



**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA**

**DIPARTIMENTO DI SCIENZE ECONOMICHE ED AZIENDALI  
“M.FANNO”**

**DIPARTIMENTO DI SCIENZE STATISTICHE**

**CORSO DI LAUREA IN ECONOMIA E MANAGEMENT**

**PROVA FINALE**

**“IDROGENO: CARBURANTE DEL FUTURO O UTOPIA?”**

**RELATRICE:**

**CH.MA PROF.SSA ALESSANDRA DALLA VALLE**

**LAUREANDA: GIULIA GNESOTTO**

**MATRICOLA N. 1136005**

**ANNO ACCADEMICO 2018 – 2019**



# INDICE

|   |               |
|---|---------------|
| <b>INTRODUZIONE .....</b>   | <b>pag.1</b>  |
| <b>Capitolo 1 – .....</b>   | <b>pag.2</b>  |
| • 1.1 PROPRIETÀ DELL’IDROGENO   |               |
| • 1.2 LA PRODUZIONE   |               |
| • 1.2.1 LO STEAM REFORMING  |               |
| • 1.2.2 L’ELETTROLISI   |               |
| • 1.3 LA CONVERSIONE E LO STOCCAGGIO  |               |
| • 1.4 IL TRASPORTO  |               |
| • 1.5 LE PRINCIPALI UTILIZZAZIONI DELL’IDROGENO   |               |
| <b>Capitolo 2 – .....</b>   | <b>pag.10</b> |
| • 2.1 I PRO E I CONTRO DI UN CARBURANTE CHE PUÒ ESSERE UN PRIMO<br>PASSO VERSO LA SOLUZIONE |               |
| • 2.2 GLI SVANTAGGI   |               |
| • 2.3 I VANTAGGI  |               |
| • 2.4 L’IDROGENO COME COMBUSTIBILE  |               |
| • 2.4.1 LA SICUREZZA  |               |
| • 2.4.2 LO STOCAGGIO E LA DISTRIBUZIONE   |               |
| • 2.5 LE STAZIONI DI RIFORNIMENTO   |               |
| <b>CONSIDERAZIONI FINALI .....</b>  | <b>pag.26</b> |
| <b>BIBLIOGRAFIA .....</b>   | <b>pag.29</b> |

*“Quarantamila anni di evoluzione  
e l'uomo ha solo intercettato una piccola parte delle sue possibilità.”  
(David Koepf)*

Ad oggi la principale causa dell'aumento dell'inquinamento ambientale è dettata dalla produzione di energia elettrica e dai sottoprodotti di carbonio rilasciati.

Perdurare nella produzione dell'energia, utilizzando come fonti le risorse fossili primarie, significa aumentare costantemente e irrimediabilmente l'impronta ecologica che viene lasciata sul nostro pianeta e che conseguentemente si ripercuote sulle nostre vite.

È necessario ridurre l'impatto delle attività umane per poter preservare il nostro ambiente.

Per dare risposta ai problemi energetici, in particolare al primario esaurimento delle fonti fossili tradizionali e ai conseguenti problemi ambientali che ne derivano, non è sufficiente applicare un'unica soluzione, ma fronteggiare la problematicità attuando degli interventi successivi nel tempo.

È basilare iniziare dalla riduzione del consumo dei combustibili fossili, aumentando l'efficienza energetica, e quindi focalizzandosi sullo sviluppo delle tecnologie e sulla loro modalità d'utilizzo.

Il secondo passo dovrebbe essere una fase di transizione, in cui si continuano a utilizzare le fonti fossili, tuttavia eliminando il loro impatto ambientale, ad esempio mediante il sequestro dell'anidride carbonica (decarbonizzazione).

La soluzione finale dovrebbe essere però quella per la quale vengono impiegate unicamente fonti energetiche rinnovabili o vettori energetici, aventi basso o nullo contenuto di carbonio, e il candidato migliore sembra essere l'idrogeno.

In questo elaborato verrà analizzata la validità dell'impiego dell'idrogeno come vettore energetico.

Nel primo capitolo si analizzeranno in primo luogo le peculiari caratteristiche di questo elemento. Verranno inoltre illustrati i metodi di produzione, le modalità di trasporto e le sue principali utilizzazioni.

Nel secondo capitolo verranno delineati gli svantaggi e i vantaggi, per i quali l'idrogeno dovrebbe essere considerato la componente ideale utilizzata per puntare alla decarbonizzazione dei trasporti. Non saranno tralasciati fattori quali la sicurezza e la distribuzione, in quanto questioni da affrontare obbligatoriamente per poter comprendere la modalità attraverso cui sfruttarne appieno il potenziale.

# CAPITOLO 1.

## 1.1 PROPRIETÀ DELL'IDROGENO

La vera natura dell'idrogeno iniziò ad emergere attorno al XVI secolo.

Questo “generatore d'acqua”, scoperto inconsapevolmente da Paracelso, materiale di sperimentazione di Cavendish, ma battezzato idrogeno solo nel 1783 dal padre della chimica (Lavoisier, 1783)<sup>1</sup>, rappresenta il più leggero e abbondante elemento dell'universo.

Esso è presente in tutti i composti organici e organismi viventi. Rappresenta il 73,9% in massa di tutta la nostra galassia ed è “lo stesso che brucia nel sole e nelle stelle, e dalla cui condensazione si formano in eterno gli universi”<sup>2</sup>.

A pressione atmosferica e temperatura ambiente, l'idrogeno si presenta stabile come un gas biatomico avente formula chimica H<sub>2</sub> (diidrogeno).

In queste condizioni l'idrogeno elementare è incolore, inodore, insapore e altamente infiammabile, con un punto di ebollizione di soli 20,27 K e un punto di fusione di 14,02 K (Wikipedia, Idrogeno)<sup>3</sup>.

|                                    |   |
|------------------------------------|---|
| Numero atomico                     | 1   |
| Massa atomica                      | 1.007825 g.mol <sup>-1</sup>                        |
| Elettronegativita' secondo Pauling | 2.1   |
| Densita'                           | 0.0899*10 <sup>-3</sup> g.cm <sup>-3</sup> at 20 °C |
| Punto di fusione                   | - 259.2 °C  |
| Punto di ebollizione               | - 252.8 °C  |
| Raggio di Vanderwaals              | 0.12 nm   |
| Raggio ionico                      | 0.208 (-1) nm                                       |
| Isotopi                            | 3   |
| Guscio elettronico                 | 1s <sup>1</sup>                                     |
| Energia di prima ionizzazione      | 1311 kJ.mol <sup>-1</sup>                           |

Tabella 1: *Proprietà dell'idrogeno.* (Fonte: Wikipedia, 2019)

Esso è il gas con densità minore, pari a 0,0899 kg/m<sup>3</sup>, come si evince nella Tabella 1, e grazie alle sue proprietà caratteristiche risulta essere il combustibile con il più alto rapporto potere calorifico su massa, ma con il più basso rispetto al volume. Si vedrà in seguito che sarà quest'ultimo punto a determinare le principali difficoltà di stoccaggio a bordo dei veicoli.

Infatti, i combustibili di tipo gassoso hanno generalmente un potere calorifico maggiore rispetto a quelli solidi e sebbene l'idrogeno abbia un elevato potere calorifico, a causa della sua bassa densità, il calore sviluppato per unità di volume è piuttosto basso.

<sup>1</sup> LAVOISIER, A., 1783. *Antoine-Laurent de Lavoisier* [online]. Disponibile su [https://it.wikipedia.org/wiki/Antoine-Laurent\\_de\\_Lavoisier](https://it.wikipedia.org/wiki/Antoine-Laurent_de_Lavoisier) [Data di accesso: 09/09/2019].

<sup>2</sup> LEVI, P., 1975. *Il sistema periodico*. 1° ed. Torino: Einaudi, p.29.

<sup>3</sup> WIKIPEDIA, 2019. *Idrogeno* [online]. Disponibile su <https://it.wikipedia.org/wiki/Idrogeno> [Data di accesso: 18/09/2019].

## 1.2 LA PRODUZIONE

Circa 500 miliardi di Nm<sup>3</sup> di idrogeno vengono attualmente prodotti ogni anno sul nostro pianeta (si veda Tabella 2). L'economia dell'idrogeno è solo agli inizi, ma sembra essere una valida base di partenza per la sostituzione dei carburanti fossili.

Jeremy Rifkin a tale proposito afferma che "l'idrogeno è un promettente inizio per un futuro florido dell'umanità sulla Terra. Dipende solo da noi se buttare via tale opportunità, ... oppure sfruttarla per il bene dell'umanità."<sup>4</sup>

| Fonte        | Produzione di idrogeno in miliardi di Nm <sup>3</sup> /anno | Percentuale |
|--------------|---|-------------|
| Gas Naturale | 240   | 48          |
| Petrolio     | 150   | 30          |
| Carbone      | 90  | 18          |
| Elettrolisi  | 20  | 4           |
| Totale       | 500   | 100         |

Tabella 2: *Fonti per la produzione dell'idrogeno.* (Fonte: Giaconia et al., 2006)

L'idrogeno non è una fonte primaria di energia, bensì un vettore energetico.

Si parla di vettore energetico in quanto strumento per accumulare e trasferire energia: è una sostanza capace di fungere da mezzo di trasporto per un'energia proveniente da altre fonti, primarie o secondarie esse siano.

Ciò significa che, non essendo presente l'idrogeno in forma pura sulla Terra e non esistendo giacimenti o riserve, esso va prodotto.

Quando ottenuto da fonti rinnovabili, come l'energia solare, eolica o idroelettrica, esso risulta essere non inquinante e virtualmente inesauribile.

Pur esistendo più di cinquanta metodi per produrre idrogeno da fonti verdi, a livello commerciale la maggior parte di essi non sono utilizzati a causa dei costi di ricerca e perfezionamento che richiederebbero.

I processi comunemente più utilizzati sono rispettivamente lo Steam Methane Reforming (SMR), utilizzando combustibile fossile come base di partenza, e l'elettrolisi, che prevede la scissione delle molecole d'acqua.

---

<sup>4</sup> RIFKIN, J., 2002. *Economia all'idrogeno*. 1° ed. Milano: Mondadori.

### 1.2.1 LO STEAM METHANE REFORMING

È uno dei metodi meno costosi e più efficaci. Esso permette di ottenere il 48% circa della produzione mondiale di idrogeno.

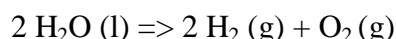
Consiste nella conversione termochimica del metano, un idrocarburo leggero, lavorato grazie a temperature operative elevate, comprese circa tra gli 820 – 870 °C, ed una pressione di 2,5 MPa.

A seguito di una prima fase in cui avviene la decomposizione del metano, in idrogeno e monossido di carbonio, nella seconda fase (shift reaction) viene prodotto il syngas (un gas di sintesi formato da monossido di carbonio e acqua), il quale viene trattato per produrre ulteriore idrogeno.

Il rendimento di questo processo è del 75 - 80%, ma l'immane quantità di energia necessaria per il funzionamento degli impianti lo riduce a circa 65%. Il costo del metano inoltre incide sul costo finale del 52 - 68% e se si vuole sequestrare la CO<sub>2</sub> il costo aumenta ulteriormente del 25% circa.<sup>5</sup> (Savino, 2000).

### 1.2.2 L'ELETTROLISI

Dall'altro canto, con l'elettrolisi il semplice passaggio di una corrente in una soluzione di acqua permette la scissione della molecola in ossigeno e idrogeno, liberando al contempo energia:



La reazione non è spontanea in condizioni normali di temperatura e pressione.

Per questo motivo scindere la molecola d'acqua significa impiegare molta energia, a causa del legame chimico interno tra le particelle che deve essere spezzato.

Deve essere fornita un'energia pari a 286 kJ/mol per poter spezzare il legame e ottenere idrogeno "verde" e ad alta purezza.

Il rendimento teorico è dell'85%, ma quello reale varia tra il 55% ed il 70% senza considerare i rendimenti della generazione elettrica.<sup>6</sup> (Agnolin, 2010)

Fino ad ora tuttavia l'energia utilizzata per innescare la reazione è principalmente quella elettrica ed è qui che risiede la parte negativa di questo processo ancora non completamente

---

<sup>5</sup> SAVINO, F., 2000. *Prospettive nella produzione di energia: aspetti merceologici ed economici. Il caso dell'idrogeno*. Università di Foggia, Facoltà di Economia.

<sup>6</sup> AGNOLIN, R., 2010. *Il confronto tra i rendimenti dalla fonte alla ruota per: auto con motore endotermico; auto elettrica; auto con idrogeno e fuel cell*. Università di Padova, Facoltà di ingegneria.

“pulito”: non è tanto la modalità di produzione dell'idrogeno, bensì come attualmente viene prodotta l'energia elettrica, impiegata per scindere le molecole d'acqua da cui deriva, ad essere inquinante e poco efficiente.

“Credo che l'acqua sarà un giorno impiegata come combustibile, che l'idrogeno e l'ossigeno di cui è costituita, utilizzati isolatamente o simultaneamente, offriranno una sorgente di calore e di luce inesauribili e di un'intensità che il carbon fossile non può dare.

L'acqua è il carbone dell'avvenire.”<sup>7</sup>

### **1.3 LA CONVERSIONE E LO STOCCAGGIO**

La cella a combustibile è il generatore capace di convertire l'energia chimica dell'idrogeno in energia elettrica e calore.

Essa sfrutta il flusso di reagenti gassosi provenienti dall'elettrolisi (quali il diidrogeno) per trasformare direttamente l'energia chimica in energia elettrica, in modo continuo fintanto che viene rifornita di reagenti.

Questo è permesso dalla particolare struttura stratificata della cella, dove, le lamine da cui è formata, svolgono il ruolo di anodo e catodo.

Questi elettrodi hanno il ruolo di siti catalitici, i quali favoriscono la reazione di combustione controllata, in cui, dall'idrogeno e dall'ossigeno, si ottiene acqua, calore e corrente elettrica.

Il processo è promosso dal materiale elettrolita presente tra gli elettrodi, grazie al quale gli ioni prodotti dall'anodo vengono condotti al catodo nel quale sono consumati, chiudendo così il circuito elettrico all'interno della cella.

In particolare l'idrogeno viene canalizzato verso l'anodo. Qui, grazie alla presenza del catalizzatore, le cariche positive vengono separate da quelle negative.

Le cariche positive, potendo attraversare l'elettrolita, raggiungono il catodo e qui, reagendo con l'ossigeno, producono l'acqua.

Le cariche negative invece, non possedendo le proprietà per superare l'elettrolita, passano attraverso un cavo conduttore esterno, generando in questo modo la corrente elettrica di immediato utilizzo.

---

<sup>7</sup> VERNE, J., 1874. *L'isola misteriosa*. In: RIFKIN, J., 2002. *Economia all'idrogeno*. 1° ed. Milano: Mondadori.



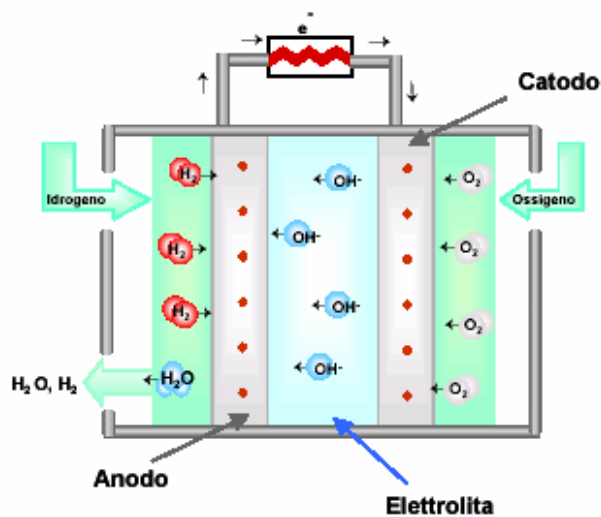


Figura 1: PEM - pila a combustibile con membrana a scambio protonico (Fonte: Wikipedia, 2019).

In particolare, la pila a combustibile con membrana a scambio protonico (PEM, Proton Exchange Membrane, o PEMFC, Proton Exchange Membrane Fuel Cell) è una tipologia di cella a combustibile ancora in fase di sviluppo per poter essere applicata nel settore dei trasporti (si veda Figura 1). Confrontata ad altre celle a combustibile essa ha il vantaggio della leggerezza, di essere poco ingombranti e in particolare esse hanno la peculiarità di poter funzionare a basse temperature e pressioni (relativamente a 50-100 °C e 0,3 MPa), grazie all'utilizzo di una membrana elettrolitica polimerica specifica.<sup>8</sup> (Wikipedia, 2019)

Lo stoccaggio dell'idrogeno può avvenire principalmente attraverso tre metodi:

- Immagazzinamento in forma di gas compresso
- Immagazzinamento in forma liquida
- Immagazzinamento in forma solida

Effettuare lo stoccaggio dell'idrogeno come gas compresso richiede l'utilizzo di un serbatoio cilindrico in cui, attraverso un regolatore di pressione, l'idrogeno viene immesso, per poi essere rilasciato al bisogno tramite un sistema di propulsione e valvole, adibite al controllo del flusso del gas in uscita.

Tale metodo è utilizzato maggiormente per il trasporto di quantità ridotte, ad esempio nei veicoli.

Per aumentare la quantità trasportata è possibile, mantenendo una temperatura costante, incrementare la pressione, riducendo così il volume dell'idrogeno.

Solitamente la pressione più utilizzata è di 350 MPa. Tuttavia è possibile raggiungere un'efficienza superiore, compresa tra l'80-90%, solo a 700 MPa.

<sup>8</sup> WIKIPEDIA, 2019. Pila a combustibile con membrana a scambio protonico [online]. Disponibile su [https://it.wikipedia.org/wiki/Pila\\_a\\_combustibile\\_con\\_membrana\\_a\\_scambio\\_protonico](https://it.wikipedia.org/wiki/Pila_a_combustibile_con_membrana_a_scambio_protonico) [Data di accesso: 19/09/2019].

Non è solo l'immagazzinamento allo stato gassoso a richiedere particolari condizioni per essere attuato.

Infatti, per conservare l'idrogeno liquido, adoperato per i trasporti di lunghe distanze e per le riserve di combustibile dei veicoli spaziali e degli aeroplani, è necessario portarlo a temperature di 20K (-253 °C), applicando oltretutto basse pressioni e impiegando serbatoi altamente isolati.<sup>9</sup>

Infine, la metodologia per lo stoccaggio dell'idrogeno allo stato solido è ancora in fase di definizione e ricerca. Vi sono solo alcuni materiali, come alcuni idruri metallici e nanostrutture in carbonio, capaci di assorbire l'idrogeno in modo reversibile, ossia in modo tale da poterlo rilasciare in seguito, grazie a reazioni chimiche o riscaldamento. Tuttavia perché essi siano funzionali, devono poter rilasciare l'idrogeno molto facilmente e devono essere sicuri da utilizzare, ma attualmente non sono presenti soluzioni soddisfacenti a questi problemi.

#### **1.4 IL TRASPORTO**

Dopo aver visto come si ottiene e si immagazzina l'idrogeno è utile considerare la modalità con cui esso viene distribuito.

È opportuno notare che esso può essere anche prodotto direttamente nella stazione di rifornimento o in impianti centralizzati per poi essere trasportato alle stazioni. In ognuno dei due casi è possibile produrre l'idrogeno tramite SMR o elettrolizzatori.

Sono disponibili varie opzioni per effettuare il trasporto dell'idrogeno e tali modalità di distribuzione variano al variare dello stato fisico in cui si presenta l'elemento.

Se in forma gassosa il trasporto può avvenire attraverso condotte o all'interno di bombole su camion.

Se in forma liquida invece lo spostamento avviene per mezzo di autobotti criogeniche.

Il primo stato permette di ottenere una resa maggiore, oltre ad avere una complessità inferiore, perciò risulta essere la tecnica più impiegata.

Tuttavia si stanno investendo ingenti somme anche nella ricerca di metodi di stoccaggio per l'idrogeno allo stato liquido più semplici, per poter ottenere un rendimento superiore, considerata l'elevata densità energetica specifica dell'elemento in questa forma.

---

<sup>9</sup> TRECCANI, 2007. Nuovi sviluppi: energia, trasporti e sostenibilità. *Enciclopedia degli idrocarburi*. Volume III, p.362.

## 1.5 LE PRINCIPALI UTILIZZAZIONI DELL'IDROGENO

Ad oggi il 59% dell'idrogeno prodotto è utilizzato dall'industria chimica, il 40% nelle raffinerie e la restante quota, solo l'1% della produzione mondiale, è destinato alle industrie elettroniche, metallurgiche, alimentari e spaziali (Marco Noro, 2003).

Negli anni la richiesta di idrogeno è aumentata in modo sostanziale ed è previsto un suo ulteriore incremento anche nel prossimo futuro (si veda Tabella 3).

| <i>Domanda di idrogeno</i>      | <i>2001</i> | <i>2006</i> | <i>2011</i> | <i>2016</i> | <i>2021</i> | <i>unità</i> |
|---------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|
| <i>Raffinazione petrolifera</i> | 328.000     | 392.000     | 360.000     | 424.000     | 464.000     | t/anno       |
| <i>Industria chimica</i>        | 48.000      | 48.000      | 48.000      | 48.000      | 48.000      | t/anno       |
| <i>Altro</i>                    | 48.000      | 48.000      | 40.000      | 48.000      | 48.000      | t/anno       |
| <b>TOTALE</b>                   | 424.000     | 488.000     | 448.000     | 520.000     | 560.000     | t/anno       |

Tabella 3: *Domanda annua di idrogeno per settore in Italia.* (Fonte: Freedonia Group, 2011)

Il suo utilizzo pratico lo vede essenzialmente protagonista di due applicazioni: per usi stazionari e come combustibile per i mezzi di trasporto.

Nella prima utilizzazione l'idrogeno è impiegato nella produzione di calore o energia elettrica ai fini industriali o domestici, in modo analogo al metano o al GPL.

Nel secondo caso l'uso dell'idrogeno per l'alimentazione dei veicoli è una realtà consolidata.

In particolare può essere impiegato come carburante di una turbina a gas, in un sistema a ciclo combinato, con emissioni quasi nulle, o, se unito all'ossigeno, esso risulta essere la fonte energetica di una cella a combustibile (Fuel Cell) e in questa ultima ipotesi le emissioni sono pari a zero.

Dato l'attuale sviluppo tecnologico, l'idrogeno può essere indubbiamente impiegato come combustibile, considerato il suo potere calorifico e il fatto che il suo sottoprodotto è solo vapore acqueo.

Utile mezzo per immagazzinare energia, presenta tuttavia delle inefficienze non trascurabili nel ciclo di produzione. Infatti, dal punto di vista termodinamico l'energia richiesta nella sua produzione risulterebbe essere superiore a quella prodotta dalla sua combustione.

Questo accade perché, in virtù della seconda legge della termodinamica, a seguito di una trasformazione, in un sistema isolato, l'entropia aumenta sempre.

Ciò significa che per ogni conversione di energia da una forma all'altra, vi è una riduzione di una parte dell'energia stessa, la quale viene dissipata come calore, non più utilizzabile per produrre lavoro.<sup>10</sup> (Wikipedia, 2019)

Se quindi una molecola d'acqua viene scissa per estrarre l'idrogeno, inevitabilmente vi è un costo. Costo quasi equivalente all'energia liberata a seguito della combustione dell'idrogeno. Quasi, in quanto non esiste ancora alcun motore perfettamente isolato capace di assicurare un rendimento assoluto.

La dissipazione di calore conseguente equivale a una perdita energetica tale da far risultare addirittura negativo il guadagno energetico del processo di produzione dell'idrogeno.

Attualmente estrarre l'idrogeno da fonti alternative rinnovabili ha un costo energetico produttivo più elevato di quello del guadagno derivante dalla sua combustione.

Un guadagno netto energetico si ha utilizzando il metodo della SMR, ma in questo processo le fonti utilizzate sono di natura fossile, esauribile e con emissioni dirette di carbonio.

Un ulteriore modo di produrre efficacemente ed efficientemente energia dall'idrogeno è quello di una futura fusione nucleare, ossia un impianto termonucleare, all'interno del quale un reattore replicherà ciò che accade all'interno del cuore del sole, fondendo tra loro gli atomi di idrogeno verrà prodotta una quantità di energia immane. Purtroppo questa tecnologia è ancora in fase di sviluppo nel reattore sperimentale ITER, il quale potrebbe, in un tempo non troppo lontano, riuscire a produrre una quantità di energia illimitata, pulita e sicura.<sup>11</sup> (Bettini, 2018).

---

<sup>10</sup> WIKIPEDIA, 2019. Il secondo principio della termodinamica [online]. Disponibile su [https://it.wikipedia.org/wiki/Secondo\\_principio\\_della\\_termodinamica](https://it.wikipedia.org/wiki/Secondo_principio_della_termodinamica) [Data di accesso: 19/09/2019].

<sup>11</sup> BETTINI, A., 2018. Dentro ITER, mega-reattore nucleare sperimentale che copierà il Sole. *Rai News* [online]. Disponibile su <http://www.rainews.it/dl/rainews/articoli/Dentro-ITER-il-megareattore-nucleare-sperimentale-che-copiera-il-Sole-c9e385bb-08e7-4d1e-9b1b-0afb85806a29.html> [Data di accesso: 29/09/2019].

## CAPITOLO 2.

### 2.1 I PRO E I CONTRO DI UN CARBURANTE CHE PUÒ ESSERE UN PRIMO PASSO VERSO LA SOLUZIONE

Il cambiamento climatico dovuto all'impatto antropogenico è il problema più critico e ingente del ventunesimo secolo. Le temperature globali continuano irrefrenabilmente ad elevarsi a causa delle crescenti emissioni di gas serra, comportando una reazione a catena di effetti disastrosi per il pianeta e per i suoi abitanti. Se non ci saranno decisivi e concreti interventi, le emissioni globali sono destinate a crescere in modo esponenziale.

La comunità scientifica ha un'unica opinione: per salvare il pianeta dal declino climatico è fondamentale limitare immediatamente e in modo considerevole le emissioni dei gas serra.

“Analisi effettuate dall'Intergovernmental Panel On Climate Change indicano che bisognerebbe abbassare ogni anno del 60% le emissioni globali fino al 2100 per evitare di raggiungere livelli di gas serra in atmosfera superiori al doppio di quelli che c'erano nell'epoca pre-industriale.”<sup>12</sup>

La preoccupazione per l'inquinamento ambientale è tale da risultare essere la paura primaria dei cittadini: 84% degli italiani è angosciato dalle tematiche globali come l'inquinamento e la distruzione dell'ambiente naturale, mentre l'82% teme l'inquinamento dell'aria.<sup>13</sup>

I principali fattori su cui è necessario operare un cambiamento per poter realizzare un'economia sostenibile, a ridotte emissioni di anidride carbonica, sono l'industria, il settore della produzione energetica e quello dei trasporti.

Nel piano dell'Unione Europea vi è l'obiettivo di ridurre nel lungo termine le emissioni dell'80-95%, azzerando quelle nette in modo totale entro il 2050.

Per fare ciò è necessario definire e realizzare un'economia competitiva e resiliente, per adempiere all'Accordo di Parigi, così da limitare a 1,5°C l'incremento della temperatura globale.<sup>14</sup>

---

<sup>12</sup> BANCONE, SASANELLI, 2006. *L'idrogeno come vettore energetico: la Ricerca in Australia* [online]. Disponibile su [http://www.piar.it/rapporti/IDROGENO\\_bancone.pdf](http://www.piar.it/rapporti/IDROGENO_bancone.pdf) [Data di accesso: 26/08/2019].

<sup>13</sup> MASSARA, D., 2019. *La classifica delle più grandi paure degli italiani: inquinamento tra i timori più diffusi* [online]. Disponibile su <https://it.yougov.com/news/2019/05/24/paure/> [Data di accesso: 28/08/2019].

<sup>14</sup> Direttiva del Consiglio Europeo EUCO 169/14 del 24 ottobre 2019 definente il quadro 2030 per le politiche dell'energia e del clima.

Un contributo considerevole al raggiungimento di queste inderogabili soluzioni può essere dato dall'idrogeno: in virtù delle sue caratteristiche come combustibile, agente chimico e vettore energetico si presta ad essere un concreto aiuto.

Tuttavia l'idrogeno permane attorniato da una luce negativa, perché relativamente sconosciuto e ritenuto, da luogo comune, altamente pericoloso.

Esso è in realtà in grado di favorire il trasporto a zero emissioni, di incrementare la flessibilità e rende possibile lo sfruttamento degli esuberi della rete elettrica. Agevola l'abbattimento delle emissioni inquinanti dell'industria, promuove l'impiego delle fonti energetiche rinnovabili e permette di elevare l'efficienza nell'utilizzo finale dell'energia.

È per questo che in Italia, e non solo, rinomate eccellenze industriali diffondono l'utilizzo su grande scala dell'idrogeno e delle celle a combustibile, trainando anche la ricerca e lo sviluppo Europeo.

## **2.2 GLI SVANTAGGI**

I mezzi alimentati a benzina o gasolio risultano essere i responsabili dell'inquinamento da smog e da ozono al suolo.

È ormai universalmente dimostrato che l'inquinamento urbano potrebbe trovare iniziale soluzione grazie alla sostituzione di un'ingente parte dei veicoli, alimentati da motori a combustione interna, con automobili a zero emissioni, come i veicoli elettrici.

In effetti questa tipologia di motore sembra essere la scelta più ovvia per il trasporto urbano.

Appurato essere silenzioso e maggiormente efficiente rispetto ad un motore a combustione fossile, è altrettanto vero però che le batterie esistenti, in esso incorporate, non sono ancora in grado di garantire un livello di accelerazione e una durata di percorrenza, tali per cui sia risvegliato l'interesse del consumatore.

Interesse che si affievolisce ulteriormente di fronte ai lunghi tempi di ricarica richiesti e alla consapevolezza che, a monte, l'energia elettrica viene prodotta specialmente da fonti fossili o nucleari.

Tuttavia quando la salute della popolazione è il principale obiettivo perseguito, il motore elettrico assume un'importanza nuova. Da ciò si deduce che, in particolar modo le pile a combustibile (PEM) sopra citate, sembrano essere le alternative migliori.

Il motore è alimentato direttamente dai serbatoi di idrogeno presenti all'interno del veicolo, i tempi di rifornimento sono abbattuti a pochi minuti e l'inquinamento risulta letteralmente evaporare. Quest'ultimo è tuttavia solo un dato apparente.

Vi sono infatti non indifferenti limiti tecnologici relativi alla produzione, alla distribuzione e all'accumulo dell'idrogeno che ne frenano la diffusione.

Va ricordato che l'energia, per unità di volume, prodotta da un motore alimentato ad idrogeno rispetto ad un motore tradizionale, è ampiamente inferiore:

Idrogeno (gassoso a temperatura ambiente) = 0,01079 MJ/L

Benzina (a temperatura ambiente) = 34.6 MJ/L

Considerata la prima legge di Gay-Lussac, per cui, in condizioni di pressione costante, il volume di un gas aumenta linearmente con la temperatura, è possibile ovviare al problema dell'energia prodotta comprimendo o raffreddando l'idrogeno, così da portare il suo grado di efficienza ai livelli di un motore a combustione interna.<sup>15</sup> (Frassinetti, 2017)

Tecnologia ad oggi in fase di perfezionamento.

È innegabile quindi che i motori alimentati ad idrogeno presentino attualmente degli impedimenti, che ostacolano l'ascesa di questo combustibile, di natura non solo tecnologica.

Si aggiungono problemi di tipo strutturale a causa dell'inadeguata rete distributiva e di siti di stoccaggio non appropriati, i quali richiedono grandi spazi e devono essere realizzati con specifici materiali. L'idrogeno ha la capacità di danneggiare i metalli ed oltrepassare le pareti dei contenitori: si fissa sugli atomi ferrosi all'interno degli spazi interstiziali dei reticoli molecolari, esercita una fatica statica capace di contribuire alla lesione del contenitore. I serbatoi devono essere quindi composti da una ingente quantità di materiali che risultano essere molto costosi e più pesanti, rispetto ad un normale serbatoio, tanto da arrivare a superare di dieci volte il costo base.

La rete di distribuzione è debole sia per quanto concerne il trasporto del carburante, dai siti di stoccaggio ai siti di impiego, sia per la quantità, irrisoria e insufficiente, delle stazioni di rifornimento. Essendo l'autonomia dei veicoli ad idrogeno minore rispetto a quella delle auto tradizionali, l'assenza di distributori disseminati lungo il paese è un forte limite alla diffusione delle auto ad idrogeno.

Seguono barriere economiche. I veicoli con pile a combustibile (PEM) sono tuttora in fase prototipale e prodotti singolarmente (alcuni produttori come Toyota costruiscono da anni le loro auto a idrogeno a mano).

---

<sup>15</sup> FRASSINETTI, A., 2017. *I pro e i contro di un carburante che sembra essere risolutivo* [online]. Disponibile su <http://www.hdmotori.it/2017/01/20/idrogeno-pro-contro/> [Data di accesso: 26/08/2019].

Ciò non garantisce un'affidabilità accettabile per il mercato veicolare, comportando dei costi di produzione elevati e non vantaggiosi. Un'industrializzazione su vasta scala permetterebbe una produzione di massa con una significativa riduzione dei costi, in quanto a seguito di un ragguardevole investimento iniziale, i costi operativi si andrebbero notevolmente a ridurre rispetto a quelli del sistema attuale.

Oltre al funzionamento generale, anche il materiale dei componenti incide nel bilancio economico finale. Nella cella a combustibile di un'auto a idrogeno si trova una lamina di platino, metallo prezioso che si trova di rado sulla terra e la cui disponibilità è limitata. Per questo essa risulta essere molto costosa e determina in modo cruciale l'elevazione del prezzo delle auto a idrogeno. Scienziati e produttori sono attualmente alla ricerca di alternative al platino più praticabili. Tali sforzi oltre ad essere diretti alla minimizzazione della quantità del catalizzatore, nella struttura elettrodica, e a delineare innovativi materiali per la membrana, forniscono indizi sensibili per l'individuazione di strutture di celle alternative, quest'ultime capaci di decrementare i costi delle fuel cell, in particolar modo se prodotte a livelli di scala industriale.

Non mancano poi ostacoli normativo-legislativi. La scarsità di leggi puntuali o linee guida, che regolino l'utilizzo e la manipolazione dell'idrogeno, limitano la sicurezza di questo elemento di natura fortemente infiammabile ed esplosiva.

Vanno inoltre considerate le conseguenze in termini sociali e ambientali derivanti dalla transazione verso un regime energetico basato sull'idrogeno. La diffidenza e la neofobia verso questo elemento, trovano la base in quella che è ad oggi stata denominata come sindrome dell'Hindenburg, per la quale il comportamento avverso del consumatore è spiegato dal fatto che esso tende a privilegiare tecnologie consolidate e a percepire negativamente l'impiego dell'idrogeno su vasta scala.

Non deve essere intrapresa solo una rivoluzione industriale, ma soprattutto una rivoluzione sociale.



### 2.3 I VANTAGGI

Alla luce di questa serie di svantaggi, perché l'idrogeno è allora ormai considerato come il combustibile del futuro? Semplicemente perché le sue particolari caratteristiche ne fanno una fonte d'energia ideale. L'idrogeno nel suo ciclo vitale potrebbe potenzialmente avere impatto zero sull'ambiente circostante.

La produzione di idrogeno si può infatti armonizzare perfettamente con l'ambiente. Se prodotto a partire da risorse rinnovabili è una fonte completamente ecosostenibile, dall'estrazione sino ai residui della sua combustione: i sottoprodotti della combustione dell'idrogeno corrispondono unicamente ad acqua pura o vapore acqueo, le responsabili dell'inquinamento sono le emissioni derivanti dalla produzione e della distribuzione.

Pur potendo essere indistintamente prodotto da qualsiasi fonte d'energia, l'attuale modus operandi di produrlo da risorse fossili è controproducente.

Chi ha a cuore la qualità dell'ambiente non può ignorare l'impatto complessivo, fissando lo sguardo solo sul residuo finale che può percepire.

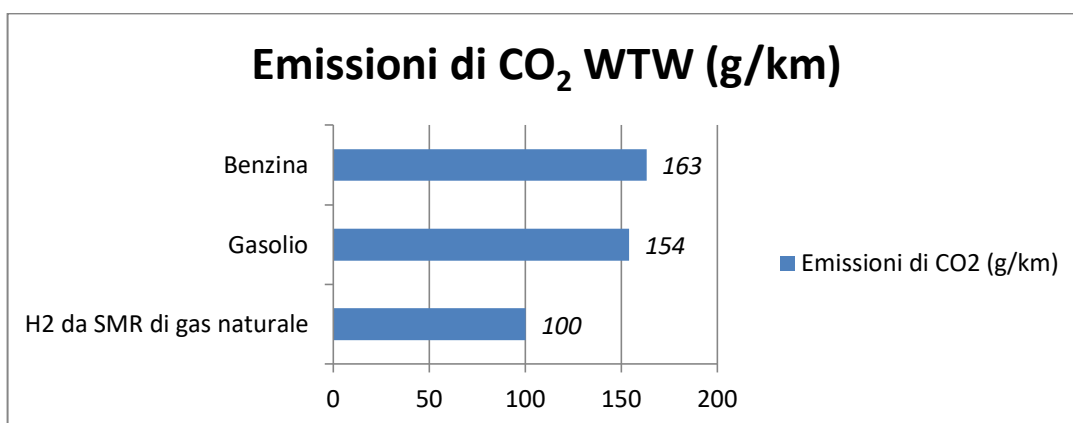


Figura 2: Analisi Well-to-Wheel delle emissioni di gas serra di diverse tipologie di combustibile.

Da un'analisi WTW (Well-to-Wheel, dal pozzo alla ruota), la quale considera le emissioni totali dall'estrazione all'utilizzo del prodotto, emerge che i gas serra, prodotti per ogni chilometro percorso, tenendo conto dell'intero processo, non sono pari a zero neppure per l'idrogeno, se si impiegano fonti fossili come materie prime (si veda Figura 2).

L'idrogeno risulta essere conciliabile con l'ecosistema solo nel caso in cui la sua estrazione, l'energia elettrica utilizzata a produrlo, il suo immagazzinamento e/o successivo trasporto ed il suo utilizzo finale non producano nessun agente inquinante.

Nel circolo virtuoso dell'energia rinnovabile l'idrogeno è oltremodo essenziale per l'immagazzinamento dell'energia stessa. Ogni ipotesi di produzione basata su fonti energetiche rinnovabili è vana, se non si ricorre all'idrogeno come veicolo di immagazzinamento dell'energia non immediatamente utilizzata o presente in esubero. Se il sole non splende, il vento non soffia, l'acqua non scorre, non si può generare energia pulita e il sistema di produzione ecosostenibile si arresta. In questi casi si può ricorrere alle scorte energetiche di idrogeno, senza dover utilizzare fonti fossili primarie: così nei momenti di scarsa insolazione e nelle ore di buio l'energia chimica dell'idrogeno è riconvertita in elettricità per soddisfare le esigenze di carico.

## **2.4 IDROGENO COME COMBUSTIBILE**

L'idrogeno trova molteplici impieghi, sia come materia prima, nella fabbricazione di un'innumerabile serie di prodotti, sia come combustibile. Quest'ultimo aspetto è stato a lungo ignorato.

In Italia nonostante vi sia stata una significativa riduzione (-76,6% dal 1990) delle emissioni di monossido di carbonio derivanti dal traffico stradale, questo continua tuttora a rappresentare la fonte principale di inquinamento (43,2% del totale nel 2008).<sup>16</sup> (Bernetti, A., et al., 2010)

La portata rivoluzionaria, a livello ambientale, emerge dall'ipotesi di poter utilizzare l'idrogeno non solo in modo isolato, ma combinato ad altri combustibili, come benzina o gas naturale. La miscelazione ottenuta dall'aggiunta di appena il 5% di idrogeno al composto di aria e benzina, in motore a combustione interna, permette di ridurre del 30%-40% le emissioni di monossido di azoto.

Per quanto si sia poco abituati a sentir parlare di auto alimentate a idrogeno, queste sono tutt'ora una realtà concreta.

---

<sup>16</sup> BERNETTI, A., et al., 2010. *Trasporto su strada, inventario nazionale delle emissioni e disaggregazione provinciale*. ISPRA, Rapporto 24/2010 [online]. Disponibile su <http://www.isprambiente.gov.it/contentfiles/00007500/7510-trasporto-strada-concopertina-xweb.pdf> [Data di accesso: 04/09/2019].

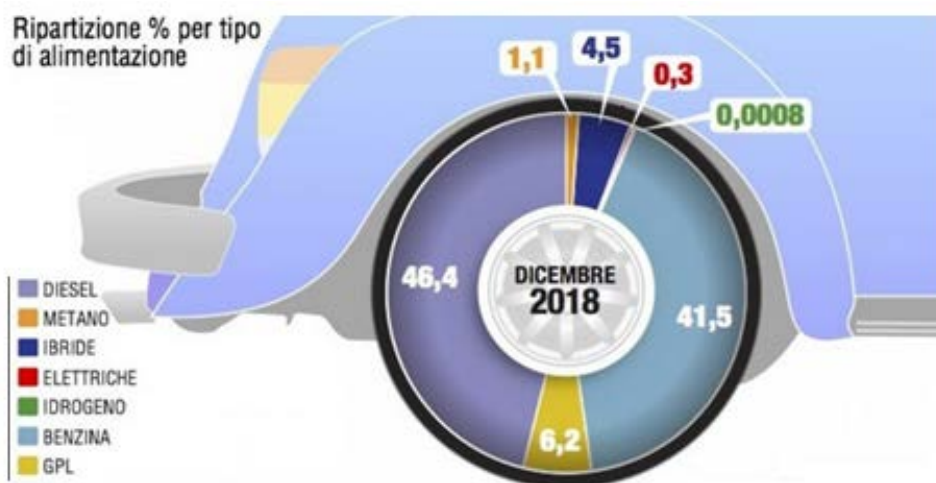


Figura 3: Vendita auto Dicembre 2018 relativa al mercato italiano. (Fonte: Energy&Strategy Group)

A dicembre 2018 è stata immatricolata la prima auto ad idrogeno su suolo italiano (si veda Figura 3). Seppur questo dato possa apparire poco significativo, è in realtà segno tangibile di come il mercato sia alla ricerca di soluzioni innovative che abbiano un minore impatto sull'ecosistema.

Alcune case automobilistiche, presenti negli Stati Uniti, in Giappone e in Europa, si sono già preparate e stanno acquisendo pian piano quote di mercato che nel prossimo futuro vedranno un significativo incremento. Nella tabella sottostante (Tabella 4) sono riportati i modelli presenti sul mercato automobilistico e le relative case produttrici.<sup>17</sup>

| <i>Casa automobilistica</i>  | <i>Prezzo</i> | <i>Autonomia</i>  | <i>Capacità del serbatoio</i> | <i>Potenza</i> |
|--|---------------|---|-------------------------------|----------------|
| <i>NUOVA HYUNDAI NEXO</i>  | 69.400 €      | 800 Km  | 6,3 Kg                        | 163 CV         |
| <i>NUOVA TOYOTA MIRAI F-CELL</i>   | 66.000 €      | 500 Km  | 5,0 Kg                        | 155 CV         |
| <i>HONDA CLARITY FUEL CELL</i><br>(disponibile solo a noleggio in California e Giappone)           | 441 €/mese    | 650 Km  | 5,0 Kg                        | 176 CV         |
| <i>MERCEDES GLC F-CELL</i><br>(disponibile solo a noleggio in Germania e presto anche in Giappone) | 799 €/mese    | 430 Km<br>(+51 Km di autonomia grazie alle batterie agli ioni di litio) | 4,4 Kg                        | 210 CV         |

Tabella 4: Le principali casi automobilistiche presenti nel mercato a Luglio 2019. (Fonte: Trendmotori, 2019)

<sup>17</sup> TRENDMOTORI, 2019. *Auto e SUV a idrogeno* [online]. Disponibile su <https://www.trendmotori.com/autoidrogeno-fuel-cell.php> [Data di accesso 16/10/2019].

L'auto elettrica nel breve periodo è indubbiamente un'alternativa ecologica più sviluppata rispetto all'auto ad idrogeno, non tanto per i suoi vantaggi, ma per la tecnologia e la maturità posseduti del settore dell'elettrico.

Superato il costo iniziale di produzione, rispetto alle auto elettriche, le auto ad idrogeno presentano enormi vantaggi che vanno dall'autonomia maggiore alla velocità di ricarica. Infatti, in meno di una manciata di minuti, è possibile ricaricare interamente un serbatoio di idrogeno, più o meno come avviene su un'auto a benzina. Studi recenti hanno stimato che, sebbene il prezzo al chilo dipenda dal metodo utilizzato per ottenerlo, il suo costo si aggira "intorno ai 10 euro per chilo di idrogeno che consentono di percorrere circa 100 km"<sup>18</sup>.

Oltre alla riduzione delle emissioni, rispetto all'auto elettrica, l'auto a idrogeno necessita di una batteria dalle dimensioni più ridotte. Dal momento che il litio sta diventando sempre più costoso, oltre ad essere la causa di numerosi conflitti per il suo sfruttamento in molteplici paesi del mondo, quando impiegato nella produzione di una batteria più piccola, l'utilizzo di una quantità nettamente inferiore di questo materiale si concretizza in un risparmio economico. Le sostanze elettrolitiche, proprie delle PEM, non sono tossiche come quelle contenute nelle batterie e pile a combustibile, anzi permettono di avere un'efficienza doppia (in alcuni casi addirittura tripla) rispetto a quella dei veicoli a benzina.

Prestazioni simili consentono di assicurare performance di guida elevate ed al contempo rendere l'auto ad idrogeno appetibile ad una vasta fascia di utenti. Con una potenza di base di 70 kW, crescente in base ai modelli, l'auto ad idrogeno è fruibile anche ai neopatentati.

L'economia dell'idrogeno per poter crescere ed espandersi necessita dell'implementazione di numerose economie di scala, le quali sono tuttavia proporzionali all'investimento effettuato.

Innumerevoli progetti sia governativi sia privati, mirati all'impiego di celle a combustibile come sistemi di alimentazione, sono attualmente in corso di attuazione.

"L'Hydrogen Council che riunisce oltre 50 imprese, dalle case automobilistiche ai fornitori di energia, prevede più di 10 milioni di auto a idrogeno entro il 2030, una presenza che si traduce nell'abbattimento del 20 per cento delle emissioni di CO<sub>2</sub>".<sup>19</sup>

Il potenziale dell'idrogeno è enorme. Eppure, per poterlo sfruttare, devono essere affrontate due questioni cardinali: la sicurezza e la distribuzione.

---

<sup>18</sup> ANTONIELLA, G., 2019. *Immatricolata la prima auto a idrogeno in Italia: ecco la 'cella' che cambierà la vita* [online]. Disponibile su <https://it.businessinsider.com/immatricolata-la-prima-auto-a-idrogeno-in-italia-ecco-la-cella-che-ci-cambierà-la-vita/> [Data di accesso: 08/09/2019]

<sup>19</sup> GARANCINI, C., 2019. *Transizione energetica: una proposta di legge per puntare sull'idrogeno* [online]. Disponibile su <https://www.lifegate.it/persona/stile-di-vita/idrogeno> [Data di accesso: 06/09/2019].

## 2.4.1 LA SICUREZZA

Valutare la sicurezza relativa all'idrogeno significa irrimediabilmente risvegliare nelle menti di molti l'episodio dell'Hindenburg, dirigibile tedesco che nel 1937, nel corso di un atterraggio d'emergenza, esplose causando la morte di 35 delle 97 persone a bordo<sup>20</sup> (Rai News, 2017). In soli quaranta secondi dell'Hindenburg non rimasero solo che ceneri.

Solamente molti decenni dopo fu rivelata l'effettiva causa dell'incidente. Studi approfonditi del Dipartimento del Commercio Usa svelarono che probabilmente l'incendio era stato innescato dal contatto dell'idrogeno puro con l'aria.

Certezze sulla reale causa dell'incidente tuttavia non furono stabilite. "Rimasero sul tavolo alcune ipotesi, la più accreditata delle quali è che sia stata una combinazione tra l'elettricità statica accumulata dall'aeromobile durante il volo e il particolare rivestimento utilizzato"<sup>21</sup>.

L'esterno del dirigibile era infatti ricoperto da una particolare vernice contenete nitrocellulosa, materiale fortemente infiammabile e ad oggi utilizzato come carburante nei razzi spaziali.

Anche se il dirigibile aveva attraversato placidamente l'Atlantico per ben 34 volte, questa tragedia lesse nel profondo la fiducia del pubblico nei confronti dei dirigibili ad idrogeno e conseguentemente stillò un forte pregiudizio sulla sicurezza dell'impiego dell'idrogeno stesso.

Per quanta diffidenza ci possa essere, attualmente, dopo vent'anni dalla diffusione delle auto ad idrogeno, sono solo due gli incidenti verificatisi: in entrambi i casi è accaduto che nelle stazioni di rifornimento vi sono state impreviste fughe di idrogeno, nessuna delle quali ad ogni modo ha causato vittime. Tuttavia, precauzionalmente sono stati chiusi questi ed una decina di altri impianti per verificare la dinamica dell'accaduto e poter scongiurare ulteriori simili episodi.<sup>22</sup> (VaiElettrico, 2019)

"La Toyota non molla comunque la presa, ribadendo che - Quel che è accaduto non cambia la visione dell'idrogeno. Vogliamo ripetere che le auto a idrogeno sono sicure come le auto normali. E che i serbatoi sono così robusti da non essere distrutti neppure con un colpo di fucile -".<sup>23</sup>

---

<sup>20</sup> RAI NEWS, 2017. *80 anni fa il disastro del dirigibile Hindenburg*[online]. Disponibile su <http://www.rainews.it/dl/rainews/media/80-anni-fa-disastro-Hindenburg-dirigibile-59ad677c-ad7f-4225-b937-c6243283bbbb.html#foto-1> [Data di accesso: 04/09/2019].

<sup>21</sup> Ibid.

<sup>22</sup> VAIELETTICO, 2019. *L'auto a idrogeno si ferma dopo l'esplosione in Norvegia?*[online]. Disponibile su <https://www.vaiellettrico.it/lauto-a-idrogeno-si-ferma-dopo-lesplorazione-in-norvegia/> [Data di accesso: 28/08/2019].

<sup>23</sup> Ibid.

Questo commento è stato fatto al fine di sottolineare la particolarità e la robustezza dei materiali utilizzati nella costruzione dei contenitori dell'idrogeno, dal momento che esso viene stoccato in bombole pressurizzate a 700 bar, pressione ampiamente superiore rispetto a quella a cui vengono conservati metano o GPL. È indiscutibile quindi che, nel momento in cui ci si appropria all'utilizzo dell'idrogeno, è tassativo operare con una prudenza meticolosa.

Oltre alla robustezza delle bombole è necessario comprendere le proprietà chimico-fisiche intrinseche di questo elemento per potersi appropria al meglio e utilizzarlo nel modo corretto. Per natura fortemente infiammabile e volatile, l'idrogeno si presenta comunemente in forma gassosa.

Non tossico ma facilmente esplosivo, è fra le sostanze con il più ampio campo di esplosività. Quest'ultimo indica l'intervallo in cui il gas è deflagrante. Con un range che varia tra il 4% e il 75% l'idrogeno resta esplosivo in quasi tutte le proporzioni se miscelato in aria, a dispetto di molti altri gas il cui campo di esplosività ha un delta percentuale ridotto.<sup>24</sup>

Altri materiali gassosi, come il gasolio, la benzina o il gas naturale, di contro, essendo molto più pesanti dell'aria, non possono disperdersi nell'ambiente e permangono costantemente una fonte di pericolo. È questa connotazione a permettere ai produttori di gas di affermare che "l'idrogeno di per sé non è più pericoloso della benzina o di altri gas combustibili. Anche in caso di collisione i rischi non sono diversi da quelli di una vettura tradizionale o a metano."<sup>25</sup>

È stato paragonato lo sviluppo di incendio di un veicolo a benzina rispetto ad uno ad idrogeno. L'incendio in un veicolo a combustione interna si protrae per 20-30 minuti in media, mentre in un veicolo ad idrogeno si arresta nel giro di 1-2 minuti, grazie alla rapida dispersione del gas nell'aria.

Vi sono inoltre poche probabilità che, nel caso di fiamme da idrogeno, il fuoco si espanda ai materiali e agli altri oggetti circostanti. Ciò oltre a ridurre la durata della combustione riduce anche la possibilità che vi possano essere emissioni tossiche.

Essendo molto leggero, fortunatamente, nell'ipotesi di perdite, l'idrogeno tende a disperdersi con rapidità nell'aria verso l'alto, senza creare ristagni dannosi al suolo, che possano causare problemi di inquinamento del terreno o delle sottostanti falde acquifere. In luoghi chiusi il pericolo tuttavia persiste. Eppure, questa rapida dispersione è allo stesso tempo un limite, in quanto l'idrogeno molecolare lentamente tende a fuoriuscire dal suo mezzo di contenimento, qualunque esso sia.

---

<sup>24</sup> WIKIPEDIA, 2019. *Idrogeno* [online]. Disponibile su <https://it.wikipedia.org/wiki/Idrogeno> [Data di accesso: 18/09/2019].

<sup>25</sup> ORIZZONTENERGIA, 2018. *Auto a idrogeno* [online]. Disponibile su <https://www.orizzontenergia.it/auto-a-idrogeno/> [Data di accesso: 28/08/2019].

Recentemente, la comunità scientifica si è posta innumerevoli interrogativi circa le possibili collaterali fuoriuscite di idrogeno. Nell'ipotesi in cui significative quantità di idrogeno gassoso effluiscano dai propri serbatoi si potrebbero originare radicali liberi ( $H^+$  e  $H^-$ ), che liberati nella stratosfera potrebbero danneggiare la fascia dell'ozono.

Un eccessivo aumento della percentuale di idrogeno atmosferico, causato da fuoriuscite, potrebbe ledere ulteriormente il già presente buco nell'ozono.

Gli effetti sono però da considerarsi essere non incisivi: la quantità di idrogeno persa è infatti minore dell'ordine delle centinaia rispetto alla stima effettuata da alcuni ricercatori.

“In Germania, ad esempio, il tasso di perdita è dello 0,1% (minore a quello del gas naturale, che è del 0,7%). Si calcola che al massimo, le perdite ammonterebbero al 1-2% dell'idrogeno contenuto nei serbatoi, anche con un uso ampio, da parte di privati non particolarmente sensibilizzati, utilizzando le odierne tecnologie.”<sup>26</sup>

In aggiunta, ulteriori studi affermano che con il progredire delle tecnologie, nei prossimi anni, sarà possibile abbattere nuovamente il tasso di perdita dei serbatoi e delle condotte.

La loro futura diffusione necessiterà la costruzione di adeguate infrastrutture: dagli stabilimenti di produzione a quelli di stoccaggio, dalle autocisterne alle stazioni di rifornimento. Oltre alla sicurezza dell'idrogeno di per sé, sarà doveroso trattare anche la sicurezza connessa a queste infrastrutture.

#### **2.4.2 LO STOCAGGIO E LA DISTRIBUZIONE**

La compressione è oggi il modo più utilizzato per immagazzinare l'idrogeno. Pur essendo una tecnica matura, ed attualmente la più efficiente, l'idrogeno per essere stoccato a circa 700 Pa richiede un'enorme quantità di energia, solo in parte recuperabile.

Recentemente sono stati introdotti serbatoi, i quali possedendo una struttura metallica, o in alternativa termoplastica, irrobustita da fibre di carbonio o vetro risultano avere un peso di circa un terzo rispetto ai comuni serbatoi. Questo garantisce elevati standard di sicurezza. L'introduzione di valvole, le quali in caso di urto interrompono il circuito, e di fusibili anti-scoppio nell'eventualità di incendio riduce ulteriormente il grado di rischio.

Per quanto concerne la normativa relativa alla sicurezza, le bombole di idrogeno impiegate a bordo dei veicoli sono soggette alle medesime restrizioni di quelle a gas naturale.

---

<sup>26</sup> WIKIPEDIA, 2019. *Economia dell'idrogeno* [online]. Disponibile su [https://it.wikipedia.org/wiki/Economia\\_dell%27idrogeno](https://it.wikipedia.org/wiki/Economia_dell%27idrogeno) [Data di accesso: 18/09/2019].

È possibile immagazzinare l'idrogeno anche in forma liquida. L'idrogeno, a pressione ambiente, liquefa ad una temperatura di  $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$ , questo implica che i mezzi entro cui viene stoccato e trasportato devono sottostare a precisi e severi requisiti di isolamento termico. "Per mantenere queste temperature sono stati messi a punto serbatoi criogenici a doppia parete, con un'intercapedine, dove viene fatto il vuoto. Questa tecnologia è ormai consolidata in Germania, dove la BMW la utilizza da oltre 15 anni su auto a idrogeno alimentate con motori a combustione interna."<sup>27</sup> Teoricamente questa forma di stoccaggio si presenta essere la migliore soluzione per l'accumulo dell'idrogeno.

Tuttavia, anche i serbatoi criogeni presentano svantaggi non indifferenti: elevati costi operativi legati ai sistemi di distribuzione e rifornimento, la difficoltà di gestire attività così altamente specializzate e i considerevoli costi energetici dovuti al processo di liquefazione.

Questi ultimi equivalgono a circa il 30% dell'intero contenuto energetico del carburante, rispetto a quelli dell'idrogeno compresso, corrispondenti a circa il 4-7%.<sup>28</sup> La complessità di stabilizzare l'idrogeno allo stato liquido non impatta solamente sui costi energetici, vi sono infatti ingenti perdite evaporative dovute all'autoscaricamento.

Nell'ipotesi in cui la temperatura aumenti, il liquido evapora parzialmente provocando un incremento della temperatura. Ciò attiva la valvola di sicurezza, la quale permette la fuoriuscita di una parte di idrogeno, ristabilendo così l'equilibrio. Al ripetersi di questo fenomeno, l'idrogeno progressivamente si disperde nell'ambiente, dissipando energia.

Oltre a rappresentare una perdita economica, la minore volatilità dell'idrogeno liquido rispetto a quello gassoso, lo rende maggiormente stagnante e pericoloso in caso di incidenti.

Questo problema non sussiste nel caso dell'idrogeno compresso, il quale risulta essere una soluzione meno complessa e permette di evitare l'impiego dell'idrogeno liquido, utilizzato raramente e solo per trasportare circoscritte quantità attraverso un lungo percorso. L'idrogeno compresso rimane ad ogni modo la forma più conveniente, soprattutto nell'ipotesi di dover trasportare l'idrogeno per brevi distanze e in limitate quantità.

Gli idrogenodotti possono essere utilizzati simultaneamente sia per il trasporto che per l'immagazzinamento, grazie ad una opportuna regolazione della pressione interna alle tubature nei periodi di sovrapproduzione. Superati i 300km di distanza, il trasporto in idrogenodotti è preferibile, in quanto gli impianti di compressione disseminati lungo il

---

<sup>27</sup> PIDATELLA, C., FERRARI AGGRADI, G., PIDATELLA, D., 2012. *Corso di meccanica, macchine ed energia*, 2 (19). Milano: Zanichelli.

<sup>28</sup> SAGGESE, F., 2003. *Stato attuale e prospettive tecnologiche delle celle a combustibile*. Università degli studi di Napoli Federico II, Facoltà di Ingegneria.



percorso producono emissioni quasi nulle. Qualunque sia la distanza da percorrere, entrambe le opzioni sono tuttora praticabili grazie alle tecnologie attualmente sviluppate. Esistono ciononostante delle differenze importanti nel costo richiesto dai due diversi metodi. Per ogni specifica applicazione sono richieste delle mirate analisi tecnico-economiche che, caso per caso, definiscano quale sia la soluzione più adatta.

Dal 1938, nel distretto della Ruhr, grandi tubazioni in acciaio hanno permesso di far pervenire l'idrogeno ai consumatori, in completa sicurezza (le tubazioni erano dotate di particolari sensori contro possibili perdite ed erano programmati controlli periodici al sistema).

Questo non è l'unico esempio riportabile, anche l'Italia infatti ha vissuto un'esperienza diretta con l'idrogeno: per più di settant'anni è stato distribuito il così chiamato "gas di città", una miscela composta in egual proporzioni di idrogeno e monossido di carbonio. Idrogenodotti di considerevoli dimensioni sono attualmente presenti ed utilizzati in diverse nazioni nel mondo: una rete di circa 170 km attraversa il nord della Francia, estendendosi anche oltre i suoi confini, così da coprire una lunghezza di più di 1.500 km all'interno del continente europeo; oltreoceano, nell'America del nord, è presente una rete di condutture per il trasporto dell'idrogeno di estensione superiore ai 700 km.

L'esperienza diventa quindi maestra, rendendo possibile la realizzazione di un numero di reti di distribuzione sempre maggiore. Sarebbe possibile utilizzare le già presenti condutture del gas naturale, le quali però dovrebbero essere adattate alle specificità chimico-fisiche intrinseche dell'idrogeno.

Le principali differenze sono dovute alla minore compatibilità dell'idrogeno con i materiali che compongono le tubature dei gasdotti (l'idrogeno si adatta maggiormente a scorrere all'interno di materiali come il cromo o il molibdeno) e ai diversi criteri di progettazione per le stazioni di rifornimento.

Inoltre, a dispetto del gas naturale, è necessario un apporto energetico pari a circa cinque volte superiore per la movimentazione dell'idrogeno: circa l'1,4% dell'idrogeno trasportato è dissipato nell'alimentazione del compressore.

È opportuno notare che "sebbene abbia una densità energetica volumetrica minore di quella del gas naturale, l'idrogeno è meno viscoso, per cui, con un'adatta progettazione, l'energia

necessaria per il suo pompaggio diventa paragonabile a quella richiesta per la stessa quantità di energia trasportata con il gas naturale.”<sup>29</sup>

D’altro canto, le reti distributive dell’idrogeno in forma liquida, essendo particolarmente dispendiose e difficilmente gestibili, sono state realizzate unicamente per applicazioni specializzate, come ad esempio per poter rifornire i veicoli spaziali.

## 2.5 LE STAZIONI DI RIFORNIMENTO

Recentemente innumerevoli pubblicazioni sono state redatte sull’impatto che l’idrogeno ha nella mente dei consumatori.

Da queste emergono dati rilevanti, come ad esempio il fatto che di un gruppo di studenti intervistati, il 75% afferma che la presenza di auto ad idrogeno li rende più fiduciosi nel futuro.

Sebbene i consumatori per la maggior parte (il 30%) sarebbero orientati a scegliere come combustibile per la propria auto l’idrogeno, questa volontà viene frenata dal limite fisico delle assenti stazioni di rifornimento (si veda Figura 4).

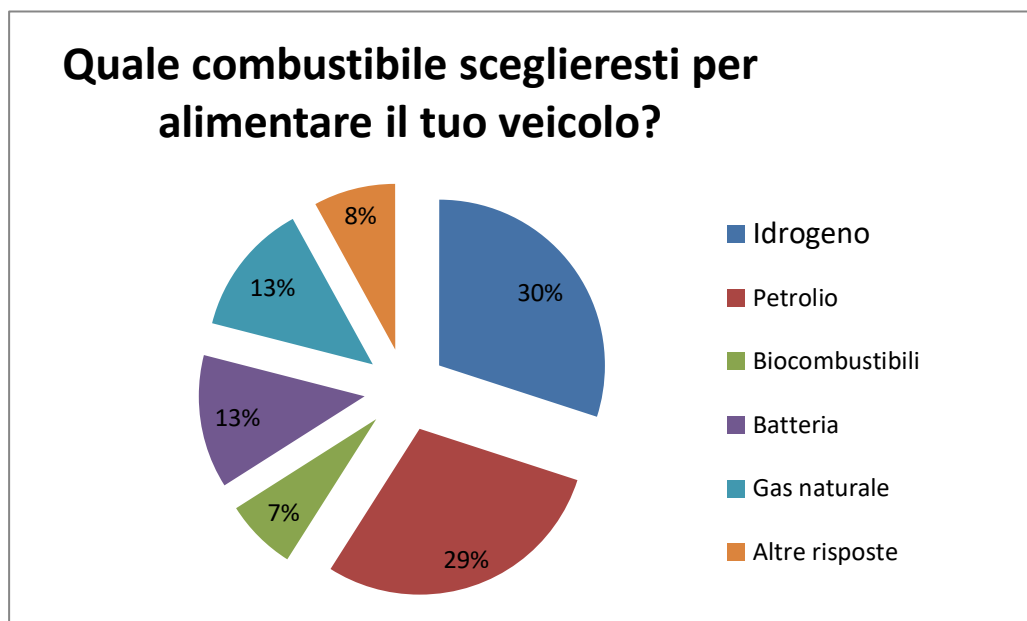


Figura 4: Scelte dei consumatori sulle tipologie di combustibili per alimentare i veicoli.

In Italia infatti queste nuove autovetture non vengono proposte proprio per la mancanza di distributori dove poter effettuare il pieno di idrogeno.

<sup>29</sup> PIDATELLA, C., FERRARI AGGRADI, G., PIDATELLA, D., 2012. *Corso di meccanica, macchine ed energia*, 2 (19). Milano: Zanichelli.

Le auto ad idrogeno “presentano al momento tassi di penetrazione del mercato molto ridotti; la costruzione di una sufficiente infrastruttura di rifornimento per l'idrogeno è pertanto essenziale per rendere possibile una diffusione su larga scala dei veicoli a motore alimentati a idrogeno.”<sup>30</sup>

Attualmente sono solamente sei le stazioni d'idrogeno operative sul territorio italiano.

Tre non ancora attive (Roma, Mantova e Livorno), due impianti di distribuzione con un impianto di 350 bar a Milano e Catania, per il rifornimento di mezzi per il trasporto pubblico, e un'unica stazione di rifornimento adibita alle autovetture a Bolzano (si veda Figura 5). Quest'ultima, in grado di erogare idrogeno a 700 bar, possiede una produzione di 180 Nm<sup>3</sup>/h, capaci potenzialmente di alimentare 700 autoveicoli e 15 bus al giorno.



Figura 5: Distributori attivi (in verde) ed in fase di attivazione (in rosso) ad oggi sul suolo italiano.

Tale numero di infrastrutture è purtroppo inadeguato alla commercializzazione delle auto ad idrogeno. Il governo italiano, con il Decreto Legislativo n. 257 del 16 Dicembre 2016, “ha recepito la direttiva europea 2014/94/EU per la creazione di un’infrastruttura per i combustibili alternativi, dove l’idrogeno è ufficialmente incluso”.<sup>31</sup>

Il numero delle auto ad idrogeno in circolazione su suolo italiano, considerate le proiezioni statistiche, sarà tendente alle 27.000 unità entro il 2025, alle quali si sommeranno inoltre circa 1.100 autobus.

<sup>30</sup> Direttiva del Parlamento Europeo e del Consiglio Europeo 2014/94/UE (comma 37) del 22 Ottobre 2014 sulla realizzazione di un’infrastruttura per i combustibili alternativi.

<sup>31</sup> CIGIOTTI, V., et al., 2019. *HyLAW La Regolamentazione del settore Idrogeno e delle sue applicazioni in Italia* [online]. Disponibile su [https://www.hylaw.eu/sites/default/files/2019-03/HyLAW\\_National%20policy%20Paper%20IT\\_ita.pdf](https://www.hylaw.eu/sites/default/files/2019-03/HyLAW_National%20policy%20Paper%20IT_ita.pdf) [Data di accesso: 09/10/2019].

Numeri importanti e destinati a crescere in modo esponenziale entro la metà del secolo corrente. Sono infatti previste otto milioni e mezzo di autovetture e 23.000 autobus al 2050.

I veicoli ad idrogeno entro il 2050 arriveranno a rappresentare circa il 20-25% dei mezzi in circolazione. Per poter sostenere una simile espansione, l'Associazione Mobilità Idrogeno Italia ha elaborato un prospetto, basato sul Decreto del 23 ottobre 2018, attraverso il quale vengono specificate le norme progettuali e di utilizzo delle stazioni di rifornimento, conformandole a quelle adottate a livello europeo.<sup>32</sup>

Entro il 2020 è prevista l'apertura di 9 ulteriori impianti sul territorio nazionale, adibiti per metà alle autovetture e per la rimanente parte ai veicoli pesanti (si veda Figura 6).



Figura 6: Nuovi distributori al 2020 sul suolo italiano.

Tale espansione è solo destinata a crescere. In previsione del 2025, è pronosticato l'avviamento di 65 stazioni di rifornimento, destinate in modo esclusivo alle auto.

Fintantoché le infrastrutture di rifornimento non saranno quantitativamente sufficienti e qualitativamente sviluppate le autovetture ad idrogeno difficilmente potranno penetrare il mercato.

<sup>32</sup> PUGLIESE, M., 2019. *Idrogeno: entro il 2025 un centinaio di distributori in Italia* [online]. Disponibile su <http://www.meteoweb.eu/foto/idrogeno-entro-2025-centinaio-distributori-italia/id/1207620/> [Data di accesso: 02/10/2019].

### **3. CONSIDERAZIONI FINALI**

L'entusiasmo positivo che circonda le fonti di energia rinnovabili non può dimenticare il mutamento radicale che la transizione energetica richiede.

Per far sì che l'idrogeno nel prossimo futuro costituisca una solida base per un sistema energetico, slegato dalle tradizionali fonti energetiche, è essenziale realizzare un cambiamento. La produzione ecosostenibile dell'idrogeno consentirà in primo luogo di sostenere il processo di decarbonizzazione dei processi fondati sull'impiego degli idrocarburi. Permetterà in seguito di introdurre sinergicamente le fonti rinnovabili nel processo produttivo dell'energia elettrica.

Il timing richiesto dall'economia dell'idrogeno, per integrarsi in modo omogeneo alle attuali organizzazioni, sarà determinato dalle tempistiche di sviluppo della normativa e delle tecnologie produttive correlate.

Compresi gli ostacoli tecnologici della filiera dell'idrogeno, riportati in precedenza, è doveroso operare un'attenta ed accurata analisi riguardante il confronto tra la finale convenienza economica rispetto alla convenienza termodinamica. Il guadagno economico è determinato e determina il beneficio termodinamico. Tale giovamento risente tuttavia anche dei costi di produzione, di vendita e dal prezzo dei macchinari e della strumentazione necessari.

Sebbene di primo acchito la produzione di idrogeno da fonti fossili risulta essere la modalità termodinamicamente più conveniente, non lo è dal punto di vista economico, in quanto derivante da risorse prossime all'esaurimento ed inquinanti. Se oggi le auto sono alimentate a petrolio, questo non potrà protrarsi per un tempo infinito. Tutte le tecnologie hanno un punto di partenza, tuttavia non sono fini a se stesse, ma in perenne divenire. Le scoperte evolvono verso delle soluzioni aventi rendimenti maggiori ed ambientalmente più sostenibili e desiderabili.

L'idrogeno ottenuto da fonti rinnovabili deve essere la nostra meta. Superate le dissipazioni di efficienza nella fasi di produzione iniziale, potrebbe rappresentare un modello energetico convenientemente valido su cui fare riferimento. Condizione inizialmente necessaria per poter realizzare un'economia dell'idrogeno è quindi la sua produzione in modo termodinamicamente conveniente, così da ottenere un guadagno energetico netto positivo derivante da fonti fossili verdi.

Vi sono ancora alcuni ostacoli da superare per poter sostenere un'economia dell'idrogeno attiva e proficua:

- è vitale realizzare siti capaci di sostenere una produttività su larga scala e rendere capillare la rete distributiva;
- è essenziale il supporto economico e legislativo dell'opinione politica per spingere le case automobilistiche a focalizzarsi su questa tecnologia, in modo da sviluppare nuovi metodi costruttivi e realizzare modelli con design e specifiche innovative;
- oltre a ridurre i costi d'acquisto, è fondamentale incrementare la sensibilità e la fiducia nei consumatori, grazie ad esempio a degli incentivi statali, così da ottenere il consenso sociale e portare le persone ad adottare questa tipologia di auto.

Tutte complicazioni facilmente superabili se si smettesse di stare comodamente adagiati nell'illusione che l'odierna economia non comporti innumerevoli rischi e costi, i quali, nel lungo termine, saranno indubbiamente superiori rispetto a quelli che l'attuazione di un'economia ad idrogeno richiederebbe. È necessario sostenere la ricerca, così da permettere uno sviluppo tecnologico tale da abbattere i costi ed incrementare l'efficienza e l'affidabilità dei veicoli.

Nel breve termine è un'economia energetica ibrida quella che alimenterà le nostre auto. Ibrida, perché data dalla combinazione di diversi combustibili derivanti da fonti diversificate e aventi usi finali differenti.

Servirà ancora del tempo, ma è un dato di fatto: l'idrogeno incorpora in sé caratteristiche che lo delineano essere la più promettente risorsa da cui estrarre energia pulita. Secondo Marco Alverà "la corsa mondiale all'idrogeno è partita... E' importante puntare sulla ricerca e sullo sviluppo dell'idrogeno prodotto da fonti rinnovabili"<sup>33</sup>. L'idrogeno, in particolar modo se prodotto attraverso il processo di elettrolisi, permetterà di concretizzare ciò che un tempo era considerato un traguardo inarrivabile: la circolazione sulle strade di veicoli fuel cell compatibili con l'ambiente entro il quale si muovono.

Considerato quanto detto in precedenza, la realizzabilità di tale progetto è tutt'altro che utopica.

---

<sup>33</sup> VERDELLI, C., 2019. Snam alla sfida dell'idrogeno. Alverà: "L'Italia può esser leader". *La Repubblica* [online]. Disponibile su [https://www.repubblica.it/economia/finanza/2019/07/09/news/snam\\_alla\\_sfida\\_dell\\_idrogeno\\_alvera\\_l\\_italia\\_pu\\_esser\\_leader\\_-230807768/](https://www.repubblica.it/economia/finanza/2019/07/09/news/snam_alla_sfida_dell_idrogeno_alvera_l_italia_pu_esser_leader_-230807768/) [Data di accesso: 27/09/2019].

Il futuro è un dato non certo. Possiamo fare delle previsioni, ma non possiamo avere certezze assolute. Dobbiamo ricordare, come la storia ci ha insegnato, che se una soluzione non è adatta al periodo che stiamo vivendo, non significa necessariamente che non è un'idea valevole per il futuro che verrà.

Non possiamo aspettarci che ripetendo costantemente le stesse azioni, le cose potranno cambiare. È di fondamentale importanza scegliere e intraprendere delle strade differenti da quelle che siamo abituati a percorrere: un'economia basata sull'utilizzo dell'idrogeno da utopia potrebbe diventare realtà, solo quando decisioni politiche e ambientali sosterranno concretamente la ricerca e lo sviluppo.

L'idrogeno probabilmente non sostituirà l'elettrico e non rappresenterà la stella di punta che trainerà il mercato dei combustibili, ma potrebbe divenire l'energia verde complementare che ci permetterà di abbattere le emissioni di CO2 e transitare verso un modello economico socialmente e ambientalmente sostenibile.

*“Il mondo che abbiamo creato è il prodotto del nostro pensiero  
e dunque non può cambiare  
se prima non modifichiamo il nostro modo di pensare.”*

*Albert Einstein*

## BIBLIOGRAFIA

AGNOLIN, R., 2010. *Il confronto tra i rendimenti dalla fonte alla ruota per: auto con motore endotermico; auto elettrica; auto con idrogeno e fuel cell*. Università di Padova, Facoltà di ingegneria.

ANTONIELLA, G., 2019. *Immatricolata la prima auto a idrogeno in Italia: ecco la 'cella' che cambierà la vita* [online]. Disponibile su <https://it.businessinsider.com/immatricolata-la-prima-auto-a-idrogeno-in-italia-ecco-la-cella-che-ci-cambiera-la-vita/> [Data di accesso: 08/09/2019]

BALLAN, R., 2013. *Rivoluzione idrogeno*. Università di Padova, Facoltà di ingegneria.

BANCONI, SASANELLI, 2006. *L'idrogeno come vettore energetico: la Ricerca in Australia* [online]. Disponibile su [http://www.piar.it/rapporti/IDROGENO\\_banconi.pdf](http://www.piar.it/rapporti/IDROGENO_banconi.pdf) [Data di accesso: 26/08/2019].

BERNETTI, A., et al., 2010. *Trasporto su strada, inventario nazionale delle emissioni e disaggregazione provinciale*. ISPRA, Rapporto 24/2010 [online]. Disponibile su <http://www.isprambiente.gov.it/contentfiles/00007500/7510-trasporto-strada-concopertina-xweb.pdf/> [Data di accesso: 04/09/2019].

BETTINI, A., 2018. *Dentro ITER, mega-reattore nucleare sperimentale che copierà il Sole*. Rai News [online]. Disponibile su <http://www.rainews.it/dl/rainews/articoli/Dentro-ITER-il-megareattore-nucleare-sperimentale-che-copiera-il-Sole-c9e385bb-08e7-4d1e-9b1b-0afb85806a29.html> [Data di accesso: 29/09/2019].

CIGIOTTI, V., et al., 2019. *HyLAW La Regolamentazione del settore Idrogeno e delle sue applicazioni in Italia* [online]. Disponibile su [https://www.hylaw.eu/sites/default/files/2019-03/HyLAW\\_National%20policy%20Paper%20IT\\_ita.pdf](https://www.hylaw.eu/sites/default/files/2019-03/HyLAW_National%20policy%20Paper%20IT_ita.pdf) [Data di accesso: 09/10/2019].

Direttiva del Consiglio Europeo EUCO 169/14 del 24 ottobre 2019 definente il quadro 2030 per le politiche dell'energia e del clima.

Direttiva del Parlamento Europeo e del Consiglio Europeo 2014/94/UE (comma 37) del 22 Ottobre 2014 sulla realizzazione di un'infrastruttura per i combustibili alternativi.

FRASSINETTI, A., 2017. *I pro e i contro di un carburante che sembra essere risolutivo* [online]. Disponibile su <http://www.hdmotori.it/2017/01/20/idrogeno-pro-contro/> [Data di accesso: 26/08/2019].

GARANCINI, C., 2019. *Transizione energetica: una proposta di legge per puntare sull'idrogeno* [online]. Disponibile su <https://www.lifegate.it/persone/stile-di-vita/idrogeno> [Data di accesso: 06/09/2019].

LAVOISIER, A., 1783. *Antoine-Laurent de Lavoisier* [online]. Disponibile su [https://it.wikipedia.org/wiki/Antoine-Laurent\\_de\\_Lavoisier](https://it.wikipedia.org/wiki/Antoine-Laurent_de_Lavoisier) [Data di accesso: 09/09/2019].

LEVI, P., 1975. *Il sistema periodico*. 1° ed. Torino: Einaudi, p.29.



- MASSARA, D., 2019. *La classifica delle più grandi paure degli italiani: inquinamento tra i timori più diffusi* [online]. Disponibile su <https://it.yougov.com/news/2019/05/24/paure/> [Data di accesso: 28/08/2019].
- ORIZZONTENERGIA, 2018. *Auto a idrogeno* [online]. Disponibile su <https://www.orizzontenergia.it/auto-a-idrogeno/> [Data di accesso: 28/08/2019].
- PIDATELLA, C., FERRARI AGGRADI, G., PIDATELLA, D., 2012. *Corso di meccanica, macchine ed energia*, 2 (19). Milano: Zanichelli.
- PUGLIESE, M., 2019. *Idrogeno: entro il 2025 un centinaio di distributori in Italia* [online]. Disponibile su <http://www.meteoweb.eu/foto/idrogeno-entro-2025-centinaio-distributori-italia/id/1207620/> [Data di accesso: 02/10/2019].
- RAI NEWS, 2017. *80 anni fa il disastro del dirigibile Hindenburg*[online]. Disponibile su <http://www.rainews.it/dl/rainews/media/80-anni-fa-disastro-Hindenburg-dirigibile-59ad677c-ad7f-4225-b937-c6243283bbbbb.html#foto-1> [Data di accesso: 04/09/2019].
- RIFKIN, J., 2002. *Economia all'idrogeno*. 1° ed. Milano: Mondadori.
- SAGGESE, F., 2003. *Stato attuale e prospettive tecnologiche delle celle a combustibile*. Università degli studi di Napoli Federico II, Facoltà di Ingegneria.
- SAVINO, F., 2000. *Prospettive nella produzione di energia: aspetti merceologici ed economici. Il caso dell'idrogeno*. Università di Foggia, Facoltà di Economia.
- TRECCANI, 2007. Nuovi sviluppi: energia, trasporti e sostenibilità. *Enciclopedia degli idrocarburi*. Volume III, p.362.
- TRENDMOTORI, 2019. *Auto e SUV a idrogeno* [online]. Disponibile su <https://www.trendmotori.com/auto-idrogeno-fuel-cell.php> [Data di accesso 16/10/2019].
- VAIELETTRICO, 2019. *L'auto a idrogeno si ferma dopo l'esplosione in Norvegia?*[online]. Disponibile su <https://www.vaielettrico.it/lauto-a-idrogeno-si-ferma-dopo-lesplorazione-in-norvegia/> [Data di accesso: 28/08/2019].
- VERDELLI, C., 2019. Snam alla sfida dell'idrogeno. Alverà: "L'Italia può esser leader". *La Repubblica* [online]. Disponibile su [https://www.repubblica.it/economia/finanza/2019/07/09/news/snam\\_alla\\_sfida\\_dell\\_idrogeno\\_alvera\\_l\\_italia\\_puo\\_esser\\_leader\\_-230807768/](https://www.repubblica.it/economia/finanza/2019/07/09/news/snam_alla_sfida_dell_idrogeno_alvera_l_italia_puo_esser_leader_-230807768/) [Data di accesso: 27/09/2019].
- VERNE, J.,1874. *L'isola misteriosa*. In: RIFKIN, J., 2002. *Economia all'idrogeno*. 1° ed. Milano: Mondadori.
- WIKIPEDIA, 2019. *Economia dell'idrogeno* [online]. Disponibile su [https://it.wikipedia.org/wiki/Economia\\_dell%27idrogeno](https://it.wikipedia.org/wiki/Economia_dell%27idrogeno) [Data di accesso: 18/09/2019].

WIKIPEDIA, 2019. *Idrogeno* [online]. Disponibile su <https://it.wikipedia.org/wiki/Idrogeno> [Data di accesso: 18/09/2019].

WIKIPEDIA, 2019. *Il secondo principio della termodinamica* [online]. Disponibile su [https://it.wikipedia.org/wiki/Secondo\\_principio\\_della\\_termodinamica](https://it.wikipedia.org/wiki/Secondo_principio_della_termodinamica) [Data di accesso: 19/09/2019].

WIKIPEDIA, 2019. *Pila a combustibile con membrana a scambio protonico* [online]. Disponibile su [https://it.wikipedia.org/wiki/Pila\\_a\\_combustibile\\_con\\_membrana\\_a\\_scambio\\_protonico](https://it.wikipedia.org/wiki/Pila_a_combustibile_con_membrana_a_scambio_protonico) [Data di accesso: 19/09/2019].

