L'idrogeno

Autor(en): **Romer, Arturo**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Archi : rivista svizzera di architettura, ingegneria e urbanistica = Swiss review of architecture, engineering and urban planning**

Band (Jahr): **- (2004)**

Heft 4

PDF erstellt am: **28.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-132969

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

L'idrogeno

Arturo Romer

L'idrogeno è un vettore energetico e non una fonte primaria di energia. Esso deve essere prodotto, a costo di energia e denaro. Il passaggio ad un'economia energetica basata principalmente sull'idrogeno richiederà molto tempo.

Introduzione

Nei prossimi decenni il consumo energetico mondiale aumenterà in modo impressionante. Per far fronte ad un tale incremento si farà sempre più ricorso alla fonte fossile, che coprirà anche nei prossimi decenni più dell'80% dell'energia primaria mondiale. Tuttavia i giacimenti di gas naturale e di petrolio continuano a diminuire e con il trascorrere del tempo si esauriranno. Ciò porterà ad un continuo aumento dei prezzi di queste energie primarie.

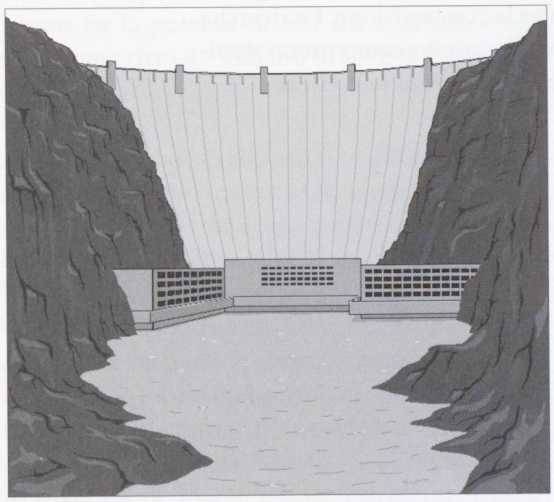
Il dibattito relativo all'impatto ambientale (effetto serra, piogge acide) connesso all'impiego di combustibili fossili è ormai aperto da tempo. È probabile ed auspicabile che le fonti rinnovabili, come l'idroelettrico, e le nuove fonti rinnovabili, come il solare termico, il solare fotovoltaico, l'eolico, la biomassa e la geotermia, assumeranno nel corso dei prossimi decenni un'importanza sempre maggiore. Molte persone si chiedono perché non usare l'idrogeno come fonte di energia pulita giacché la sua combustione produce semplicemente acqua. Tale entusiasmo va subito ridimensionato: l'idrogeno non è una fonte energetica primaria, ovvero non è un combustibile che si trova allo stato «libero» in natura. Esso deve essere prodotto a costo di energia e denaro, attraverso l'elettrolisi o la trasformazione di altre fonti energetiche primarie. Pertanto, quando si parla di un prodotto o di un servizio, l'intero ciclo energetico deve essere considerato. L'idrogeno è infatti solo un anello di una catena. Per elettrolisi si intende molto brevemente, la scissione dell'acqua (H_2O) nelle sue componenti idrogeno (H_2) e ossigeno (O_2) tramite energia elettrica. La scissione (rendimento = 70%) di un litro d'acqua richiede per esempio circa 6.3 kWh_{el} di energia elettrica.

Il contenuto energetico dell'idrogeno così prodotto (circa 1.3 m^3) corrisponde approssimativamente a 4.41 kWh di energia chimica. Volendo nuovamente ricavare energia elettrica da 1.36 m^3 di idrogeno con l'impiego di un ciclo combinato (turbina a gas e turbina a vapore) oppure di una cella a combustibile si otterrebbero circa 2.2 kWh_{el} di energia elettrica (fig. 1).

1 l di H_2O + 6.299 kWh_{el}	(η = 70%) → elettrolisi	1,358 m^3 H_2 + 0,679 m^3 O_2	(η = 50%) → cella a combustibile	2.2 kWh_{el} + calore residuo

1 – Il ciclo «elettrolisi - cella a combustibile»

I numeri appena riportati potrebbero far apparire molto discutibile e poco conveniente la tecnologia dell'elettrolisi per la produzione di idrogeno. In realtà, il procedimento sopra descritto può essere interessante a determinate condizioni. Si pensi all'utilizzazione di energia idroelettrica in estate (basso costo, abbondanza) e allo sfruttamento dell'idrogeno immagazzinato in inverno. In questo caso, l'analisi potrebbe risultare più favorevole sia dal punto di vista economico che da quello ecologico.



L'energia idroelettrica è rinnovabile per eccellenza

1. Caratteristiche fisiche dell'idrogeno

L'idrogeno rappresenta l'elemento più abbondante dell'universo. Nel sole ad esempio è presente per circa il 90%, e con l'ossigeno ed il silicio è uno degli elementi più diffusi della crosta terrestre. Combinato con carbonio, ossigeno ed azoto è uno dei principali costituenti del mondo vegetale e animale. A temperatura ambiente è un gas incolore, inodore e praticamente insolubile in acqua. Generalmente poco attivo a freddo, esso dà luogo a caldo o in presenza di catalizzatori a numerose reazioni chimiche. La combinazione con ossigeno avviene spesso con un'esplosione.

L'idrogeno ha il più alto contenuto di energia per unità di massa di tutti gli altri combustibili (potere calorico superiore).

2. L'idrogeno come combustibile

L'idrogeno è un gas industriale di primaria importanza. Per lungo tempo è stato utilizzato negli aerostati e poi sostituito dall'elio, leggermente più pesante ma meno infiammabile. Attualmente viene usato come combustibile nei programmi spaziali.

Oggetto delle più recenti ricerche è inoltre la realizzazione di un sistema energetico basato sull'idrogeno. L'interesse a considerare l'idrogeno come fonte di energia risale all'inizio degli anni '70, durante la crisi petrolifera. La realizzazione di un tale sistema energetico era però strettamente correlata alla disponibilità di energia elettrica a basso costo. Finita la crisi del petrolio e salito il prezzo dell'elettricità, i progetti di ricerca legati all'idrogeno sono stati progressivamente abbandonati. Nel corso degli anni '80 nuovi progressi sono stati raggiunti nell'ambito delle tecnologie relative alle risorse rinnovabili. La ricerca su sistemi energetici altamente efficienti basati su idrogeno e fonti rinnovabili è così tornata ad essere interessante. Attualmente le principali tecnologie di produzione dell'idrogeno sono:

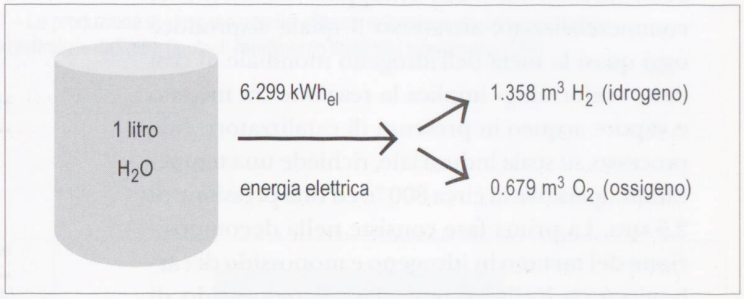
- Elettrolisi dell'acqua
- Steam reforming del gas metano
- Ossidazione parziale non catalitica di idrocarburi
- Gassificazione del carbone
- Gassificazione e pirolisi (decomposizione mediante calore) delle biomasse

2.1 L'elettrolisi dell'acqua

Il processo dell'elettrolisi fu applicato per la prima volta da Sir William Grove nel 1839. Questo processo richiede il passaggio di corrente elettrica attraverso l'acqua, da un elettrodo negativo, il

Massa molecolare	g/mole	2.01588
Densità (come gas, alle condizioni standard)	kg/m^3	0.0838
Densità (come liquido, a -253 °C)	kg/m^3	70
Potere calorico superiore	kWh/kg	39.41
Potere calorico inferiore	kWh/kg	33.31

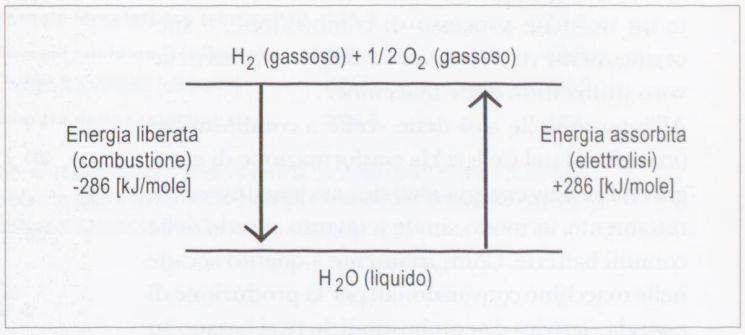
Tab. 1 – Proprietà dell'idrogeno (H_2). Il potere calorico superiore è il calore sviluppato dalla combustione di idrogeno tenendo anche conto del calore di condensazione del vapore acqueo (1 kWh = 3.6 MJ)



2 – L'elettrolisi di un litro d'acqua (1.358 m^3 di $H_2 \approx$ 4.41 kWh di energia chimica)

Consumi e prodotti finali / Rendimento elettrolisi	Consumo di elettricità [kWh_{el}/litro H_2O]	Prodotti finali H_2	O_2
Processo ideale rendimento η = 100%	4.4098	1.358 [m^3] (=111.898 [g])	0.679 [m^3]
Processo reale rendimento η = 70%	6.299	1.358 [m^3] (=111.898 [g])	0.679 [m^3]

Tab. 2 – L'elettrolisi di 1 litro d'acqua (Ipotesi: 286 [kJ/mole H_2])



3 – La produzione e la combustione di idrogeno

catodo, ad un elettrodo positivo, l'anodo. L'idrogeno e l'ossigeno così separati confluiscono rispettivamente verso il catodo e verso l'anodo (fig. 2 e fig. 4). Il rendimento delle odierne celle elettrolitiche si situa tra il 70 e l'80%.
Tuttavia il costo per la produzione di idrogeno dall'elettrolisi resta il più alto rispetto a qualsiasi altra tecnologia e pertanto attualmente solo il 4% della produzione mondiale di idrogeno avviene mediante questa tecnica (tab. 2).

2.2 «Steam reforming» del gas metano

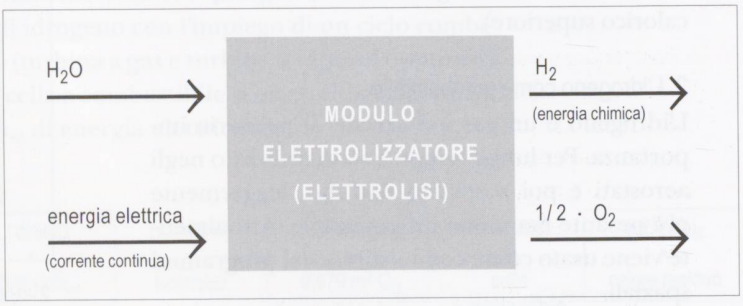
Lo «Steam reforming» del gas metano è un processo endotermico ben sviluppato ed altamente commercializzato, attraverso il quale si produce oggi quasi la metà dell'idrogeno mondiale. Il così detto «reforming» implica la reazione tra metano e vapore acqueo in presenza di catalizzatori. Tale processo, su scala industriale, richiede una temperatura operativa di circa 800 °C ed una pressione di 2.5 MPa. La prima fase consiste nella decomposizione del metano in idrogeno e monossido di carbonio (CO). Nella seconda fase il monossido di carbonio e l'acqua si trasformano in biossido di carbonio (CO_2) ed idrogeno. Tramite membrane, il biossido di carbonio viene separato dalla miscela di gas. Scenari futuristici prevedono la separazione del biossido di carbonio ed il suo rispettivo stoccaggio finale nei fondi marini. Il costo del gas metano incide fortemente sul prezzo finale dell'idrogeno, ma i costi del «reforming» restano comunque notevolmente inferiori a quelli dell'elettrolisi e competitivi con quelli di altre tecnologie (fig. 7).

3. Impiego dell'idrogeno nelle celle a combustibile

In generale, nelle reazioni di combustione si assiste ad un processo chimico rapido nel quale avviene l'ossidazione tramite un reagente (il comburente, l'ossigeno) di una sostanza detta combustibile. L'energia rilasciata dalle reazioni chimiche di ossidazione è resa disponibile in forma di calore. Il modo più comune per ottenere lavoro da un combustibile è proprio quello di trasformare l'energia chimica in energia termica, tramite un normale processo di combustione, e successivamente di convertire l'energia termica in lavoro utilizzando delle macchine.
All'interno delle così dette «celle a combustibile» (in inglese Fuel Cell, FC) la trasformazione di energia chimica in energia elettrica avviene invece direttamente, in modo simile a quanto accade nelle comuni batterie. Contrariamente a quanto accade nelle macchine convenzionali per la produzione di energia elettrica da combustibili, le FC si basano su delle reazioni elettrochimiche. Questo tipo di rea-

Consumi e prodotti finali / Rendimento elettrolisi	Consumo di elettricità [kWh_{el} / kgH_2]	Prodotti finali H_2	O_2
Processo ideale rendimento η = 100%	39.41	12.136 [m^3] (=1 [kg])	6.068 [m^3]
Processo reale rendimento η = 70%	56.3	12.136 [m^3] (=1 [kg])	6.068 [m^3]

Tab. 3 – La produzione di 1 [kg] di idrogeno mediante elettrolisi (Ipotesi: 286 [kJ/mole H_2])

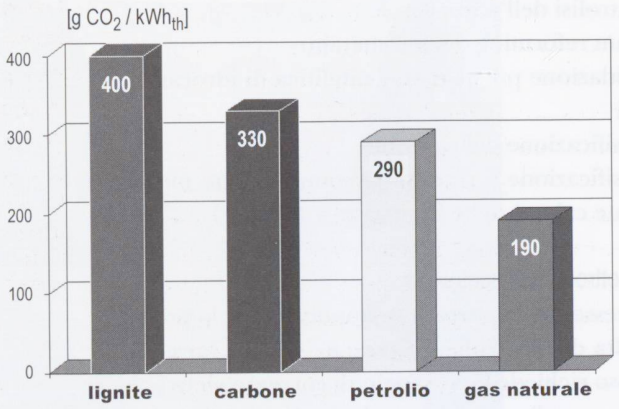


4 – La rappresentazione schematica di un elettrolizzatore

«Steam reforming» di metano:

$$CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3 \cdot H_2$$
$$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$$
$$CH_4 + 2 \cdot H_2O \rightarrow CO_2 + 4 \cdot H_2$$

5 – Il rendimento globale dello «Steam reforming» si situa tra il 70 e l'80%

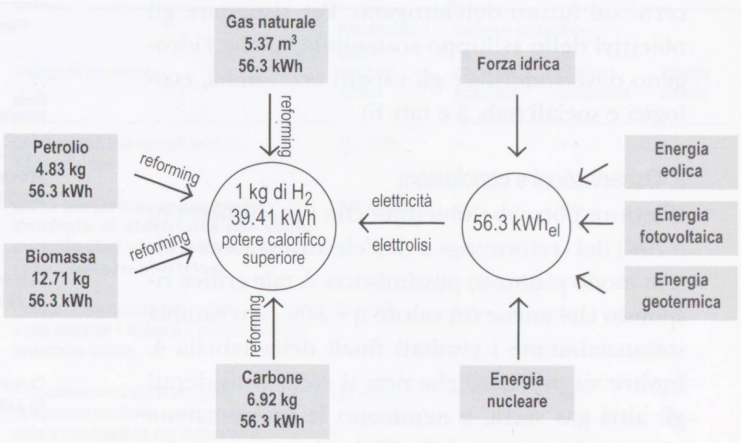


6 – Emissioni specifiche di CO_2. Nel caso del cosiddetto «Steam reforming» queste emissioni sono identiche

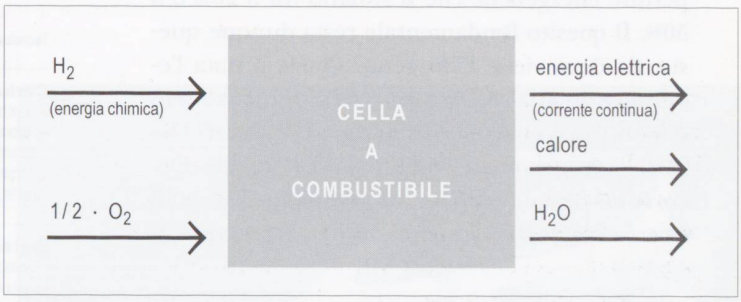
zioni non coinvolge il calore come forma intermedia di energia, come accade invece nella conversione energia chimica-calore-lavoro caratteristica delle reazioni classiche di combustione. In una tipica cella a combustibile, il combustibile gassoso (ad es. H_2) è fornito all'anodo (dove avviene l'ossidazione del combustibile e la produzione di elettroni), mentre il comburente (aria oppure ossigeno) viene fornito al catodo (dove avviene la riduzione dell'ossigeno con gli elettroni provenienti dal circuito esterno collegato con l'anodo). La reazione chimica avviene dunque mediante scambio di ioni attraverso l'elettrolita. Chiudendo il circuito tra gli elettrodi, viene direttamente prodotta la corrente elettrica.

4. Idrogeno e sviluppo sostenibile

I valori di emissione specifica in [gCO_2/kWh_{th}] elencati nella figura 6 e in [gCO_2/kgH_2] nella tabella 4, permettono di affermare quanto segue: la produzione di idrogeno (H_2) da fonti energetiche fossili (ligniti, carbone, petrolio, gas naturale) si giustifica unicamente se l'anidride carbonica (CO_2) viene sequestrata nell'ambito del processo chiamato «reforming». In caso contrario il processo «fonte fossile → idrogeno → motore a combustione interna» peggiora nettamente l'impatto ambientale. Il consumo di energia primaria rimarrebbe pressoché pari a quello attuale scegliendo il percorso «fonte fossile → idrogeno → cella a combustibile». La sequestrazione della CO_2 resta pertanto una condizione «*sine qua non*». Oggi l'unico percorso meritevole di attenzione sia dal punto di vista ecologico che da quello economico e politico è il seguente: «energia idroelettrica → idrogeno (elettrolisi) → cella a combustibile». Si potrebbe pure partire dall'energia nucleare, ma in questo caso il consenso socio politico non sarebbe scontato. Il percorso «nuove energie rinnovabili (fotovoltaico, eolico, biomassa, geotermia) → idrogeno → cella a combustibile» è interessante dal punto di vista ecologico, ma rischia di rimanere ancora per lungo tempo proibitivo dal punto di vista economico. E l'aspetto economico resta un criterio fondamentale nell'ambito dello sviluppo sostenibile. È pure necessario poter disporre di dati ecologici ed economici affidabili per quanto riguarda la gestione dell'idrogeno (compressione, liquefazione, immagazzinamento, trasporto, sicurezza). Tutte queste considerazioni invitano a diffidare di fronte a chi presenta l'idrogeno come soluzione definitiva ai problemi energetici mondiali. Ciò non significa viceversa che si debba restare passivi. Bisogna fare ancora molta ricerca e migliorare le tecnologie prima di poter fornire risposte univoche e



7 – La produzione di idrogeno tramite «Steam reforming» da un lato e tramite «elettrolisi» dall'altro (ipotesi: rendimento elettrolisi e reforming 70%)



8 – La rappresentazione schematica di una cella a combustibile

Fonte, risp.tecnologia / Emissioni specifiche	Produzione di idrogeno (η = 70%) [g CO_2 /kg H_2]	Cella a combustibile (η = 50%) [g CO_2/kWh_{el}]
Metano (reforming)	10'697	543
Petrolio (reforming)	16'327	828
Carbone (reforming)	18'579	950
Mix elettrico europeo (elettrolisi)	27'868	1'414
Energia idroelettrica (elettrolisi)	**225.2**	**11.4**
Energia nucleare (elettrolisi)	**450.4**	**22.9**
Energia fotovoltaica (elettrolisi)	8'445	428.6
Energia eolica (elettrolisi)	**2'027**	**103**

Tab. 4 – La produzione di idrogeno e la successiva produzione di elettricità mediante cella a combustibile (energia immessa alla fonte: 56.3 kWh/kgH_2). Emissioni specifiche di CO_2

certe sul futuro dell'idrogeno. Per rispettare gli obiettivi dello sviluppo sostenibile, anche l'idrogeno deve soddisfare gli aspetti economici, ecologici e sociali (tab. 5 e tab. 6).

5. Osservazioni e conclusioni

Il lettore potrebbe obiettare che i rendimenti (η = 70%) del «reforming» e dell'elettrolisi sono scelti in modo piuttosto pessimistico. A tale critica rispondo che anche un valore η = 80% non cambia sostanzialmente i risultati finali della tabella 4. Inoltre va precisato che non si sono considerati gli altri gas serra, e nemmeno le intere catene energetiche (LCA = Life Cicle Assessment). Le emissioni specifiche di $CO_{2\text{-equivalente}}$ risulterebbero in realtà maggiorate di circa il 10%. Pertanto si può affermare che i due aspetti tendono a compensarsi. Non si dimentichi inoltre che la gestione dell'idrogeno (compressione, liquefazione, trasporto, immagazzinamento) comporta ulteriori perdite energetiche che si situano tra il 20% e il 50%. Il quesito fondamentale resta dunque questo: da dove viene l'idrogeno? Quale è stata l'energia primaria che l'ha generato? Con quali rendimenti, con quali emissioni e a quali prezzi? L'era dell'idrogeno non è quindi dietro l'angolo. Occorrono rigore, onestà e ancora molto lavoro di ricerca e sviluppo prima di dare risposte certe.

Processo	Percorso «energia fossile-reforming-cella a combustibile-elettricità»			Produzione diretta di elettricità (ciclo di Carnot)		
Fonte primaria	Emissione totale di CO_2 [$kgCO_2/kgH_2$]	Produzione di elettricità [kWh_{el}]	Emissione specifica [gCO_2/kWh_{el}]	Emissione totale di CO_2 [$kgCO_2$]	Produzione di elettricità [kWh_{el}]	Emissione specifica [gCO_2/kWh_{el}]
Metano 56.3 kWh	**10.697**	**19.7**	**543**	**10.697**	**33.8 (η = 60%) ciclo combinato**	**324**
Petrolio 56.3 kWh	16.327	19.7	828	16.327	22.5 (η = 40%) turbina a vapore	726
Carbone 56.3 kWh	18.579	19.7	950	18.579	22.5 (η = 40%) turbina a vapore	826

Tab. 5 – Un confronto tra la via del «reforming» e la via diretta (ciclo di Carnot). Energia primaria immessa alla fonte: 56.3 kWh

Emissioni e sostenibilità / Tecnologia	Emissione specifica [gCO_2/kWh_{el}]	Sviluppo sostenibile: aspetto ecologico	aspetto economico	aspetto sociale
Carbone				
– combustione, ciclo Carnot (η = 40%)	826	– –	+ + +	–
– reforming, H_2 compresso, cella a combustibile	1100	– – –	+	–
– combustione, elettrolisi, H_2 compresso, cella a combustibile	2200	– – – –	–	–
Metano				
– combustione, ciclo combinato	317	–	+ + +	+
– reforming, H_2 compresso, cella a combustibile	633	– –	+	+
– combustione, elettrolisi, H_2 compresso, cella a combustibile	760	– –	–	+
Forza idrica				
– produzione di elettricità	4	+ + + +	+ + +	+ +
– elettrolisi, H_2 compresso, cella a combustibile	13	+ + +	+	+
Energia nucleare				
– produzione di elettricità	8	+ +	+ + +	+
– elettrolisi, H_2 compresso, cella a combustibile	27	+	+	+
Energia fotovoltaica (Svizzera)				
– produzione di elettricità	150	+ +	– – –	+ +
– elettrolisi, H_2 compresso, cella a combustibile	500	+ –	– – – –	+
Energia eolica (Svizzera)				
– produzione di elettricità	36	+ +	–	+ +
– elettrolisi, H_2 compresso, cella a combustibile	120	+	– –	+

Tab. 6 – Emissioni specifiche e sostenibilità. Produzione di energia elettrica

Fonti bibliografiche internet

www.svizzera-energia.ch
www.hydrogen.org
www.efcf.com/reports
www.psi.ch
www.enea.it
www.eren.doe.gov/hydrogen/
www.diebrennstoffzelle.de
www.fuelcells.com
www.wupperinst.org
www.iefe.uni-bocconi.it
www.lbst.de
www.polimi.it
www.toyota.com
www.bmw.com
www.fiat.com
www.iea.org

Impiego del gas naturale	Rendimento globale dell'auto-vettura	Sviluppo sostenibile aspetto ecologico	aspetto economico	aspetto sociale
Combustione interna con motore a gas naturale	18 – 20%	+	+ +	+
Auto elettrica, produzione centrale di elettricità con ciclo combinato, elettricità della rete, motore elettrico	**30 – 36%**	**+ +**	**+ –**	**+ +**
Combustione interna con motore a gas naturale + batterie + motore elettrico (macchina ibrida)	25 – 28%	+ +	+ –	+ +
Produzione centrale di idrogeno compresso mediante «steam reforming», cella a combustibile sull'autovettura, motore elettrico	22 – 24%	+	– – –	+ +
Produzione centrale di elettricità, ciclo combinato, elettrolisi, idrogeno compresso, cella a combustibile sull'autovettura, motore elettrico	12 – 15%	+	– – – –	+

Tab. 7 – Varie possibilità dell'impiego del gas naturale nel traffico leggero. Rendimento globale «dal gas naturale alla ruota»

Quesito essenziale. Da dove proviene l'idrogeno??