

Economia dell'idrogeno Qual è l'impatto ambientale prevedibile?

di Ennio Lazzarini

Si considera il possibile impatto ambientale dell'economia dell'idrogeno nel campo della mobilità su gomma e della produzione di energia elettrica con celle a combustibile. Per la prima applicazione ci si basa essenzialmente sull'automobile a idrogeno liquido, LH₂, della Bmw e per la seconda sui dati desunti dalla gestione a Milano Bicocca di una centrale di 1,3 MWe della Aem (Azienda Elettrica Milanese). Si accenna anche all'impianto a cogenerazione dell'Ansaldo PC25C da 200 kWe, un cui esemplare è stato installato recentemente presso il Museo della Scienza e della Tecnologia di Milano.

L'economia dell'idrogeno si basa sull'uso di questo elemento ottenuto, ad esempio da elettrolisi, in luoghi diversi da quelli della sua utilizzazione o prodotto *in situ* da composti organici, idruri ecc., da cui l'idrogeno è liberato al momento dell'uso. Ciò può esser fatto in impianti mobili, e/o veicoli fissi per la produzione di energia elettrica, ad esempio, mediante celle a combustibile.

Nell'articolo si cerca di esaminare l'impatto ambientale dell'uso dell'idrogeno seguendo lo schema ora tratteggiato. Si considerano in particolare le automobili a idrogeno liquido, LH₂, della Bmw e l'impianto di generazione di energia elettrica a celle a combustibile da 1,3 MWe dell'Azienda Elettrica di Milano, in cui si usa H₂ da *reforming* di CH₄. Si utilizzeranno anche dati provenienti dalla gestione dell'impianto a celle a combustibile PC25C da 200 kWe dell'Ansaldo.

Uso dell'idrogeno elementare

Si possono includere, insieme all'H₂ elementare, anche quei composti che lo liberano facilmente, alcuni di questi sono menzionati nella Tabella 1. I composti, per un loro uso pratico come sorgenti di H₂, dovrebbero avere i seguenti requisiti:

1) cedere facilmente il loro idrogeno, altrimenti la formazione

E. Lazzarini, Dipartimento di Ingegneria Nucleare - Politecnico di Milano - Via Ponzio, 34/3 - 20133 Milano. 2cesne2@axp7000.cdc.polimi.it



Figura 1 - Rifornimento di LH₂ ad un'automobile. La condotta di alimentazione, che è a chiusura ermetica verso l'esterno, è costituita dal tubo di adduzione dell'LH₂ e da quello di spurgo dell'LH₂ gassoso formato per evaporazione dell'LH₂

di H₂ mediante *reforming* appare più ragionevole (vedi paragrafi seguenti);

- 2) il loro processo di fabbricazione dovrebbe essere semplice ed a costo basso, cioè la loro formazione dovrebbe richiedere meno energia di quella necessaria per produrla, a meno di applicazioni del tutto eccezionali;
- 3) il loro uso dovrebbe essere il più possibile esente da rischi.

Per esemplificare, l'idrazina soddisfa il primo requisito (Tabella 1), ma non il terzo essendo molto tossica, talché il suo uso è possibile solo in ambienti controllati da parte di specialisti, ma non è consigliabile invece una sua applicazione diffusa nell'habitat.

Attualmente tra i composti di Tabella 1 solo l'idrogeno liquido, simbolo LH₂, sembra suscettibile di ampia applicazione, soprattutto per le automobili. Per illustrare questo uso ci si servirà di dati presentati dalla Bmw in un'esposizione tenuta a Milano qualche mese fa.

Nel motore della Bmw, l'LH₂ tiene il luogo della benzina, l'accensione dell'H₂ nel cilindro avviene con l'ossigeno dell'aria a temperatura più bassa non solo di quella del metano, ma anche di quella della benzina, si ha quindi un minore rilascio di ossidi nitrici, inoltre non c'è formazione di gas serra, né di residui dannosi incombusti. È ragionevole poi ritenere che il famoso particellato, per la parte già presente nell'aria usata per la combustione, abbia al momento del suo ritorno in atmosfere

Tabella 1 - Composti da cui si può liberare facilmente H₂ con alcune loro caratteristiche [1]

Composto	Formula	H%	Densità (g ml ⁻¹)	Vol. composto (dm ³) equivalente a 1 kg H ₂	Note
idrogeno liquido	H ₂	100	0,07	14	-252 °C
idruro di litio	LiH	12,68	0,82	6,5	caustico
idruro di berillio	BeH ₂	18,28	0,67	8,2	molto tossico
diborano	B ₂ H ₆	21,86	0,417	11	tossico
metano liquido	CH ₄	25,13	0,415	9,6	-175 °C
ammoniaca	NH ₃	17,76	0,817	6,7	tossico, 100 ppm
acqua	H ₂ O	11,19	1,0	8,9	
sodio idruro	NaH	4,3	0,92	25,9	caustico, economico
calcio idruro	CaH ₂	5,0	1,9	11	
alluminio idruro	AlH ₃	10,8	1,3	7,1	
silano	SiH ₄	12,55	0,68	12	
potassio idruro	KH	2,51	1,47	27,1	tossico 0,1 ppm
titanio idruro	TiH ₂	4,40	3,9	5,8	caustico

ra dimensioni maggiori di quelle che aveva all'entrata, funzionando le particelle come centri di condensazione del vapore. Questo costituisce un vantaggio ambientale, infatti si ricorda che solo particelle di dimensioni minori di 10 µm possono trovare la via dei bronchi, causandovi inconvenienti fisiologici.

A questo punto l'interrogativo ambientale che nasce riguarda la sicurezza del sistema, infatti nell'immaginario collettivo è presente la catastrofe del dirigibile Hindenburg (6 maggio 1937) che in pratica segnò la fine della mobilità mediante un gas più leggero dell'aria. Va precisato però:

- 1) che nell'incidente vi furono 37 morti, solo un terzo circa degli imbarcati; questi dati sono da confrontare con quelli di consimili catastrofi con aeromobili più pesanti dell'aria;
- 2) che l'incendio non scaturì dall'H₂, ma dall'involucro del dirigibile costituito da materiali altamente infiammabili come sottile strato protettivo dell'involucro;
- 3) che i morti furono causati dall'incendio della nafta dei diesel imbarcati.

Sicuramente, però, l'H₂ è molto infiammabile ed ha un grande intervallo di esplosività in aria, ma in compenso diffonde rapidamente per il piccolo peso molecolare e la sua fiamma non sviluppa molto calore.

Il centro di ricerche europeo di Ispra, che sta simulando le possibili conseguenze del rilascio di H₂ in ambienti sia aperti sia chiusi, non ha evidenziato finora rischi del tutto inaccettabili o quanto meno non affrontabili [2].

L'H₂ può essere collocato nelle automobili come gas in bombole o come liquido in Dewar (Tabella 2). Non essendo ancora omologate in Italia le bombole ultraleggere tedesche in materiale composito, l'uso dell'H₂ in bombole, come per le automobili a CH₄, non è conveniente per lo sfavorevole rapporto tra energia trasportata e peso della bombola, che riduce drasticamente l'autonomia del veicolo. La soluzione suggerita dalla Bmw è di impiegare idrogeno liquido, LH₂, trasportato in Dewar cilindrici aventi pareti di 3 cm formate da 70 fogli di Al ricoperti da fibre di vetro. La pressione d'uso del gas è di 5 bar, il volume dell'LH₂ liquido trasportato è di 120 dm³, il suo peso 8,5 kg e la densità 71 kg m⁻³. La Tabella 2 fornisce altre

caratteristiche d'interesse sull'LH₂. Dal punto di vista della sicurezza ambientale il rifornimento è fatto in modo complementamente automatizzato da distributori tipo quelli della benzina ed in tempi paragonabili. Distributori di questa specie sono già installati in Germania, ad esempio negli aeroporti di Monaco e Berlino. La Figura 1, desunta dalla copertina di [2], mostra il riempimento di una di queste automobili. Con un pieno di LH₂ si percorrono 350 km, la velocità fuori città è di 180 km h⁻¹. Se non si trova rifornimento di LH₂ lungo la via, l'alimentazione del motore può essere rapidamente convertita a benzina, rendendo così disponibili altri 350 km di percorrenza.

La Bmw afferma che i serbatoi dell'automobile hanno superato favorevolmente le prove d'urto (*crash*) a cui sono stati sottoposti.

Circa il trasporto dell'LH₂ per i rifornimenti ai distributori si parla di un idrogenodotto in Francia di 1.000 km. È interessante osservare la Figura 2 da cui si intuisce attraverso l'evidenziazione delle città in cui circolano prototipi di questi veicoli, una possibile via dell'idrogeno attraverso una dorsale nord-sud che va da Amburgo a Milano passando per Berlino e Monaco (ma perché non includere Genova?).

Il rifornimento di LH₂ non è un problema, se lo si usa per il parco autobus di città medio-grandi, dove possono essere installati distributori dedicati, centralizzati ed autonomi riforniti con autobotti.

Resta il problema della produzione dell'H₂ da liquefare ed immettere nelle stazioni di rifornimento. Si ricorda che LH₂ arriva già da due anni per nave ad Amburgo, provenendo dal Canada, dove è presumibilmente prodotto per elettrolisi dalle centrali idroelettriche alimentate dall'energia generata nelle ore notturne insieme alla D₂O usata nei reattori nucleari canadesi. Futuribile per futuribile, si può pensare che da noi i reattori nucleari, non operanti però attualmente, potrebbero impiegare l'energia prodotta nelle ore notturne non solo per pompare le acque dai bacini idroelettrici a valle in quelli a monte, in modo da sopperire per via idroelettrica alla mag-

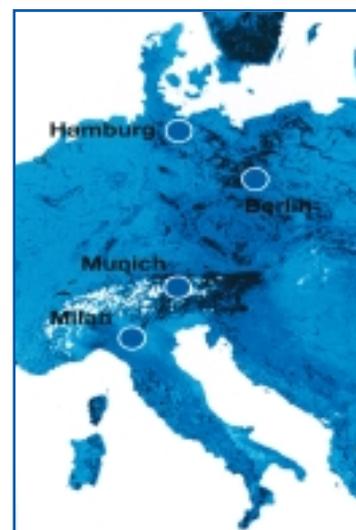


Figura 2 - Luoghi in cui sono in prova le automobili della Bmw a LH₂ (Fonte: Bmw)

Tabella 2 - Alcune caratteristiche del Dewar della Bmw [3]

Peso liquido vuoto	51,5 kg
Volume Dewar	0,2 m ³
H ₂ liquido stivato	8,5 kg
Efficienza di stivaggio (massa di H ₂ in %)	14,2
Energia specifica	5,57 kWh kg ⁻¹
Massa di H ₂ per dm ³	0,0425 kg dm ⁻³

Tabella 3 - Alcune caratteristiche del processore a metanolo della Daimler-Chrysler (A) e della General Motor (B) [3]

	A	B
Potenza massima in kWe	30	50
Densità di potenza in kWe L ⁻¹	0,5	1,1
Potenza specifica in kWe kg ⁻¹	0,44	0,44
Conversione del CH ₃ OH in %	82-85	98-100

giore richiesta di potenza diurna, ma anche per produrre H₂ durante le ore notturne. In questo caso la rete di trasporto dell'H₂ sarebbe sostituita da quella elettrica mediante la quale l'H₂ sarebbe prodotto direttamente nel luogo di utilizzazione o di distribuzione delocalizzata. La Bmw pensa invece ad una futura *cintura del sole* basata sulla produzione di H₂ da fotovoltaico localizzata nelle zone tropico-equatoriali.

Concludendo, l'uso dell'H₂ sopra delineato, è quello di un sostituto della benzina che non produce né contaminanti, né gas serra e non aggrava la situazione del particolato, ma forse la migliora. Si può avere un'idea dei vantaggi della mobilità ad LH₂ rispetto a quella ordinaria a benzina e gasolio, in particolare per quanto riguarda il gas serra CO₂, ricordando che il 40% dei trasporti mondiali avviene su gomma.

I quarant'anni di impiego dell'LH₂ per la produzione con celle a combustibile di energia elettrica ed acqua nelle navicelle spaziali provano la piena affidabilità dei sistemi a LH₂, a parte l'incidente, non fatale però anche se in condizioni estreme, del Challenger dovuto al cedimento di una flangia e non all'LH₂ in sé e per sé. Per veicoli di dimensioni maggiori delle automobili, come i Tir, in particolare per quelli impegnati nella catena del freddo, che richiedono energia anche durante gli stazionamenti nelle piazzole autostradali, è probabilmente più conveniente la preparazione dell'H₂ *in situ* sullo stesso mobile mediante *reforming* con cui si alimentano le celle a combustibile, e quindi i motori elettrici trasportati. In questo modo però non si evita la produzione del gas serra CO₂. Il motore del veicolo non è più a combustione interna, ma elettrico, come detto nel paragrafo seguente. Questa via di preparazione dell'H₂ appare la più interessante per l'applicazione nelle celle a combustibile.

Produzione *in situ* dell'H₂

L'H₂ può essere prodotto *in situ* estraendolo, per così dire, da composti che lo contengono per alimentare, insieme all'O₂ dell'aria, celle a combustibile. Il composto formato nella cella è H₂O, che è ininfluente sull'ambiente. L'H₂ con cui si alimentano le celle può provenire da LH₂, e quindi preformato (è il caso del tutto particolare delle capsule spaziali), o ottenuto *in situ* mediante *steam reforming* di composti organici vari (metano, metanolo, biomasse ecc.), che è la via per ora normal-

mente percorsa. Se si tratta di impianti fissi, con particolare riferimento all'Italia, il *reforming* del CH₄ appare attualmente più conveniente dal punto di vista pratico per l'estesa e capillare rete di distribuzione di questo gas, già esistente, mentre nel caso di impianti mobili il metanolo appare più adatto per il migliore rapporto peso/ingombro rispetto al CH₄, pur non esistendo una rete di distribuzione che dovrebbe quindi essere costruita. I processori per automobili a metanolo studiati dalla Daimler-Chrysler (già Daimler-Benz) e dalla General Motor-Opel hanno potenza massime di 50 e 30 kWe, rispettivamente, l'efficienza di conversione del CH₃OH è 97-100% nel primo e maggiore del 99% nel secondo (Tabella 3).

La Bmw ha fondato la sua scelta del LH₂ sul fatto che la velocità ottenibile è maggiore con la combustione diretta dell'H₂ nel motore e, dal punto di vista ambientale, si ha anche il vantaggio che H₂ può essere ottenuto senza coproduzione di gas di serra, come accade con lo *steam reforming*.

Lo *steam reforming* è una tecnologia matura con cui si ottiene su larga scala l'H₂ e CO da usare nelle sintesi chimiche. La reazione, con cui si ricava, da CH₄ il *gas di sintesi* che è una miscela di H₂ e CO, è:



La miscela è comunemente usata per produrre metanolo, ma se si usa l'H₂ del gas di sintesi per alimentare celle a combustibile bisogna trasformare il CO in CO₂ con la reazione 2),

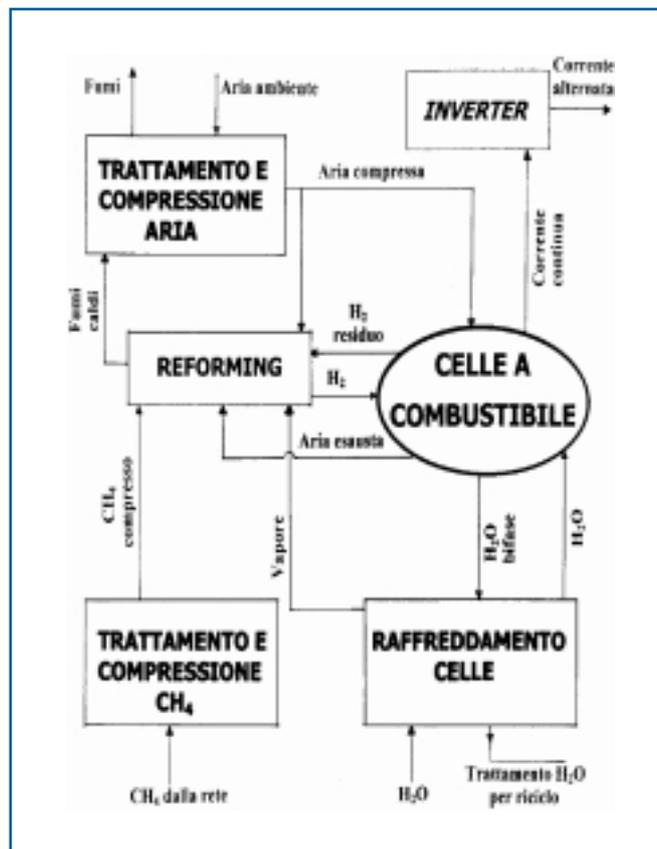


Figura 3 - Diagramma di flusso di un generatore di energia elettrica mediante celle a combustibile. L'inverter è il dispositivo che trasforma la corrente continua dello stack di celle in corrente alternata a 23 kV, consentendo così la connessione con la rete elettrica cittadina nei due sensi [4]

Tabella 4 - Confronto dell'emissione di contaminanti da sistemi diversi di produzione di energia elettrica per kWh prodotto (dati indicativi). Dettagli nel testo [6]

Contaminanti	NO _x (mg·kWh ⁻¹)	CO ₂ (g·kWh ⁻¹)	CO (mg·kWh ⁻¹)	SO _x (mg·kWh ⁻¹)	Aerosol (g·kWh ⁻¹)
<i>Bruciatore ordinario</i>					
CH ₄	500	600	500	Fino a 10 ⁴	0
Gasolio	1.600	800	600	300	
<i>Turbina a gas</i>					
Ordinaria	1.900*÷2.600	500*÷600	50*÷60	Fino a 10 ⁴	0*÷300
Con controllo delle emissioni					
	70*÷100	500*÷600	50*÷60	150*÷250	0*÷150
<i>Celle a combustibile</i>					
A bassa T ^a	5*÷6	500*÷600	0,2*÷0,4	1*÷2	~0
Ad alta T ^b	4*÷5	400*÷500	~0	~0	~0

* Minimo e massimo; ^aTipo PAFC (Phosphoric Acid Fuel Cells) come quelle del generatore dell'Aem; ^bTipo MCFC (Molten Carbonate Fuel Cells), in corso di installazione sul generatore Aem

detta di *shift*, al fine di evitare l'avvelenamento dei catalizzatori degli elettrodi della cella:



Se poi il CH₄ proviene dalla rete di distribuzione cittadina, prima del *reforming* occorre eliminare anche i composti solforati che sono aggiunti al CH₄ dal distributore per odorizzarlo ed evidenziarne così le eventuali fughe, infatti anche questi composti sono veleni del catalizzatore delle celle.

Il diagramma di flusso della centrale dell'Aem, già menzionata è mostrato in Figura 3. La Tabella 4, che quota le emissioni da centrali elettriche di diverso tipo per kWh prodotto, mostra che la produzione di energia elettrica mediante celle a combustibile è, tra quelle elencate, decisamente la migliore sotto il punto di vista dell'inquinamento.

Alcuni chiarimenti dei dati della Tabella: la riduzione degli NO_x nell'impianto della Aem a pochi percento e non totale è da ascrivere alla combustione "a fiamma" per fornire calore al *reformer*. Si noti comunque che l'emissione di NO_x dall'impianto è di gran lunga minore del limite stabilito della normativa attualmente vigente.

Un'altra precisazione riguarda le ultime voci della Tabella 4: il generatore dell'Aem aveva celle del tipo PAFC (Phosphoric Acid Fuel Cells) in cui si origina H₂O a 180-200 °C e un rendimento globale, inclusa la cogenerazione, dell'80%.

L'impianto è stato ora fermato per sostituire le PAFC con le MCFC (Molten Carbonate Fuel Cells), che operano a temperature elevate ed hanno la possibilità di usare come sorgenti di H₂ non solo il CH₄, ma anche altri tipi di combustibili sia liquidi (metanolo, nafta), sia solidi (carbone, biomasse) [4]. Il loro rendimento elettrico dovrebbe salire al 55-65%, maggiore di quello delle PAFC con temperature all'uscita di 800 °C. Il rendimento con cogenerazione non dovrebbe superare di molto però quello delle PAFC. Si noti che rendimenti più alti significano, a parità di energia prodotta, minore emissione di contaminanti e del gas serra CO₂.

I dati di Tabella 4 trovano conferma in quelli che l'Ansaldo [6] fornisce per il generatore PC25C, di cui si è dotato il Museo della Scienza e della Tecnologia di Milano (Figura 4). La Figura 5 mostra il generatore che può essere installato all'aper-

to od in ambienti chiusi. Esso è progettato in due moduli: il primo detto di potenza; il secondo detto di raffreddamento. Le loro dimensioni sono:

- moduli di potenza: 7,3x3x3,5 m;
- moduli di raffreddamento: 3,6x1,8x2,2 m.

Il calore in eccesso è dissipato in aria. Il funzionamento è automatizzato e l'impianto è connesso con la rete elettrica. Esso può fornire energia elettrica ad un fabbricato di 50 abitazioni familiari.

È da sottolineare, inoltre, il basso inquinamento acustico degli impianti a celle a combustibile per la ridotta presenza di parti in movimento, cosa

di notevole rilevanza per la loro installazione in abitazioni civili, come si dirà tra poco.

Essendovi in Europa, ed in particolare in Italia, una rete distribuita di metano che raggiunge anche località montane (ad esempio Macugnaga, ai piedi del Monte Rosa) esiste la possibilità di avere H₂ per *reforming* del metano praticamente ovunque. Gli impianti a celle a combustibile hanno potenziali che vanno da 3 kWe (che è la potenza usuale per abitazioni unifamiliari) a 11 MWe ed il loro funzionamento può essere automatizzato cosicché una squadra può sovrintendere a più impianti. In altre parole la produzione di energia elettrica può essere distribuita sul territorio anche cittadino.

In caso di installazioni per grandi centri commerciali (supermercati), ospedali ecc., l'*inverter* (Figura 4) trasforma la cor-

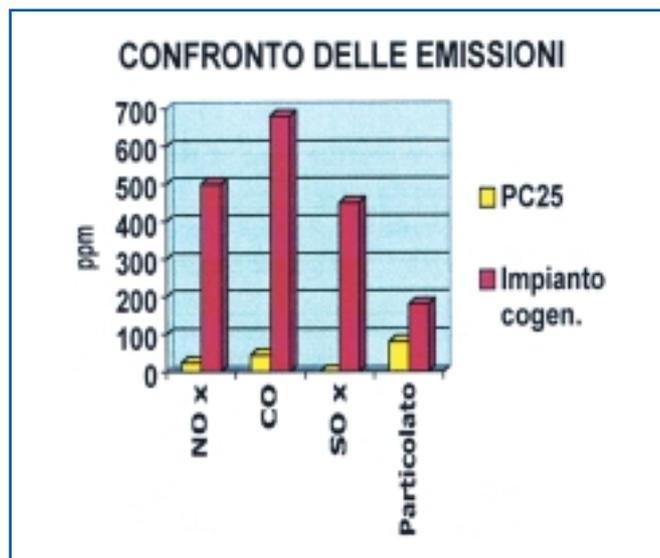


Figura 4 - L'istogramma confronta il rilascio di contaminanti della centrale da 200 kWe dell'Ansaldo PC25C con quelli di impianti convenzionali cogenerativi. Per quanto riguarda la CO₂, essendo il rendimento del PC25C del 40%, mentre quello dei secondi è del 30%, si ha una emissione minore nel rapporto 30:40. L'acqua calda fornita ha una temperatura tra 37 e 81 °C al 100% della potenza nominale. La centrale usa CH₄



Figura 5 - Visione d'insieme dell'unità PC25C versione standard da 200 kWe dell'Ansaldo

rente continua in alternata, consentendo la cessione a rete del surplus di energia prodotta a rete e garantisce contemporaneamente la continuità del rifornimento di energia in occasione di manutenzione ordinaria e straordinaria. Un altro vantaggio per le piccole utenze è la bassa rumorosità anche in assenza di isolamento: ad esempio per l'unità PC25C da 200 kWe dell'Ansaldo essa è inferiore a 60 dB a 10 m di distanza [6]. La maggiore efficienza di questi sistemi nell'utilizzazione dell'energia potenziale chimica produce vantaggi ecologici non solo nel microsistema, ma anche nel macrosistema. Per chiarezza, tram e filobus non producono direttamente né contaminati, né gas serra, prodotti però dagli impianti da cui essi traggono l'energia elettrica usata.

Rimane la questione dei costi, infatti sogni e realtà spesso si scontrano tra loro, sul terreno della vile moneta. Ancora una volta può soccorrci l'esperienza fatta con l'impianto dell'Aem, anche se si tratta di stime di massima più che di un reale bilancio economico, essendo l'impianto sperimentale.

I dati di entrata per la valutazione sono:

- potenza elettrica prodotta = 1 MWe;
- ore di funzionamento ipotizzabili = 8.000 h anno⁻¹;
- energia elettrica prodotta = 8.000 MWe anno⁻¹;
- ricavo ipotizzato per kWe prodotto = 170 lire;
- volume CH₄ consumato = 300 Nm³ h⁻¹;
- costo unitario CH₄ = 250 lire Nm⁻³;
- calore sfruttabile, ma qui disperso in atmosfera = 4.000 MWe anno⁻¹;
- ricavo ipotizzato per il kWh prodotto = 130 lire.

Dai valori sopra elencati si ricava:

- ricavo dovuta all'energia elettrica prodotta = 1.360 milioni di lire anno⁻¹;
- ricavo dovuto al recupero del calore prodotto = 520 milioni di lire anno⁻¹;
- costo del combustibile = 600 milioni di lire anno⁻¹.

Se si ipotizza che l'investimento iniziale sia di 5 miliardi di lire, la vita dell'impianto di cinque anni e l'interesse del 5%, la quota di capitale è di 1,15 miliardi di lire anno⁻¹ (23% annuo). Inoltre, assumendo che la spesa di manutenzione sia di 150 milioni di lire anno⁻¹ ed il costo del lavoro di 100 milioni di lire anno⁻¹ si ha:

- ricavo totale (energia elettrica + termica) = 1.880 milioni di lire anno⁻¹;

- costo totale d'impianto (fisso + operativo) = 2.000 milioni di lire anno⁻¹.

Si ha pertanto un disavanzo di 120 milioni di lire anno⁻¹.

Si noti però che nella fase di sperimentazione dell'impianto dovettero essere garantiti tre turni al giorno per ragioni precauzionali dettate dalla novità dell'intrapresa, ma che questi impianti possono però essere gestiti in automazione, come si è già detto. Si delinea quindi la possibilità di appaltare diverse installazioni di questo tipo ad un'unica squadra di intervento supplendo alla mancanza locale di energia in attesa dell'intervento mediante la connessione a rete. Si può ritenere che la spesa per la manodopera si possa così ridurre alla metà. Per quanto riguarda l'affidabilità di questi impianti l'esperienza acquisita nei programmi spaziali dovrebbe fugare molte preoccupazioni.

Inoltre l'aspetto economico della tecnologia è ampiamente migliorabile grazie sia allo studio e alla ricerca di materiali sempre meno costosi per le celle, sia ad una sua possibile ampia penetrazione sul mercato con le conseguenti economie di scala e di standardizzazione delle diverse parti; ad esempio non pochi inconvenienti sono derivati all'Aem dall'aver dovuto impiegare un compressore reperibile sul mercato, non ottimizzato per le prestazioni richieste, inconveniente eliminabile se fosse stato progettato ad *hoc* e prodotto in serie.

Le cose sono poi ulteriormente migliorabili se si effettua il bilancio su una scala più vasta di quella della sola produzione di energia elettrica, considerando il *risparmio sanitario* per il minor inquinamento ambientale e la conseguente minore morbilità.

Non trascurabile, poi, per alcune città come Milano, il danno economico causato dalla drastica riduzione della mobilità imposta dalle autorità a causa della psicosi di quegli strati della popolazione più sensibili a possibili effetti dannosi del particolato. Questi risparmi sono difficili a stimare dall'impianto della Aem perché l'esperienza ha coinvolto una percentuale così piccola dell'energia prodotta in Milano da non consentire indagini epidemiologiche, tuttavia è sicuramente anch'essa una voce non nulla nell'attivo degli impianti a celle a combustibile.

Conclusioni

Quanto esposto, sebbene basato su tre soli casi concreti, lascia prevedere che l'economia dell'idrogeno meriti tuttavia una profonda attenzione non solo dal punto economico, ma anche ambientale. Considerando scenari geopolitici più ampi, una forte seduzione esercita inoltre la possibile sinergia per la mobilità su gomma che nasce dalla combinazione dell'economia dell'idrogeno con quella nucleare.

Bibliografia

- [1] J. Larminie, A. Dicks, Fuel Cell Systems Explained, J. Wiley, Chichester, England, 2000, 213.
- [2] Fuel Cells Powering the Future. Sustainable Power for the European Union, EUR 19367 EN, Luxemburg, 2000, 7.
- [3] V. [1], 208.
- [4] E. Lazzarini, G. Picciotti, Celle a Combustibile, Aem, Milano, 2001, 59.
- [5] *ibid.*, 70.
- [6] Impianto di cogenerazione a celle a combustibile PC25C, Ansaldo Ricerche, Finmeccanica Iri Group.