



scienza attiva®

# IDROGENO E CELLE A COMBUSTIBILE

**Massimo Santarelli**

DENER - Dipartimento di Energetica

Politecnico di Torino





## Progetto "Scienza Attiva"

# Tecnologie dell'Idrogeno e delle Celle a Combustibile

**Prof. Massimo Santarelli**  
**Dipartimento di Energetica, Politecnico di Torino**

### Premessa

Con il periodico ritorno di discussioni e dibattiti accesi sul problema dell'esaurimento dei combustibili fossili e del concomitante e crescente impatto ambientale, sempre più spesso si ascoltano proposte di affrontare tali problemi ricorrendo all'utilizzo diffuso dell'idrogeno, suffragate dalle argomentazioni più diverse e, spesso, velleitarie. Se si aggiunge che sull'utilizzazione energetica dell'idrogeno si è assistito ad un significativo clamore mediatico, diventa spesso difficile riflettere con il rigore che invece sarebbe necessario ed esprimere opinioni meditate per una materia complessa e così rilevante per la generazione attuale e per quelle future.

A prescindere dall'entità del successo che avrà nei prossimi decenni la diffusione delle tecnologie dell'idrogeno, i ricercatori hanno il dovere di fornire all'opinione pubblica dati e informazioni più oggettivi possibile, riducendo al minimo le incertezze e privilegiando la razionale esposizione dei fatti.

È questo l'intento con cui si imposta il dialogo con gli studenti sul tema delle Tecnologie dell'Idrogeno e delle Celle a Combustibile.

Nel dettaglio, si pone particolare enfasi a un dispositivo di conversione energetica, le Celle a Combustibile appunto, che rappresentano una innovazione tecnologica di sicuro interesse grazie alle loro elevate efficienze di trasformazione, e che quindi, a opinione dell'Autore, rappresentano un tema meno controverso rispetto a quello delle tecnologie dell'idrogeno.

### Contesto

L'idrogeno può essere considerato come uno degli elementi che concorrono alla soluzione dei problemi energetico-ambientali che le moderne società industrializzate, ma anche le economie di transizione, si trovano ad affrontare nel XXI Secolo. L'idrogeno è un *vettore energetico*, complementare al vettore elettrico. Come tale, può essere utilizzato come un elemento del ciclo virtuoso di produzione di energia da fonti rinnovabili: infatti, i progressi nelle tecnologie di produzione, immagazzinamento, trasporto, ed utilizzo finale dell'idrogeno possono ampliare la diffusione e la affidabilità delle *risorse primarie rinnovabili*, innescando un processo di sviluppo di tecnologie sostenibili.



# POLITECNICO DI TORINO

L'Agenzia Internazionale dell'Energia colloca questa fase di maturità commerciale dal 2030 in avanti, a completamento delle fasi di costruzione del mercato e delle infrastrutture.

La domanda di idrogeno è destinata in futuro a crescere grazie allo sviluppo di differenti tecnologie in campo energetico che ne faranno uso. Di conseguenza, si avvertirà la necessità di una economica e sicura disponibilità di idrogeno, che si dovrà basare su di una efficiente rete di distribuzione e produzione.

La produzione in particolare è un aspetto critico, in quanto richiede notevoli quantità di energia. L'uso di fonti rinnovabili è particolarmente interessante in quanto il ciclo energetico completo (produzione e consumo) sarebbe ad impatto ambientale quasi nullo. Delle diverse tecnologie attualmente in corso di analisi (fotolisi, cicli termochimici, alghe...) l'unica già disponibile è l'elettrolisi dell'acqua, che può essere anche effettuata in abbinamento a fonti rinnovabili (eolico, solare, idroelettrico). Una ulteriore ipotesi in corso di analisi è l'accoppiamento di impianti nucleari con sistemi di produzione di idrogeno per elettrolisi, per finalità essenzialmente di peak shaving e per utilizzo del vettore in ambito auto motive.

Nel settore dell'utilizzo finale dell'Idrogeno, le tecnologie più promettenti sono rappresentate dai convertitori elettrochimici noti come *Celle a Combustibile*. Le celle a combustibile convertono il vettore idrogeno in energia elettrica con un processo ad elevata efficienza e caratterizzato da sostenibilità ambientale, in quanto il prodotto di reazione è vapore d'acqua. Il by-product termico delle celle le posiziona nel settore degli impianti di tipo cogenerativo, o anche trigenerativo, particolarmente interessanti per il settore della generazione distribuita in quanto le elevate efficienze di conversione non sono legate alla taglia di impianto.

I mercati di riferimento della tecnologia delle celle a combustibile sono essenzialmente:

- il mercato automotive (celle a combustibile PEMFC)
- il mercato della cogenerazione residenziale (celle a combustibile PEMFC e SOFC) e della cogenerazione di media taglia distribuita (celle a combustibile SOFC e MCFC).

In particolare, tra le varie tipologie di celle a combustibile, le celle ad alta temperatura (SOFC, MCFC) hanno il vantaggio di una maggiore flessibilità nel combustibile primario, e hanno quindi una prospettiva di mercato legata al settore dei biogas e biocombustibili: le celle SOFC nel breve-medio periodo potrebbero proporsi come il miglior candidato all'utilizzo efficiente dei biogas da biomassa.

## Contenuti

Il materiale fornito, e le discussioni con gli studenti, hanno l'obiettivo di fornire le informazioni di base nel settore delle tecnologie dell'Idrogeno e delle Celle a Combustibile.

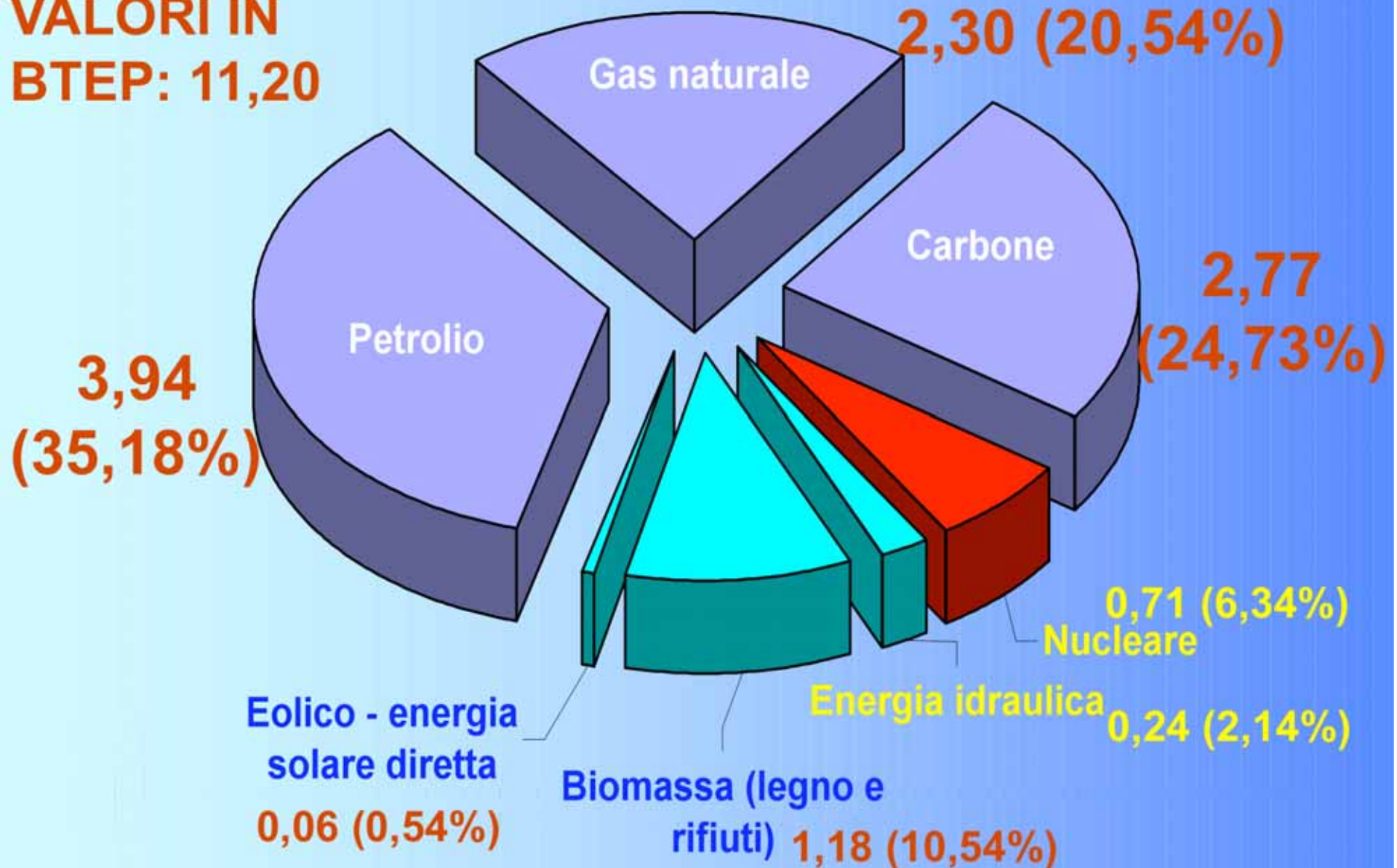
Sono analizzati i diversi step della catena del *sistema idrogeno*: produzione, immagazzinamento, e utilizzo finale. In particolare, ci si sofferma sulla soluzione tecnologica di produzione di energia ad elevata innovazione costituita dalle *celle a combustibile*, che hanno elevate potenzialità di mercato e possono utilizzare un range di combustibili molto ampio, al di là del solo idrogeno.

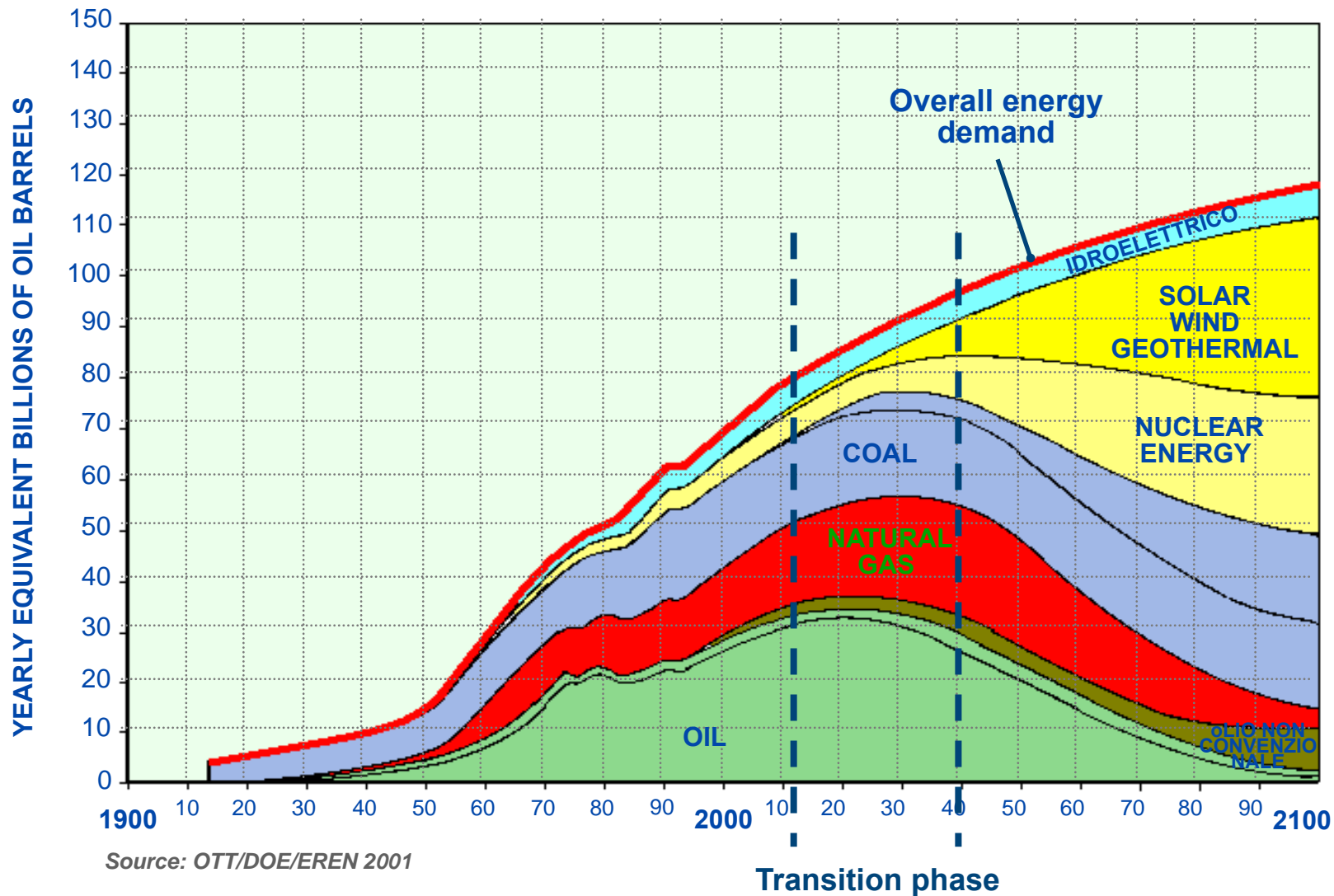
Sono sottolineati i vantaggi energetici ed ambientali di tali tecnologie, e le prospettive di ingresso sul mercato negli anni a venire.

# 1. Introduzione

**LE FONTI PRIMARIE:** da dove l'uomo preleva l'energia nel 2006

**VALORI IN  
BTEP: 11,20**





Secondo la proiezione della International Energy Agency, le fonti fossili tradizionali (petrolio, gas naturale) tendono ad esaurirsi. Il carbone ha invece riserve accertate superiori, e sarà utilizzato in nuovi dispositivi (gassificazione). Le fonti primarie diventeranno le fonti rinnovabili e il nucleare (da fissione o preferibilmente da fusione). L'idrogeno potrebbe avere il ruolo di "accumulatore" (nel tempo e nello spazio) di queste tipologie di fonti primarie.

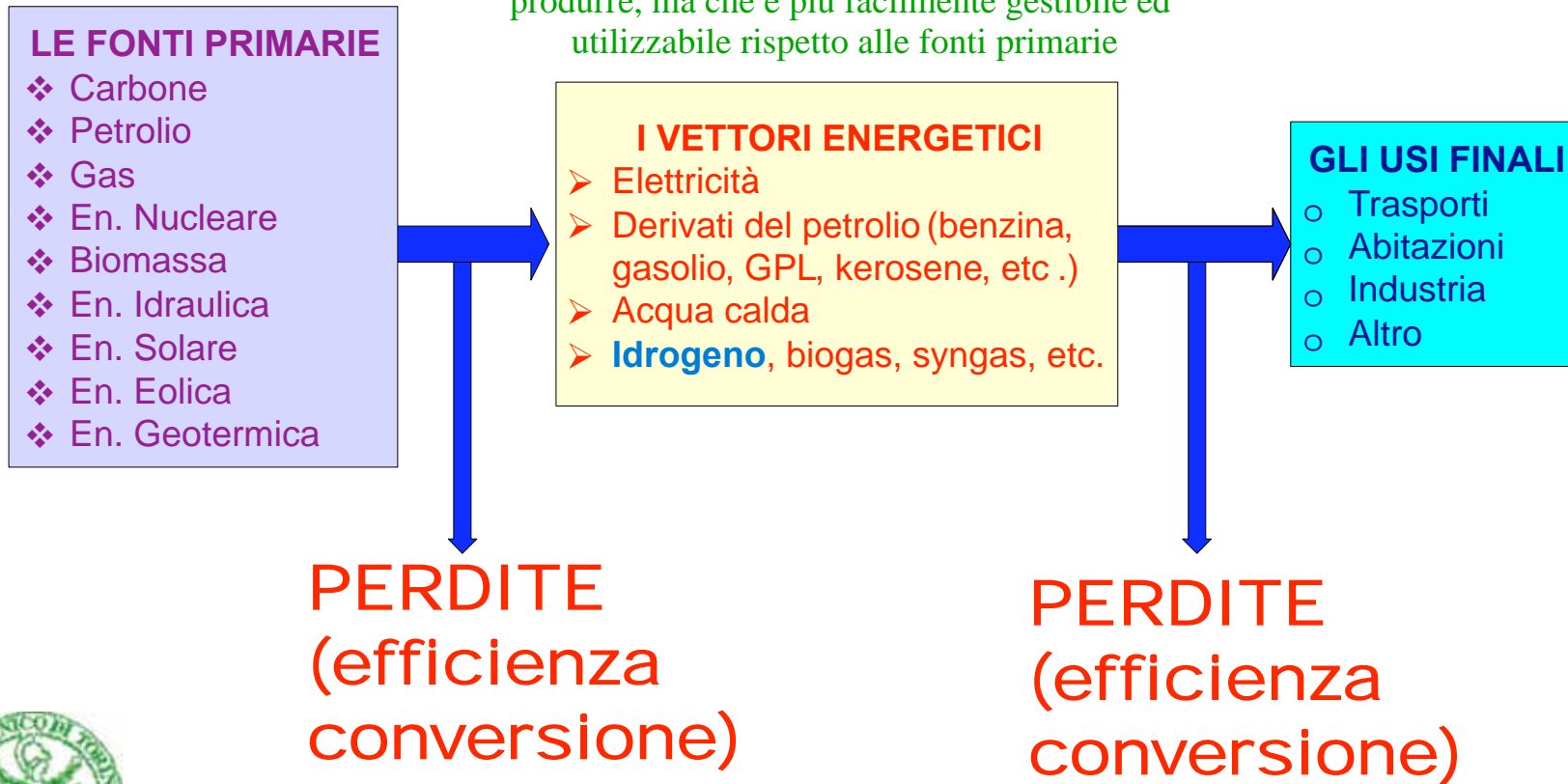


# 1. Introduzione

## Energia e problemi ambientali

### La sequenza di utilizzazione

VETTORE ENERGETICO è una forma di energia secondaria, non disponibile in natura e quindi da produrre, ma che è più facilmente gestibile ed utilizzabile rispetto alle fonti primarie



# 1. Introduzione

## Energia e problemi ambientali

Le risposte ai problemi energetici (esaurimento delle riserve di fonti fossili tradizionali) e ai correlati problemi ambientali (emissione di sostanze che alterano l'equilibrio dell'ecosistema) possono essere molteplici. Non esiste una soluzione perfetta, ma si può considerare una serie di interventi correlati.

Alcuni interventi più immediati possono essere annoverati tra i seguenti:

### 1. Aumento dell'efficienza energetica (riduzione dei consumi dei combustibili fossili)

Intervento sulla tecnologia, e/o sullo stile di vita

### 2. Produzione di energia da combustibili fossili con separazione e sequestro di CO<sub>2</sub> in riserve naturali

Intervento-tampone: fase di transizione in cui si continuano a usare combustibili fossili, ma si cerca di rimuovere il loro effetto ambientale

### 3. Uso di fonti energetiche e vettori energetici (gas naturale, rinnovabili, **Idrogeno**, nucleare) a basso o nullo contenuto di C

Intervento sulle fonti primarie vere e proprie, con ausilio di vettori energetici privi di carbonio



# 1. Introduzione

## Idrogeno: vantaggi di un vettore energetico privo di C

Non ha emissioni nocive (acqua) tranne  $\text{NO}_x$  nel caso in cui venga sottoposto a combustione (da evitare)

Non produce  $\text{CO}_2$

Può essere prodotto da varie fonti (diversificazione e indipendenza energetica)

Costituisce sia una forma di accumulo di energia che un vettore energetico

Quando prodotto da fonte rinnovabile risulta non inquinante e virtualmente inesauribile



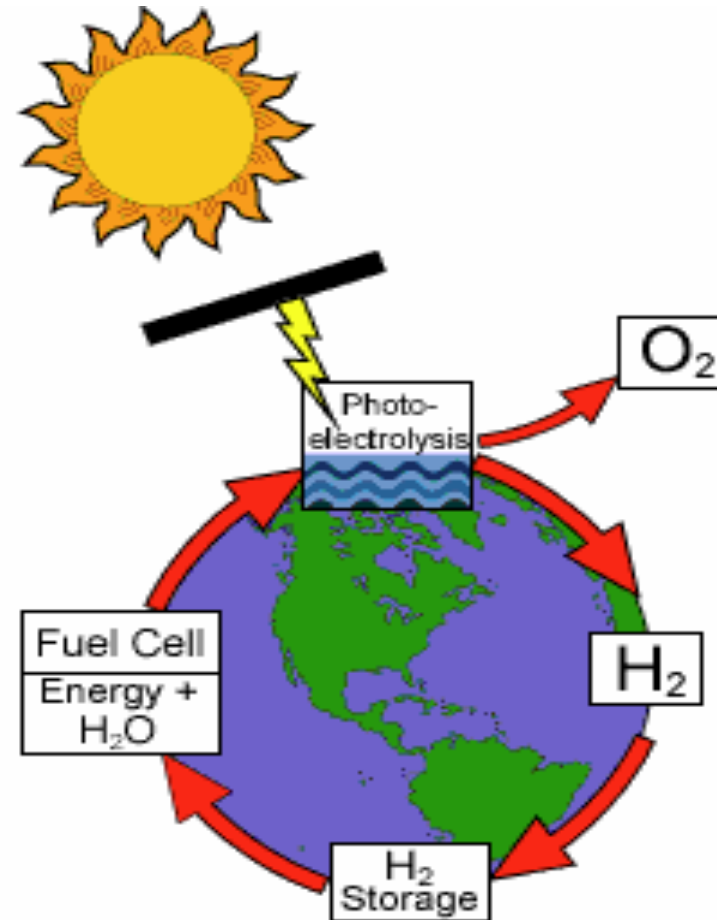


# 1. Introduzione

## Idrogeno

### **“HYDROGEN ECONOMY”**

**Una economia basata principalmente sull'energia solare (energia rinnovabile) e che usa l'idrogeno come mezzo conveniente per accumulare e trasportare (insieme al vettore elettrico) energia**



## 2. Produzione

### Introduzione

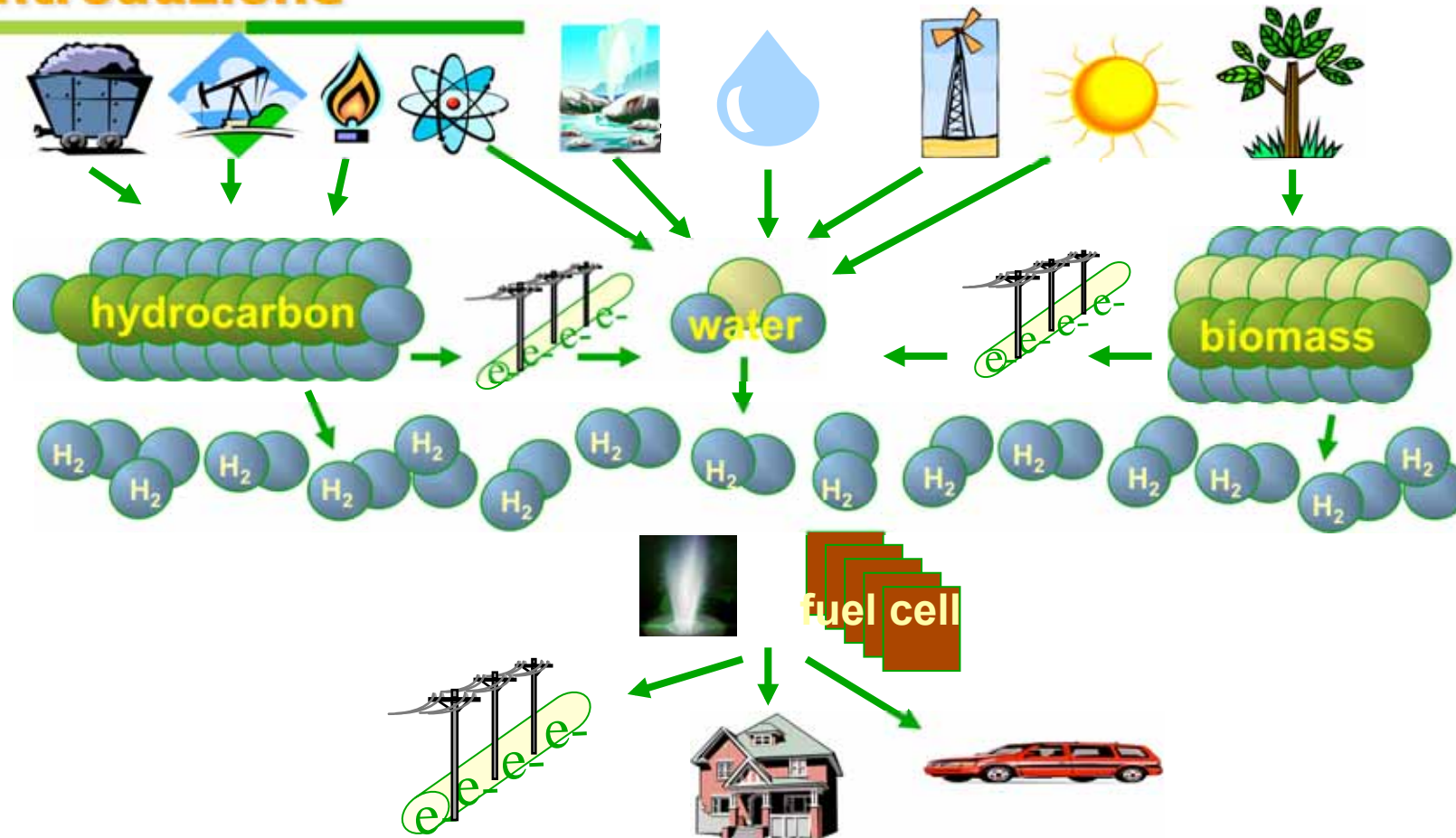
---

$H_2$  non si trova libero in natura ed è principalmente combinato con carbonio in idrocarburi ( $C_nH_m$ ) e con ossigeno nell'acqua ( $H_2O$ ) da cui può essere separato mediante, ad esempio:

- Energia elettrica (es. elettrolisi, vedi slide 14)
- Calore (es. pirolisi, decomposizione della molecola del carbone nei suoi elementi semplici mediante l'apporto di calore (circa a temperature pari a  $1000^\circ C$ ) in un'atmosfera a bassa percentuale di ossigeno)
- Reazione chimica (utilizzando vapor d'acqua, ossigeno, e una fonte termica)
- Irraggiamento (es. termolisi: scissione diretta della molecola di acqua ad altissima temperatura tramite irraggiamento solare concentrato; oppure fotolisi: scissione a temperature minori con ausilio di reazioni elettrochimiche)



## 2. Produzione Introduzione



L'Idrogeno si pone come VETTORE di energia, tra le fonti primarie (può essere prodotto da tutte le fonti primarie) e gli utilizzi finali (residenziali, trasporti, industriali). Aiuta a far sì che le fonti primarie producano servizi energetici, e lo fa con dispositivi ad efficienza molto alta (celle a combustibile) e senza causare inquinamento durante il suo utilizzo

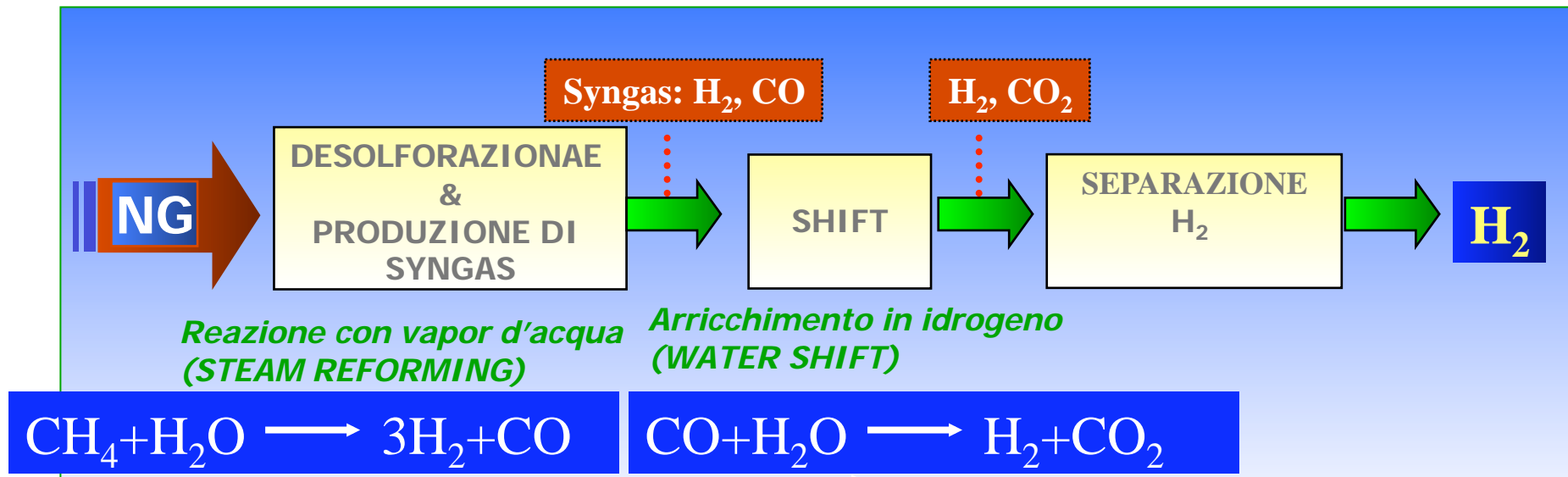


## 2. Produzione

### Produzione di idrogeno da gas naturale

#### PRODUZIONE DI IDROGENO DA GAS NATURALE

60% di Idrogeno prodotto a livello internazionale

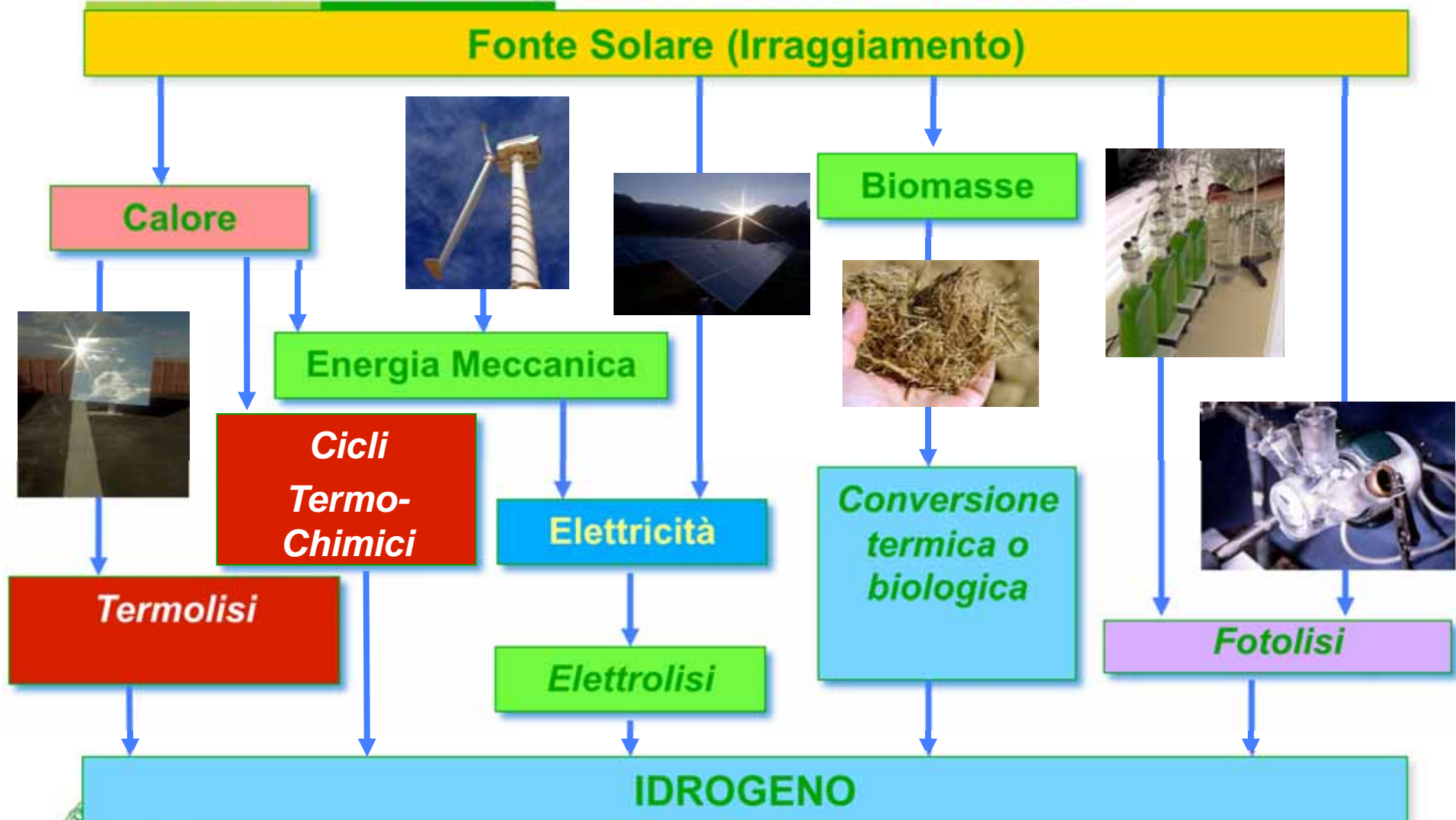


Efficienza media produzione da gas naturale = 65%



## 2. Produzione

### Produzione di idrogeno da fonti rinnovabili



## 2. Produzione

### Produzione di idrogeno per elettrolisi

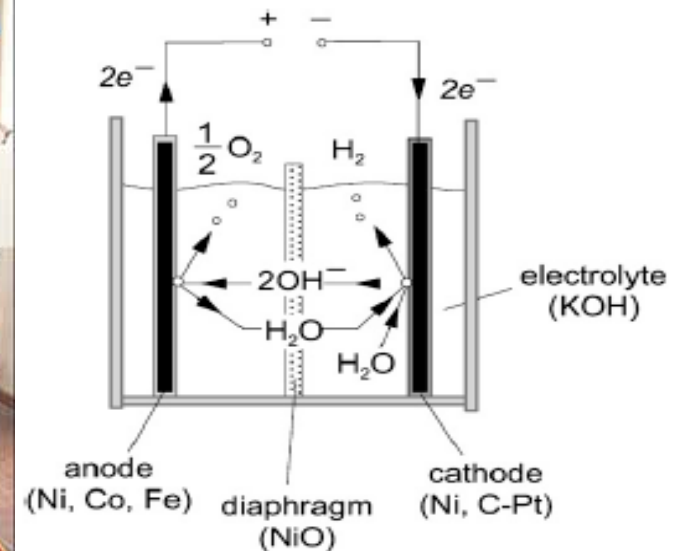
Elettrolizzatori usano elettricità per scindere la molecola d'acqua in idrogeno e ossigeno:



Tecnologie basate su fonti rinnovabili (fotovoltaico, eolico, idroelettrico) possono fornire potenza per effettuare elettrolisi.

Sfide tecnologiche

- Costi delle tecnologie
- Efficienze conversione
- Integrazione di rete elettrica con fonti rinnovabili
- Costi dell'elettricità



## 2. Produzione

### Produzione di idrogeno

#### Stime dei costi di produzione dell'idrogeno



PRODUZIONE CENTRALIZZATA	Costo €/GJ
Reforming del gas naturale (H2 gas)	5 - 8
Reforming del gas naturale (H2 liquido)	12 - 15
Altre fonti fossili (POX idrocarburi, gassificazione del carbone)	10 - 12
Gassificazione biomasse	9 - 13

PRODUZIONE DISTRIBUITA	Costo €/GJ
Reforming on-site del gas naturale	16 - 19
Elettrolisi (energia elettrica da rete)	10 - 20
Elettrolisi (eolico)	20 - 40
Elettrolisi (solare termico)	40 - 60
Elettrolisi (fotovoltaico)	50 - 100



... ma ci sono prospettive più ambiziose ...



## 2. Produzione

### Produzione di idrogeno per fotoelettrolisi

- La radiazione visibile (luce) ha sufficiente energia per separare l'acqua ( $H_2O$ ) in Idrogeno ( $H_2$ ) e Ossigeno ( $O_2$ ).



- Combina una giunzione a effetto fotovoltaico (PV) e una cella di elettrolisi in un unico elemento
  - L'efficienza del singolo elemento è più elevata (30%) rispetto ai due sistemi separati (fotovoltaico + elettrolizzatore)
  - Realizzazioni già effettuate a scala di laboratorio

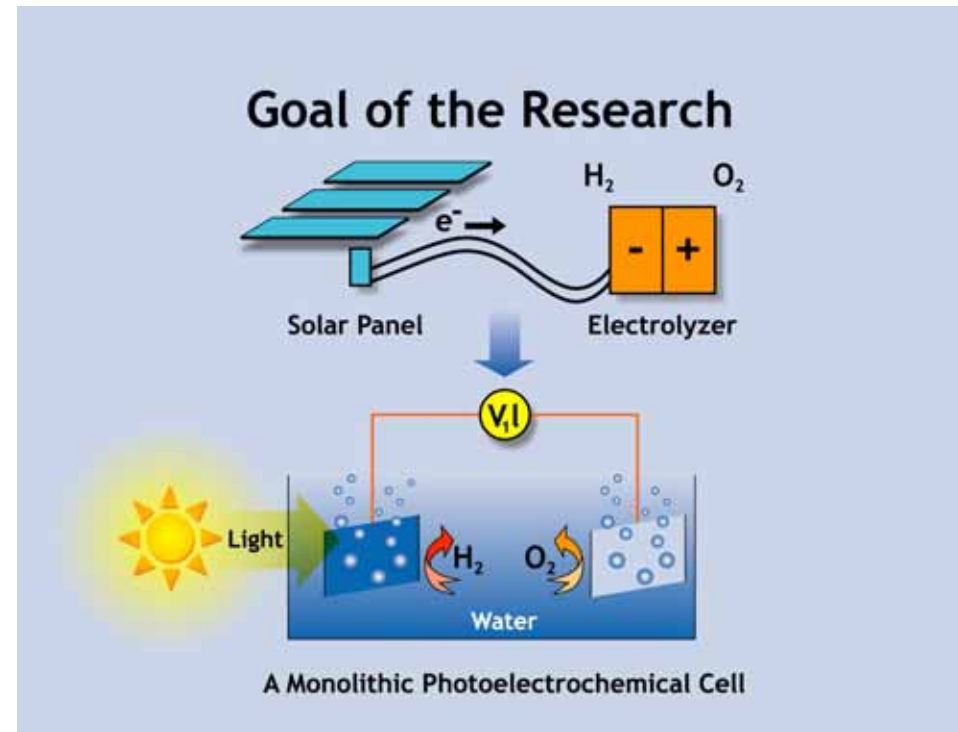


Immagine di un fotoelettrodo per separazione di acqua in  $H_2$  e  $O_2$





## 2. Produzione

### Produzione di idrogeno per cicli termochimici

Irraggiamento solare concentrato può essere usato per scindere acqua tramite cicli di trasformazioni chimiche alimentati da calore solare

- Separazione termochimica dell'acqua (tra 700°C e 1500°C)
- Separazione diretta dell'acqua per effetto termico (>> 2000°C)

#### Barriere termiche

- Gestione di irraggiamento e calore da fonte intermittente (Sole)
- Materiali per alte temperature duraturi e non costosi
- Costo di capitale dei concentratori solari



Zinc Oxide Cycle for the Thermochemical Dissociation of Water Using Concentrated Solar Energy

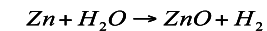
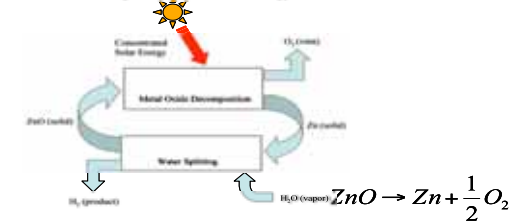


Immagine del reattore di separazione di Ossido di Zinco in Zinco e Ossigeno (fare riferimento a schema di ciclo termochimico a Ossido di Zinco sulla destra)

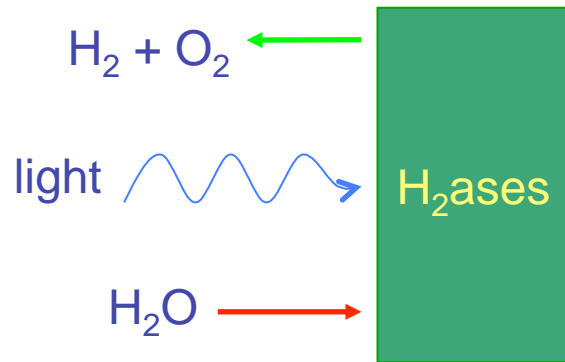


# 2. Produzione

## Produzione fotobiologica di idrogeno

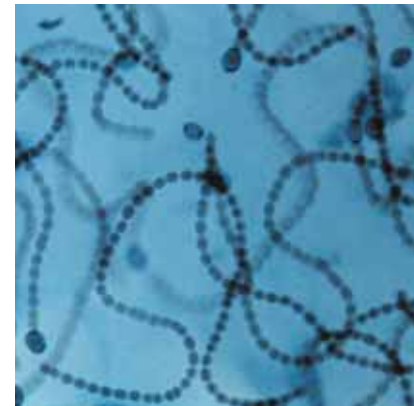
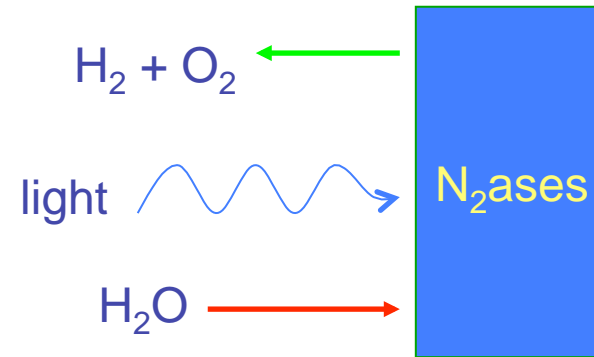
Alcune tipologie di organismi (alghe verdi e batteri) nella loro attività metabolica producono una scissione della molecola di acqua in H<sub>2</sub> e O<sub>2</sub>, usando come fonte di energia l'irraggiamento solare

### I. Alghe verdi



green algae

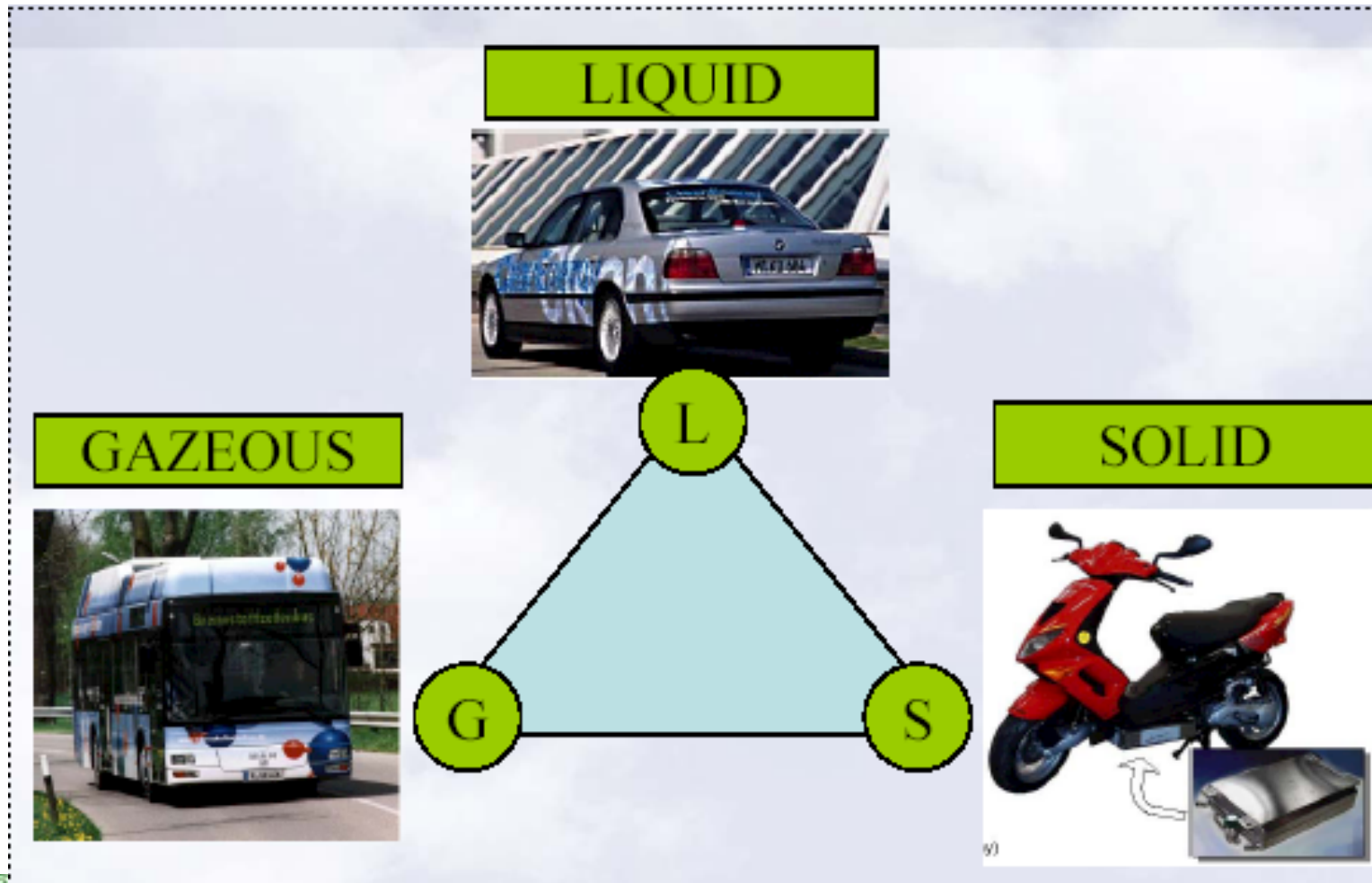
### II. Cianobatteri



cyanobacteria



# 3. Stoccaggio Metodi di accumulo



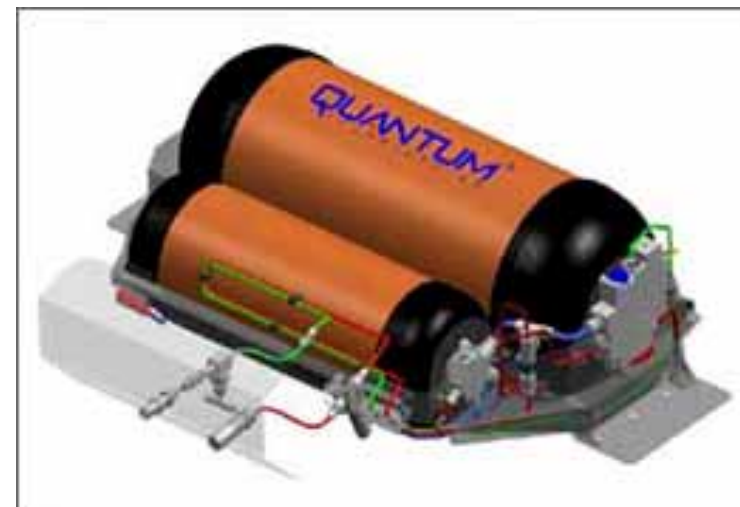
### 3. Stoccaggio Gas compresso

#### Gas compresso:

- *simile al gas naturale*
- *larghi serbatoio sferici o cilindrici (fino a 700 bar)*

Serbatoi sperimentali:

- Polimeri rinforzati da fibre di carbonio o materiali compositi metallici
- Volume interno tipico 40 l
- peso 29 Kg
- pressione = 350-700 bar
- 14 Nm<sup>3</sup> di H<sub>2</sub>, 1.25 kg di H<sub>2</sub>
- 4.3 % in massa di H<sub>2</sub>



# 3. Stoccaggio Idrogeno liquido

## Idrogeno liquido (LH2):

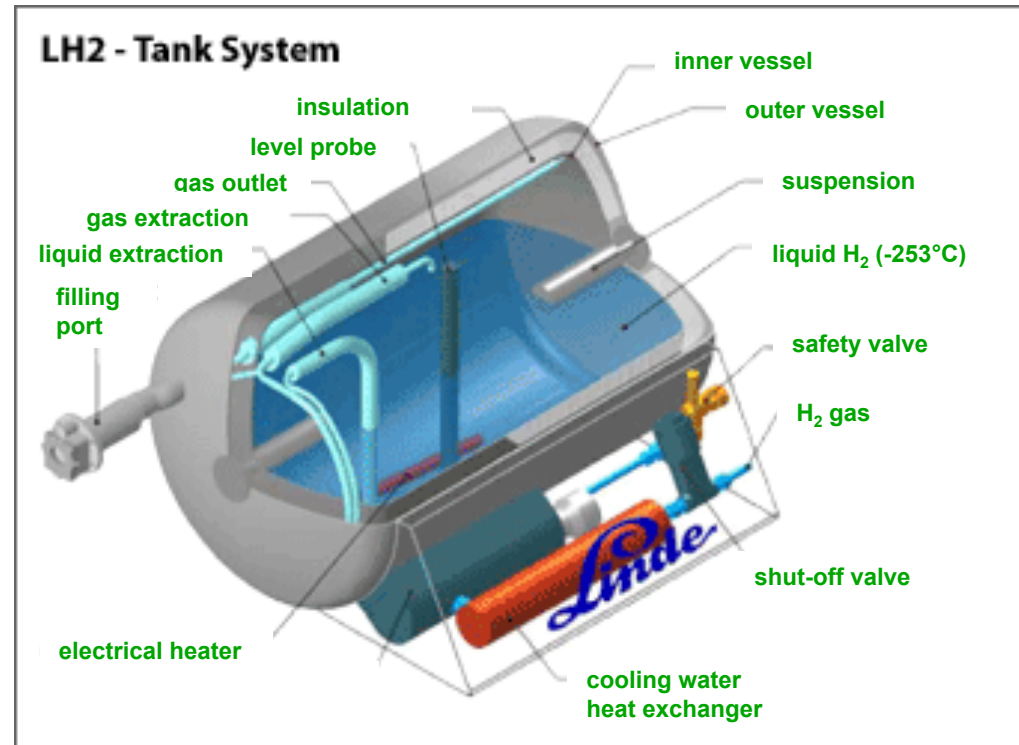
*Alta densità di energia*

*Bassissima temperatura (-253 °C)*

*Alti costi di liquefazione (circa 30% del contenuto energetico)*

*Perdite per evaporazione (circa 1-2% al giorno)*

*Applicazioni: aerospaziale e auto ad H<sub>2</sub> dimostrative*



# 3. Stoccaggio Stato solido

## Idruri metallici (MH):

Adsorbimento di  $H_2$  nella lega metallica

Processo endo/esotermico

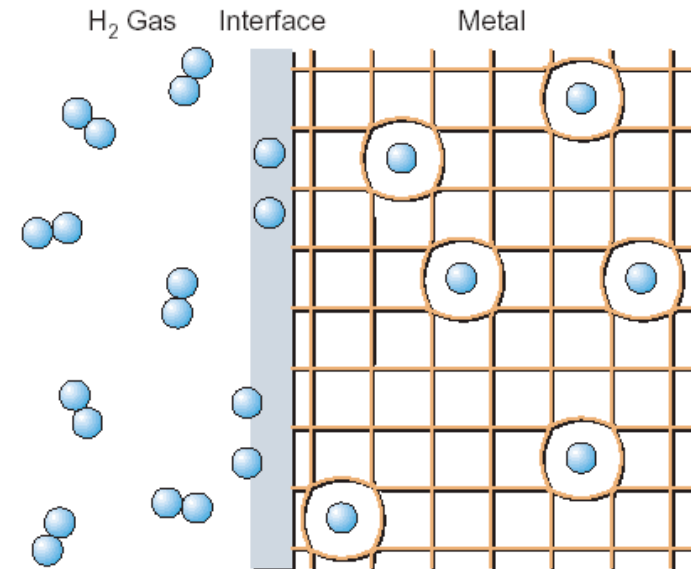
Pressione: fino a 100 bar

Temperatura: da ambiente a  $500^\circ C$

$H_2$ : 2-7% in peso (0.6-2.3 kWh/kg)

Pro: sicuro, alta densità energia

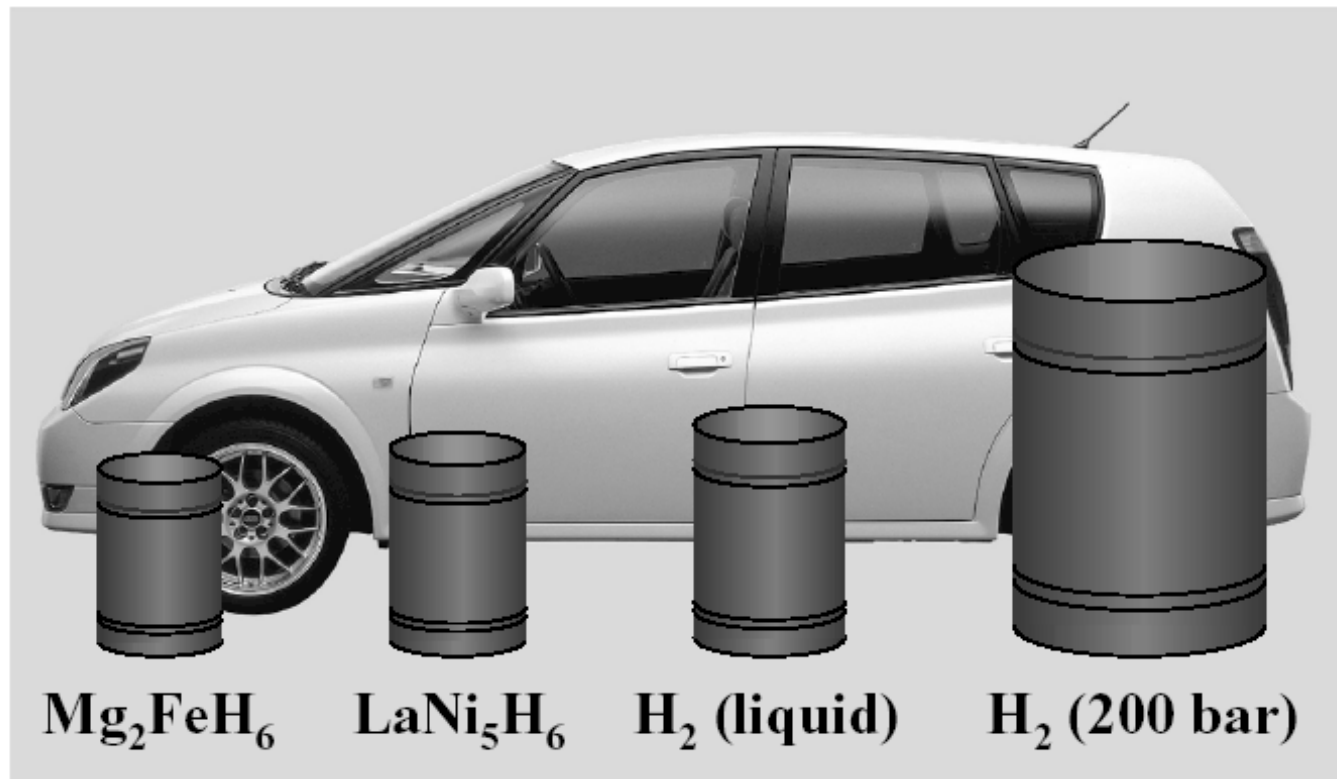
Contro: peso, costo, ciclo di vita



### 3. Stoccaggio Confronto

4 kg di idrogeno, in un propulsore a celle a combustibile, possono dare una autonomia di 400-500 km. Nella figura è evidenziata la differenza di volume di questi 4 kg di H<sub>2</sub> in diverse metodologie di accumulo a bordo. Come si vede, gli idruri metallici hanno il volume minimo (ma il loro problema è il peso elevato)

**4 kg hydrogen = 560 MJ<sub>therm.</sub>**



## 4. Utilizzazione: Le Celle a Combustibile

### Generalità

---

Una cella a combustibile è, in sostanza, un reattore elettrochimico in cui avviene la reazione di sintesi dell'acqua a partire dagli elementi che la costituiscono, idrogeno e ossigeno, con produzione di potenza elettrica e calore:





## 4. Utilizzazione: Le Celle a Combustibile

### Caratteristiche principali

---

Il combustibile più utilizzato è l'idrogeno che non è disponibile in forma libera; non è quindi una fonte di energia ma un vettore energetico; deve essere prodotto

La produzione di corrente elettrica è in corrente continua

I rendimenti elettrici sono elevati a prescindere dalla taglia dello stack (superiori al 45%)

Il rendimento aumenta ai carichi parziali perchè si riducono le irreversibilità termodinamiche



## 4. Utilizzazione: Le Celle a Combustibile

### Caratteristiche principali

---

Seguono i carichi con grande rapidità (in particolare le celle a bassa temperatura)

Le varie tipologie generano calore che in alcuni casi può essere utilizzato

Non producono  $\text{NO}_x$  (assenza di reazione di combustione)

Non producono rumori e vibrazioni (funzionamento statico)

Sono modulari, con elementi base di piccola potenza (dell'ordine del W)



## 5. Applicazioni.

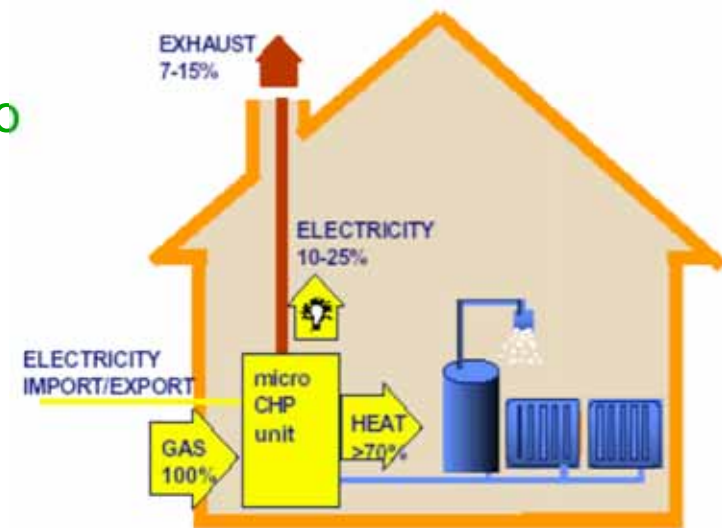
### Residenziale: mCHP

**mCHP:** micro generazione combinata di potenza elettrica e calore per utilizzi residenziali e attività commerciali.

**Residenziale:** elettricità usata per luce e apparecchiature, calore usato per riscaldamento ed acqua calda.

**Produzione guidata da richiesta di calore:** l'elettricità è quindi un prodotto secondario che segue la richiesta di calore.

- Se calore non è richiesto, meglio spegnere macchina e comprare elettricità dalla rete elettrica.
- Se calore è richiesto, ma il consumo elettrico è basso: si esporta (vende) elettricità alla rete elettrica.



## 5. Applicazioni.

### Residenziale-Terziario-Industriale: SOFC (Turbocare spa, Torino)



#### Dati tecnici:

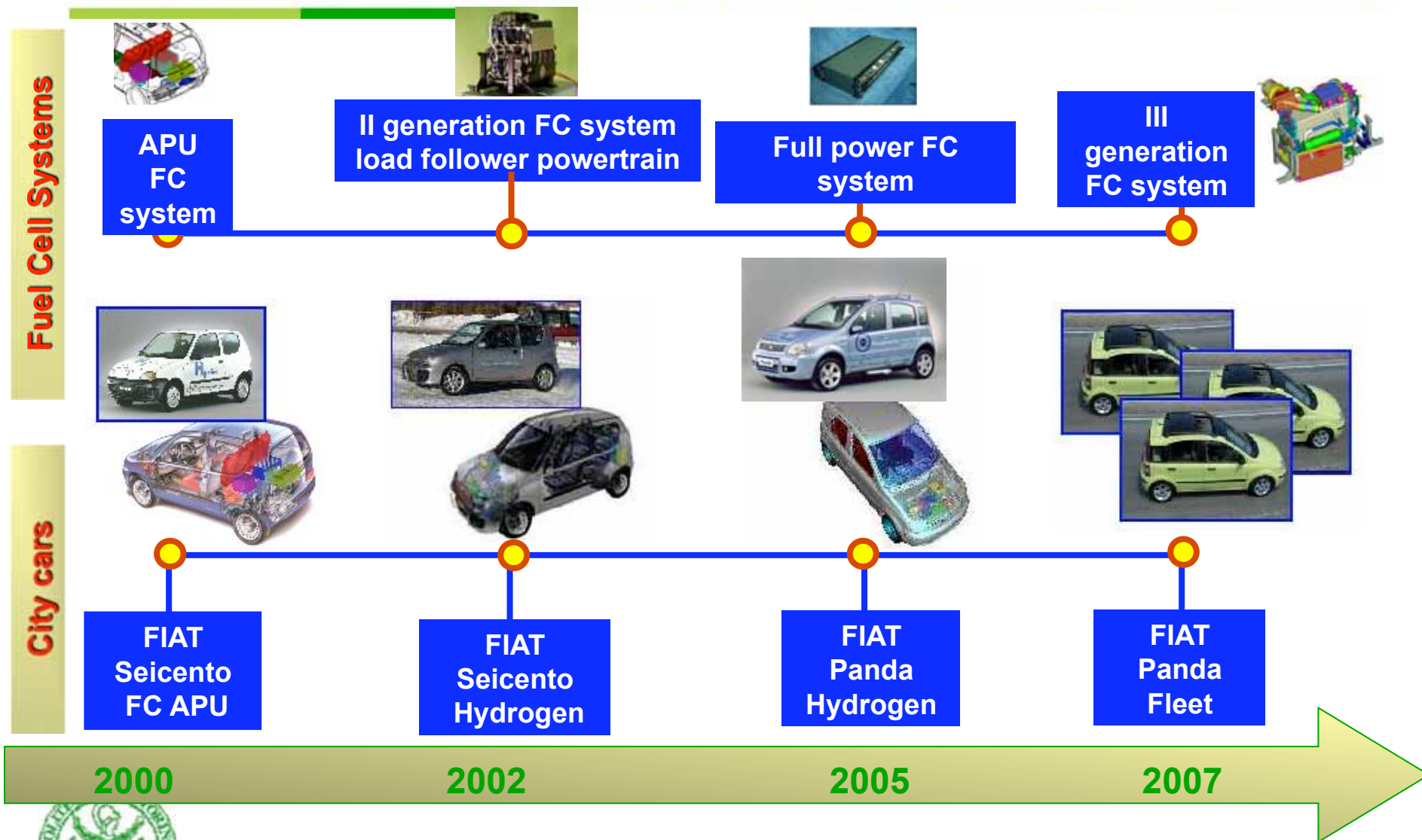
- 100 kW elettrici AC
- 65 kW termici

Il famoso impianto tri-generativo (potenza elettrica, potenza termica, potenza di refrigerazione) basato su uno stack SOFC da 100 kW AC, installato presso la TurboCare SpA di Torino nell'ambito del progetto con Politecnico di Torino denominato EOS (Energia da Ossidi Solidi), finanziato dalla Regione Piemonte nel 2005

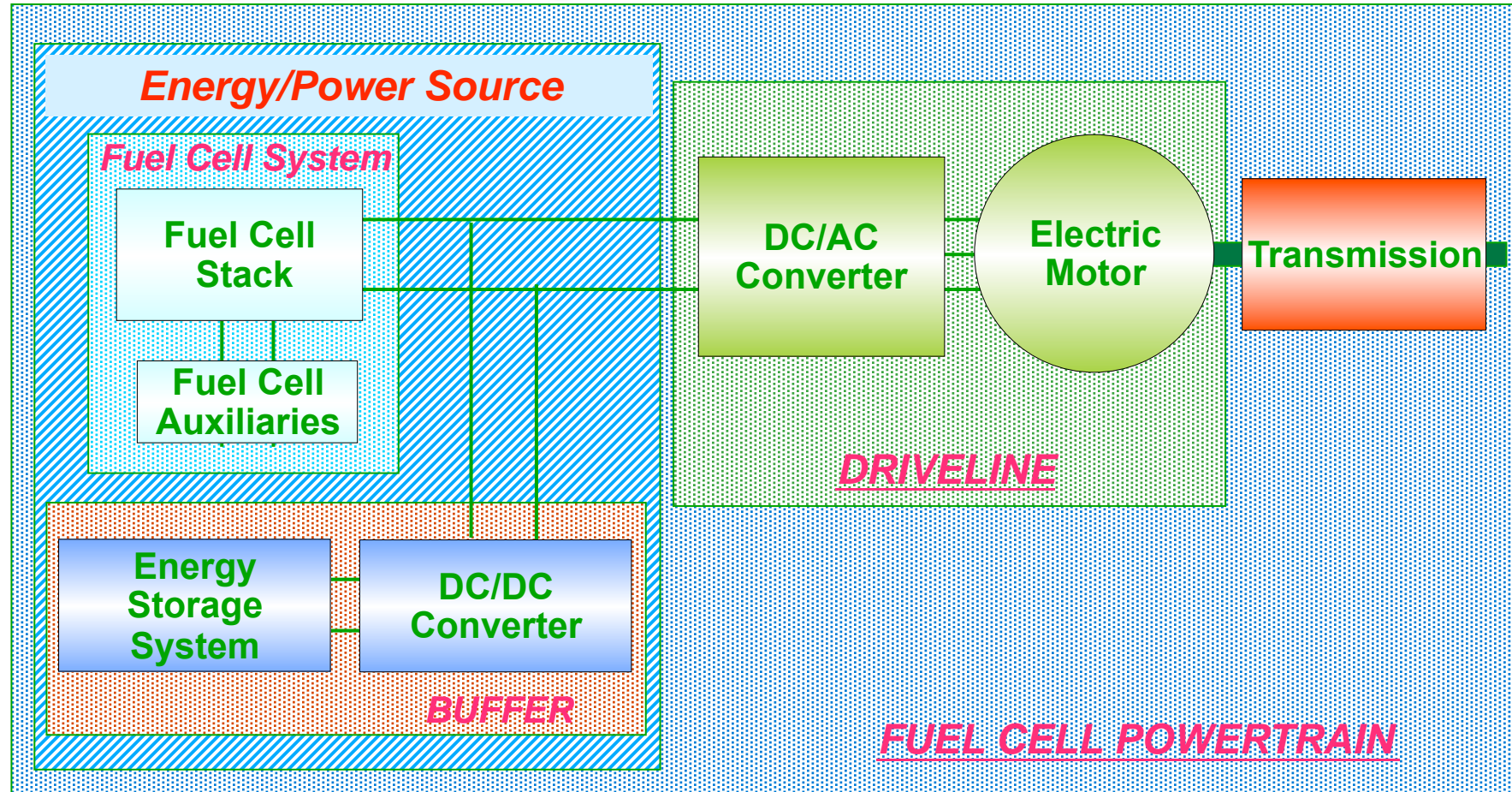


# 5. Applicazioni.

## Automotive: PEMFC (evoluzione dei prodotti FIAT per autoveicoli)



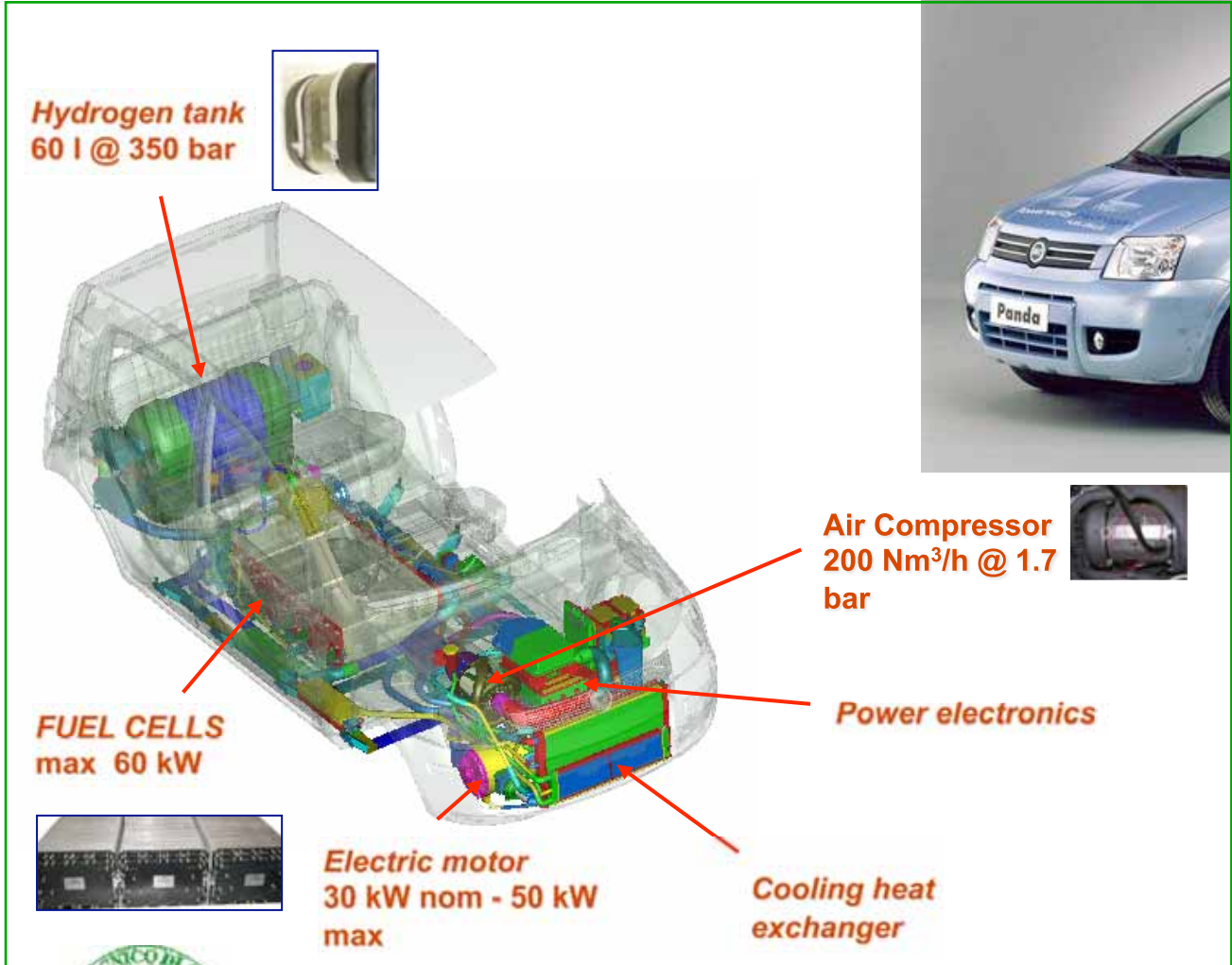
# 5. Applicazioni. Automotive: PEMFC



La cella a combustibile, alimentata a idrogeno ed aria, produce potenza elettrica, che (opportunamente condizionata in tensione dal convertitore DC/DC) è ceduta ad un motore elettrico che fornisce potenza meccanica alla trasmissione. La cella è spesso associata ad una batteria elettrica che aiuta a superare i picchi di richiesta del motore, e a recuperare energia elettrica dalla trasmissione nella fase di frenata

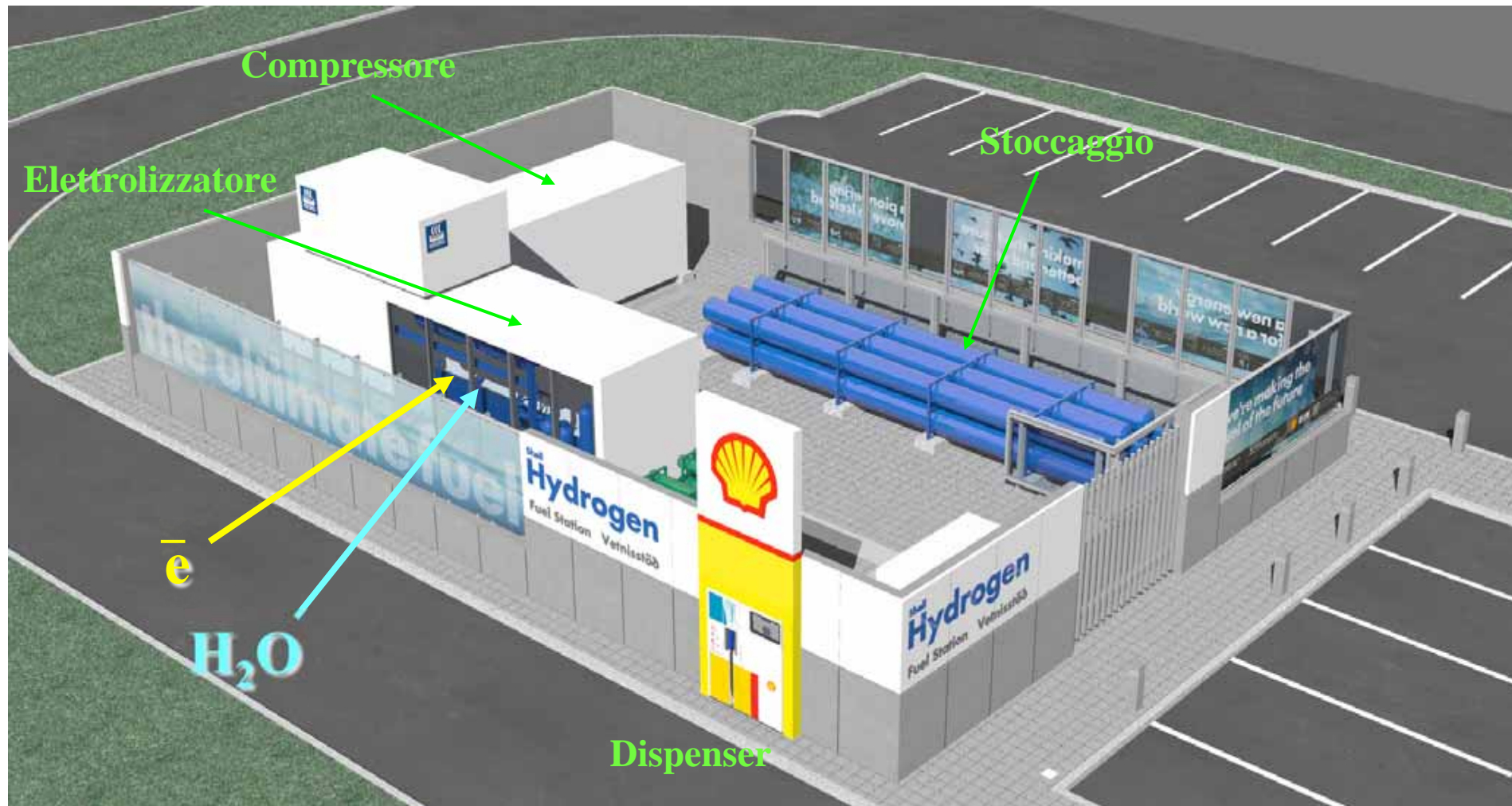


# 5. Applicazioni. Automotive: PEMFC



## 5. Applicazioni.

### Automotive: stazione di rifornimento





## 5. Applicazioni. Elettronica portatile: DMFC

power



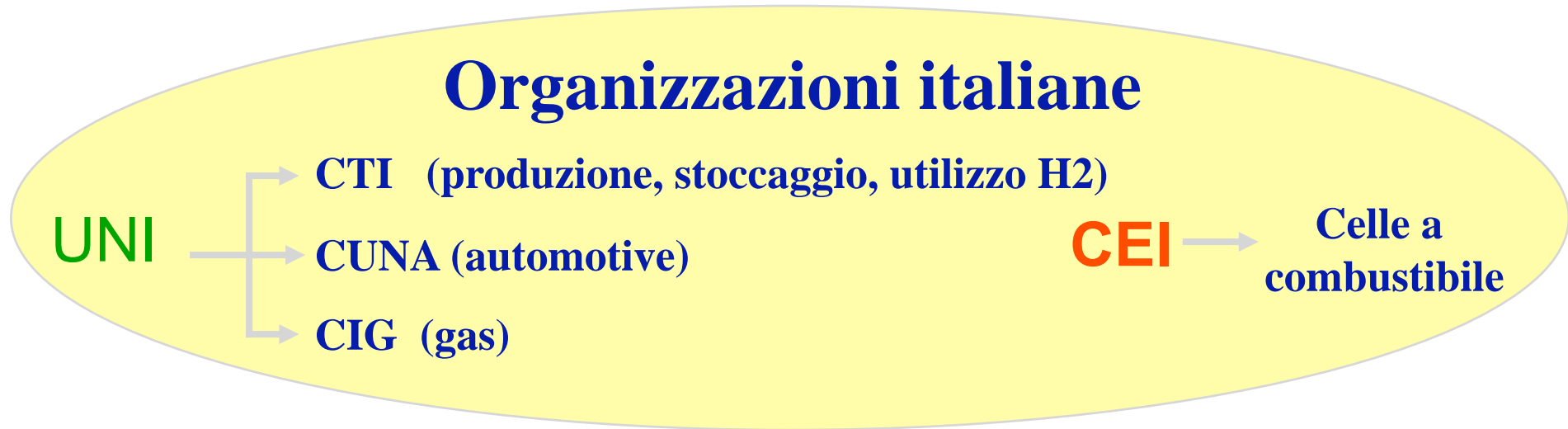
### *Applicazioni*

- ✓ maggiore autonomia per dispositivi elettronici portatili
- ✓ Potenza elettrica in aree con insufficienti infrastrutture di distribuzione
- ✓ dispositivi silenziosi e non inquinanti

time



## 5. Applicazioni. Normativa



**Istituzioni Italiane**

- Ministero dell'Ambiente
- Ministero delle Attività Produttive
- Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti
- Ministero dell'Interno → Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco

### Istituzioni locali

### Associazioni

H2IT

FII (Forum Italiano Idrogeno)



## 5. Applicazioni. Normativa

---

### Attività del C.C.T.S. del Ministero dell'Interno

Linee guida per prevenzione incendi in stazioni di servizio multi-fuel (con anche H2) **APPROVATO**

Linee guida per caratterizzazione e rischio di incendio di componenti specifici di autoveicoli alimentati a idrogeno **COMPLETATO**

Sviluppo di linee guida per installazione di impianti di distribuzione di idrogeno in tubature **INIZIATO**

