

Idrogeno e celle a combustibile - Come, per cosa e perché?

Hans U. Fuchs, 2019

Caro Lettore,

questo è un testo non troppo tecnico, pensato per tutti coloro tra che non sono ingegneri o scienziati. Il testo delinea alcune informazioni di fondo sulla tecnologia dell'idrogeno e delle celle a combustibile. Tuttavia, sono stati inclusi alcuni temi più tecnici, inseriti in riquadri contrassegnati dall'etichetta **T**

Quindi, forse, ad una prima lettura, potreste seguire le linee principali della descrizione e della spiegazione, tralasciando questi riquadri, e tornare poi su di essi più tardi, se volete approcciarvi al testo completo...

L'idrogeno, come combustibile, e le celle a combustibile per generare elettricità attraverso l'idrogeno potrebbero un giorno sostituire i nostri attuali combustibili e i modi di fornire l'energia. Questa prospettiva solleva almeno tre interrogativi: come funziona un sistema di questo tipo, per cosa useremmo esattamente l'idrogeno e le celle a combustibile, e perché dovremmo voler intraprendere la sfida di una nuova tecnologia se quella vecchia ci è servita in modo funzionale e potrebbe continuare a servirci per molto tempo a venire?

Argomenti a favore della Tecnologia FCH

1. L'idrogeno è un combustibile che può essere rinnovabile.



2. Bruciando l'idrogeno, o utilizzandolo in celle a combustibile, si produce solo acqua.
3. L'idrogeno nelle celle a combustibile è potenzialmente altamente efficiente.

Ci sono almeno tre argomenti a favore della tecnologia delle celle a combustibile e dell'idrogeno (FCH-T):

1. I combustibili attualmente utilizzati sono per lo più non rinnovabili. Carbone, petrolio e gas naturale sono stati depositati nella crosta terrestre molto tempo fa e, una volta esauriti, non torneranno più.
2. Bruciando i combustibili usuali si creano sostanze che danneggiano l'ambiente in vari modi. Ad esempio, inquinano l'aria che respiriamo e l'acqua che beviamo. Soprattutto, l'anidride carbonica prodotta dalla combustione di carbone, petrolio e gas naturale rende il nostro pianeta più caldo a un ritmo che non sarà accettabile per le generazioni future - e non dovrebbe essere accettabile per noi.
3. Da un punto di vista fisico e tecnico, bruciare combustibili è uno spreco – la produzione di calore non è ciò che vogliamo ottenere. Ci sono modi migliori, almeno teoricamente, sulla base di una prospettiva scientifica e ingegneristica, per utilizzare i combustibili.

Idrogeno

Fisicamente, l'idrogeno è una **sostanza** semplice, come l'acqua o l'aria, ma non così abbondante sulla Terra; è la principale "componente" di cui è fatto il nostro Sole. Sulla Terra, in condizioni ambientali normali, appare come un gas, proprio come altri semplici gas quali l'azoto, l'ossigeno e l'anidride carbonica, che fanno parte dell'aria.

Chimicamente, l'idrogeno è un **elemento**, come l'ossigeno, o l'elio, o il ferro. In realtà, come gas sulla Terra, l'idrogeno è un composto: le sue molecole sono costituite da due atomi di idrogeno. In chimica, usiamo il simbolo H per l'elemento idrogeno e il simbolo H₂ per l'idrogeno (due atomi H combinati).

Può servire come combustibile, il che significa che può reagire in una reazione chimica con l'ossigeno e quindi provocare altri processi relativi al calore, all'elettricità o al moto. In altre parole, mette a disposizione energia per guidare

questi processi. L'idrogeno può essere una fonte di energia, è un **mezzo di immagazzinamento dell'energia**.

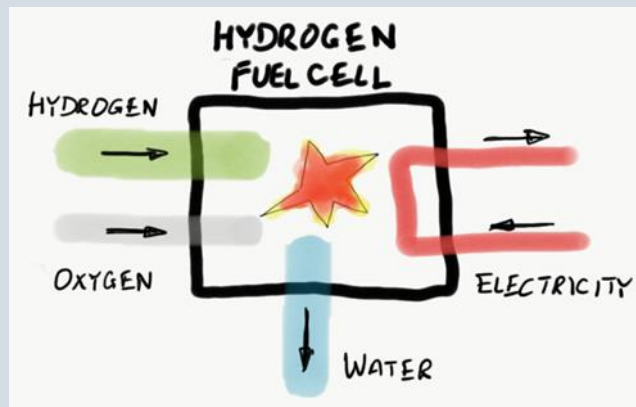
Possiamo anche definire l'idrogeno un **vettore energetico**: l'idrogeno che riceviamo porta con sé la sua energia.

La tecnologia FCH, d'altra parte, ha la potenzialità di rispondere a tutte queste problematiche. L'idrogeno può essere prodotto utilizzando la luce del Sole. Bruciando l'idrogeno o, meglio ancora, usandolo nelle celle a combustibile, si produce acqua come "prodotto di scarto"; non c'è carbonio in gioco che porterebbe alla produzione di anidride carbonica.

Inoltre, utilizzare un combustibile in una cella a combustibile significa che non viene bruciato: non c'è fuoco; non viene utilizzato per produrre calore - l'energia resa disponibile da un combustibile può essere utilizzata per alimentare il processo elettrico di una cella a combustibile (una cella a combustibile funziona fondamentalmente come una batteria).

Celle a combustibile

Una cella a combustibile è una specie di macchina. Come tale, non è diversa da una pompa elettrica per l'acqua, da una dinamo o dal motore termico di un'automobile. Proprio come tutti questi dispositivi, è fatta per accoppiare due processi: il primo processo ne aziona un altro desiderato. In una pompa elettrica per l'acqua, ad esempio, sfruttiamo la potenza dell'elettricità per portare il flusso d'acqua da un punto in basso a un punto più in alto. In una cella a combustibile, un processo chimico ne aziona uno elettrico.



Una cella a combustibile utilizza un combustibile come l'idrogeno o il metano, lo fa reagire e in tal modo alimenta un processo elettrico. Nel tipo più elementare, una cella a combustibile utilizza idrogeno che, reagendo con l'ossigeno, produce acqua e innalza la tensione elettrica la quale permette di "pompare" l'elettricità attraverso i fili e gli apparecchi. Questo è molto simile a quello che fa una batteria, con la differenza che, in una cella a combustibile, le sostanze reagenti vengono fornite e i prodotti della reazione vengono rimossi continuamente.

Sicuramente, la tecnologia FCH, nella sua integralità, porterebbe ancora alla produzione di alcune sostanze nocive, e produrre idrogeno e utilizzarlo nelle celle a combustibile non sarà mai efficiente al 100%, nonostante apparenti promesse teoriche. Tuttavia, il prodotto dell'inefficienza dell'FCH-T è essenzialmente un po' di calore. Questo non comporta rischi per il nostro pianeta.

Di seguito, vogliamo discutere le domande poste nel titolo e descrivere in dettaglio gli aspetti ad esse associati. Alla seconda di queste (FCH-T: A che cosa serve?) si risponde abbastanza facilmente: viene utilizzata soprattutto nelle tecnologie in cui oggi utilizziamo combustibili per rendere disponibile l'energia. La terza domanda (FCH-T: Perché?) richiederà più tempo per rispondere. Considerandola, saremo ricompensati con una certa conoscenza dei processi fisici e chimici e, soprattutto, con una migliore comprensione del potenziale dell'FCH-T per un futuro energetico sostenibile. Ma prima di iniziare a rispondere a queste domande, iniziamo con la prima.

Tecnologia FCH: Come?

Un sistema che fornisce e utilizza l'idrogeno potrebbe avere il seguente aspetto (vedi Fig. 1). In primo luogo, l'idrogeno deve essere prodotto. Un modo diretto per farlo è dall'acqua. Attraverso una reazione chimica, l'acqua si trasforma in due gas, idrogeno e ossigeno; questo può essere ottenuto con l'aiuto dell'elettricità.

Usare la luce del Sole per...

1. azionare l'elettricità direttamente nelle celle solari;
2. generare il vento delle turbine eoliche;
3. dar origine al ciclo dell'acqua dandoci potenza idroelettrica.

Se vogliamo che il Sole alimenti i processi elettrici, possiamo costruire un impianto fotovoltaico. Possiamo anche utilizzare il vento o l'acqua che scorre sulla superficie del nostro pianeta per azionare turbine eoliche o idrauliche che poi azionano i generatori elettrici. Poiché sulla Terra i flussi di vento e acqua sono causati dalla luce solare, anche l'energia del vento e dell'acqua viene dal Sole.

Quando facciamo circolare elettricità attraverso dell'acqua leggermente salata, l'acqua è soggetta a una reazione chimica che produce idrogeno e ossigeno. Il processo si chiama elettrolisi. L'ossigeno può essere immesso nell'atmosfera; l'idrogeno viene raccolto e immagazzinato per tutto il tempo desiderato.

Quando serve idrogeno, può essere immesso in una cella a combustibile dove la reazione chimica che lo ha prodotto è invertita - l'acqua viene prodotta dall'idrogeno e l'ossigeno dell'aria. Come risultato, la cella a combustibile può alimentare dei dispositivi, proprio come si può far funzionare un motore elettrico con una batteria.

Il dispositivo potrebbe essere una pompa di calore in una casa. Una pompa di calore pompa il calore da un luogo relativamente freddo, come il terreno all'esterno della casa, ad un luogo più caldo, come l'acqua in un serbatoio di acqua calda o l'aria all'interno della casa.

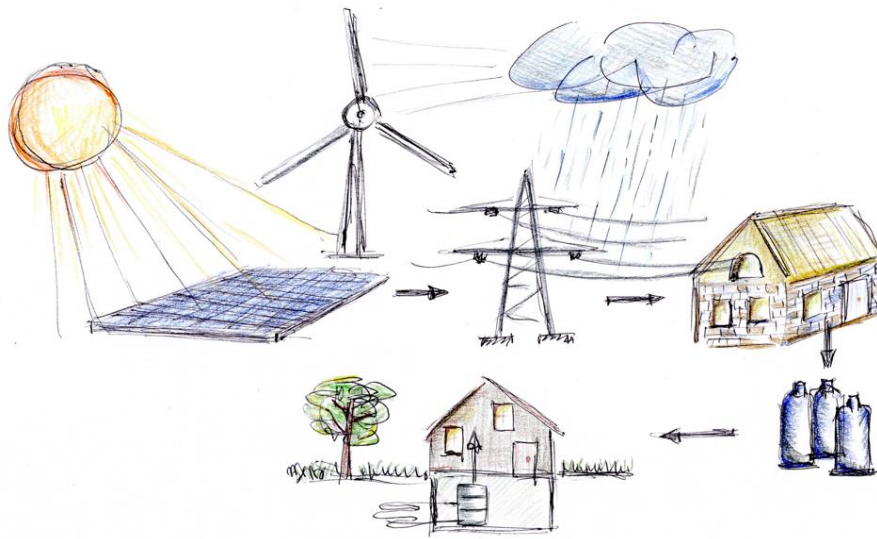


Figura 1: Un sistema a celle a combustibile e idrogeno alimentato dal sole e utilizzato per riscaldare una casa. Da notare i serbatoi di idrogeno al centro della catena di processi.

La Fig. 1 mostra un caso concreto di un sistema energetico all'inizio del quale si trova il Sole, e alla fine del quale abbiamo alcuni fenomeni per i quali utilizziamo energia. L'elettricità fornitaci dall'idrogeno utilizzato nelle celle a combustibile può azionare motori di camion, automobili, treni e persino navi, luci di città, o far funzionare frigoriferi.

Possiamo produrre idrogeno finché c'è il Sole, immagazzinare il combustibile e spostarlo dove sarà necessario, e alimentare delle celle a combustibile che funzionano come l'equivalente di un generatore elettrico. In altre parole, indirettamente, il Sole e l'idrogeno possono essere usati per alimentare la maggior parte se non tutti i dispositivi e le macchine che usiamo nella nostra vita quotidiana.

Tecnologia FCH: Per che cosa?

La tecnologia delle celle a combustibile idrogeno (FCH) combina due elementi che non devono necessariamente essere combinati: l'uso dell'idrogeno come combustibile e l'uso di combustibili nelle celle a combustibile per alimentare un processo elettrico. Tuttavia, unire le forze dell'idrogeno e delle celle a combustibile presenta alcuni importanti vantaggi.

Idrogeno

L'idrogeno non è solo un combustibile, ma svolge un ruolo importante come sostanza chimica anche per la produzione di altri prodotti chimici e farmaceutici. Ma qui ci preoccupiamo del suo ruolo di combustibile. Dove oggi utilizziamo i nostri combustibili tradizionali come il carbone, il petrolio o il gas naturale, in futuro potremo utilizzare l'idrogeno.

Importanti usi su larga scala dei combustibili

4. Riscaldamento degli edifici e produzione del calore per i processi industriali.
5. Potenza elettrica per grandi impianti.
6. Trasporti (terra, acqua, aria).

I carburanti sono utilizzati per un certo numero di applicazioni. Tre di questi si distinguono in particolare: bruciare combustibili per il **riscaldamento** e la produzione del calore dei processi industriali; bruciare combustibili nelle centrali **elettriche**; e bruciare combustibili nei motori per i **trasporti** (come i motori delle automobili, o i motori diesel e le turbine a gas utilizzati in treni e navi). Nel primo caso, utilizziamo il calore, nel secondo l'elettricità, nel terzo produciamo moto.

In tutti e tre i casi, i combustibili vengono bruciati. Quindi, in realtà, la prima cosa che succede è che viene prodotto calore. Se finalizzato al riscaldamento, questo potrebbe essere considerato accettabile, ma anche in questa applicazione, ci sono modi migliori di usare i combustibili. Nel secondo e nel terzo, ci si potrebbe chiedere perché dobbiamo passare attraverso il calore per arrivare all'elettricità o al moto.

Celle a combustibile

È qui che entrano in gioco le **celle a combustibile**. Piuttosto che bruciare un combustibile, una cella a combustibile utilizza un combustibile per alimentare direttamente un processo elettrico, proprio come fa una batteria. Dove l'elettricità può essere utilizzata per alimentare altri processi desiderati, in particolare il moto: le celle a combustibile possono sostituire la tecnologia esistente. Le celle a combustibile possono essere utilizzate per il trasporto e possono sostituire fundamentalmente le centrali elettriche, perché sono esse stesse centrali elettriche. Potremmo persino utilizzarle per il riscaldamento, producendo calore elettricamente. Ma questo non solo **sembra** uno spreco, come correre in tondo, **è** uno spreco: possiamo usare l'elettricità per azionare pompe di calore e ottenere molto più calore per unità di energia che se bruciamo un combustibile come l'idrogeno o produciamo calore in un riscaldatore elettrico (facendo circolare l'elettricità attraverso fili sottili che si riscaldano).

La tecnologia FCH potrebbe potenzialmente sostituire il nostro attuale uso di combustibili per il riscaldamento, l'elettricità e i trasporti con processi rinnovabili, più puliti e più efficienti. Il motivo per cui questa tecnologia porta a processi più puliti e più efficienti sarà ora esaminato.

Tecnologia FCH: Perché?

All'inizio, abbiamo indicato tre motivi principali per cui potremmo voler spostare alcuni aspetti del nostro uso dei combustibili verso la tecnologia FCH: l'idrogeno può essere prodotto in processi rinnovabili; utilizzato come combustibile, crea solo acqua come residuo; e, utilizzato nelle celle a combustibile, è più efficiente dal punto di vista energetico.

Rimane l'importante questione di come la tecnologia FCH potrebbe raggiungere tutti questi obiettivi. Cerchiamo di capire perché l'idrogeno sarebbe un combustibile rinnovabile, perché sarebbe potenzialmente pulito e perché potrebbe essere utilizzato in modo potenzialmente efficiente.

Per chiarire questi aspetti, dobbiamo entrare nel merito ad alcune questioni scientifiche e ingegneristiche. È importante sottolineare che l'apprendimento di questi aspetti non deve intimidire - ci sono modi per creare descrizioni e spiegazioni narrative che fanno appello alla nostra esperienza quotidiana e alla comprensione del mondo che ci circonda. Queste narrazioni utilizzano un linguaggio naturale e immagini che non devono necessariamente essere formali o inaccessibili alla maggior parte di noi.

La chimica della combustione

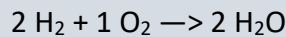
Cominciamo con gli aspetti chimici dell'uso dei combustibili. Per semplicità, e per amore di concretezza, consideriamo solo due combustibili: l'idrogeno e il metano. L'idrogeno è normalmente un gas le cui molecole sono composte da due atomi di idrogeno. Il metano è composto da atomi di carbonio e idrogeno. È il componente primario del gas naturale, ed è prodotto in molti processi biologici (le mucche "scozzano" metano!). Il metano è anche un potente gas serra; in eccesso nell'atmosfera ha un forte effetto di riscaldamento sul pianeta.

Quando un gas, come l'idrogeno o il metano, viene bruciato, si combina normalmente con l'ossigeno prelevato dall'aria. La combustione dell'idrogeno gassoso porta all'acqua. Bruciando metano si ottiene acqua e anidride carbonica. Quindi, almeno potenzialmente, bruciare l'idrogeno è "pulito", mentre bruciare metano non lo è. (Si noti, tuttavia, che se otteniamo metano dalla produzione di biogas, bruciarlo e produrre anidride carbonica non è un problema: l'anidride carbonica proveniva originariamente dall'aria presa dalle piante. Quindi, il biometano è fondamentalmente non rilevante dal punto di vista dell'anidride carbonica).

➤ T Bruciare idrogeno e metano

L'idrogeno gassoso è composto da due atomi di idrogeno. Il simbolo H è usato per (gli atomi di) idrogeno, quindi l'idrogeno gassoso è indicato con H₂ in chimica. L'ossigeno gassoso in aria è composto da due atomi di ossigeno (O), quindi ha il simbolo O₂.

Bruciare l'idrogeno gassoso significa coinvolgerlo in una reazione chimica con l'ossigeno gassoso che produce acqua. Poiché l'acqua è composta da due parti di idrogeno e una parte di ossigeno (H₂O), dobbiamo considerare che due unità di idrogeno gassoso reagiscano con un'unità di ossigeno gassoso per produrre due unità di acqua:



D'altra parte, bruciare metano (CH₄, dove il simbolo C sta per carbonio) crea acqua e anidride carbonica (CO₂):



Qui vediamo l'origine del nostro problema della produzione del gas-serra biossido di carbonio: si tratta di un sottoprodotto inevitabile della combustione di idrocarburi come il petrolio e il gas naturale. Si produce anche bruciando il carbone.

Le cose non sono però così semplici. Quando bruciamo idrogeno in aria, otteniamo altri sottoprodotti perché l'aria non contiene solo ossigeno (che, insieme all'idrogeno, compone l'acqua). In particolare, ad alte temperature, l'azoto gassoso nell'aria si combina con l'ossigeno per produrre ossidi di azoto (come NO₂ e N₂O) che inquinano l'aria che respiriamo. Reagendo con la luce del Sole, NO₂ (biossido di azoto) produce ozono (O₃) che è irritante per i nostri polmoni e per gli animali e le piante. Anche l'ossido di azoto (N₂O) e l'ozono sono gas serra.

Queste sono alcune delle ragioni per cui non dovremmo bruciare l'idrogeno; chiamiamo queste, ragioni chimiche. In seguito, impareremo che c'è un'altra ragione fisica molto importante per non bruciare l'idrogeno: bruciare combustibili crea calore, e creare calore non è mai una buona soluzione per le sfide dell'ingegneria energetica. Piuttosto, dovremmo usare i combustibili nelle celle a combustibile, soprattutto se desideriamo l'elettricità per ulteriori applicazioni.

I portatori energetici e le loro tensioni

Nel nostro percorso per conoscere la tecnologia FCH, un prerequisito importante per comprendere gli aspetti dell'ingegneria energetica è il seguente: dobbiamo imparare e accettare che ciò che chiamiamo *luce, calore, elettricità o moto non sono energia*: più semplicemente, sono *portatori di energia*.

In realtà, ha senso usare parole come *luce, calore, elettricità o moto per fenomeni* che abbracciano una serie di aspetti: l'energia è solo uno di questi. Insieme ai fluidi (come l'acqua e l'aria) e la miriade di sostanze chimiche di cui facciamo uso, luce, calore, elettricità o movimento possono essere meglio compresi come *forze della natura*, fenomeni dotati di potere (vedi il documento *Forze della Natura e Energia*).

Oltre ad essere associate all'energia, attraverso il loro aspetto di potere, le forze della natura sono principalmente caratterizzate da due aspetti in più: i fenomeni possono essere *più o meno intensi*, e possono essere più o meno *grandi o piccoli* (vedi Fig. 2). Ci sono *intensità* di luce, calore, elettricità e movimento; le intensità sono visualizzate come livelli, sono *alte o basse*. Si noti che le differenze di intensità producono ciò che sperimentiamo come *tensioni*. E poi ci sono *quantità* di luce, di calore, di elettricità e di movimento.

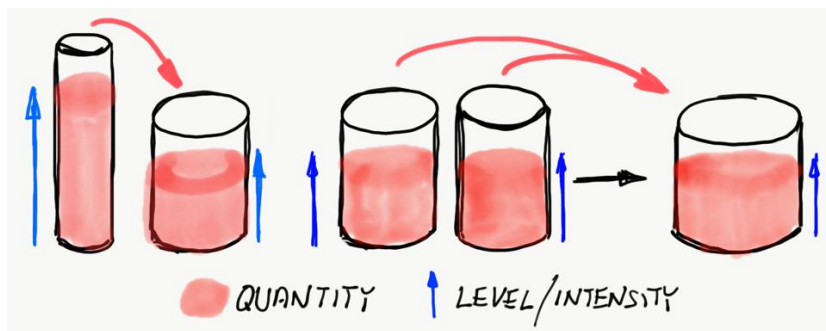


Figura 2: Quantità fluide - *quantità* di fluido, elettricità, calore, luce, luce, movimento, ecc. sono visualizzate come "roba" rossa dentro a dei contenitori. Le loro intensità sono indicate dai livelli di questa "roba" nei contenitori. La stessa quantità può essere associata a diversi livelli (a sinistra) o due volte la stessa quantità può essere associata allo stesso livello (a destra).

Il fatto che vediamo *quantità* dietro fenomeni fisici e chimici - quantità di fluido, di calore o elettricità, di moto o sostanza - può essere pensato con l'immagine di

quantità simil-fluido (Fig. 2). Quantità di elettricità, luce, fluidi, calore, moto o sostanza sono *contenute* in elementi di accumulo (il calore in una pietra calda, il moto in una pietra che si muove, l'elettricità in un condensatore, l'acqua in un barattolo, ecc.), e possono *fluire* dentro e fuori di questi elementi e da elemento ad elemento (Fig. 3)

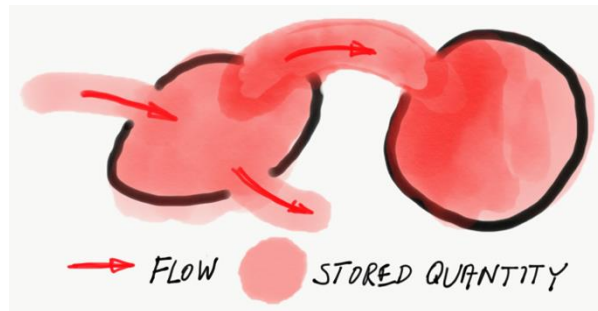


Figura 3: *Quantità* di sostanza simil-fluido - quantità di fluido, elettricità, calore, luce, moto, ecc. possono essere immagazzinate e possono fluire all'interno e all'esterno degli elementi di stoccaggio o da un elemento di stoccaggio ad un altro.

Quando studiamo l'acqua, questo è chiaro. Può esserci più o meno acqua, l'acqua può essere ad alta o bassa pressione (e le differenze di pressione costituiscono una tensione associata allo scorrimento o all'immagazzinamento dell'acqua). E l'acqua può essere più o meno potente: potremmo dire che l'acqua è dotata di più o meno *energia*. In realtà, per quanto riguarda l'energia, ha senso vedere l'acqua come *portatore di energia*: **non** è certamente energia.

È importante vedere la luce, il calore, l'elettricità e il moto allo stesso modo. Essi sono caratterizzati da intensità: *luminosità*, *temperatura*, *potenziale elettrico* e *velocità*, rispettivamente. Inoltre, sono associati a tensioni: differenze di luminosità, differenze di temperatura, tensione elettrica e differenze di velocità, rispettivamente. La *quantità di luce*, la *quantità di calore* (*calorico*), la *quantità di elettricità* (*carica*), e la *quantità di moto*, d'altra parte, dovrebbero essere immaginati come portatori di energia (vedi Fig. 4).

Naturalmente, anche le sostanze sono vettori energetici; quindi anche l'idrogeno è un vettore energetico!

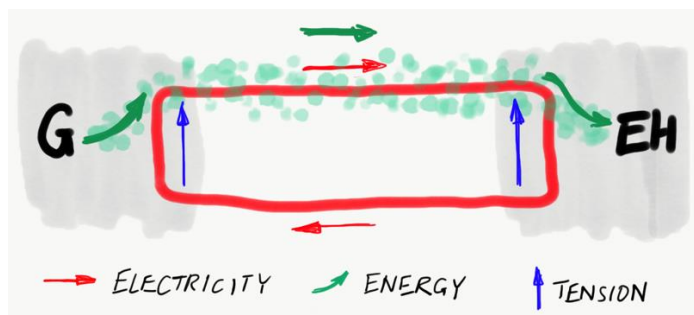


Figura 4: *Riscaldamento elettrico:* L'elettricità (carica elettrica) scorre in un circuito (circuito chiuso rosso). Trasporta l'energia che ha ricevuto nel generatore (G) ad un riscaldatore elettrico (EH) che è semplicemente un filo lungo e sottile. Lì "scarica" l'energia ricevuta. L'energia è simboleggiata come una "sostanza" verde. Quando l'elettricità riceve energia nel generatore, si crea una tensione.

Energia: Renderla disponibile e utilizzarla

Quando l'acqua scende da una montagna, può essere utilizzata per alimentare altri processi (vedi Fig. 5). Tipicamente, la usiamo per azionare una turbina ad acqua che alimenta un generatore elettrico, che aziona un qualche dispositivo elettrico, magari un motore elettrico, e così via.

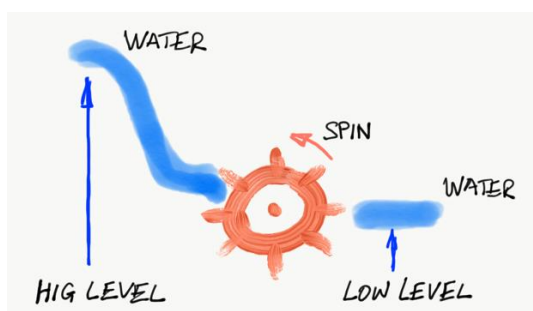


Figura 5: L'acqua che cade in una cascata può azionare una ruota idraulica. Diciamo che, in questo modo, l'acqua alimenta il moto rotazionale (*rotazione* è il nome tecnico per la quantità di moto rotazionale). L'acqua sta passando da un livello alto ad un livello basso. Quello che non vediamo è che la rotazione sta effettivamente passando da un'intensità bassa ad un'intensità elevata (rotazione veloce).

Nota bene: ci sono catene di processi con forze della natura *interagenti*. L'acqua che cade interagisce con il moto rotatorio della turbina (vedi Fig. 6), e la forza del moto rotatorio interagisce con la forza dell'elettricità, che interagisce con il moto rotatorio del motore elettrico. La prima interazione avviene nella turbina, la seconda nel generatore e la terza nel motore elettrico. Gli oggetti fisici - turbina,

generatore e motore - sono chiamati *trasferitori*. Permettono di accoppiare le forze della natura.

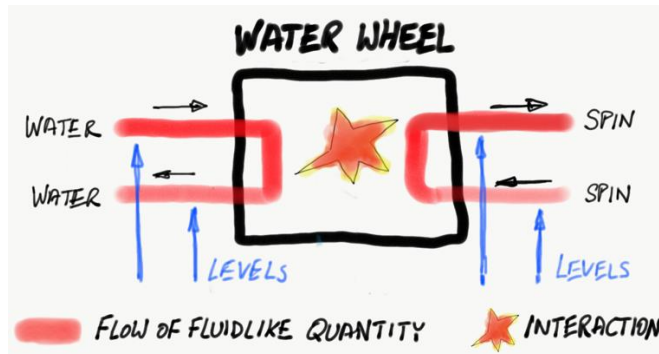


Figura 6: Rappresentazione astratta dell'interazione dell'acqua (come forza della natura) con il moto rotatorio (come altra forza della natura). La quantità di fluido entra nel riquadro (che simboleggia un trasferitore) ad alto livello e lo lascia a basso livello. La rotazione viene poi "pompata" dal livello basso (zero) a quello alto (alta velocità di rotazione). L'immagine è simile a come abbiamo rappresentato il funzionamento di una cella a combustibile a pagina 3.

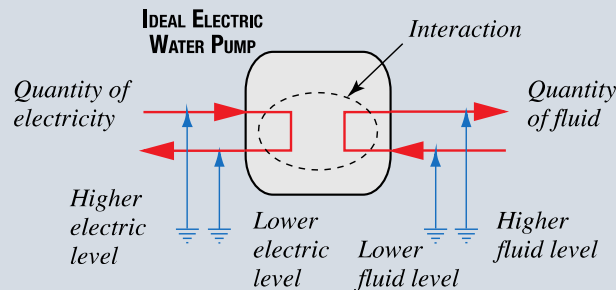
Nell'accoppiamento di due processi, la prima forza è l'*agente causale*, mentre la seconda è *causata* dalla prima. Un buon esempio è quello che accade in una pompa dell'acqua ad alimentazione elettrica. In realtà, se usassimo una pompa a mano in cui si gira una manovella, l'immagine astratta dell'accoppiamento sarebbe semplicemente il contrario di quello che abbiamo in Fig. 6: la rotazione va dal livello alto al livello basso di rotazione e quindi fa salire l'acqua (l'acqua passa ora da un livello basso ad un livello più alto).

Quando ci pensiamo, il fenomeno "agente causale" è caratterizzato dalla quantità della forza della natura che *cade* da un livello superiore ad un livello inferiore (nella turbina, questa è la quantità di acqua che scorre dall'alto verso il basso; in una pompa elettrica, la quantità di elettricità, cioè la carica, cade da un livello elettrico elevato ad uno inferiore). Il fenomeno "causato o forzato", invece è caratterizzato dalla quantità della forza della natura che viene *pompata* da un livello inferiore ad un livello superiore (nella turbina, si tratta della quantità di moto rotatorio che va da bassa ad alta velocità di rotazione; nella pompa d'acqua elettrica, viene pompata l'acqua).

➤ **T** **Interazione di forze della natura nei trasferitori: Diagrammi di processo**

In una pompa per l'acqua a motore elettrico ideale, interagiscono due forze della natura: l'acqua e l'elettricità. L'elettricità è *l'agente trainante*, l'acqua è *quello guidato* (è quella che subisce l'azione). La pompa è il trasformatore.

Quando l'elettricità aziona un altro agente in un processo di accoppiamento, lo fa perché passa da un livello elettrico elevato ad uno più basso. L'acqua, viceversa, viene spinta, cioè pompata, da un livello inferiore (pressione) ad uno superiore. Possiamo descrivere questa semplice storia di interazione nel seguente *diagramma di processo*:



I diagrammi di processo sono una rappresentazione astratta del nostro immaginario di come funzionano le forze della natura. Abbiamo riquadri per i trasferitori, frecce (rosse) che entrano ed escono per rappresentare flussi di quantità simil-fluido, e frecce verticali (blu) che indicano i livelli o le densità.

Se vogliamo quantificare l'interazione (accoppiamento) di due forze della natura, dobbiamo pensare ad una nuova quantità. Questa quantità è l'energia. Diciamo che il processo di far avvenire o di causare i processi *rende disponibile energia*; il processo causato o azionato *utilizza energia*. La potenza dell'accoppiamento è descritta da quanta energia viene scambiata dall'agente causale alla forza causata ogni secondo. Questa quantità è definita come la *potenza del processo*.

Finora, nelle Figg. 2 e 6, abbiamo usato un simbolo "buffo", una specie di simbolo come quello che vediamo nei fumetti quando l'artista vuole indicare che "qualcosa di violento" sta accadendo: una stella colorata come metafora di una "esplosione". In Fig. 7, ora usiamo un simbolo più "scientifico", frecce verdi che puntano verso il

basso o verso l'alto per rendere disponibile energia (ad un certo tasso) o, rispettivamente, per usarla.

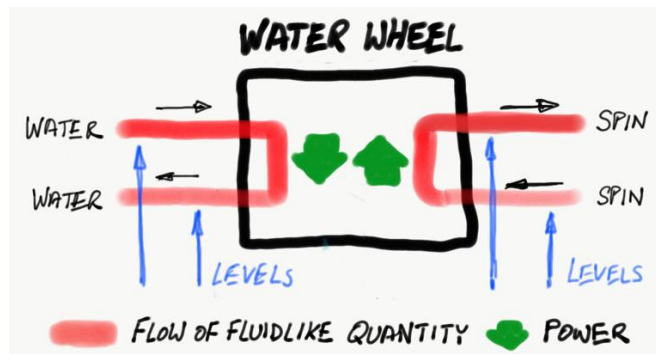


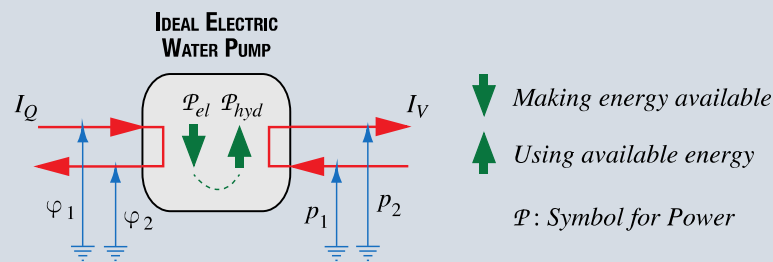
Figura 7: Rappresentazione astratta dell'interazione dell'acqua (come forza della natura) con il moto rotatorio (come altra forza della natura), come in Fig. 5. Qui, abbiamo sostituito la stella colorata al centro con frecce verdi che indicano la rapidità con cui l'energia è resa disponibile e utilizzata. In questa forma, la figura è quello che chiamiamo un diagramma di processo delle interazioni fra forze della natura. Più diagrammi possono essere uniti per rappresentare catene di processi.

Ci sono alcuni aspetti degni di nota nel rappresentare l'interazione delle forze della natura in questo modo. In primo luogo, l'esempio che abbiamo usato qui - l'interazione dell'acqua e del moto rotazionale - si presume che sia avvenuto idealmente. Ciò significa che tutta l'energia resa disponibile dalla caduta dell'acqua è stata utilizzata per la rotazione da un basso livello ad un alto livello rotatorio. Sappiamo che questo non è il modo in cui le cose funzionano in natura. Torneremo su questo importante punto, sull'imperfezione degli accoppiamenti, più tardi.

In secondo luogo, avremmo potuto rappresentare un sistema costituito da acqua in caduta, turbina e generatore elettrico rotante e "confezionarlo" in un unico riquadro o accoppiatore come in Fig. 6. In questo caso, non rappresenteremmo più la turbina. Ci sarebbe la caduta dell'acqua che alimenta direttamente l'elettricità. Siamo perfettamente autorizzati a fare questo: la scienza è spesso l'arte di scegliere come guardare la realtà. Se si addice allo scopo di abbreviare la spiegazione, questo "confezionamento" è quello che faremo.

➤ T Rendere disponibile e utilizzare l'energia: Potenza di un processo

Le azioni di messa a disposizione di energia o di utilizzo dell'energia disponibile possono essere facilmente rappresentati nei diagrammi di processo.



Le frecce spesse verticali sono usate per indicare la rapidità con cui l'energia è resa disponibile o utilizzata. I_Q e I_V sono i simboli rispettivamente dei flussi di quantità di elettricità o di fluido; ϕ e p simboleggiano, rispettivamente, il livello elettrico e la pressione.

Portatori di energia e catene di processi

Non siamo pronti per creare descrizioni di catene di processi - come avviene in natura e nei sistemi artificiali - e quindi cerchiamo di capire il ruolo dell'energia e dei portatori di energia da un altro punto di vista. Rivediamo la discussione sul "confezionamento" di un sistema costituito da una catena di acqua in caduta, una turbina e un generatore elettrico rotante. Quando un singolo trasferitore è "confezionato", sembra che l'acqua stia azionando direttamente l'elettricità. Proviamo ora a "spacchettare" questo sistema per mostrare cosa sta succedendo al suo interno.

Abbiamo due trasferitori: la turbina ad acqua e il generatore. La turbina accoppia il flusso dell'acqua alla rotazione, e il generatore accoppia il flusso della rotazione al flusso della carica elettrica.

La descrizione della turbina assume la forma visualizzata in Fig. 6. L'acqua passa da un livello alto a uno basso e mette a disposizione la sua energia per azionare la rotazione (quantità di moto rotatorio) da una bassa velocità di rotazione (in realtà da zero, dal suolo dove è collegata la turbina) ad una velocità di rotazione elevata (dell'albero della turbina). Ovviamente, l'energia resa disponibile deve essere

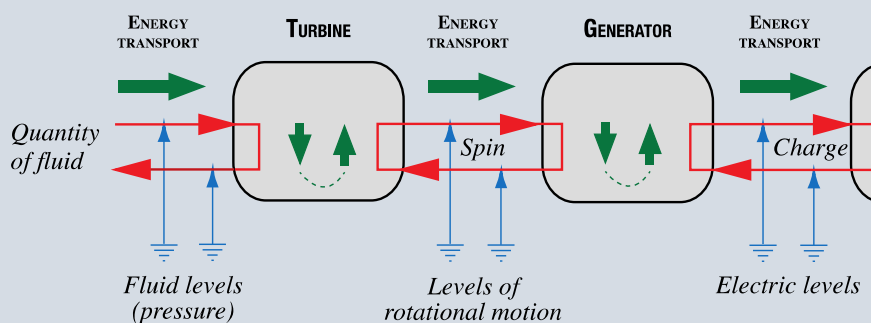
stata portata alla turbina dall'acqua: questo è il ruolo dell'acqua come portatore di energia.

La rotazione ha "raccolto" l'energia nel trasferitore. È logico supporre che la rotazione trasporti l'energia dalla turbina ad acqua al generatore elettrico ad essa collegato attraverso l'albero. Questo significa che noi vediamo la rotazione come il vettore di energia del moto rotazionale. Rotazione ed energia entreranno nel generatore dove quest'ultima viene "scaricata", cioè resa disponibile per l'accoppiamento della rotazione con l'elettricità.

Nel generatore, la carica elettrica passa da un livello elettrico basso ad uno alto. Sfrutta l'energia resa disponibile dal processo di rotazione e la trasporta lungo il suo percorso verso un luogo dove farà funzionare un dispositivo, magari un motore, delle lampade o un riscaldatore elettrico. In altre parole, proprio come l'acqua o la rotazione, la carica elettrica è un portatore di energia. Possiamo rappresentare quest'idea come in Fig. 4.

➤ T Portatori di energia e flusso di energia nei diagrammi di processo

Quando un certo numero di dispositivi - naturali o tecnologici - operano in una catena di processi, l'energia viene trasportata da un dispositivo all'altro. Ecco un esempio di una catena che va da una turbina a un generatore elettrico a una macchina elettrica.



L'energia non scorre da sola, ma deve essere trasportata. I portatori possono essere *quantità di fluido (acqua)*, *quantità di moto rotatorio (rotazione)*, quan-

tità di elettricità (carica elettrica), ecc. La maggior parte dei vettori sono invisibili (quantità di elettricità, quantità di calore (calorico), rotazione, quantità di movimento...).

I portatori di energia fluiscono da livelli più alti a livelli più bassi o sono pompati da livelli più bassi a livelli più alti all'interno dei dispositivi, mentre entrano ed escono dai dispositivi senza cambiare i livelli. Tutto questo è visibile *nei diagrammi di processo* come quello precedente.

Da tutto quello che abbiamo detto sui portatori di energia e sull'energia, ha senso supporre che un portatore trasporti tanta più energia quanto più alto è il suo livello di intensità. Se l'acqua scorre a un livello alto verso un mulino ad acqua, porterà più energia. Se la carica elettrica fluisce verso un dispositivo elettrico con un livello elettrico alto (tensione elettrica), porterà con sé più energia.

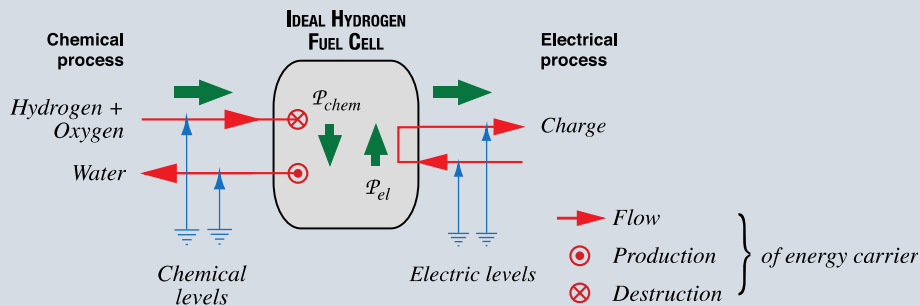
L'idrogeno come vettore energetico e agente nelle reazioni chimiche

Come abbiamo detto prima, anche l'idrogeno è un vettore energetico. Ed è un agente chimico. Può trasportare energia da e verso i luoghi, può rendere disponibile l'energia quando reagisce con l'ossigeno e può utilizzare o prelevare energia quando viene prodotto con l'aiuto dell'elettricità nel processo chiamato elettrolisi (vedi pagina 26).

Insieme all'ossigeno, l'idrogeno è in tensione con l'acqua - questo è il modo in cui l'idrogeno è potente, ed è per questo che l'acqua viene prodotta quando l'idrogeno e l'ossigeno reagiscono. Nella reazione, l'energia è resa disponibile e può essere utilizzata per produrre calore (quantità di calore) quando l'idrogeno viene bruciato, o per pompare il portatore elettrico di energia (carica elettrica) – per questo si utilizzano le celle a combustibile.

➤ T Uso dell'idrogeno in una cella a combustibile

La reazione dell'idrogeno con l'ossigeno che produce acqua rende disponibile l'energia. In una cella a combustibile, l'energia resa disponibile viene utilizzata per pompare la carica elettrica da un livello elettrico inferiore ad un livello elettrico superiore, creando una tensione elettrica.



Quando l'idrogeno reagisce con l'ossigeno gassoso, i due gas scompaiono. Al loro posto appare l'acqua. Come risultato della reazione, la carica elettrica viene pompata.

Si noti che c'è qualcosa di diverso tra i processi che coinvolgono acqua, elettricità, o rotazione e quelli che coinvolgono reazione chimiche. Nel primo caso, i portatori di energia entrano ed escono dai trasferitori. Le stesse quantità entrano ed escono. Se guardiamo ad una cella a combustibile invece ci sono diverse sostanze che entrano e che escono. L'idrogeno e l'ossigeno fluiscono in entrata (Fig. 2) e l'acqua fluisce in uscita. In altre parole, in questa particolare reazione, idrogeno e ossigeno scompaiono e appare l'acqua. L'idrogeno e l'ossigeno vengono distrutti e si produce acqua.

La tensione tra la combinazione di idrogeno e ossigeno da un lato e l'acqua dall'altro è così alta che spontaneamente non può avvenire il contrario: l'acqua non decade spontaneamente in idrogeno e ossigeno. Per ottenere questo decadimento, c'è bisogno della forza dell'elettricità che fornisca energia.

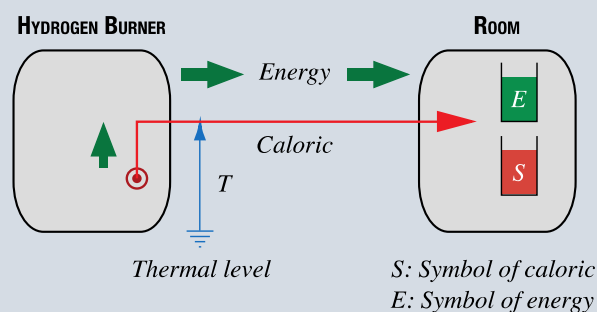
Calorico (quantità di calore) come portatore di energia e agente termico

Il calore - o meglio, la quantità di calore, che un tempo si chiamava *calorico*, quando la scienza del calore si sviluppò per la prima volta più di 200 anni fa – è un

vettore energetico. Quando il calore scorre da un oggetto all'altro, porta con sé energia.

➤ T Calorico come portatore di energia

Quando il calore (quantità di calore, il portatore di energia nei fenomeni termici) prodotto dalla combustione di un combustibile viene utilizzato per riscaldare una stanza, esso fluisce dal bruciatore alla stanza e viene immagazzinato nella stanza.



Il calore trasporta nella stanza l'energia che è stata usata per produrlo, qui si accumula anche l'energia.

Dobbiamo distinguere la quantità di calore dalla sua intensità. L'intensità o *livello* del portatore è la *temperatura*; la differenza di temperatura è la *tensione termica*. In Fig. 2, il calorico sarebbe questa "sostanza rossa" all'interno dei contenitori, e la temperatura, cioè l'intensità del calore: sarebbe il livello di calore all'interno di un corpo dove è immagazzinato.

Un altro aspetto importante dei processi termici è il significato della differenza di temperatura. Infatti, il nostro corpo è attrezzato per associare le esperienze corporee alle differenze di temperatura: sono quelle che chiameremmo *tensioni termiche*. Le tensioni termiche hanno un ruolo analogo alle tensioni idrauliche (differenze di pressione), alle tensioni elettriche (differenze di potenziale elettrico), alle differenze di luminosità o alle differenze di velocità degli oggetti in movimento.

Temperatura

La temperatura misura semplicemente *quanto è caldo qualcosa*. Metaforicamente parlando, la temperatura è il livello termico – è alto o basso – e le differenze di temperatura sono differenze di livello o *tensioni*. Le tensioni termiche *azionano* i processi termici o *sono stabilite* dai processi termici.

Come tutti i portatori di energia, il flusso calorico può fluire e può essere immagazzinato. Quando è all'interno dei materiali, li rende caldi o li fa espandere (come l'aria) o li scioglie o li fa evaporare (quando il ghiaccio si trasforma in acqua e l'acqua in vapore).

Come tutti i vettori energetici, il calorico può rendere disponibile l'energia (affinché altre cose accadano) quando scorre dall'alto verso il basso, da un luogo caldo ad un luogo freddo. Come tutti i vettori energetici, può essere pompato dal basso verso l'alto (da freddo a caldo) quando è disponibile energia - questo avviene nelle pompe di calore.

Il principio di funzionamento dei motori termici spiega come funzionano i motori termici. Sadi Carnot ha paragonato il funzionamento di un motore a vapore a quello di una cascata che aziona una ruota ad acqua (1824; vedi Fig. 8). Questa analogia è appropriata e utile. Come disse Carnot:

Secondo i principi stabiliti al momento attuale, possiamo paragonare con sufficiente precisione la forza motrice del calore a quella di una cascata d'acqua La forza motrice di una cascata di acqua dipende dalla sua altezza e dalla quantità d'acqua; anche la forza motrice del calore dipende dalla quantità di calore utilizzato, e da ciò che si può chiamare, da ciò che di fatto chiameremo, l'altezza della sua caduta, cioè la differenza di temperatura dei corpi tra i quali si effettua lo scambio di calore. Nella caduta dell'acqua la forza motrice è direttamente proporzionale alla differenza di livello tra il serbatoio superiore e quello inferiore. Nella caduta del calorico la forza motrice indubbiamente aumenta con la differenza di temperatura tra il corpo caldo e quello freddo; ma non sappiamo se è proporzionale a questa differenza.

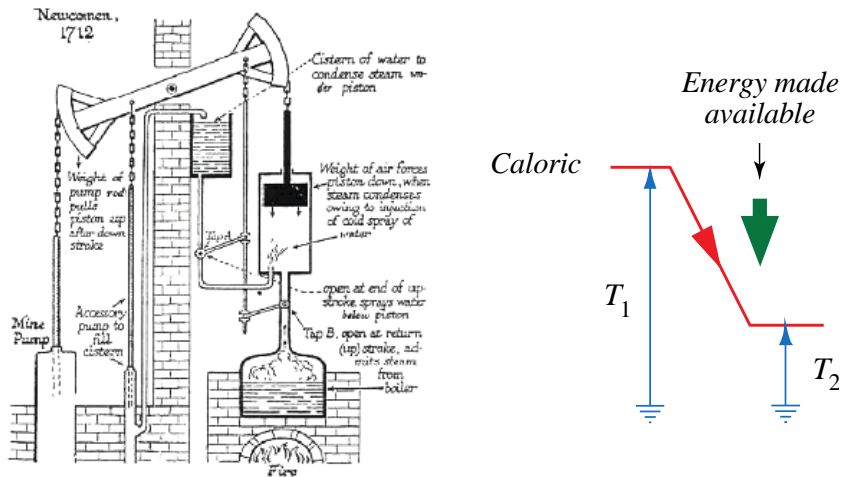
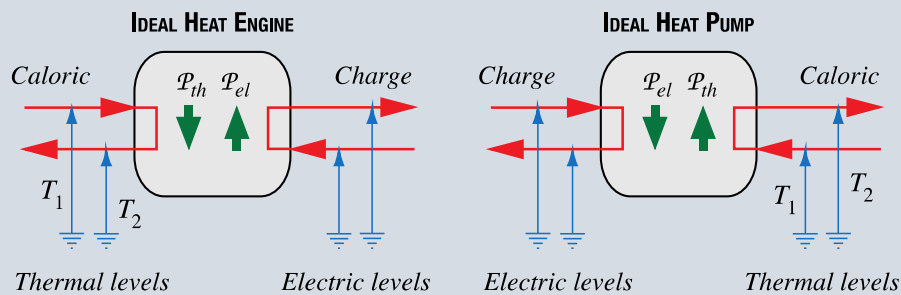


Figura 8: L'immagine di Sadi Carnot della cascata per il funzionamento di un motore termico. Il calore è prodotto in un forno, che appare ad alta temperatura. Con l'aiuto del vapore, viene poi trasportato in un luogo freddo - il più freddo - dove il calore viene emesso nell'ambiente circostante. Nella caduta del calorico attraverso una tensione termica, è resa disponibile l'energia.

➤ T Il calore aziona i motori e può essere pompato

Quando il calore cade da un luogo caldo a uno freddo, mette a disposizione l'energia che viene utilizzata per guidare o alimentare un altro processo. Questo è il principio di base dei motori termici. Otteniamo un motore termico ideale se tutta l'energia messa a disposizione viene utilizzata per guidare il processo desiderato (tipicamente meccanico o elettrico).



In alternativa, se viene resa disponibile dell'energia, è possibile pompare il calore. Questo avviene nelle pompe di calore e nei frigoriferi: il calore viene spostato da un luogo freddo a uno caldo. Le pompe di calore sono utilizzate per

riscaldare i materiali, i frigoriferi sono costruiti per creare un luogo freddo in un ambiente caldo.

➤ T Temperatura e temperature assolute

Se vogliamo capire meglio i motori termici (motori a vapore, turbine a gas, motori a combustione nelle automobili) o le pompe di calore, dobbiamo sapere come esprimere le temperature. Le temperature devono sempre essere considerate nella *scala assoluta Kelvin*. C'è un punto al di sotto del quale le temperature non possono andare: si trova a -273°C e a questa temperatura viene dato un valore di 0 K (zero Kelvin).

Il punto di congelamento dell'acqua è di 273 K, la temperatura ambiente è di circa 300 K, l'acqua bolle a circa 370 K, il rame fonde a 1360 K, l'acciaio a 1780 K, e la temperatura superficiale del nostro Sole è di circa 6000 K. Una tipica centrale nucleare funziona tra le temperature di 600 K nel reattore e 300 K dell'ambiente.

La relazione tra calore e energia dipende dalla temperatura assoluta alla quale si verifica il fenomeno. Ecco perché abbiamo bisogno di conoscere la scala Kelvin quando si considerano i processi termici per l'ingegneria energetica.

Perché non possiamo usare tutta l'energia quando bruciamo un carburante

A differenza della maggior parte dei vettori energetici, come i prodotti chimici, *il calore può essere prodotto*. Quando sfregiamo le mani, quando l'elettricità scorre attraverso un filo, quando l'acqua o l'olio scorrono attraverso i tubi, quando i pneumatici strisciano sull'asfalto, quando i carburanti bruciano e quando la luce solare viene assorbita dai materiali, si produce calore.

Molto importante, la produzione di calore richiede sempre energia: un processo precedente deve aver reso disponibile l'energia. Questa è la risposta alla domanda sul perché non possiamo usare tutta l'energia per far funzionare i motori quando bruciamo un carburante. Ora, diamo un'occhiata più da vicino a cosa significa quando produciamo calore.

Abbiamo già parlato di un caso in cui si produce calore – bruciando l'idrogeno. Per capire meglio cosa significa, consideriamo un riscaldatore elettrico. Si tratta di un

semplice dispositivo in cui la carica elettrica fluisce attraverso fili che si scaldano ed emettono calore in una stanza o nell'acqua da riscaldare.

Quando la carica elettrica passa attraverso un conduttore, passa da un livello elettrico elevato ad un livello inferiore. Prima però deve essere stata pompata ad un livello alto da un generatore, dalle celle solari, da una batteria o una cella a combustibile, tutto ciò che può stabilire tensioni elettriche. Come conseguenza del "pompaggio", la carica elettrica assorbe energia. Questa energia sarà resa nuovamente disponibile quando la carica passa attraverso un filo, spinta dalla tensione elettrica lungo il condotto (vedi Fig. 4).

Processi che producono calore

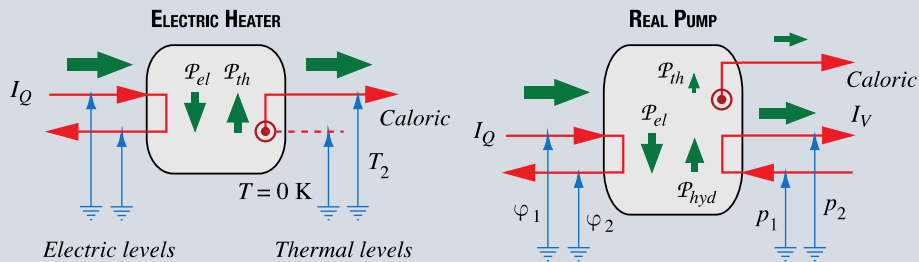
1. Bruciare combustibili.
2. Passaggio di carica elettrica attraverso i fili.
3. Sfregamento; tutti i processi meccanici in cui si ha attrito.
4. Assorbimento della luce solare.
5. Fluidi che scorrono attraverso dei tubi.
6. Miscelazione di materiali; miscelazione di fluidi a temperature diverse.
7. Conduzione del calore attraverso i materiali durante il trasferimento di calore.

L'energia messa a disposizione può spesso essere utilizzata per qualche scopo, come ad esempio per alimentare il movimento. Quando però la carica fluisce attraverso un filo, succede che l'energia disponibile provoca anche la produzione di calore.

Il calore prodotto nel filo rende il filo caldo che porta il calore ad essere emesso nell'ambiente. Il calore porta l'energia utilizzata per produrlo nell'ambiente. Questo significa che se produciamo calore, il calore deve sempre finire nell'ambiente, almeno alla fine, e questo porta con sé una certa quantità di energia. Si dice che questa energia sia energia *persa*.

➤ T Produrre calore

Il calore può essere prodotto se l'energia è stata resa disponibile. Spesso, questo è un sottoprodotto indesiderato dei processi desiderati (come in una pompa reale).



Allora, cosa succede quando bruciamo un carburante? Fondamentalmente, dal punto di vista calorico, è lo stesso di quando l'elettricità scorre attraverso un filo. L'energia resa disponibile dalla reazione viene utilizzata quasi esclusivamente per produrre calore (un po' di essa verrà utilizzata per espandere l'aria nella fiamma). Se si vuole, e si progetta, il calore può guidare il movimento in un motore termico.

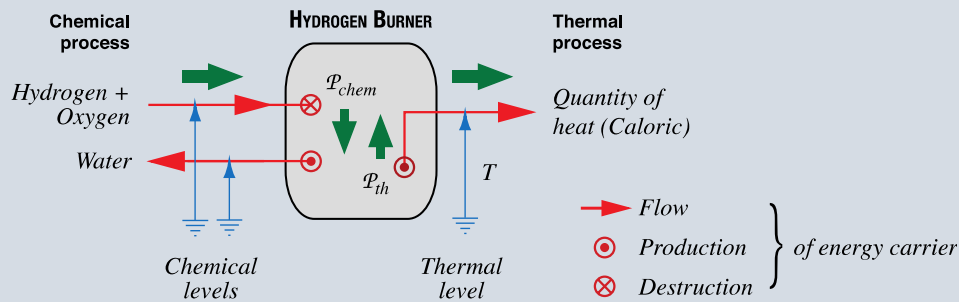
Di nuovo, anche se facciamo uso del calore che è stato prodotto per il riscaldamento di una stanza, alla fine il calore deve fluire nell'ambiente, portando con sé la sua energia che andrà perduta. Ricordate, abbiamo dovuto pagare per produrre calore con energia che avrebbe potuto essere usata in modo più saggio.

Il significato di perdita diventa ancora più chiaro se consideriamo il caso in cui bruciamo un combustibile per azionare un motore termico. Produciamo calore ad una temperatura più o meno elevata. Il calore viene poi utilizzato per alimentare il movimento o l'elettricità. Questo significa che il calore proveniente dal bruciatore a questa temperatura più o meno elevata cade attraverso il motore ad una temperatura più bassa che possiamo assumere essere la temperatura dell'ambiente. Il calore viene poi emesso nell'ambiente a questa temperatura più bassa.

Il calore proveniente dal bruciatore porta con sé un po' di energia. Quando scende a temperatura più bassa, una parte dell'energia viene messa a disposizione per far funzionare il motore. L'energia messa a disposizione viene quindi utilizzata dal processo desiderato alimentato dal motore.

➤ T Bruciare l'idrogeno per produrre acqua e calore (quantità di calore)

La reazione dell'idrogeno con l'ossigeno che produce acqua può avvenire attraverso la combustione. In questo caso, il calore viene prodotto con l'aiuto dell'energia resa disponibile dalla reazione.



Quando l'idrogeno gassoso reagisce con l'ossigeno gassoso, i due gas scompaiono. Al loro posto appare l'acqua. Inoltre, appare la *quantità di calore* (detto *calorico*), che viene prodotta proprio come l'acqua. Successivamente il calore lascia il bruciatore portando con sé dell'energia.

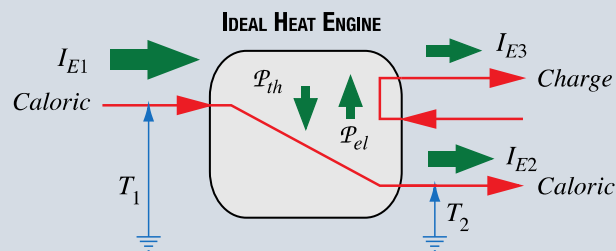
Quello che ci interessa è che questa è solo una "parte" dell'energia che proviene dal bruciatore, in prima battuta. Ricordate che il calore ha bisogno di lasciare il motore e fluire nell'ambiente attraverso il radiatore. Poiché la temperatura dell'ambiente non è in realtà zero assoluto - si tratta di circa 300 unità standard (300 Kelvin) di temperatura al di sopra dello zero assoluto - il flusso calorico che fluisce nell'ambiente porta energia con sé, la quale viene poi dispersa. Il flusso calorico ad un certo livello - ad una certa temperatura - porta sempre con sé energia: più alta è la temperatura, più energia viene trasportata.

Quindi, una risposta al motivo per cui non possiamo usare tutta l'energia proveniente dalla combustione ha a che fare con il fatto che c'è un livello minimo assoluto per la temperatura, la cosiddetta temperatura dello zero assoluto, e il nostro ambiente è ben al di sopra di questo livello. Questo significa che ogni volta che noi, o i nostri motori, produciamo una certa quantità di calore, alla fine di tutto, questo porterà con sé una certa quantità di energia nell'ambiente.

Questa perdita non ha nulla a che fare con il fatto che il motore non sia ideale. Infatti, come si è detto, il motore funziona in modo ideale: l'energia resa disponibile dalla caduta di calore nel motore è tutta utilizzata dal processo che è alimentato dal motore.

➤ T Flussi di potenza e di energia per un motore termico ideale

Il calore proveniente da un bruciatore entra in un motore termico ad alta temperatura T_1 , scende in T_2 e poi lascia il motore. Nella caduta, rende disponibile l'energia ad un tasso P_{th} .



L'energia resa disponibile è tutta utilizzata, quindi abbiamo $P_{el} = P_{th}$. Tuttavia, poiché il calore in uscita dal motore porta con sé energia, l'energia a disposizione del portatore fatto funzionare dal motore è solo la differenza di energia trasportata dentro e fuori dal motore dal calore stesso: $I_{E3} = I_{E1} - I_{E2}$.

La situazione non è diversa da quella di una centrale idroelettrica in montagna (Fig. 9). Immaginate l'acqua che arriva alle turbine dalle montagne a 1500 m sul livello del mare. La centrale elettrica si trova a 750 m sul livello del mare. L'energia messa a disposizione dall'acqua che cade da 1500 m a 750 m è quindi proporzionale al dislivello, cioè a 750 m.

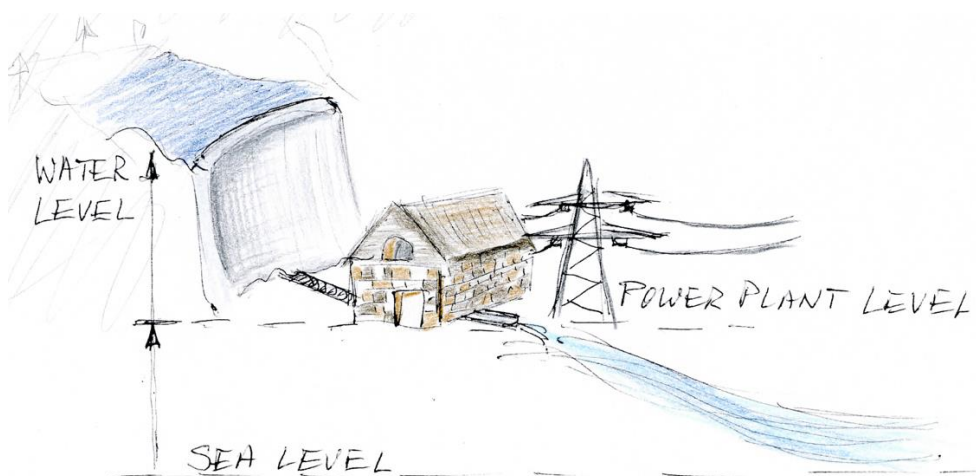


Figura 9: Se si considerano le altezze delle montagne e delle valli rispetto al livello del mare, solo una parte dell'energia che potrebbe essere resa disponibile dall'acqua scendendo dalle montagne fino al mare è resa disponibile in una centrale elettrica che si trovi in una valle a metà della quota rispetto al livello del mare.

L'acqua che esce dalla centrale finirà per riversarsi in mare. Teoricamente, almeno, potremmo sfruttare la caduta dell'acqua da 750 m fino al livello del mare, cosa che renderebbe nuovamente disponibile tanta più energia di prima. Se non possiamo sfruttare queste circostanze, si perde il cinquanta per cento dell'energia dell'acqua. Anche in questo caso, questa perdita non ha nulla a che vedere con il fatto che la centrale elettrica sia ideale o meno. Dopo tutto, l'impianto utilizza il cento per cento dell'energia resa disponibile nella caduta dell'acqua dalle montagne a valle.

Finalmente, possiamo descrivere la differenza tra l'utilizzo dell'idrogeno in una cella a combustibile ideale e invece la combustione dell'idrogeno in un motore termico ideale. Per semplificare, si supponga che il motore termico ideale azioni un generatore elettrico ideale, quindi il risultato sia elettricità, proprio come nel caso della cella a combustibile ideale.

Prendiamo una quantità di idrogeno che rende disponibile un'unità di energia quando reagisce con l'acqua - non importa se questo avviene in una cella a combustibile o per combustione diretta. In entrambi i casi viene messa a disposizione un'unità di energia.

Ora, se l'idrogeno viene utilizzato in una cella a combustibile ideale, il cento per cento dell'energia resa disponibile sarà utilizzata per il pompaggio dell'elettricità, quindi, la quantità di elettricità che scorre porta con sé il cento per cento dell'energia del combustibile.

Se invece bruciamo la quantità di idrogeno che ci dà un'unità di energia elettrica, e se la combustione avviene al doppio della temperatura assoluta dell'ambiente (circa 600 Kelvin), solo la metà dell'energia sarà resa disponibile; l'altra metà finirà nell'ambiente insieme al calorico prodotto. In altre parole, l'elettricità alimentata dal motore termico ideale insieme al generatore ideale riceve solo il cinquanta per cento dell'energia resa disponibile dall'idrogeno.

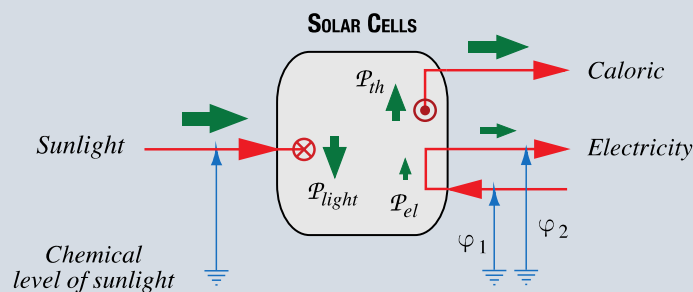
Un sistema a celle a combustibile idrogeno

Parliamo ora in dettaglio di un possibile sistema FCH, come quello abbozzato in Fig. 1. Conosciamo i portatori di energia, i livelli (intensità) e le tensioni, e l'energia messa a disposizione, usata e trasportata dai portatori. Per la nostra discussione, i portatori importanti sono la luce, l'acqua, l'elettricità, il calore, l'idrogeno e il moto.

Un impianto solare-elettrico. Un sistema di energia rinnovabile per la tecnologia FCH inizia tipicamente con il nostro Sole. Se vogliamo usare l'elettricità per la produzione di idrogeno, una via diretta è rappresentata dalle celle fotovoltaiche, le quali, quando esposte alla luce solare, stabiliscono una tensione elettrica che alimenta i successivi processi.

➤ T Celle solari

La luce del sole trasporta l'energia che viene resa disponibile per alimentare un processo elettrico e la produzione di calore nelle celle solari (celle fotovoltaiche).



Le celle solari, che coinvolgono luce, elettricità e calore come vettori e agenti, funzionano come segue. La luce solare trasporta molta energia che viene resa disponibile quando la luce colpisce le celle solari e viene assorbita (celle fotovoltaiche o celle PV). La luce scompare come una sostanza chimica in una reazione, e mette a disposizione la sua energia. L'energia viene utilizzata per separare le cariche positive e quelle negative nelle celle, creando così una tensione elettrica. Se previsto, la carica fluirà attraverso un circuito come quello che collega una cella elettrolitica - dove si produce idrogeno dall'acqua - al nostro impianto fotovoltaico.

Questa storia ha lasciato fuori un aspetto importante: le celle solari non sono dispositivi ideali. Esse utilizzano solo una parte dell'energia resa disponibile dalla luce da loro assorbita. La frazione utilizzata per alimentare l'elettricità è di circa il 20%. Il resto dell'energia disponibile alimenta un processo che preferiremmo non avere ma che non possiamo impedire che accada: la produzione di calorico. Di solito, il calorico viene immesso direttamente nell'ambiente dove riversa anche l'energia che porta via con sé.

Idrogeno dall'acqua. Ora che abbiamo un impianto solare-elettrico, possiamo considerare il prossimo passaggio per alimentare qualche processo utile nelle nostre case, nell'industria o nei trasporti. Abbiamo bisogno di idrogeno che può essere prodotto dall'acqua.

Per ottenere idrogeno dall'acqua, dobbiamo far avvenire nella direzione opposta la reazione spontanea che creerebbe acqua dall'idrogeno e dall'ossigeno - per questo abbiamo bisogno di energia resa disponibile dall'elettricità. Il processo si chiama elettrolisi.

L'elettrolisi può essere dimostrata abbastanza facilmente in cucina. Abbiamo bisogno di una batteria, dei fili elettrici, due elettrodi ottenuti da una matita (semplicemente le mine delle matite), un bicchiere d'acqua, sale, e alcuni "coccodrilli" per fissare i fili agli elettrodi di grafite. Se immergiamo gli elettrodi in acqua leggermente salata e li colleghiamo ai due poli della batteria, vedremo presto delle bolle che salgono da entrambi gli elettrodi (Fig. 10). Uno dei due gas che appaiono è idrogeno, l'altro è ossigeno. Possiamo raccogliere l'idrogeno e stoccarlo per un uso successivo. Naturalmente, per le applicazioni reali abbiamo bisogno di un grande impianto elettrolitico dove ciò viene fatto professionalmente e sono presenti dei mezzi per il trasporto dell'idrogeno ai clienti.

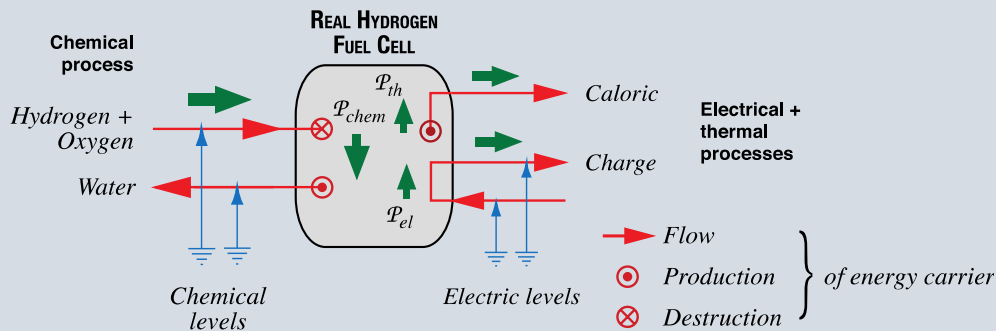


Figura 10: L'idrogeno può essere prodotto in cucina con l'aiuto di una batteria, due mine delle matite come elettrodi e un po' di acqua salata.

Idrogeno dall'acqua nelle celle a combustibile-elettricità. Dove c'è bisogno di energia, sia per il riscaldamento, che per il trasporto o altro, possiamo sfruttare l'energia dell'idrogeno. Ora sappiamo che bruciarlo non è la strada da seguire, nemmeno se vogliamo produrre calore per il riscaldamento.

➤ T Le celle reali a combustibile idrogeno

Una cella reale a combustibile (idrogeno) viene alimentata con idrogeno e ossigeno. La loro reazione aziona un processo elettrico e uno termico in parallelo.



In una cella a combustibile reale, come in tutti i processi reali, si produce calorico anche se non vogliamo necessariamente che questo accada. Se introduciamo idrogeno e ossigeno nella cella, le sostanze reagiscono e rendono disponibile energia. In una cella a combustibile reale, l'energia disponibile viene divisa e alimenta due processi in parallelo: quello di pompaggio della carica elettrica e quello di produzione di calore. In una casa, potremmo utilizzare sia l'elettricità che il calore per alimentare dispositivi di illuminazione e per il riscaldamento.

Alimentare elettricamente una pompa di calore per il riscaldamento di una casa.

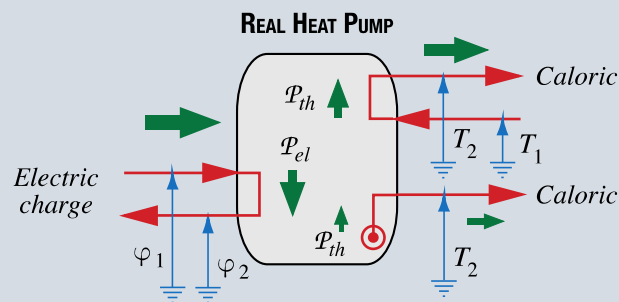
Supponiamo che, in una casa, tutto quello che vogliamo in un certo momento sia il riscaldamento. Da tutto ciò di cui abbiamo discusso finora, è chiaro che non dobbiamo bruciare l'idrogeno: dovremmo usarlo in una cella a combustibile e utilizzare l'elettricità per azionare una pompa di calore.

Una pompa di calore reale funziona come una pompa dell'acqua reale. L'elettricità rende disponibile l'energia. Parte di essa sarà utilizzata per prendere calore da un luogo più freddo al di fuori della casa da riscaldare, tipicamente dall'aria esterna o dal terreno, e pomparlo alla temperatura desiderata che potrebbe essere la temperatura dell'acqua utilizzata per riscaldare gli ambienti.

A seconda della qualità della pompa di calore e della temperatura esterna, potremmo pompare da tre a cinque volte più calore di quello che otterremmo generandolo elettricamente. Se a questo aggiungiamo il calore prodotto dalla cella a combustibile, potremmo ottenere una quantità di calore da due a tre volte superiore a quello che si otterrebbe se avessimo bruciato direttamente l'idrogeno.

➤ T Pompe di calore

Una pompa di calore reale utilizza un processo elettrico per pompare il calore da un luogo freddo a uno caldo. Allo stesso tempo, si produce calore. In questo modo si ottiene molto più calore che se l'avessimo prodotto elettricamente o bruciando un combustibile.



Perché le FCH? Perché non usare direttamente il Sole?

Il sistema FCH qui descritto in dettaglio è abbastanza interessante e, fondamentalmente, funziona. Ma è il modo migliore di procedere? La prima parte della catena di processi descritti in Fig. 1 - dal fotovoltaico solare all'idrogeno - non è molto efficiente. Se il fotovoltaico avesse un'efficienza di circa il 15%, e l'elettrolisi dell'acqua poco più del 60%, l'efficienza complessiva di questa parte sarebbe di circa il 10%. Se poi usassimo l'idrogeno per produrre corrente elettrica, potremmo ottenere un'efficienza di appena il 5%, dal Sole alla presa elettrica di una casa.

Se usassimo il fotovoltaico direttamente per produrre corrente elettrica, raggiungeremo un'efficienza dal 10 al 20%, molto meglio del sistema FCH-elettrico. E per il riscaldamento, sembra ancora peggio. Se vogliamo acqua calda per la casa, l'efficienza di un sistema solare termico per l'acqua calda raggiungerà facilmente il 40%!

Il punto è che l'efficienza non è tutto. Dobbiamo essere in grado di fornire energia per fare ciò che dobbiamo fare nel giusto tasso, il che potrebbe significare una potenza elevata, e al momento giusto, come di notte o in inverno, in paesi che si trovano lontani dall'equatore. I combustibili sono ancora insuperabili nel fornire

energia ad alto tasso e in momenti in cui il sole non splende abbastanza intensamente.

Quindi, in estate, in un paese dove in inverno fa piuttosto freddo, non abbiamo bisogno di una tecnologia a celle a combustibile idrogeno per ottenere acqua calda per una famiglia, e non ne abbiamo bisogno per ottenere elettricità. Tuttavia, se pensiamo ad altre applicazioni come i trasporti, o a momenti in cui il fabbisogno di riscaldamento è elevato e il sole è debole, la tecnologia FCH potrebbe essere una delle migliori soluzioni a nostra disposizione in futuro.