di metano. Questo sistema permette di utilizzare il combustibile fossile in modo più efficiente rispetto ai motori tradizionali, riducendo significativamente le emissioni inquinanti. Tuttavia, è importante notare che, sebbene le emissioni di gas serra siano inferiori rispetto a quelle dei motori convenzionali, il processo di Steam Reforming non è completamente privo di impatti ambientali, poiché produce comunque anidride carbonica come sottoprodotto.

## 6.2. Veicoli ibridi

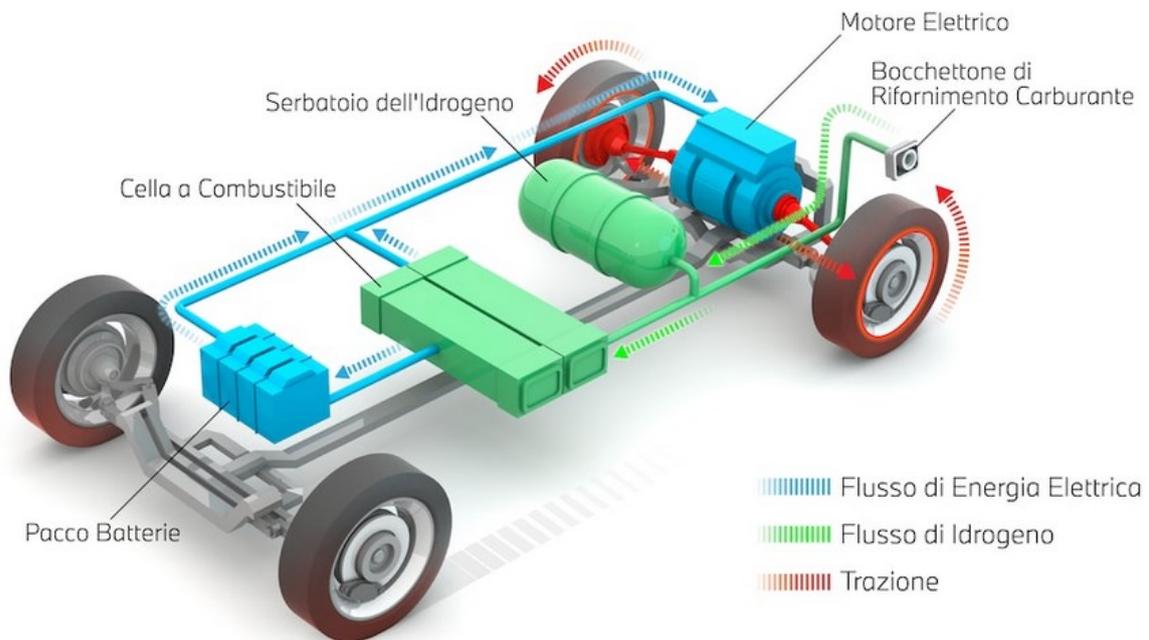


Figura 29: Architettura di un veicolo ibrido Fuel Cell/batteria

Un veicolo a idrogeno con celle a combustibile (fuel cells) è composto da diverse parti principali che lavorano insieme per garantire il suo funzionamento. I componenti principali sono:

- **Motore elettrico:** Trasforma l'energia elettrica in movimento.
- **Controllo del motore elettrico:** Gestisce il funzionamento del motore per ottimizzare le prestazioni.
- **Sistema fuel cells (Stack + controlli elettronici):** Converte l'idrogeno in elettricità.
- **Batterie:** Forniscono energia aggiuntiva e immagazzinano quella in eccesso
- **Serbatoi  $H_2$ :** Conservano l'idrogeno in forma compressa. (capitolo 5)

Esaminiamo ora più nel dettaglio i componenti principali.

### 6.2.1. Il motore elettrico

I motori sincroni a magneti permanenti (PMSM), noti anche come motori brushless, sono ampiamente utilizzati nelle auto elettriche grazie alla loro alta efficienza e alle elevate prestazioni. Questi motori, sebbene generalmente più costosi a causa della presenza di magneti permanenti, offrono una notevole

versatilità, con potenze che possono variare dai 100 kW, tipici delle auto economiche e leggere, fino ad oltre 400 kW per i veicoli che necessitano di maggior potenza.

I PMSM non richiedono manutenzione specifica e sfruttano strategie di controllo avanzate per ottimizzare l'alimentazione attraverso l'inverter, garantendo un'alta precisione nella regolazione della velocità di rotazione. Inoltre, possono essere utilizzati come freni e permettono il recupero di energia durante le frenate o le decelerazioni, migliorando l'efficienza complessiva del veicolo.

Tuttavia, uno svantaggio significativo di questi motori è legato ai limiti termici dei magneti permanenti. Quando la temperatura supera certi limiti, i magneti possono perdere parte del loro flusso magnetico, riducendo la coppia massima erogata dal motore. Questo fenomeno, a seconda della gravità del surriscaldamento, può compromettere le prestazioni del motore e, in casi estremi, causare danni permanenti ai magneti. È opportuno tenere in considerazione questo svantaggio in fase di progettazione in modo tale da prevedere un appropriato circuito di raffreddamento.

## 6.2.2. Controllo del motore elettrico, l'inverter

Un inverter per motori sincroni a magneti permanenti (PMSM) è un dispositivo elettronico che converte la corrente continua (DC) proveniente dalla batteria in corrente alternata (AC) trifase, indispensabile per alimentare questo tipo di motore. La funzione principale dell'inverter è regolare la frequenza e l'ampiezza della corrente AC, controllando così con precisione sia la velocità che la coppia del motore PMSM.

Il controllo preciso di questi parametri è essenziale per ottimizzare le prestazioni e l'efficienza del sistema di trazione elettrica, particolarmente nei veicoli elettrici e in altre applicazioni industriali.

L'inverter, sotto la supervisione dell'elettronica di controllo, agisce regolando i segnali in base alle condizioni operative richieste. Ad esempio, attraverso tecniche di modulazione della larghezza di impulso (PWM), è possibile variare in tempo reale la velocità del motore e la coppia in risposta ai comandi ricevuti, come l'accelerazione o la decelerazione. Questo permette di adattare il comportamento del motore alle diverse esigenze operative.

Grazie a questo tipo di controllo, il motore PMSM può funzionare in maniera efficiente in un ampio range di velocità, garantendo un'elevata efficienza energetica e una risposta dinamica rapida.

### 6.2.3. Batterie

Le batterie al litio, in particolare gli accumulatori agli ioni di litio (Li-ion), sono ampiamente utilizzate nelle auto elettriche grazie alle loro caratteristiche superiori rispetto ad altre tecnologie di accumulo. Tra i principali vantaggi, offrono un eccellente rapporto peso/potenza, il che significa che sono in grado di immagazzinare e fornire grandi quantità di energia senza aggiungere un peso eccessivo al veicolo. Questa caratteristica è fondamentale per i veicoli elettrici, poiché contribuisce a migliorare sia le prestazioni che l'autonomia, ossia la distanza che un'auto può percorrere con una singola ricarica.

Uno dei punti di forza delle batterie agli ioni di litio è la loro alta densità energetica, che permette di accumulare più energia in un volume o peso relativamente ridotto rispetto ad altre tipologie di batterie, come quelle al piombo-acido o al nichel-metallo idruro (*NiMH*). Questo aspetto è cruciale per i veicoli elettrici, in quanto consente di ottenere autonomie superiori senza compromettere lo spazio interno o il peso complessivo del veicolo.

Inoltre, le batterie al litio presentano un basso tasso di autoscarica, il che significa che perdono energia molto lentamente quando non sono in uso, rendendole efficienti anche durante i periodi di inattività. Un altro grande vantaggio è l'assenza dell'effetto memoria, un fenomeno che affliggeva vecchie tecnologie di batterie, come quelle al nichel-cadmio, dove la capacità della batteria si riduceva se non veniva scaricata completamente prima della ricarica. Con le batterie agli ioni di litio, questo problema non esiste, permettendo una maggiore flessibilità nelle modalità di ricarica.

Un ulteriore vantaggio delle batterie al litio è la loro versatilità di design. Possono essere realizzate in varie forme e dimensioni, adattandosi facilmente agli spazi disponibili nei veicoli, un aspetto importante per ottimizzare l'architettura dei veicoli elettrici.

Infine, queste batterie vantano una buona durata e sono in grado di sopportare un elevato numero di cicli di ricarica, mantenendo prestazioni efficienti nel tempo. Questa caratteristica, insieme alla loro capacità di gestire cicli di ricarica rapida, le rende ideali per l'uso nei veicoli elettrici, dove la durata e l'affidabilità della batteria sono fondamentali per garantire l'efficienza complessiva del sistema di trazione elettrica.

## 6.2.4. Architettura dei veicoli ibridi

La scelta dell'architettura di trazione di un veicolo elettrico dipende dall'uso previsto del mezzo e quindi dal numero di batterie che si desidera installare a bordo. La potenza del veicolo, come visto precedentemente, viene gestita da un sistema di controllo elettronico che interagisce con il motore elettrico, convertendo l'energia elettrica in energia meccanica per la trazione. In ambito urbano, dove sono più frequenti le fermate e le ripartenze rispetto all'uso extraurbano, l'architettura di trazione deve tener conto di queste condizioni di utilizzo.

Le celle a combustibile, ad esempio, operano in modo più efficiente e con un rendimento più elevato in condizioni stazionarie, cioè quando non ci sono brusche variazioni di carico. Per questo motivo, durante le fasi di transizione, come accelerazioni e frenate, è vantaggioso sfruttare le caratteristiche delle batterie. Quest'ultime, infatti, sono particolarmente adatte a gestire i transitori grazie alla loro capacità di fornire elevate coppie di spunto durante le accelerazioni o nelle salite. Inoltre, svolgono una funzione fondamentale di recupero energetico: immagazzinano energia preziosa nelle fasi di frenata o decelerazione, migliorando così l'efficienza complessiva del veicolo.

In base all'utilizzo risultano quindi tre le configurazioni più utilizzate:

- Configurazione **load leveller**: Si definisce questa configurazione quando la potenza elettrica delle celle è leggermente superiore a quella delle batterie. Per una citycar destinata all'uso urbano, l'architettura ideale è quella ibrida fuel cell/batterie, composta da un piccolo pacco batterie e uno stack di celle a combustibile ridotto. Questa configurazione assicura una buona autonomia, spazio sufficiente a bordo e prestazioni di accelerazione efficienti. In questo sistema, le celle a combustibile forniscono l'autonomia principale, caricando le batterie quando possibile, mentre queste ultime gestiscono i transitori, garantendo le coppie di spunto necessarie. Le batterie sono collegate sia al motore sia allo stack di celle a combustibile, rendendo questa configurazione particolarmente adatta all'uso urbano. Solitamente, le fuel cells non vengono connesse direttamente al motore elettrico, al contrario, si preferisce inserire le batterie tra i due, al fine di prolungare la durata dello stack.

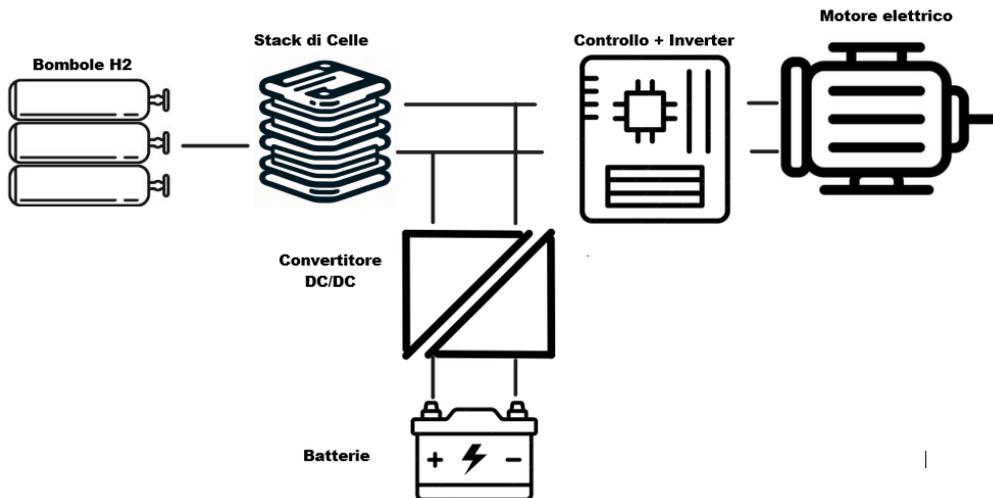


Figura 30. Configurazione ibrida LOAD LEVELLER

- Configurazione **range extender**: Prevede che la maggior parte della potenza elettrica necessaria al motore venga fornita dalle batterie, mentre le celle a combustibile contribuiscono per circa il 25%. In questo schema, le celle hanno il compito principale di ricaricare le batterie per estendere l'autonomia del veicolo. Poiché uno stack di celle a combustibile di grande potenza è costoso, si tende a dimensionare il pacco batterie per gestire i picchi di potenza, riducendo così i costi dello stack e permettendogli di operare in modo continuo, aumentando la sua longevità e migliorando il rendimento. Il sistema di controllo elettronico regola quale fonte energetica utilizzare in base alle esigenze operative, evitando che le celle a combustibile debbano affrontare variazioni di carico.

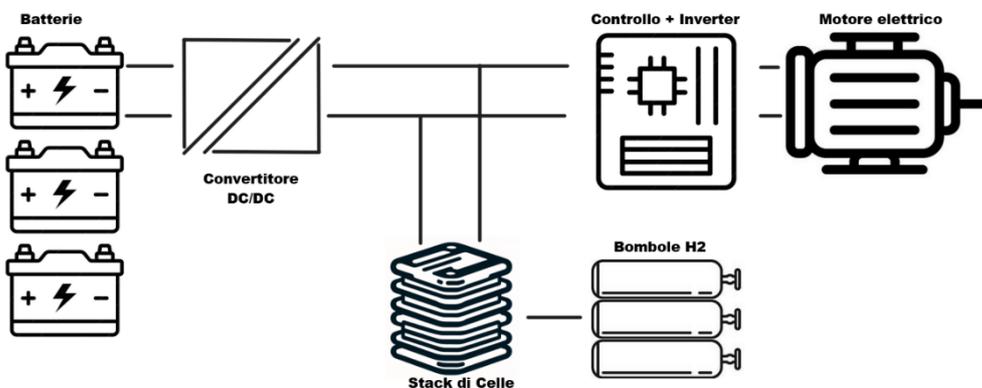


Figura 31. Configurazione ibrida RANGE EXTENDER

- Configurazione **full power**: Corrisponde ad un collegamento della fuel cell direttamente al motore. Questa configurazione 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.

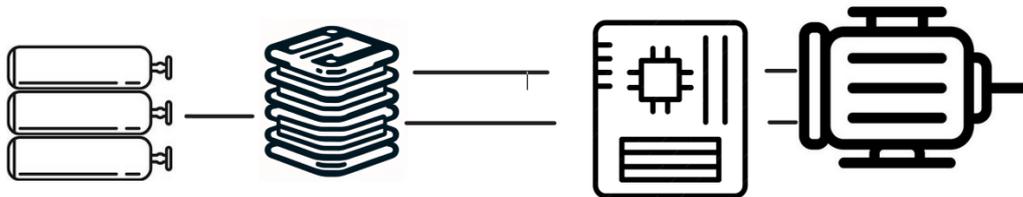


Figura 32. Configurazione ibrida FULL POWER

## 6.3. Veicoli ibridi prodotti:

### 6.2.3. BMW iX5 Hydrogen (2023)



Figura 33. BMW iX5 Hydrogen

La BMW iX5 Hydrogen rappresenta un salto tecnologico significativo nel campo della mobilità sostenibile, offerta da BMW. Questo modello si distingue per la combinazione di celle a combustibile ad alta efficienza con l'affidabilità e il design emblematico del marchio tedesco, offrendo un'alternativa ecologicamente avanzata rispetto alle tradizionali auto elettriche a batteria. Si posiziona dunque come una soluzione pionieristica nel mercato dei veicoli a idrogeno.

Al cuore della iX5 Hydrogen troviamo un avanzato sistema di celle a combustibile che non solo riduce drasticamente le emissioni inquinanti ma permette anche rifornimenti rapidi, paragonabili a quelli di un veicolo a combustibili fossili tradizionali. Il motore elettrico sincrono a magneti permanenti della BMW iX5 Hydrogen eroga una potenza di circa 374 CV (275 kW), garantendo prestazioni dinamiche con accelerazioni fluide e potenti, fedeli al carattere sportivo delle vetture BMW.

L'autonomia del veicolo è notevole, raggiungendo i 504 km secondo la normativa WLTP, grazie a serbatoi di idrogeno ad alta pressione realizzati in fibra di carbonio. Questi serbatoi sono in grado di immagazzinare una quantità di idrogeno sufficiente per garantire un raggio d'azione comparabile a quello delle auto a combustione interna, con il vantaggio aggiuntivo di tempi di rifornimento di soli 3-4 minuti.

In un'epoca in cui la sostenibilità rappresenta un imperativo, la iX5 Hydrogen emerge come un modello che rispetta l'ambiente senza compromettere l'esperienza di guida, una qualità distintiva delle auto BMW.

#### 6.2.4. Toyota Mirai 2020



**Figura 34. Toyota mirai 2020**

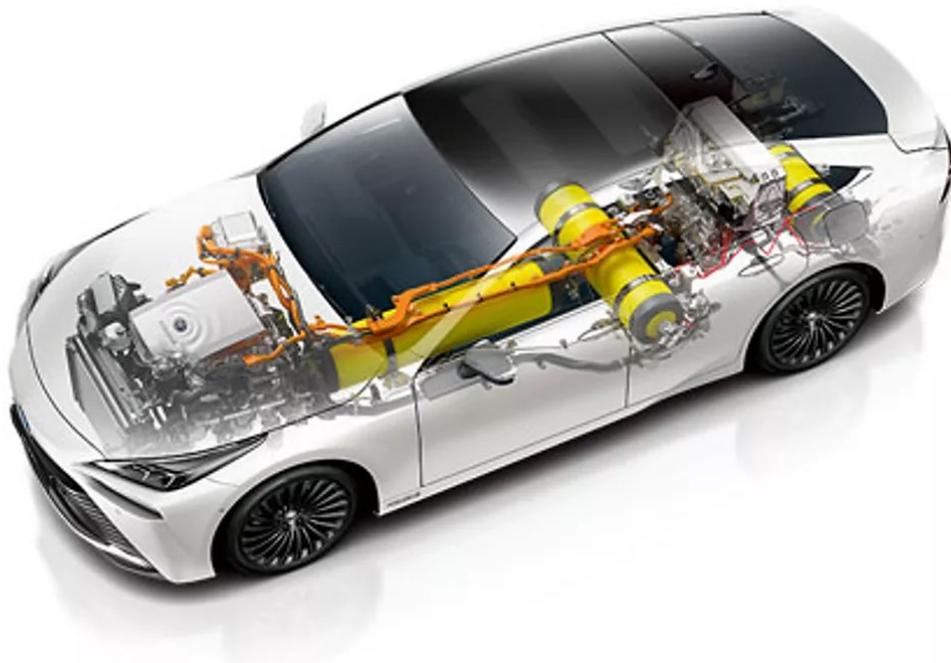
Questa è la seconda generazione della berlina a idrogeno prodotta in serie da Toyota, presentata per la prima volta al Salone di Ginevra nel 2014. Rispetto alla generazione precedente, il nuovo modello vanta un design più elegante e sportivo, con linee che rimandano a una berlina di lusso. La piattaforma modulare GA-L a trazione posteriore è stata adattata per integrare la cella a combustibile nella parte anteriore del veicolo, mentre i serbatoi di idrogeno e le batterie sono strategicamente posizionati dietro e al centro dell'abitacolo, rispettivamente.

Questa disposizione garantisce un bilanciamento ottimale dei pesi e una maggiore rigidità torsionale, migliorando notevolmente il piacere di guida e il comfort per i passeggeri. Il motore elettrico sincrono a magneti permanenti produce 182 CV, supportato da una cella a combustibile che aggiunge altri 174 CV. Lo stack di celle a combustibile di tipo PEM, alloggiato nell'avantreno, include 330 celle connesse in serie, pesa 52 kg e stabilisce un record per la densità di potenza specifica di 5,4 kW/l.

Le batterie agli ioni di litio del veicolo comprendono 84 celle con una capacità di 4 Ah ciascuna e un

peso totale di 44,6 kg. Il veicolo può raggiungere una velocità massima di 175 km/h, con un peso complessivo in ordine di marcia di 2400 kg. Offre cinque posti a sedere e un serbatoio con una capacità massima di 142,2 litri, equivalente a 5,6 kg di idrogeno.

Durante la fase di avviamento, la vettura sfrutta l'energia delle batterie, passando poi all'uso esclusivo delle celle a combustibile durante la guida normale. Le due fonti di energia vengono combinate per garantire le massime prestazioni quando necessario. L'autonomia del veicolo varia tra 650 e 750 km, rendendolo estremamente versatile per viaggi lunghi. Inoltre, il modello è dotato di una presa sotto il cofano che permette alla vettura di funzionare come generatore di emergenza, erogando fino a 9 kW.



**Figura 35: Disposizione componentistica Toyota Mirai**

### 6.2.5.Honda e GM

Nel 2023, Honda, in collaborazione con General Motors, ha introdotto una nuova gamma di celle a combustibile disponibili in diverse dimensioni, pensate per essere integrate in una varietà di veicoli, tra cui autobus, camion, automobili e motociclette. Questo sistema si distingue per un rendimento e una affidabilità nettamente migliorati rispetto alle generazioni precedenti. In particolare, la gamma di queste power unit sarà adottata dalla Honda CR-V e la cui commercializzazione è prevista per il 2025.

Per quanto riguarda il settore dei camion, Honda ha sviluppato un modello dotato di un serbatoio da

82 chili di idrogeno compresso a 700 bar. Questo serbatoio alimenterà tre celle a combustibile da 80 kW ciascuna, raggiungendo una potenza totale di 240 kW.

Il camion, con un'autonomia stimata di circa 645 km, è progettato per operare con una massa a pieno carico di 37 tonnellate, suddivise tra 13 tonnellate per il trattore e 24 per il rimorchio. La batteria integrata avrà una capacità di 120 kWh, garantendo energia sufficiente per sostenere le lunghe distanze e le elevate esigenze energetiche del veicolo.



*Figura 36: Fuel cell Honda per automobili*



*Figura 37: Camion Honda con Fuel Cell*

### 6.3.1. Settore navale

Oltre all'innovazione nei veicoli terrestri, la tecnologia delle celle a combustibile sta iniziando a trovare applicazione anche nel settore marittimo. Nel 2023, Hyundai Heavy Industries ha annunciato il lancio di una nuova nave cargo alimentata da celle a combustibile a idrogeno, segnando un significativo passo avanti verso la decarbonizzazione del trasporto marittimo. Questa nave, la prima del suo genere, è progettata per ridurre drasticamente le emissioni di gas serra senza compromettere le capacità operative. Con una configurazione che prevede l'uso di celle a combustibile da 200 kW ciascuna, la nave è in grado di navigare autonomamente per oltre 1.000 miglia marine. Questo sviluppo non solo evidenzia il potenziale dell'idrogeno in un settore tradizionalmente dipendente dai combustibili fossili ma apre anche la strada a future innovazioni nel trasporto di merci su larga scala.

## Conclusioni

La tecnologia delle celle a combustibile, nonostante quasi due secoli di sviluppo, fatica ancora a emergere nel mercato energetico attuale. Una delle principali barriere è di natura economica: le celle a combustibile restano troppo costose per competere efficacemente con le tecnologie consolidate. Ad esempio, nel settore dei trasporti, la dipendenza dai combustibili fossili continuerà a prevalere finché l'estrazione del petrolio rimarrà economicamente più vantaggiosa della produzione di idrogeno. Inoltre, la creazione di infrastrutture per la produzione e distribuzione dell'idrogeno richiede significativi investimenti iniziali. Tuttavia, l'interesse crescente delle case automobilistiche per l'idrogeno suggerisce che il futuro delle automobili ecologiche potrebbe non essere così distante.

Affinché questa transizione sia efficace, è necessario che l'intero sistema energetico diventi ecosostenibile. Ciò implica che l'idrogeno debba essere prodotto utilizzando fonti rinnovabili, un traguardo che al momento non è stato ancora raggiunto su larga scala. Attualmente, oltre la metà dell'idrogeno prodotto globalmente deriva da processi come lo steam reforming, che utilizzano derivati del petrolio e rilasciano significative quantità di  $CO_2$ . Inoltre, oltre il 70% della produzione mondiale di energia elettrica dipende ancora dai combustibili fossili, il che implica che, nell'attuale contesto, l'impatto ambientale dei veicoli elettrici non sia significativamente migliore rispetto a quello dei veicoli a combustione interna.

Per la produzione di idrogeno, metodi alternativi come l'elettrolisi, teoricamente più puliti, necessitano che l'energia elettrica impiegata derivi da fonti rinnovabili, come il fotovoltaico o l'idroelettrico. Un esempio di buona pratica è l'impianto di Bolzano, dove l'energia necessaria per l'elettrolisi dell'acqua proviene da fonti rinnovabili, come l'energia idroelettrica generata localmente.

Il primo passo fondamentale per proteggere l'ambiente è aumentare massicciamente l'uso delle fonti rinnovabili. Questo ridurrebbe significativamente i costi di produzione dell'idrogeno, promuovendo una diffusione più ampia delle celle a combustibile e una conseguente riduzione dei loro costi. Senza un investimento iniziale in questa direzione, il mercato dell'idrogeno e delle celle a combustibile resterà intrappolato in un circolo vizioso di costi proibitivi.

La soluzione sta dunque in una forte volontà politica: spetta ai governi incentivare le imprese, sia grandi che piccole, verso un'economia ecosostenibile. Creando un nuovo mercato energetico basato sulle fonti rinnovabili, si aprirà la strada a tecnologie a impatto zero sull'ambiente, come le celle a combustibile, contribuendo significativamente alla lotta contro il cambiamento climatico e promuovendo un futuro più sostenibile.



# Bibliografia

M. Noro, *Celle a combustibile, tecnologia e possibilità applicative*, Palermo, (2003), Italia: collana AiCARR, D. Flaccovio Editore

J.M. Andújar, F. Segura, *Fuel cells: History and updating. A walk along two centuries*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009, Elsevier Ltd

P. Kurzweil, *Fuel Cells*, 2009, Elsevier B.V.

S. Belz, *A synergetic use of hydrogen and fuel cells in human spaceflight power systems*, *Acta Astronautica*, 2015, Elsevier Ltd

Shani Elitzur, Valery Rosenband, Alon Gany, *Combined energy production and waste management in manned spacecraft utilizing on-demand hydrogen production and fuel cells*, *Acta Astronautica*, 2016, Elsevier Ltd

Mohamed Gabbasa, Kamaruzzaman Sopian, Ahmad Fudholi, Nilofar Asim, *A review of unitized regenerative fuel cell stack: Material, design and research achievements*, *Hydrogen Energy Publications*, 2014, Elsevier Ltd

S.A. Grigoriev, P. Millet, V.I. Porembsky, V.N. Fateev, *Development and preliminary testing of a unitized regenerative fuel cell based on PEM technology*, *Hydrogen Energy Publications*, 2010, Elsevier Ltd

P. Millet, R. Ngameni, S.A. Grigoriev, V.N. Fateev, *Scientific and engineering issues related to PEM technology: Water electrolysers, fuel cells and unitized regenerative systems*, *Hydrogen Energy Publications*, 2010, Elsevier Ltd

Ryan O'Hayre, Suk-Won Cha, Whitney Colella, Fritz B. Prinz, *Fuel Cell Fundamentals, Seconda Edizione*, 2009, John Wiley & Sons Inc

# Sitografia

[www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org)

[chimica.campusnet.unito.it](http://chimica.campusnet.unito.it)

[www.intelligent-energy.com](http://www.intelligent-energy.com)

[www.mobilitah2.it](http://www.mobilitah2.it)

[www.greenplanner.it](http://www.greenplanner.it)

[www.toyota.it](http://www.toyota.it)

[www.greenstyle.it](http://www.greenstyle.it)

[www.alvolante.it](http://www.alvolante.it)

[www.ansa.it](http://www.ansa.it)

[dataenergia.altervista.org](http://dataenergia.altervista.org)

[www.quattroruote.it](http://www.quattroruote.it)

[www.linkiesta.it](http://www.linkiesta.it)

[www.treccani.it](http://www.treccani.it)

[www.making-hydrogen.com](http://www.making-hydrogen.com)

[www.researchgate.net](http://www.researchgate.net)

[www.linde.com](http://www.linde.com)

[www.toyota.it](http://www.toyota.it)

[www.bmw.it](http://www.bmw.it)

# Ringraziamenti

*Concludendo questo percorso di studi, desidero esprimere un sincero ringraziamento a tutte le persone che mi hanno sostenuto e ispirato lungo il cammino.*

*In primo luogo, un grazie speciale va a Sofia, per essermi stata sempre accanto con pazienza, per i sacrifici condivisi e per l'infinito supporto che mi dai ogni giorno. Sei la luce nei momenti più bui e grazie per aver sempre creduto in me.*

*Un ringraziamento caloroso va anche a Mamma, Papà, Marco e Michela che nei momenti più impegnativi hanno saputo confortarmi e sostenere. Avete rispettato i miei spazi, condiviso le mie vittorie e mi avete rincuorato nelle sconfitte. Siete stati una fonte inesauribile di motivazione.*

*Un grazie particolare a Flips per la grande complicità e l'amicizia sincera, per le parole giuste nel momento giusto, per il conforto e i preziosi consigli che porterò sempre con me.*

*Desidero estendere i miei ringraziamenti anche ai miei parenti e a tutti coloro che, in vari modi, hanno contribuito a questo viaggio. Ogni gesto e ogni parola di incoraggiamento hanno avuto un immenso valore.*

*Infine, non posso dimenticare i miei compagni di corso: grazie per avermi fatto vivere la vera essenza della vita universitaria e per avermi mostrato cosa significa essere uno studente. La vostra amicizia ha reso questi anni universitari un'esperienza unica e indimenticabile.*

*Un grande abbraccio va a nonno Antonio,  
perché poche parole possono dire molto,  
perché il tempo passa veloce,  
e perché il tempo trascorso insieme non sembra mai abbastanza.*