



**UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE**

**FACOLTA' DI INGEGNERIA**

---

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Meccanica

**Metodi e strumenti per la valutazione di impatti ambientali di sistemi per la produzione di idrogeno "Green"**

**Methods and tools for the evaluation of environmental impact of "Green" hydrogen production systems.**

Relatore:  
Prof. **Michele Germani**

Tesi di Laurea di:  
**Miriana Micelli**

Correlatrice:  
Prof.ssa **Marta Rossi**

**A.A. 2022/2023**

*A chi c'è sempre stato  
A chi se ne è andato  
A chi ha creduto in me fin dall'inizio  
E fino alla fine*



# Indice

Indice immagini .....	4
<b>1) Introduzione.....</b>	<b>6</b>
<b>2) Attuali fonti energetiche.....</b>	<b>7</b>
<b>3) Cos'è l'idrogeno.....</b>	<b>8</b>
<b>4) Tipologie di idrogeno .....</b>	<b>9</b>
- Idrogeno grigio.....	10
- Idrogeno blu.....	11
- Idrogeno Green.....	11
<b>5) Processi di produzione dell'idrogeno green .....</b>	<b>12</b>
- ALK .....	12
- PEM.....	13
- SOEC.....	14
- Elettrolisi fotovoltaica.....	15
- Fotocatalisi.....	16
- Fotosintesi artificiale.....	17
- Fotofermentazione .....	18
- Biomassa .....	19
<b>6) LCA: Life Cycle Assessment .....</b>	<b>21</b>
<b>7) LCIA: Life Cycle Impacts Assessment .....</b>	<b>25</b>
- <i>LCA dell'idrogeno grigio</i> .....	25
- <i>LCA dell'idrogeno blu</i> .....	26
- <i>LCA dell'idrogeno green</i> .....	27
<b>8) Impatti dell'idrogeno .....</b>	<b>30</b>
<b>9) Impatto dell'idrogeno green sul mondo .....</b>	<b>31</b>
- Caso Corea del Sud .....	32
<b>10) Impatto sull'ambiente .....</b>	<b>32</b>
1. <i>Uso del suolo</i> .....	32
2. <i>L'uso dell'acqua</i> .....	33
3. <i>Inquinamento acustico</i> .....	34
Esempi .....	34

<b>11) Impatto sulla quotidianità .....</b>	<b>35</b>
- <i>Uso domestico</i> .....	36
- <i>Trasporto</i> .....	36
<b>12) Impatto sul clima .....</b>	<b>38</b>
<b>13) Esempi .....</b>	<b>39</b>
- <i>Argentina</i> .....	39
- <i>Paesi Bassi</i> .....	41
- <i>Austria, Belgio, Islanda</i> .....	43
<b>14) Conclusioni.....</b>	<b>46</b>
<b>15) References .....</b>	<b>47</b>

## Indice immagini

Figura 1 Fasi dei combustibili fossili.....	7
Figura 2 Risorse di energia.....	9
Figura 3 Produzione di idrogeno.....	10
Figura 4 Domanda di idrogeno Grigio.....	10
Figura 5 Processo di produzione IG .....	11
Figura 6 Processo di produzione IB.....	11
Figura 7 Classificazione .....	12
Figura 8 ALK .....	13
Figura 9 PEM.....	14
Figura 10 SOEC.....	15
Figura 11 Elettrolisi fotovoltaica .....	16
Figura 12 Fotocatalisi .....	17
Figura 13 Fotosintesi artificiale.....	18
Figura 14 Fotofermentazione .....	19
Figura 15 Idrogeno puro .....	19
Figura 16 Biomassa .....	20
Figura 17 LCA .....	21
Figura 18 Cradle to Grave .....	22
Figura 19 Cradle to Cradle .....	22

Figura 20 Fasi LCA .....	22
Figura 21 Confini del sistema .....	23
Figura 22 Inventario .....	23
Figura 23 Interpretazione dei risultati .....	24
Figura 24 LCIA .....	25
Figura 25 Costo idrogeno .....	26
Figura 26 Costo IB .....	27
Figura 27 LCA Idrogeno Green .....	28
Figura 28 Costi di produzione: Green vs Blu .....	29
Figura 29 Impatto .....	30
Figura 30 Trilemma .....	31
Figura 31 Importazioni Corea .....	32
Figura 32 Uso del suolo .....	33
Figura 33 Uso dell'acqua .....	34
Figura 34 Idrogeno per uso domestico .....	36
Figura 35 Idrogeno per il trasporto .....	37
Figura 36 Confronto emissioni .....	38
Figura 37 Emissioni nette totali di gas serra .....	40
Figura 38 Emissioni totali di gas serra evitate .....	40
Figura 39 Bilancio energetico per la produzione di idrogeno .....	41
Figura 40 Confronto impatti ambientali .....	42
Figura 41 Elettricità rinnovabile .....	43
Figura 42 Idrogeno prodotto .....	44
Figura 43 Emissioni totali .....	45

## **1) Introduzione**

L'obiettivo di questa tesi è quella di descrivere, attraverso metodi quali LCA e LCIA e strumenti quali Simapro, l'impatto ambientale che hanno i sistemi di produzione dell'idrogeno; nonché la promettente fonte energetica del futuro.

Mostreremo nello specifico, attraverso esempi ed articoli scientifici, la necessità di utilizzare l'idrogeno, nella quasi totalità dei nostri bisogni e della realtà industriale, come principale fonte energetica, con l'obiettivo ultimo di ridurre l'anidride carbonica arrivando, così, ad avere un futuro più sostenibile.

Pertanto, il seguente elaborato si comporrà delle seguenti parti: presentazione dell'idrogeno, nello specifico dell'idrogeno green, e del suo utilizzo per la sostenibilità ambientale; successivamente parleremo dei vari sistemi adoperati per la sua produzione, con una dettagliata analisi sulla loro sostenibilità attraverso l'utilizzo di metodi quali LCA e LCIA e rispettivi esempi grazie allo strumento Simapro.

Giungeremo, infine, a definire qual è il sistema di produzione più sostenibile e come questo possa proiettarci in un futuro a zero emissioni.

## 2) Attuali fonti energetiche

Attualmente, le principali fonti energetiche, nonché le più richieste sul mercato internazionale, sono rappresentate dai combustibili fossili; nello specifico da petrolio, carbone e gas. Ogni fase del loro ciclo di vita - estrazione, lavorazione, trasporto e combustione - genera inquinamento atmosferico e idrico tossico, nonché emissioni di gas serra (GHG) che guidano la crisi climatica globale.

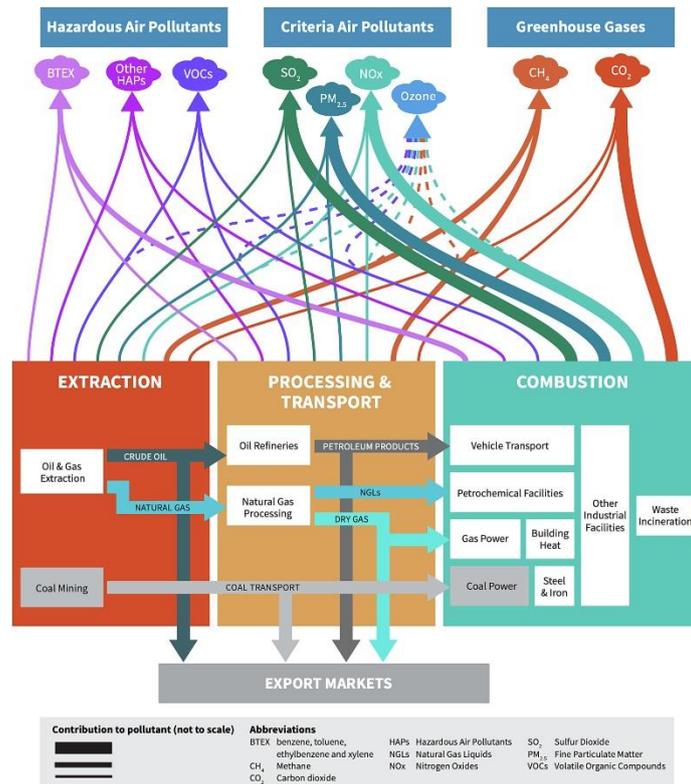


Figura 1 Fasi dei combustibili fossili

Consideriamo, al momento, la prima fase cioè l'estrazione.

Il gas naturale è composto principalmente da metano (CH<sub>4</sub>), che è un gas serra con un potenziale di riscaldamento 84-87 volte maggiore del CO<sub>2</sub> su un arco temporale ventennale. Le emissioni di metano non combusto dalle infrastrutture petrolifere e del gas rappresentano un chiaro rischio climatico; infatti, esso ed altri inquinanti legati alla perforazione, sono potenziali precursori dell'ozono e possono svolgere un ruolo nell'aumento delle concentrazioni di ozono nelle regioni con alti livelli di perforazione. In particolare, gli studi nella regione petrolifera e del gas del Colorado hanno riscontrato un elevato rischio di cancro entro 500 piedi dai siti di pozzi di petrolio e gas, mentre uno studio in Pennsylvania ha scoperto che i bambini che vivono entro 2 km da un pozzo avevano il doppio delle probabilità di sviluppare la leucemia.

Negli ultimi anni, la ricerca ha rafforzato l'associazione tra lo sviluppo di petrolio e gas, e gli esiti avversi per la salute perinatale e respiratoria. Nello specifico, la produzione di petrolio, gas e il flaring sono stati associati a nascite pretermine; mentre, vivere vicino ad un pozzo petrolifero è associato alla funzione polmonare inferiore e all'asma; quest'ultima, viene associata anche a degli elevati livelli di ozono, legati proprio, alla produzione di petrolio e gas. [1.]

Questi sono i rischi in termini di salute e inquinamento solo nella prima fase, ovvero l'estrazione, dei combustibili fossili e se pensiamo che tali risultati possano raddoppiare, se non triplicare, nelle fasi seguenti ovvero: lavorazione, trasporto e combustione; allora ci rendiamo conto che, queste fonti energetiche che fino ad adesso sono state il motore e il fulcro pulsante delle nostre attività e bisogni quotidiani, quali trasporti, riscaldamento ecc; devono lasciare il posto a fonti ecosostenibili e derivanti da energie rinnovabili, in quanto più sicure per l'ambiente e, soprattutto, per la nostra salute.

La soluzione, di cui stiamo discutendo, sta prendendo sempre più piede in questo decennio in quanto argomento di studio, discussione e test da parte dei diversi ingegneri e scienziati nel mondo; ovvero l'argomento centrale di questa tesi: l'idrogeno e, nello specifico, l'idrogeno green.

### **3) Cos'è l'idrogeno**

Prima della sua reale scoperta, infatti, l'idrogeno venne osservato – ma non riconosciuto – già nel XVI secolo. Fu Theophrastus Von Hohenheim, meglio conosciuto con il nome di Paracelso, a ottenerlo, combinando metalli e acidi forti: tuttavia, il gas particolarmente infiammabile prodotto dalla reazione fu scambiato per altro.

La vera e propria scoperta avvenne nel 1766, quando il chimico inglese Henry Cavendish ripeté nuovamente l'esperimento di Paracelso, questa volta riconoscendo un nuovo elemento, che chiamò aria infiammabile, che ritenne fosse sprigionata dal metallo (in quel caso il mercurio) invece che dall'acido. Si rese, inoltre, conto che il risultato finale di questa reazione era semplice acqua, ed è per questo che, nel 1783, Antoine Lavoisier lo chiamò idrogeno, dal greco generatore di acqua.

Da allora l'idrogeno ha avuto un utilizzo massiccio nell'industria missilistica prima e, successivamente, nel settore aerospaziale, fino ad arrivare al suo utilizzo moderno ed ecosostenibile legato alla produzione di energia elettrica che va così ad alimentare batterie e motori elettrici. [2.]

Prima di poterlo adoperare, però, dobbiamo fare riferimento alla sua produzione e sappiamo che, secondo la ricerca, ogni anno vengono prodotti circa 120 milioni di tonnellate di idrogeno, di cui due terzi sono idrogeno puro e un terzo sono miscelati con

altri gas. Circa il 5 % dell'idrogeno è prodotto dal gas naturale e dal carbone e un altro 5 % è prodotto come sottoprodotto dell'elettrolisi. Al momento, quindi, non esiste una quantità apprezzabile di idrogeno prodotto da fonti rinnovabili; infatti, attualmente, circa il 95 % della produzione mondiale di idrogeno proviene da combustibili fossili: [3.]

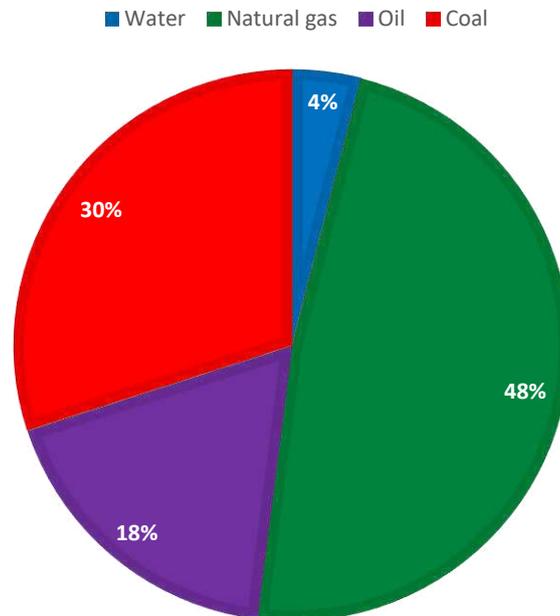


Figura 2 Risorse di energia

Facendo riferimento a quella che è la sua produzione e alle fonti da cui l'idrogeno deriva, possiamo classificarlo in: idrogeno grigio, blu e green. Parleremo di ciò nel paragrafo successivo.

#### 4) Tipologie di idrogeno

I benefici ambientali dell'uso dell'idrogeno dipendono fortemente dai metodi di produzione per ottenerlo e dalle fonti primarie utilizzate durante lo stesso processo. Tuttavia, fino ad ora, l'idrogeno è stato prodotto principalmente utilizzando i processi di produzione più economici, quali per esempio il reforming a vapore del gas naturale, senza considerare l'impatto che questo ha sull'ambiente; infatti, oltre l'idrogeno, viene prodotta e rilasciata, nell'atmosfera, una consistente quantità di carbonio, che va ad aumentare l'effetto serra.

Con i pressanti problemi ambientali, però, l'interesse per la produzione di idrogeno a basse emissioni di carbonio è in aumento, come ci viene indicato dalla seguente figura:

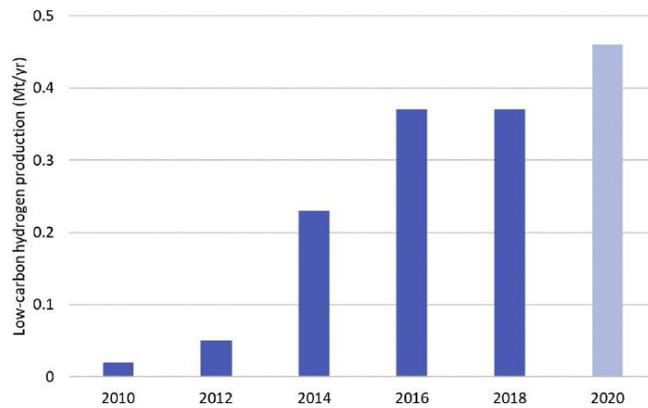


Figura 3 Produzione di idrogeno

Ciò ci permette di avvicinarci ad una produzione di idrogeno più ecosostenibile, producendo così idrogeno green, differenziandolo da quelli che lo sono meno, quali idrogeno grigio e blu.

#### - Idrogeno grigio

L'idrogeno grigio rappresenta l'idrogeno prodotto dal reforming a vapore del gas naturale o della gassificazione del carbone senza cattura, utilizzo e stoccaggio del carbonio (CCUS). Esso è utilizzato principalmente nell'industria petrolchimica e per la produzione di ammoniaca e questo fa sì che la sua domanda sia aumentata notevolmente negli ultimi 70 anni.

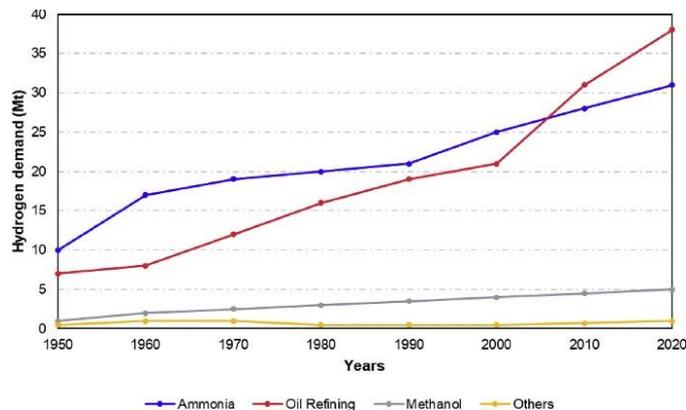


Figura 4 Domanda di idrogeno Grigio

Il principale svantaggio dell'idrogeno grigio è associato a una significativa quantità di emissioni di CO<sub>2</sub> generate durante la sua produzione; tuttavia, il reforming a vapore del gas naturale (SMR) senza CCUS è un processo ben consolidato, con conseguente basso costo dell'idrogeno, il che lo rende più vantaggioso e richiesto dalle grandi potenze nel mondo.

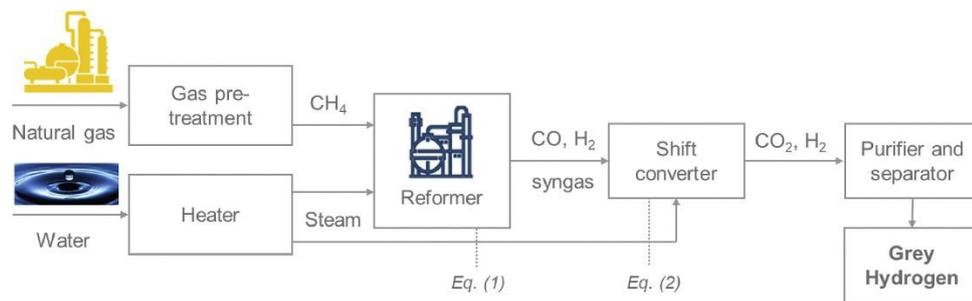


Figura 5 Processo di produzione IG

- Idrogeno blu

L'idrogeno blu è l'idrogeno prodotto dal reforming del metano a vapore con CCUS, utilizzando gas naturale o biomassa, grazie al quale si riesce a catturare il 90% delle emissioni di CO<sub>2</sub> nell'atmosfera.

Nonostante le emissioni siano inferiori, l'impatto ambientale rimane ancora significativo a causa di quelle che sono: le perdite di metano, prima; e trovare siti di stoccaggio adeguati al carbonio catturato che non può essere utilizzato, dopo. Ciò fa aumentare di gran lunga il prezzo di tale idrogeno rendendolo meno competitivo sul mercato.

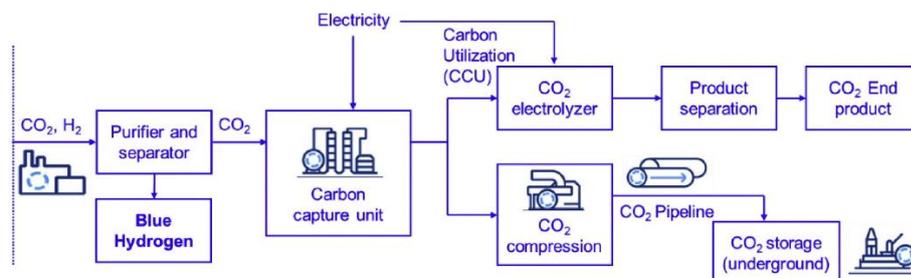


Figura 6 Processo di produzione IB

- Idrogeno Green

L'idrogeno green è l'idrogeno prodotto dall'acqua mediante elettrolisi utilizzando elettricità da fonti energetiche rinnovabili.

Attualmente, ci sono tre principali tecnologie di elettrolisi: elettrolisi dell'acqua alcalina (ALK), elettrolisi della membrana elettrolitica polimerica (PEM) e cella elettrolizzatore a ossido solido (SOEC).

Ognuna di queste è più o meno “matura” per il processo di produzione dell’idrogeno green, e portano a diversi vantaggi, ma anche svantaggi, che vedremo in seguito. [4.]

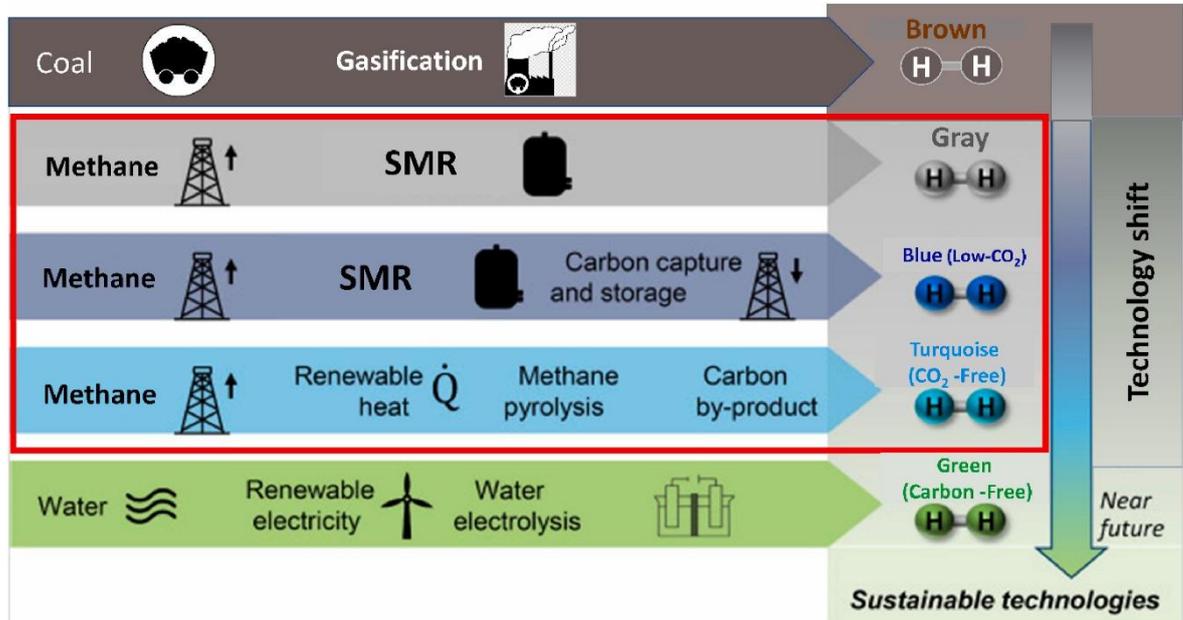


Figura 7 Classificazione

## 5) Processi di produzione dell’idrogeno green

Nel paragrafo precedente abbiamo fatto riferimento alle tecniche di produzione dell’idrogeno green più utilizzate e importanti, al momento. Esse, come abbiamo visto, avvengono mediante elettrolisi dell’acqua, ed in questo capitolo spiegheremo, nella maniera più efficiente possibile, la loro realizzazione e funzionamento.

### - ALK

L'elettrolisi dell'acqua alcalina è una tecnica elettrochimica di scissione dell'acqua in presenza di elettricità che prevede due singole reazioni di semi-cella, ovvero: la reazione di evoluzione dell'idrogeno al catodo, e quella dell'ossigeno all'anodo. Inizialmente sul lato catodico due moli di soluzione alcalina vengono ridotte per produrre una mole di idrogeno (H<sub>2</sub>) e due moli di ioni ossidrilici (OH<sup>-</sup>); l'H<sub>2</sub> prodotto può essere eliminato dalla superficie catodica e, i rimanenti ioni ossidrilici (OH<sup>-</sup>), vengono trasferiti sotto l'influenza del circuito elettrico, tramite un elettrolita, ovvero, una soluzione liquida alcalina costituita da idrossido di sodio e potassio, all'anodo.

All'anodo, gli ioni ossidrilici ( $\text{OH}^-$ ) vengono scaricati e producono 1/2 molecola di ossigeno ( $\text{O}_2$ ) e una molecola di acqua ( $\text{H}_2\text{O}$ ).

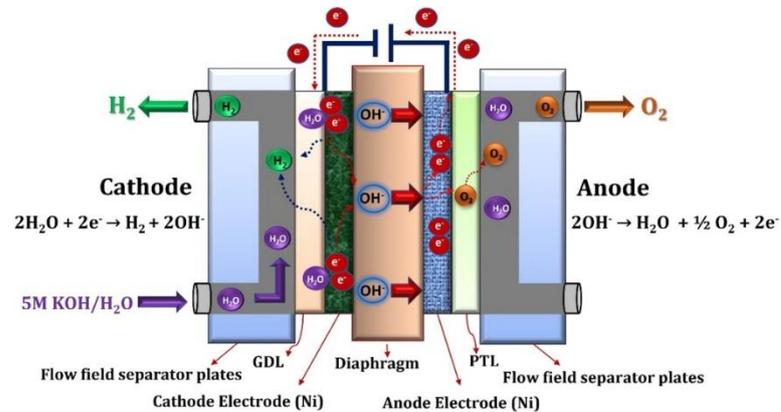


Figura 8 ALK

L'elettrolisi ALK è la tecnologia più matura, utilizzata già dal 1920, che beneficia dei bassi costi e della lunga durata operativa. Uno svantaggio è che il processo deve essere eseguito continuamente per evitare danni, in modo che, l'energia rinnovabile variabile non debba essere l'unica fonte di energia; inoltre, hanno problemi con basse densità di corrente e condizioni corrosive.

#### - PEM

L'elettrolisi PEM è stata idealizzata da Grubbs e sviluppato da General Electric Co. nell'anno 1966.

Rispetto al caso precedente, vi sono delle differenze, ovvero: il vettore di carica ionica è  $\text{H}^+$  e l'acqua deionizzata, che permea attraverso la membrana conduttrice di protoni, fornisce la funzionalità della reazione elettrochimica; mentre, la membrana polimerica solfonata viene utilizzata come elettrolita.

Il principio di funzionamento è il seguente: l'acqua viene scissa elettrochimicamente in idrogeno e ossigeno; inizialmente, sul lato anodico, la molecola d'acqua viene decomposta per generare ossigeno ( $\text{O}_2$ ), protoni ( $\text{H}^+$ ) ed elettroni ( $e^-$ ). L'ossigeno così generato, ed i protoni rimanenti, vengono trasportati attraverso la membrana conduttrice di protoni fino al lato catodico; mentre, gli elettroni, raggiungono il catodo attraverso il circuito esterno.

Sul lato catodico, i protoni e gli elettroni si ricombinano per produrre  $\text{H}_2$ .

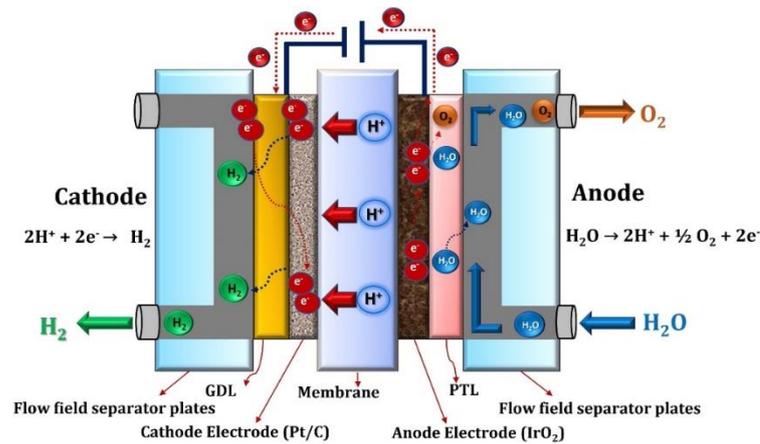


Figura 9 PEM

L' elettrolisi dell'acqua PEM funziona a temperature più basse (30-80 °C) con densità di corrente più elevate (1-2 A/cm<sup>2</sup>) e produce un'elevata purezza (99,999%) dei gas; inoltre è più sicura dell'elettrolisi dell'acqua alcalina grazie all'assenza di elettroliti caustici e all'ingombro ridotto.

Tuttavia, i principali punti a sfavore sono l'alto costo dei componenti, ovvero i materiali degli elettrodi in quanto realizzati in platino, i collettori di corrente e le piastre bipolari.

#### - SOEC

La cella di elettrolisi dell'acqua ad ossido solido (SOEC) è una delle celle di conversione elettrochimica; ovvero, converte l'energia elettrica in energia chimica. Il suo sviluppo è iniziato negli Stati Uniti nel 1970 da General Electric e Brookhaven National Laboratory, seguiti poi da Dornier in Germania.

La SOEC funziona con acqua sotto forma di vapore ad alte temperature (500-850 °C) e genera idrogeno green e ossigeno; il suo funzionamento è il seguente: inizialmente sul lato catodico, la molecola d'acqua viene ridotta in idrogeno (H<sub>2</sub>) e ione ossido (O<sub>2</sub><sup>-</sup>) mediante l'aggiunta di due elettroni. L'idrogeno rilasciato dalla superficie catodica e lo ione ossido rimanente (O<sub>2</sub><sup>-</sup>) vengono trasportati, attraverso la membrana a scambio ionico, fino al lato dell'anodo.

Sul lato anodico, gli ioni ossido (O<sub>2</sub><sup>-</sup>) vengono ulteriormente ridotti per generare ossigeno ed elettroni; a questo punto, l'ossigeno viene rilasciato dalla superficie anodica mentre, gli elettroni, vengono attratti, grazie alla positività del catodo, attraverso il circuito esterno, verso il lato catodico.

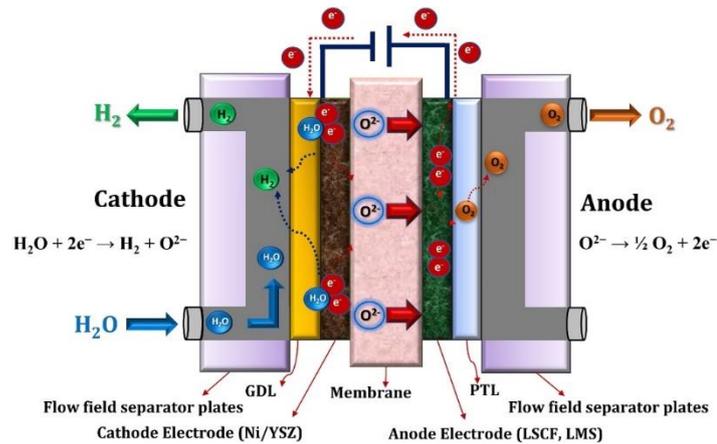


Figura 10 SOEC

I vantaggi di tale catalisi sono diversi: l'elevate temperature riducono drasticamente il consumo di energia per scindere l'acqua in idrogeno e ossigeno aumentando di conseguenza l'efficienza energetica; ciò porta ad una forte riduzione del costo dell'idrogeno. Rispetto alle tecniche precedenti, inoltre, essa non richiede l'uso di elettrocatalizzatori costruiti in metalli nobili e offre un'elevata efficienza di conversione.

Nonostante questi vantaggi, la SOEC ha un unico e grande svantaggio, ovvero un'insufficiente stabilità a lungo termine che ne ha impedito la commercializzazione; infatti, la stabilità riportata attualmente è di sole 20.000 ore con elettrolita sottile in zirconia stabilizzato all'ittrio. [5.]

Oltre queste tecniche, che possiamo definire principali, si stanno sviluppando nuovi metodi di produzione dell'idrogeno sempre più moderni ed ecosostenibili; tali alternative sono:

- Elettrolisi fotovoltaica

è un sistema ibrido, chiamato solare-idrogeno, costituito da pannelli fotovoltaici (PV), elettrolizzatori (EL) e batteria, la quale funge da accumulatore evitando le instabilità indotte dall'intermittenza delle uscite fotovoltaiche.

Tale elettrolisi avviene mediante celle fotoelettrochimiche ed il processo è analogo a quello dell'elettrolisi semplice; in questo caso, però, l'elettrodo è un semiconduttore e assorbe la luce solare proprio come avviene nei pannelli fotovoltaici. L'energia così prodotta viene poi usata per scindere le molecole di acqua in idrogeno e ossigeno.

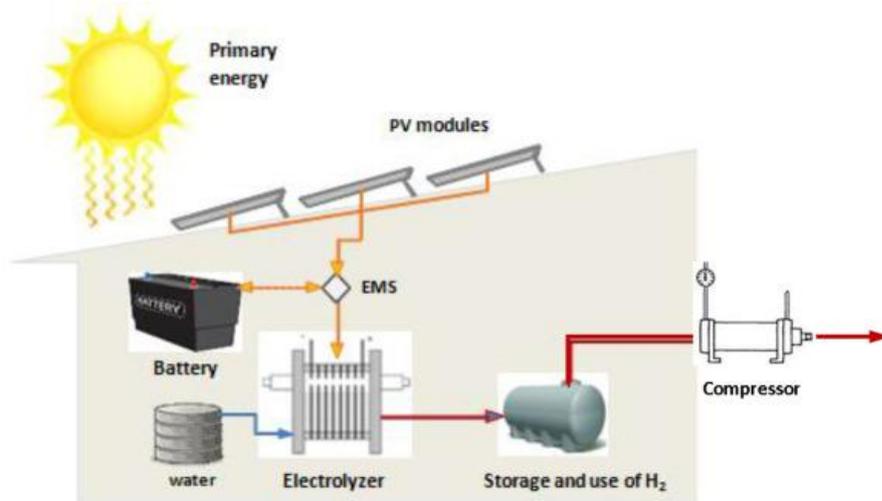


Figura 11 Elettrolisi fotovoltaica

Per i sistemi connessi alla rete, l'energia proveniente da quest'ultima può essere utilizzata per prolungare il tempo di funzionamento degli elettrolizzatori ed evitare frequenti avviamenti/arresti; ciò facilita un funzionamento più conveniente e, allo stesso tempo, migliora l'efficienza e riduce il costo degli elettrolizzatori stessi. Attualmente non esistono ancora materiali consolidati per garantire, al tempo stesso, efficienza e costi convenienti per la produzione su larga scala; per questo l'unione della tecnologia solare con quella dell'elettrolisi spesso risulta non sostenibile. [6.][7.]

#### - Fotocatalisi

La produzione di idrogeno fotocatalitico tramite la scissione solare dell'acqua è una delle soluzioni più promettenti per l'energia sostenibile in quanto l'energia solare è una risorsa energetica naturale inesauribile.

La reazione fotocatalitica di scissione dell'acqua prevede tre fasi principali.

- ~ I fotocatalizzatori vengono eccitati dalla luce per generare elettroni e lacune.
- ~ Gli elettroni e le lacune generati vengono separati e trasferiti sulla superficie dei fotocatalizzatori
- ~ Il rapporto di separazione avviene attraverso l'energia solare.

Le reazioni fotocatalitiche utilizzano generalmente semiconduttori per assorbire direttamente i fotoni al di sopra dell'energia del gap di banda e produrre vettori costituiti da elettroni e lacune, promuovendo così reazioni di ossidazione e riduzione.

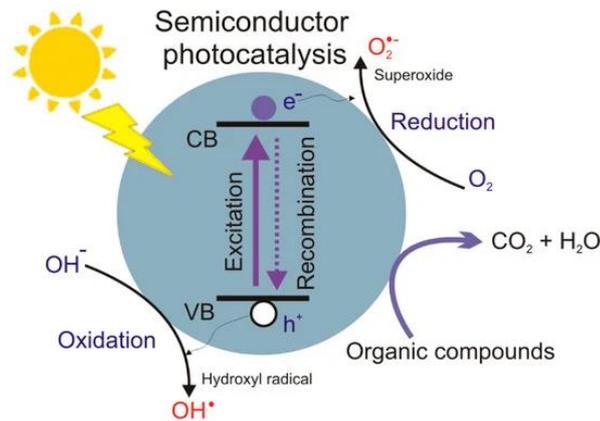


Figura 12 Fotocatalisi

La bassa efficienza solare-idrogeno è una delle sfide cruciali nella fotocatalisi ed i fattori che la provocano sono prevalentemente due: la maggior parte dei semiconduttori usati come fotocatalizzatori possono essere attivati solo dall'ultravioletto e da una certa luce visibile; inoltre, elettroni e lacune hanno un alto rapporto di ricombinazione; ovvero, all'aumentare delle concentrazioni di elettroni liberi aumenta la probabilità che un elettrone libero vada ad occupare una lacuna.

Negli anni, però, si è trovata una soluzione per aumentare l'efficienza della fotocatalisi e questa risiede nell'utilizzare metalli nobili come materiali fotocatalitici in quanto riescono a risolvere entrambi i problemi sopra elencati. Essi, infatti, assorbono gli elettroni eccitati, frenando così la ricombinazione tra elettroni e lacune; inoltre, l'oscillazione collettiva degli elettroni sulla superficie dei metalli nobili stessi, contribuisce al forte assorbimento della luce visibile. [8.][9.]

#### - Fotosintesi artificiale

La fotosintesi artificiale tenta di replicare il processo naturale della fotosintesi in cui le piante verdi utilizzano la luce solare naturale per convertire  $H_2O$  e  $CO_2$  in liquidi (metanolo o alcol di legno) e gas (idrogeno e metano).

Contrariamente a quanto accade in natura, dove la reazione è continua e ininterrotta, durante la fotosintesi artificiale, ciò non avviene; infatti, in questo caso, la reazione viene continuamente interrotta, bruciando sostanze chimiche, ma producendo idrogeno e ossigeno.

Gli step in cui può essere descritto tale processo, sono i seguenti:

- ~ La separazione dell'acqua in ossigeno e idrogeno utilizzando la luce e un fotocatalizzatore.
- ~ L'utilizzo di una membrana per separare l'idrogeno dall'isola gassosa prodotta contenente anche ossigeno.

- ~ L'uso di un catalizzatore per creare la reazione tra idrogeno e CO<sub>2</sub> per produrre olefina.

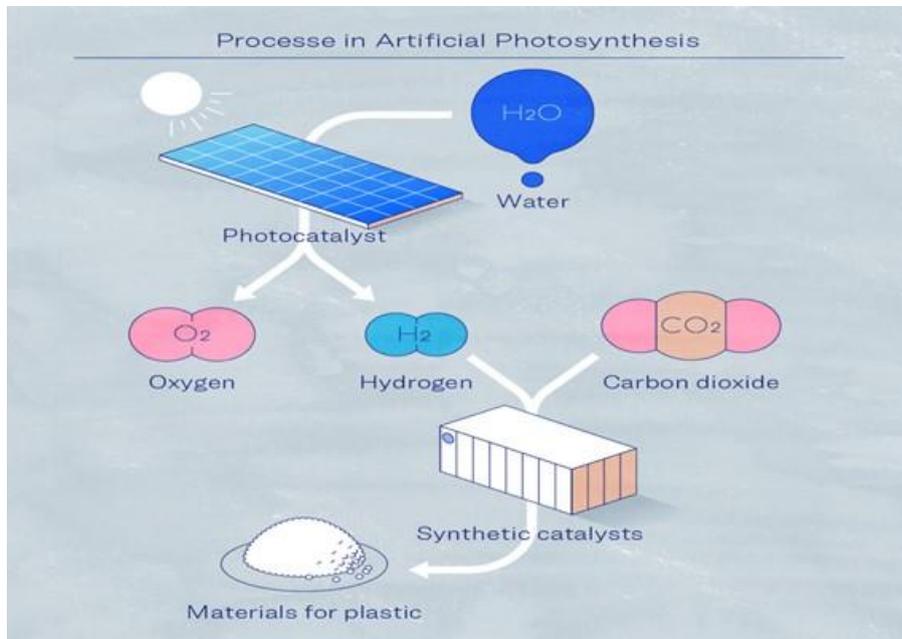


Figura 13 Fotosintesi artificiale

La New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO) ha classificato la fotosintesi artificiale come uno dei metodi più promettenti per il futuro, perché oltre a fornire idrogeno a qualsiasi motore o industria, consente il riciclo dei materiali di scarto, quali l'olefina, utilizzata per produrre plastica evitando l'utilizzo di ulteriore petrolio. [10.]

#### - Fotofermentazione

L'idrogeno può essere prodotto da una varietà di microrganismi fotosintetici e non fotosintetici come alghe verdi, cianobatteri, batteri fotosintetici anossigenati; che utilizzano l'energia solare per produrre idrogeno attraverso la fotosintesi, nota anche come produzione di idrogeno fotobiologico.

Tali microrganismi sono in grado di ridurre gli ioni H<sup>+</sup> in idrogeno gassoso, attraverso l'ossidazione di composti organici come gli acidi grassi a basso peso molecolare e l'energia del sole.

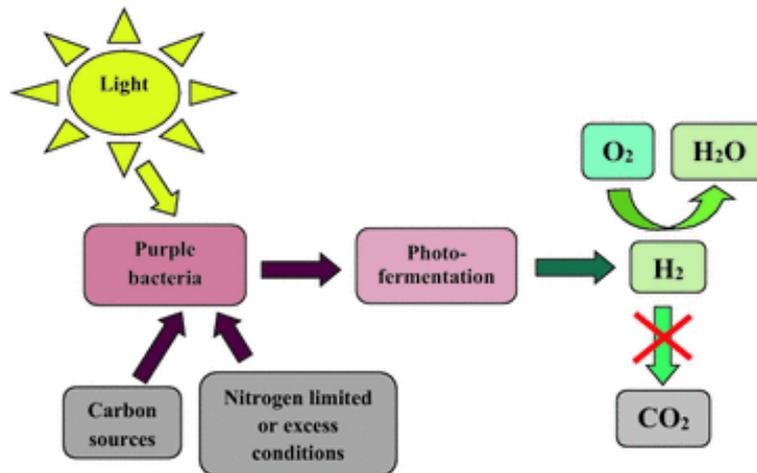


Figura 14 Fotofermentazione

- Biomassa

La produzione di idrogeno da fonti rinnovabili, in particolare biomassa, porta ad innumerevoli vantaggi grazie alla disponibilità, abbondanza e neutralità in termini di inquinamento, di quest'ultima.

La produzione di idrogeno green mediante biomassa consiste nell'utilizzare il biogas prodotto dalla digestione anaerobica della biomassa (chiamata metanizzazione), producendo una miscela di idrogeno e metano, chiamata biohythane, composta dal 10% di idrogeno, 60% di metano ed il resto da CO<sub>2</sub>.

Le fasi principali nella produzione di idrogeno da biogas sono descritte dalla seguente immagine:

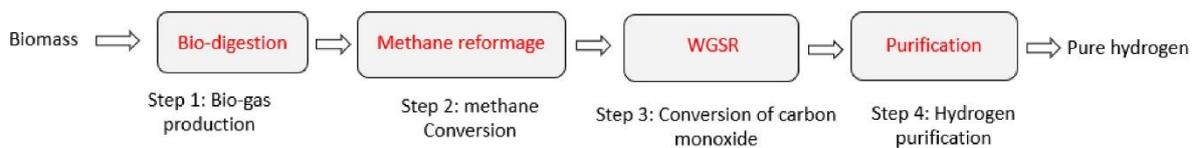


Figura 15 Idrogeno puro

Uno dei prodotti importanti del processo di reforming è il CO, che a sua volta può essere convertito in H<sub>2</sub> secondo la reazione di spostamento del gas d'acqua (WGS); ovvero il metodo per convertire la CO<sub>2</sub> di scarto e H<sub>2</sub> rinnovabile in CO e H<sub>2</sub>O, dove il CO risultante può essere utilizzato in processi che richiedono syngas. Per quest'ultima fase si utilizzano catalizzatori ferro-cromo (Fe-Cr) e rame-zinco (Cu-Zn) per facilitare la

reazione rispettivamente ad alte e basse temperature; ultimamente, però, la ricerca si sta spostando verso il cerio, in quanto dotato di proprietà più favorevoli. [11.]

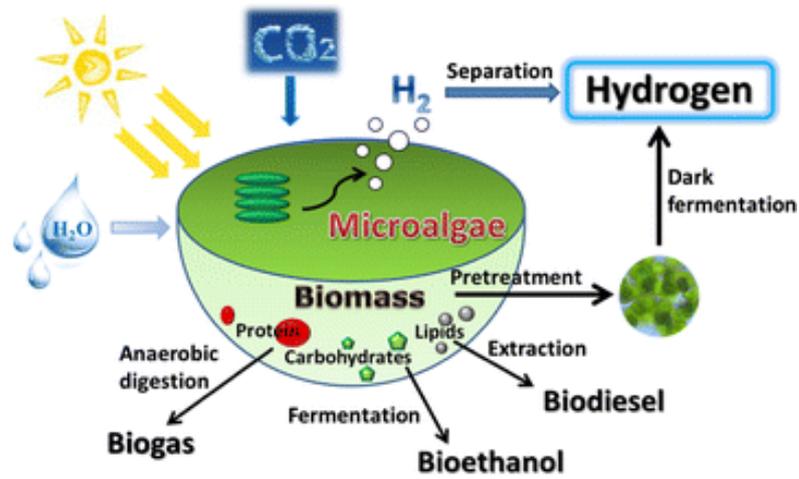


Figura 16 Biomassa

## 6) LCA: Life Cycle Assessment

Quelli appena descritti, partendo dai più utilizzati fino ad arrivare a quelli più moderni ed in fase di studio, sono i metodi principali per produrre idrogeno green, ovvero idrogeno con bassa emissione di carbonio. Per stabilire quali tra questi, in assoluto, è il processo più sostenibile e all'avanguardia per un futuro a zero emissioni, adoperiamo degli strumenti, quali LCA e LCIA, che ci permettono di studiare l'impatto che queste tecniche di produzione hanno sul mondo. Iniziamo allora ad esporre cosa sono questi strumenti e come funzionano.

- LCA: il Life Cycle Assessment costituisce una procedura standardizzata che permette di quantificare gli impatti ambientali di un prodotto, processo e servizio.  
Concetto chiave connesso alla metodologia LCA è il ciclo vita di prodotto, ovvero l'inclusione e la considerazione di tutte le fasi del ciclo vita, che possono essere riassunte in: reperimento materie prime, processi produttivi, trasporti, uso e fine vita. Questo è molto importante in quanto, se si considerassero solo alcune fasi del ciclo vita, si potrebbe arrivare a conclusioni distorte circa i vantaggi o gli svantaggi del sistema considerato.



Figura 17 LCA

Tale metodologia, inoltre, può essere applicata in diversi contesti, quali:

- ~ Cradle to Grave (dalla culla alla tomba) se il ciclo vita si considera terminato con la riduzione a rifiuto del prodotto considerato;

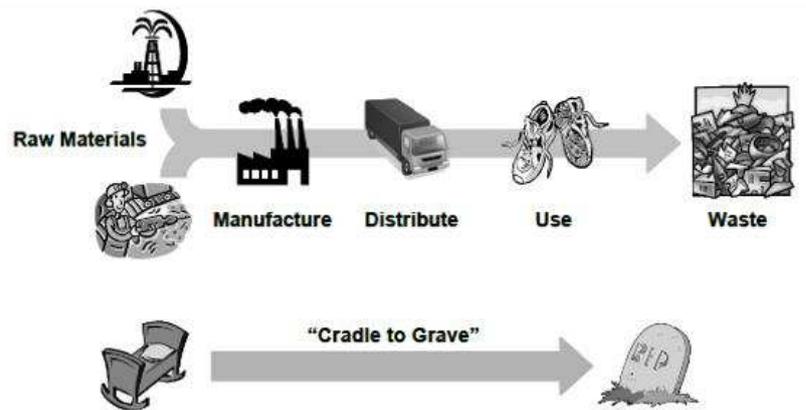


Figura 18 Cradle to Grave

~ Cradle to Cradle (dalla culla alla culla) se il ciclo vita si considera terminato con la re-immissione in successivi cicli vita dei rifiuti rigenerati;

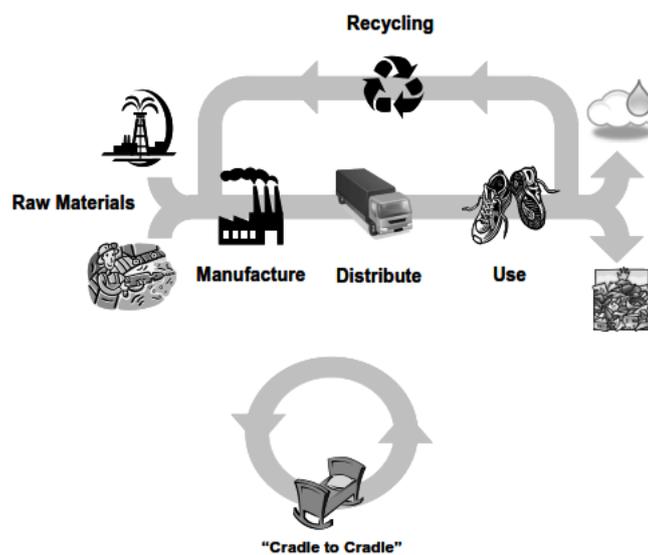


Figura 19 Cradle to Cradle

Presentiamo, ora, i vari passi che costituiscono un'analisi LCA:



Figura 20 Fasi LCA

1. Definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione: si definisce l'obiettivo dell'analisi e il suo campo di applicazione; esempi possono essere:
  - ~ Definizione e quantificazione del carico ambientale di un determinato ecosistema;
  - ~ Valutazione delle emissioni di CO<sub>2</sub> associate ad un sistema;
  - ~ Definizione di linee guida per migliorare prodotti e processi

Una volta definito l'obiettivo, si definisce l'unità funzionale, ovvero la funzione che sarà oggetto di analisi; essa è dotata di una unità di misura ed è il parametro di riferimento a cui tutta l'analisi sarà riferita.

Infine, si definiscono i confini del sistema, ovvero le fasi del ciclo di vita del sistema in oggetto che vogliamo includere nell'analisi.

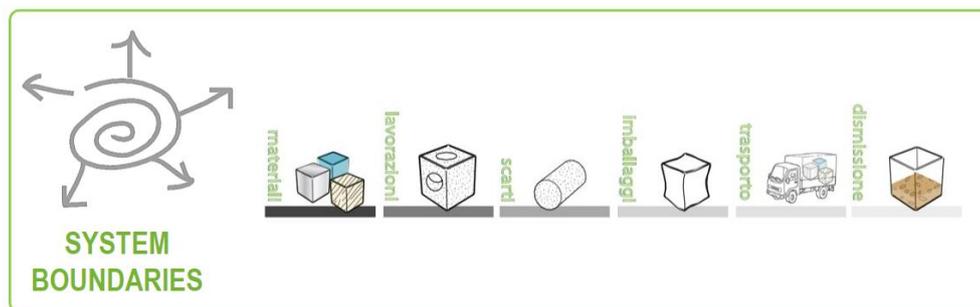


Figura 21 Confini del sistema

2. Inventario: è la fase di reperimento di tutti i dati necessari per lo svolgimento dell'analisi, che viene svolta solitamente in collaborazione con le aziende. Tali dati vengono poi classificati nelle seguenti categorie:

Collect data and classify under the following major headings

Energy inputs, raw material inputs, ancillary inputs, and other physical inputs	Releases to air, water, and soil
Products, co-products and waste	Other environmental aspects

Figura 22 Inventario

Questo è lo step più lungo dell'intero processo LCA in quanto serve a determinare l'accuratezza dell'analisi stessa; alcune fasi principali sono:

- ~ Preparazione della raccolta dati con strumenti di support quali, per esempio, Excell;
- ~ Collezionare i dati;

- ~ Validare i dati;
  - ~ Relazionare i dati all'unità funzionale;
  - ~ Raffinare i confini del sistema a causa, per esempio, della mancanza di alcuni dati;
  - ~ Revisionare e ripetere, se necessario, alcuni passi.
3. Valutazione degli impatti: in questa fase si determinano gli impatti ambientali dell'oggetto preso in esame mediante software commerciali di analisi LCA. Entra qui in gioco la fase LCIA di cui parleremo, nello specifico, nel paragrafo successivo.
  4. Interpretazione dei risultati: questo è lo step finale di un'analisi LCA in cui si possono ipotizzare, dopo aver valutato e interpretato, in base all'obiettivo dell'analisi, i risultati ottenuti, soluzioni migliorative da studiare, poi, con successive analisi. Vengono, a questo punto, tratte le giuste conclusioni in base ai dati ottenuti e agli obiettivi prefissati. [12.]

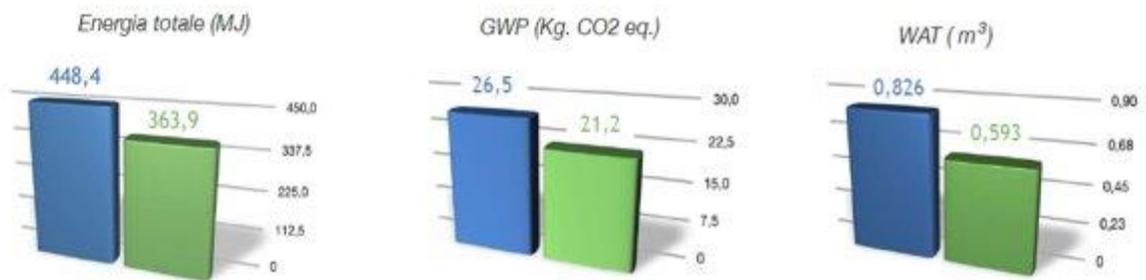


Figura 23 Interpretazione dei risultati

## 7) LCIA: Life Cycle Impacts Assessment

La fase LCIA (Life Cycle Impacts Assessment) converte i dati raccolti nei vari passaggi del ciclo LCA, in potenziali impatti ambientali.

Possono essere scelte diverse categorie di impatto per la valutazione del carico ambientale di un prodotto/processo/servizio, tra queste vi sono: acidificazione (AP), eutrofizzazione (EP), cambiamenti climatici (GWP), esaurimento dell'ozono (ODP).

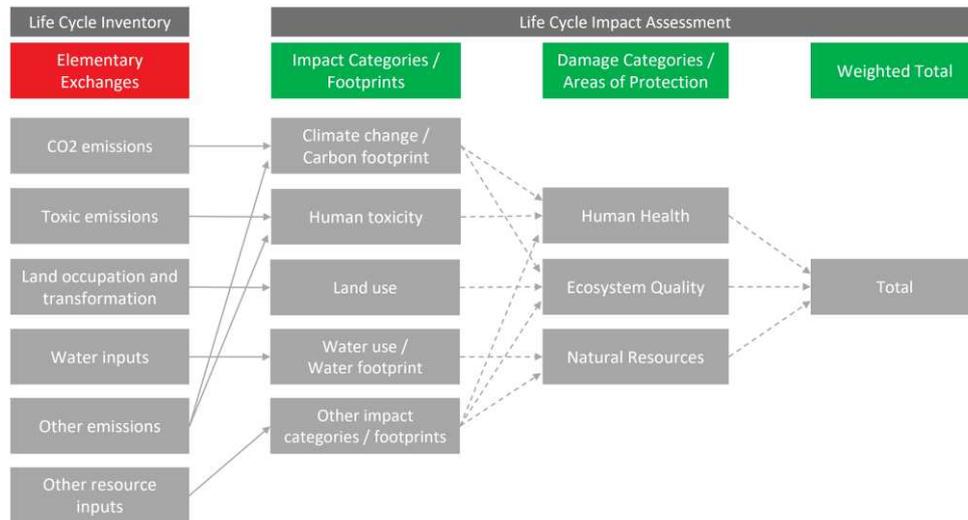


Figura 24 LCIA

Il processo LCIA viene realizzato mediante software commerciali; nella stesura di questa tesi prenderemo in considerazione il programma SimaPro che è uno strumento professionale per raccogliere, analizzare e monitorare le prestazioni ambientali di prodotti e servizi.

I dati LCIA possono essere rappresentati graficamente o utilizzando dati tabulati; prendiamo, per esempio, lo studio dell'LCA dei tre tipi di idrogeno presentati nella parte iniziale dell'elaborato.

### - LCA dell'idrogeno grigio

L'idrogeno grigio rappresenta l'idrogeno prodotto dal reforming a vapore del gas naturale o della gassificazione del carbone senza cattura, utilizzo e stoccaggio del carbonio (CCUS); quindi, il suo principale svantaggio, è associato a una significativa quantità di emissioni di CO<sub>2</sub> generate durante la sua produzione.

Proprio per questo, e per l'utilizzo di combustibili fossili come materia prima di produzione, l'LCA di questo idrogeno è molto sfavorevole ma, nonostante ciò, tale idrogeno è quello più richiesto e venduto sul mercato perché è il più economico rispetto agli altri due, in quanto il suo prezzo è circa 1/1,5 dollari al kg, molto meno dei 2-2,5 dollari del blu e dei 4 dollari del green.

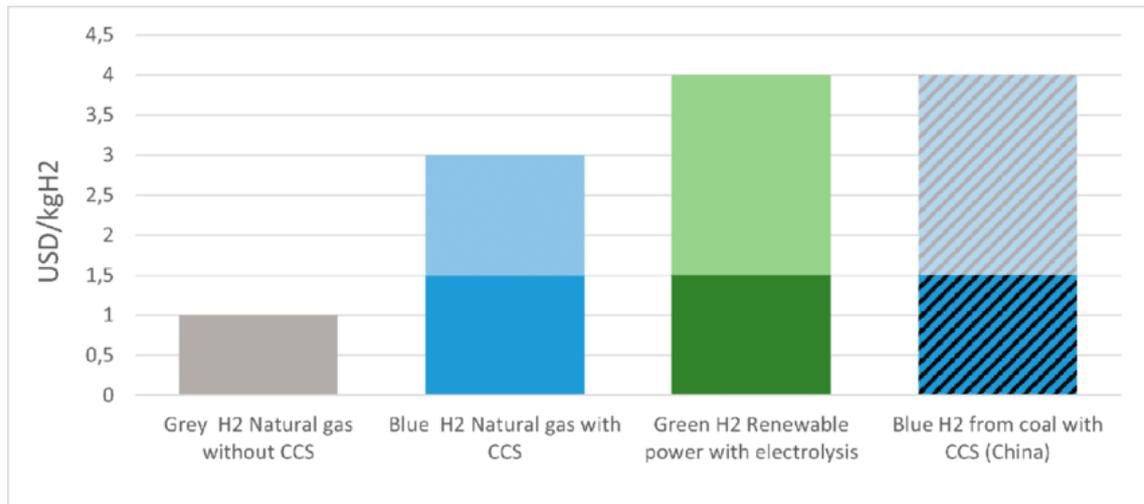


Figura 25 Costo idrogeno

#### - LCA dell'idrogeno blu

Nel 2020 è stato condotto uno studio in Europa sull'impatto del ciclo di vita di un sistema di produzione di idrogeno blu, dal quale si è ottenuto che, le riduzioni di CO<sub>2</sub> equivalente, per unità di idrogeno prodotto, sono dell'ordine del 50-80% rispetto ai sistemi di produzione di idrogeno non verdi.

Ciò dimostra come l'idrogeno blu riduca notevolmente le emissioni di inquinanti e che quindi sia preferibile il suo utilizzo, piuttosto dell'idrogeno grigio; ma in realtà, il metodo LCA mostra che il blu è sinonimo di idrogeno a basse emissioni solo se vengono soddisfatte due condizioni:

- ~ Il gas naturale associato deve avere le minori emissioni possibili: ciò significa che dall'estrazione del metano al proseguimento della catena di produzione compreso il trasporto, lo stoccaggio deve essere ridotto al minimo. Questo punto porta ad includere importanti investimenti nelle infrastrutture del gas naturale per migliorarne l'efficienza, costi che gli investitori non sono pronti a sostenere;
- ~ Catturare fino al 90% di CO<sub>2</sub>: ciò porta ad un aumento dei costi e ad una minore efficienza energetica.

Per quanto riguarda il costo dell'idrogeno blu, questo è quasi tutto determinato dal costo di produzione del metano.

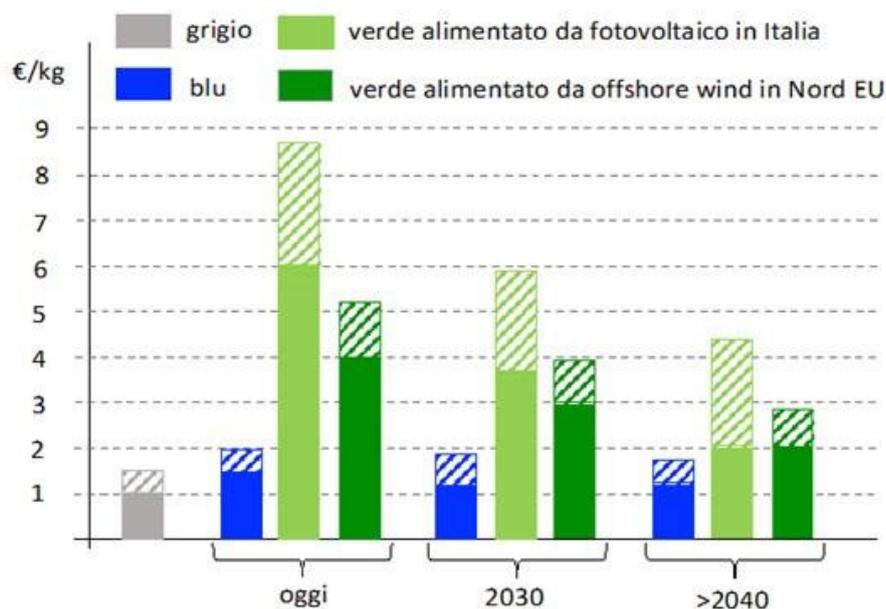


Figura 26 Costo IB

- LCA dell'idrogeno green

La conversione dell'elettricità rinnovabile in idrogeno green è l'alternativa più fattibile ed economica, che richiede solo un elettrolizzatore per l'installazione. Le problematiche economiche e tecnologiche, legate a questo processo, risiedono nel trasporto e nello stoccaggio dell'idrogeno green prodotto: la compressione ad alta pressione soffre di bassi problemi di efficienza energetica e sicurezza; per lo stoccaggio di idrogeno di grandi dimensioni, la sua liquefazione o la conversione chimica in metanolo, ammoniaca e dibenzil toluene sono risultate vantaggiose in termini di densità di stoccaggio, ma le richieste di energia termica di questi processi sono elevate e le soluzioni da adoperare costose.

Negli ultimi anni, però, si è pensato ad una soluzione che potesse, nel modo più semplice e veloce possibile, ridurre quelli che sono i costi di trasporto e stoccaggio, utilizzando impianti già presenti all'interno della rete. Tale soluzione consiste nel miscelare l'idrogeno green, ottenuto dall'elettrolisi dell'acqua, nella rete del gas naturale esistente fino ad un volume massimo pari al 10%; tuttavia, il contenuto di idrogeno nella rete del gas naturale deve essere limitato per i seguenti motivi:

- ~ l'infragilimento all'idrogeno dell'acciaio delle tubazioni;
- ~ L'aumento della portata volumetrica per convogliare la stessa quantità di energia;

- ~ Limite di idrogeno delle stazioni di compressione e loro aumento dei costi operativi;
- ~ Pericoli e rischi associati all'iniezione di idrogeno.

Come abbiamo detto all'inizio di questo paragrafo, la conversione dell'elettricità prodotta da fonti rinnovabili, in idrogeno green, è possibile grazie al solo impiego dell'elettrolizzatore che è l'elemento che più grava sui costi del sistema.

Attualmente esistono tre tipi di elettrolizzatori, che si distinguono in base alle condizioni operative e al tipo di elettrolita impiegato: elettrolizzatore alcalino (ALK), elettrolizzatore a membrana a scambio protonico (PEM) ed elettrolizzatori a ossido solido (SOEC).

Confrontando le tecnologie di questi elettrolizzatori e analizzandone le prestazioni ambientali nello specifico di PEM e SOEC, si è scoperto che il maggior contributo alle diverse categorie di impatto selezionate nell'LCA, era dovuto all'elettricità durante il funzionamento. Inoltre, l'elettrolizzatore PEM ha mostrato i più bassi impatti ambientali grazie ad un minor consumo energetico ed al minor utilizzo di materiali ad alto impatto ambientale.

Per quanto riguarda le tecnologie, invece, mentre gli elettrolizzatori alcalini sono la tecnologia incumbent per l'applicazione industriale, essendo anche caratterizzati da una maggiore durata e meno soggetti a rischi di approvvigionamento del materiale, gli elettrolizzatori PEM mostrano una flessibilità molto più elevata e la più alta capacità di turndown. [13.]

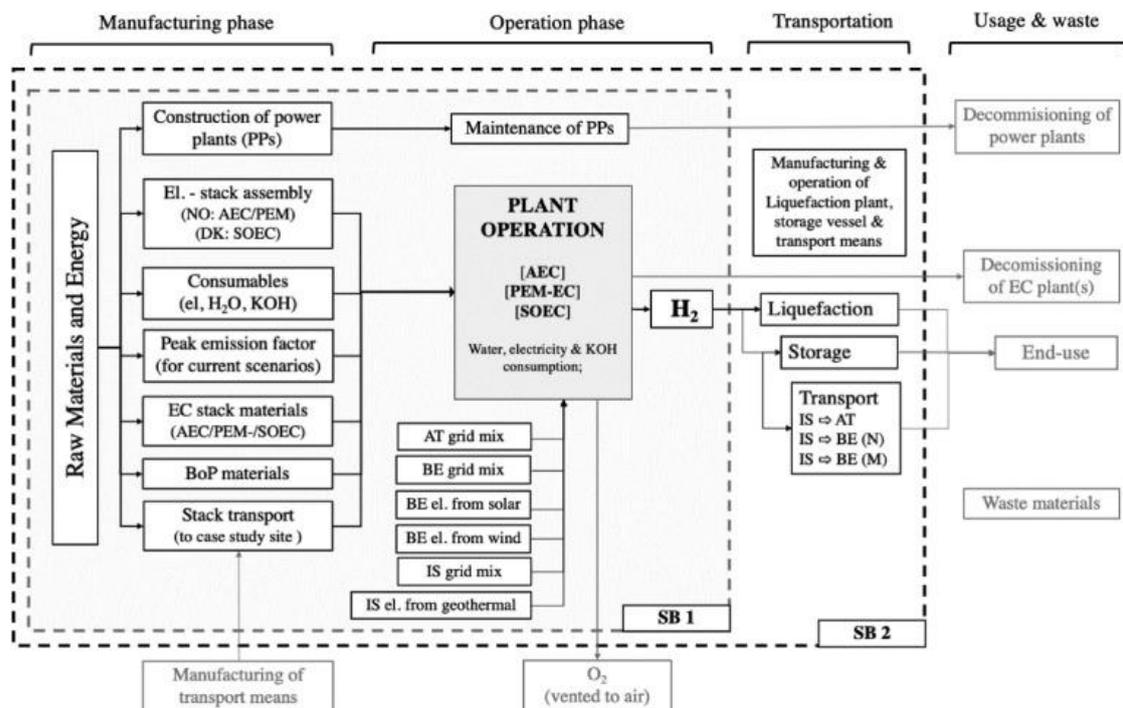


Figura 27 LCA Idrogeno Green

Concludiamo con il dire che, dai vari confronti effettuati fino a questo momento, si è più volte visto come idrogeno blu e idrogeno green siano abbastanza simili tra di loro in termini di sostenibilità. Volendo fare un confronto preliminare su quelli che sono i costi al chilogrammo, attuali e futuri tra i due, noteremo che, nonostante l'enorme investimento iniziale che fa schizzare il prezzo dell'idrogeno green nei primi periodi di produzione, trasporto e stoccaggio a 10 \$/kg rispetto al massimo di 3 \$/kg per l'idrogeno blu, nel 2050 che è la data prevista per avere zero emissioni, il prezzo dell'idrogeno green scenderà notevolmente fino ad arrivare ad un massimo di 1 \$/kg.

Ciò porta a dire che, a lungo termine, investire sull'idrogeno green non può che portare solo a dei vantaggi; ma, essendo questa tecnologia ancora in fase di sviluppo, si preferirebbe investire, in egual misura, anche sull'idrogeno blu, in modo tale da non privare il mondo di alcuna possibilità in termini di efficienza e sostenibilità.

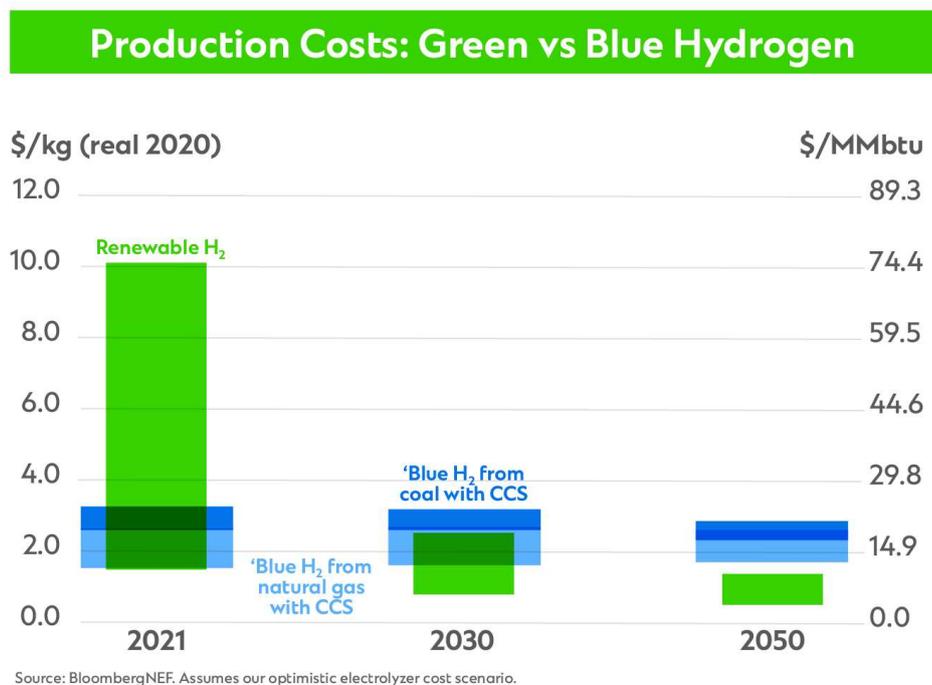


Figura 28 Costi di produzione: Green vs Blu

## 8) Impatti dell'idrogeno

Tutto quello che abbiamo scritto e dimostrato in questa tesi ha lo scopo di informare e sensibilizzare sull'esistenza dell'idrogeno green come fonte energetica a zero emissioni, capace di portare il mondo, e noi suoi abitanti, verso un futuro che sia totalmente sostenibile ed ancora più adatto alle nostre esigenze.

Abbiamo, pertanto, mostrato solo una faccia della medaglia, ovvero la più vantaggiosa; ciò che non abbiamo ancora approfondito, invece, è la faccia "oscura" di questa tecnologia, ovvero gli impatti che tale idrogeno ha nella nostra quotidianità e su ciò che ci circonda.



Figura 29 Impatto

## 9) Impatto dell'idrogeno green sul mondo

La 26a Conferenza delle parti delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici a Glasgow ha sottolineato la necessità di eliminare gradualmente i combustibili fossili per prevenire gli effetti negativi dei cambiamenti climatici; tuttavia, le fonti di energia rinnovabile più ampiamente accettate, tra cui l'eolico e il solare fotovoltaico, presentano limiti tecnici ed economici, principalmente a causa della loro intermittenza. L'idrogeno, tra le altre soluzioni tecniche, è il pezzo mancante del puzzle per superare tali sfide delle fonti di energia rinnovabile.

Nel 2021, 17 paesi, tra cui Francia, Giappone e Corea del Sud, hanno annunciato le loro strategie sull'idrogeno per espanderne l'applicazione o la produzione; nello specifico, la Corea del Sud ha prefissato che, entro il 2050, consumerà circa 27 milioni di tonnellate di idrogeno per raggiungere i suoi obiettivi di decarbonizzazione.

Il World Energy Council ha utilizzato il trilemma energetico, che consiste in sostenibilità ambientale, equità energetica e sicurezza energetica, per studiare i punti di forza e di debolezza dell'idrogeno rispetto ad altri vettori energetici e per formulare raccomandazioni politiche appropriate.

L'idrogeno e altre importanti fonti di elettricità, come il carbone, il gas, l'uranio e le energie rinnovabili, sono confrontati in un quadro tridimensionale la cui struttura è composta da: ritorno sull'energia degli investimenti energetici, emissioni di gas a effetto serra durante il ciclo di vita, prezzo dell'energia, dipendenza dalle importazioni, il ruolo dei vettori energetici come stoccaggio dell'energia e altre applicazioni.

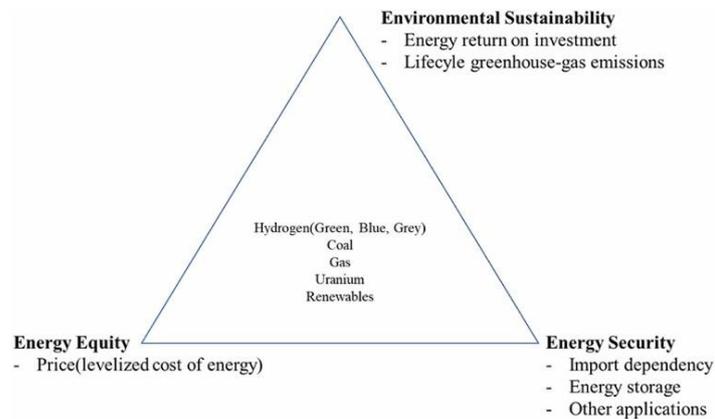


Figura 30 Trilemma

- Caso Corea del Sud

La dipendenza dalle importazioni e lo stoccaggio dell'energia sono due criteri essenziali per valutare la sicurezza energetica ma queste, per la Corea del Sud, sono due punti completamente a sfavore; infatti, la dipendenza della Corea dalle fonti energetiche importate è aumentata al 93,5% nel 2019, in particolare per l'idrogeno siamo al 99,4%, a causa dell'elevata quota di industrie ad alta intensità energetica e delle scarse risorse energetiche interne.

	Carbone	Olio <sup>un</sup>	Gas naturale	Nucleare	Energie rinnovabili	Idrogeno
Dipendenza dalle importazioni (%)	99.5	97.3	99.4	100	0	99.4
Importazioni nette <sup>b</sup>	84,086	906,021	40,748	747	0	129.22
Totale consumi finali <sup>b</sup>	84,486	927,062	40,991	747	13,511	130

Figura 31 Importazioni Corea

La Corea, infatti, non ha la possibilità di produrre autonomamente l'idrogeno green, in quanto la sua produzione attraverso il solare fotovoltaico e l'eolico non sono economicamente fattibili a causa del loro basso ritorno energetico. Essa, pertanto, è costretta ad importarlo perdendo, di fatto, tutti i vantaggi di una fonte rinnovabile a km zero. [14.]

## 10) Impatto sull'ambiente

I criteri di sostenibilità possono essere applicati in diverse fasi della produzione dell'idrogeno green; in questa sezione tratteremo quelli inerenti all'ambiente e di ciò che ne fa parte.

I criteri che riguardano la categoria di impatto "Ambiente" sono tre:

### 1. Uso del suolo

Tale criterio indica quale tipo di terreno è o non è ammissibile come possibile cantiere per l'elettrolizzatore e la relativa produzione di elettricità.

Al fine di garantire la conservazione delle riserve naturali e la protezione delle specie minacciate, tutti i tipi di aree naturalmente protette, come per esempio le

riserve naturali, le foreste, gli ecosistemi ricchi di biodiversità, ecc... non possono essere utilizzati come cantiere.

Si aggiungono anche i terreni agricoli produttivi, in quanto si deve consentire una produzione agricola stabile e priva di interferenze che possono alterare la qualità e la sostenibilità del prodotto coltivato.

Si è dimostrato che, in caso di strozzature della rete e per evitare riduzioni di elettricità rinnovabile, gli elettrolizzatori dovrebbero essere costruiti nelle immediate vicinanze di parchi eolici, parchi solari o sottostazioni; ma se ciò non è possibile e bisogna per forza sviluppare nuove aree di produzione, allora si deve concentrare la ricerca su terreni che hanno una qualità del suolo inferiore a 20, che sta ad indicare una bassa produttività agricola.

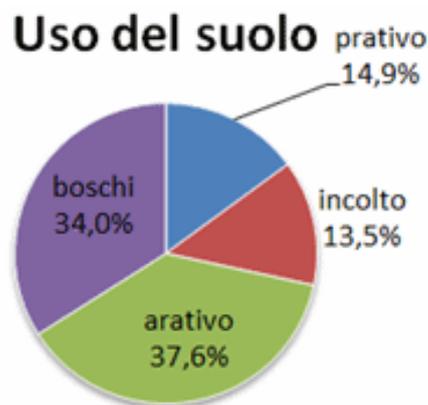


Figura 32 Uso del suolo

## 2. L'uso dell'acqua

L'acqua dolce è fondamentale nel processo di elettrolisi, stimando un consumo di 9 kg di acqua per ottenere 1 kg di idrogeno; tuttavia, essa è una risorsa scarsa in molte regioni del mondo, per questo le acque superficiali o sotterranee dovrebbero essere utilizzate solo in aree in cui la quantità di acqua dolce disponibile è sufficiente per scopi umani e agricoli, senza causare stress idrico. Nelle aree in cui è necessaria la desalinizzazione dell'acqua di mare per fornire acqua alla popolazione, devono essere installati desalinizzatori aggiuntivi per la produzione di idrogeno; il che fa abbassare il grado di sostenibilità in quanto, oltre a considerare i costi ambientali legati al processo di elettrolisi, bisogna tener conto anche di quelli riguardanti la depurazione.



Figura 33 Uso dell'acqua

### 3. Inquinamento acustico

La produzione di idrogeno provoca emissioni acustiche causate dalla ventilazione e il raffreddamento durante l'elettrolisi. Questo tipo di impatto crea dei grossi problemi legati non solo agli umani per i quali, nei paesi in cui le centrali elettriche sono situate in prossimità di aree residenziali, bisogna rispettare rigidamente dei limiti di emissioni acustiche; ma vi sono problemi legati anche agli animali, infatti se prendiamo l'elettricità dai mulini a vento o dalle turbine eoliche, queste hanno un impatto sulla vita di uccelli e pipistrelli, in quanto creano inquinamento acustico e visivo, portando all'aumento della mortalità animale del 3-14%. [15.]

Nonostante tutti questi impatti negativi, dobbiamo spezzare una lancia a favore per l'idrogeno, infatti un aspetto fondamentale da considerare è l'utilizzo di materiale di scarto come fonte di energia primaria per produrlo.

#### Esempi

- La produzione globale di rifiuti di plastica ha raggiunto i 322 milioni di tonnellate nel 2015; lo smaltimento improprio dei rifiuti di plastica potrebbe causare un grave inquinamento ambientale, pertanto, convertire i rifiuti di plastica in carburante, può ridurre la quantità di plastica nelle discariche o negli inceneritori, diminuendo così l'impatto ambientale. Inoltre, i rifiuti di plastica possono essere materie prime preziose per la conversione in combustibili utili poiché sono ricchi di carbonio e idrogeno e possono aiutare a ridurre la dipendenza da fonti di energia non rinnovabili. Esistono vari metodi per utilizzare i rifiuti plastici per il recupero di energia, tra cui: incenerimento, pirolisi e gassificazione; in particolare le ultime due, che sono già note per la produzione stessa di idrogeno. [16.]

- Un esempio più concreto, ma non ancora tangibile, è il caso Brasile. In Brasile, come nella maggior parte del mondo, l'idrogeno è prodotto principalmente dal gas naturale fossile (NG) attraverso il reforming del metano a vapore (SMR), producendo elevate emissioni di anidride carbonica e quindi molto inquinamento. Tuttavia, il Brasile può produrre uno degli idrogeni verdi più economici al mondo a lungo termine, grazie alle sue risorse di energie primarie rinnovabili che possono essere utilizzati per produrre idrogeno elettrolitico alimentato da energia eolica e solare; dall'elettrolisi dell'acqua dell'elettricità in eccesso generata negli impianti di etanolo e zucchero; da acque reflue per produrre bioidrogeno o per altre fonti, come i residui prodotti negli impianti di vino ed etanolo. Tuttavia, la produzione di idrogeno dai rifiuti urbani manca ancora di valutazione a livello nazionale. Ogni anno in Brasile vengono prodotti 82,5 Mt di rifiuti solidi urbani (RSU), di cui il 92,2% viene raccolto e il 60,2% viene smaltito adeguatamente in discariche sanitarie. Di conseguenza, il 39,8% dei rifiuti solidi urbani viene ancora smaltito impropriamente in discariche a cielo aperto e in discariche controllate dove, uno dei principali sottoprodotti del processo di trattamento è il biogas, una miscela di metano e anidride carbonica, da cui si può produrre il biometano. [17.]
- Ultimo, ma non per importanza, è il caso dell'Egitto, in cui abbiamo la prova tangibile che il recupero dei rifiuti e dei materiali di scarto per produrre idrogeno verde, è davvero possibile. Una nota azienda americana, infatti, sta investendo in Egitto su un sistema avanzato che converte i rifiuti organici, ma anche le plastiche non riciclabili, in energia per la produzione di idrogeno. La capacità di questo impianto è di produrre 300.000 tonnellate di idrogeno verde all'anno da 4 milioni di tonnellate di rifiuti. Il principio di funzionamento è il seguente: gli inceneritori di questi rifiuti non disperdono nell'ambiente il gas contenuto ma utilizzano il calore prodotto per azionare le turbine che creano energia elettrica e quindi idrogeno, utilizzando i metodi che abbiamo visto finora. [18.]

## 11) Impatto sulla quotidianità

Finora, abbiamo visto quelli che sono gli impatti dell'idrogeno green sul mondo e sull'ambiente, ma non ci siamo soffermati su quale sia l'impatto che questo ha sulla nostra quotidianità.

Le attuali carenze dell'idrogeno green sono in parte spiegate dagli elevati costi infrastrutturali per la produzione, lo stoccaggio e la distribuzione; ma anche a causa della sua bassa densità di energia per volume, delle caratteristiche esplosive e della capacità di causare infragilimento in metalli come l'acciaio. In effetti, le credenziali di sicurezza dell'idrogeno sono state discusse per diversi decenni in relazione a vari settori e applicazioni, tra cui trasporti, energia, industria, e più recentemente, uso residenziale.

Analizziamo, nello specifico, alcune di queste:

- *Uso domestico*

Le indagini sulla miscelazione dell'idrogeno nella rete del gas naturale esistente hanno stabilito le condizioni in cui la miscelazione di idrogeno puro potrebbe essere utilizzata in sicurezza nei gasdotti, se questo non supera il 10%; soglia raccomandata affinché gli impatti siano trascurabili sulle condutture e sugli apparecchi esistenti.

L'idrogeno ha una velocità di fiamma molto elevata, e questo aumenta il potenziale di rischi esplosivi; pertanto, questa caratteristica, può ridurre la durata di vita degli apparecchi a idrogeno, aumentando al contempo la necessità di misure di manutenzione più frequenti e all'avanguardia che porterebbero ad una riduzione delle prestazioni termiche degli elettrodomestici stessi.

Possiamo pertanto concludere che, sebbene le prestazioni complessive di combustione degli apparecchi non possano essere influenzate in modo significativo da un'aggiunta di circa il 15% di idrogeno, si raccomanda che la miscela massima non superi il 15%-20%, in modo tale da evitare il declassamento della qualità del gas naturale e la formazione di protossido di azoto ( $N_2O$ ) che risulta essere tossico e pericoloso per noi umani. [19.]

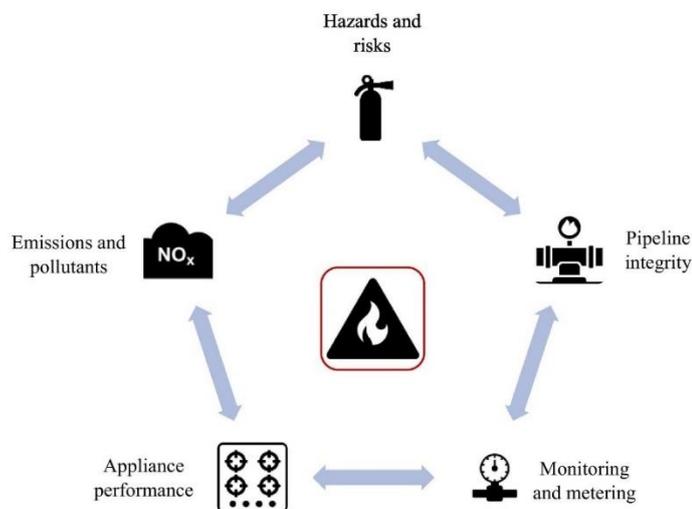


Figura 34 Idrogeno per uso domestico

- *Trasporto*

L'idrogeno può essere utilizzato come combustibile in quasi tutte le applicazioni dove attualmente vengono utilizzati combustibili fossili, in particolare per la motorizzazione dei veicoli, il che offrirebbe benefici immediati in termini di riduzione dell'inquinamento e ambiente più pulito.

L'idrogeno ha un alto rendimento energetico di 120 MJ / kg, che è circa 2,75 volte maggiore dei combustibili idrocarburici, ma la densità dell'idrogeno liquido è molto inferiore alla benzina. Queste proprietà danno vantaggi all'idrogeno che immagazzina circa 2,6 volte più energia per unità di massa rispetto alla benzina, il che significa che l'idrogeno ha un potere calorifico più elevato rispetto alla benzina stessa.

La bassissima densità dell'idrogeno comporta due problemi quando viene utilizzato in un motore a combustione interna:

- ~ è necessario un volume molto elevato per immagazzinare abbastanza idrogeno da dare a un veicolo un'autonomia di guida adeguata;
- ~ la densità di energia di una miscela idrogeno-aria, e quindi la potenza erogata, è ridotta.

Grazie alla sua capacità di disperdersi nell'aria, però, l'idrogeno è molto vantaggioso per due motivi principali:

- ~ facilita la formazione di una miscela uniforme di carburante e aria;
- ~ se si sviluppa una perdita di idrogeno, l'idrogeno si disperde rapidamente. Pertanto, le condizioni non sicure possono essere evitate o ridotte al minimo.

[20.]



Figura 35 Idrogeno per il trasporto

## 12) Impatto sul clima

L'idrogeno green è quello più sostenibile, perché quasi a zero emissioni, rispetto a quelli di tipo grigio e blu. Tale caratteristica è dovuta al fatto che esso è prodotto utilizzando energie rinnovabili come materie prime, quali l'energia solare ed eolica; ma la produzione di queste comporta delle emissioni a monte, derivanti dalla produzione di turbine eoliche o impianti solari fotovoltaici, nonché apparecchiature relative al processo di elettrolisi. Per determinare gli "effetti collaterali" che hanno le fonti rinnovabili sulla produzione di idrogeno, facciamo riferimento a due indici; ovvero: potenziale di acidificazione (AP) e potenziale di riscaldamento globale (GWP). Come vediamo dal grafico sottostante, la produzione di idrogeno da energia eolica ed elettrolisi, sono i processi più distruttivi per l'ambiente con GWP relativamente elevato in quanto legato all'alimentazione elettrica basata sui combustibili fossili, per l'elettrolisi; e alla produzione e all'installazione di turbine eoliche, per l'energia eolica. La gassificazione della biomassa, invece, ha un AP molto elevato a causa della produzione di catrame al termine del processo. D'altra parte, in termini di AP ed emissioni di CO<sub>2</sub>, energia solare, geotermia, alghe e celle a combustibile sono le tecnologie più ecologiche studiate.

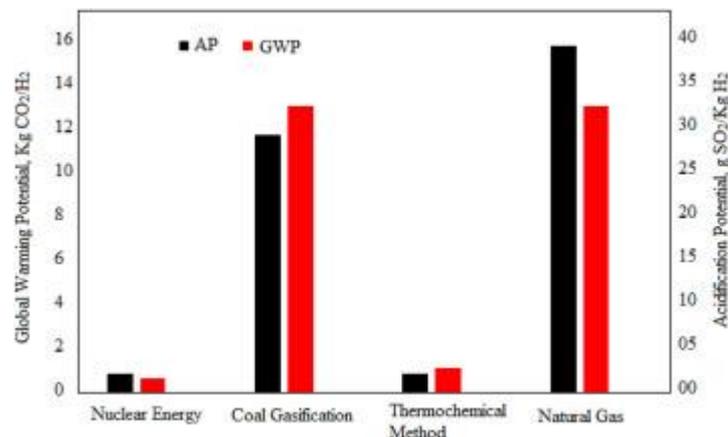


Figura 36 Confronto emissioni

Potremmo dire, quindi, che la non totalità dell'idrogeno come fonte energetica completamente sostenibile, è causata dalle fonti rinnovabili; tuttavia, l'idrogeno genera emissioni durante il trasporto, le quali dipendono dalla quantità di energia necessaria per trasformare l'idrogeno in una forma facile da trasportare o immagazzinare. [21.]

### 13) Esempi

Per concretizzare tutto ciò che fino ad adesso abbiamo espresso pressoché a parole, in questa sezione ci occuperemo di fornire esempi su come il Mondo sta, o intende, utilizzare l'idrogeno green per arrivare a produrre zero emissioni e salvaguardare, così, l'ambiente e la salute degli esseri viventi che lo abitano.

#### - Argentina

A Rosario, in Argentina, gli autobus sono alimentati dal 90% di gasolio fossile e dal restante 10% da una miscela di biodiesel. Una percentuale così alta di combustibili fossili porta a dei gravi impatti ambientali quali: l'inquinamento atmosferico e acustico a livello locale e l'emissione di gas serra (GHG) dovuta all'emissione di anidride carbonica.

Come pubblicato nel 2017 nel Rapporto annuale sulle emissioni di gas serra in Argentina, le emissioni di gas serra da fonti mobili legate principalmente al trasporto pubblico rappresentano il 15,5% delle emissioni totali di gas serra; una percentuale molto elevata!

Proprio per questo, si è pensato di utilizzare l'idrogeno compresso come fonte di energia pulita per autobus elettrici alimentati da celle a combustibile PEM; ma questa soluzione, sarà sufficiente ad abbassare le emissioni di gas serra?

Per rispondere a tale domanda si è effettuato uno studio LCA di otto tecnologie differenti, confrontando il consumo di miscela diesel liquida negli autobus con motore a combustione interna, attualmente utilizzati nella città di Rosario; rispetto al consumo ipotetico, nella stessa città, negli autobus con motore elettrico alimentato da celle a combustibile PEM, il cui combustibile è gas compresso a idrogeno.

Le otto tecnologie su cui si basa l'analisi LCA, sono le seguenti:

- ~ **T1:** Autobus alimentati da una miscela diesel di 90% di combustibili fossili e 10% di biodiesel;
- ~ **T21:** bus alimentato da idrogeno compresso; la produzione di idrogeno avviene mediante gassificazione di biomassa solida costituita da pioppo;
- ~ **T22:** Bus alimentato da idrogeno compresso; la produzione di idrogeno avviene mediante gassificazione di biomassa solida costituita da residui di legno post-industriale da pallet riciclati;
- ~ **T31:** Bus alimentato da idrogeno compresso; la produzione di idrogeno avviene dal reforming del biogas derivato da colture di mais;
- ~ **T4A:** Bus alimentato da idrogeno compresso; la produzione dell'idrogeno avviene mediante l'elettrolisi dell'acqua in un unico impianto industriale;
- ~ **T4B:** Bus alimentato da idrogeno compresso; la produzione dell'idrogeno avviene mediante l'elettrolisi dell'acqua presso la stazione di servizio di erogazione dell'idrogeno;

- ~ **T5A:** alimentato da bus a idrogeno compresso; la produzione dell'idrogeno avviene mediante reforming del gas naturale in un unico impianto industriale;
- ~ **T5B:** Bus alimentato da idrogeno compresso; la produzione dell'idrogeno avviene mediante reforming del gas naturale presso la stazione di servizio di erogazione dell'idrogeno;

Le fasi in cui queste otto tecnologie vengono analizzate, sono:

- ~ Fase 1: approvvigionamento delle materie prime,
- ~ Fase 2: Trasporto e adattamento della materia prima,
- ~ Fase 3: Trasformazione della materia prima, produzione di combustibile e condizionamento per il consumo negli autobus,
- ~ Fase 4: Trasporto carburante,
- ~ Fase 5: alimentazione del carburante,
- ~ Fase 6: consumo di carburante in autobus

Dalla realizzazione dell'LCA mediante le 8 precedenti tecnologie, attraverso le precedenti 6 fasi, otteniamo i seguenti risultati:

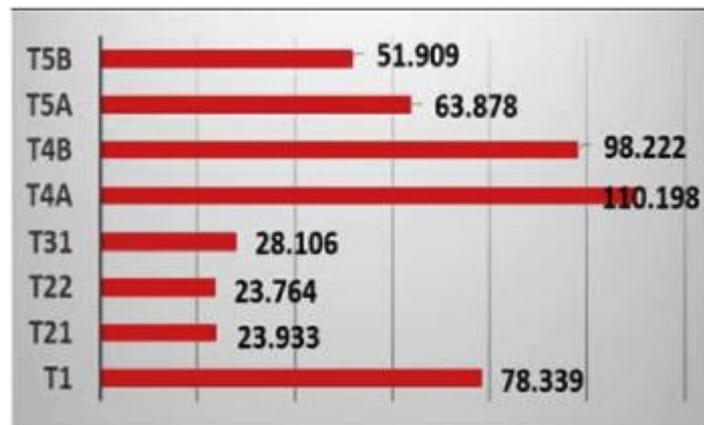


Figura 37 Emissioni nette totali di gas serra

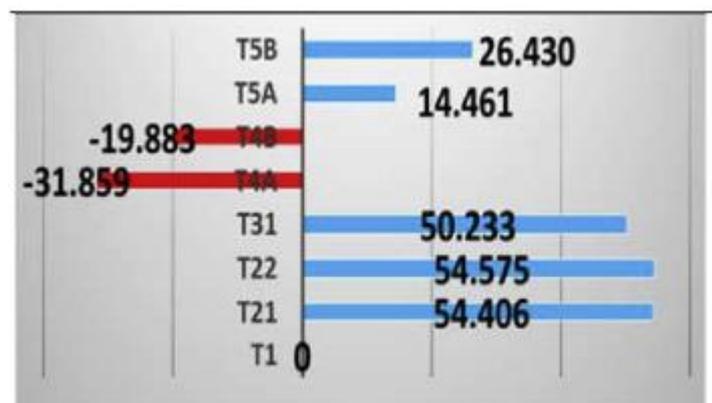


Figura 38 Emissioni totali di gas serra evitate

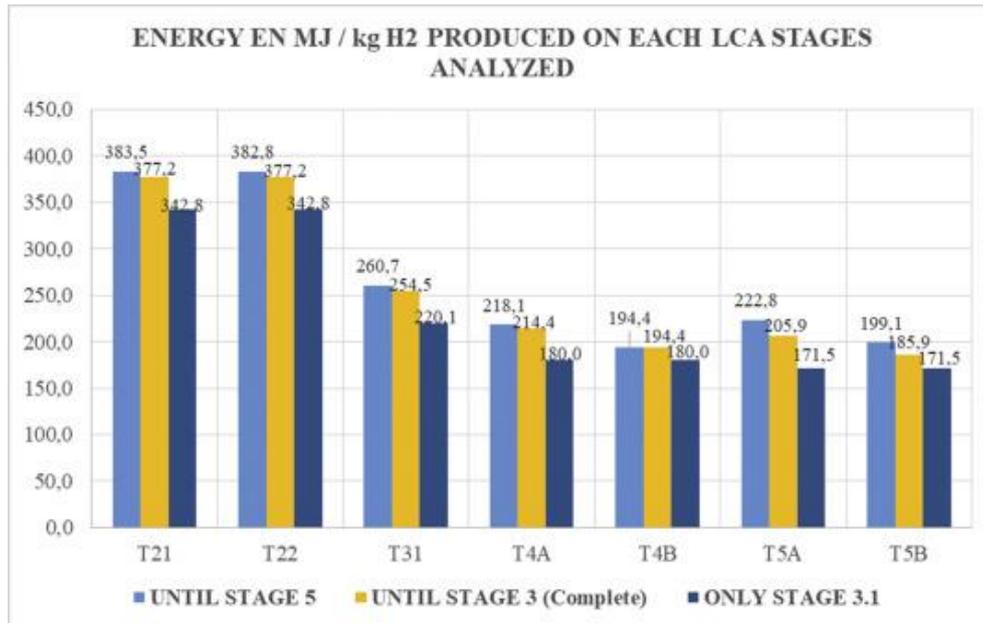


Figura 39 Bilancio energetico per la produzione di idrogeno

I risultati dell’LCA ci portano a dire che, al di là dei processi unitari, la convenienza ambientale ed energetica della produzione di idrogeno, per usarlo come carburante negli autobus, dipende fortemente dallo scenario considerato; ma, in definitiva, si può stabilire che gli autobus il cui combustibile è idrogeno rinnovabile, prodotto vicino alla città di Rosario, soddisfano i principali criteri di sostenibilità dei biocarburanti dell’Unione europea, con una riduzione di almeno il 70% di gas serra emesso rispetto ai motori a combustione interna alimentati da combustibili fossili. [22.]

- Paesi Bassi

L'accordo di Parigi mira a limitare il riscaldamento globale richiedendo una massiccia decarbonizzazione di tutti i settori ad alta intensità energetica attraverso i combustibili ad idrogeno, i quali andranno a sostituire del tutto i combustibili fossili. Tuttavia, circa il 96% della produzione di idrogeno nel mondo è attualmente basata su combustibili fossili; di conseguenza, è necessario un importante spostamento della produzione di idrogeno verso percorsi più sostenibili. Uno di questi percorsi è la produzione dell’idrogeno mediante elettrolisi dell’acqua, combinata con fonti di energia rinnovabile. Il processo di elettrolisi può avvenire mediante due tipi di elettrolizzatori: gli elettrolizzatori ad elettrolita alcalino (AE) e quelli a membrana elettrolitica polimerica (PEM).

Quest'ultime tecnologie sono in fase di sviluppo e la loro implementazione considera i Paesi Bassi come caso di studio, in quanto questi mirano a liberarsi dei combustibili fossili entro il 2050.

L'analisi LCA condotta per studiare l'impatto ambientale dell'idrogeno green sull'ambiente, si divide in due scenari:

- ~ Scenario A "piena energia a idrogeno": in questo scenario è stato selezionato il percorso di sviluppo più ambizioso per il 2050 per la tecnologia dell'idrogeno che prevede la produzione di 1 kg di H<sub>2</sub> da un impianto di 1 GW, alimentato da energia elettrica proveniente da turbine eoliche. Tali risultati portano alla costruzione di grandi parchi eolici e un aumento del mercato delle auto a idrogeno del 70%, nel 2050; mentre il restante 30% è composta da auto a base di petrolio o auto elettriche a batteria.
- ~ Scenario B "senza idrogeno basato sul vento": questo scenario è stato selezionato come un percorso più pessimista per il 2050 per lo sviluppo dell'idrogeno verde che prevede la produzione di 1 kg di H<sub>2</sub> da un impianto da 100 MW, alimentato da energia elettrica proveniente da turbine eoliche. Tali risultati scoraggeranno il governo olandese ad investire sull'idrogeno e ciò porterà a diverse conseguenze, quali: i grandi parchi eolici verranno costruiti ugualmente ma serviranno per alimentare la rete elettrica e non a produrre idrogeno; ci sarà una grande implementazione di auto elettriche a batteria al posto di quelle ad idrogeno.

Gli impatti ambientali dei due scenari proposti sono i seguenti:

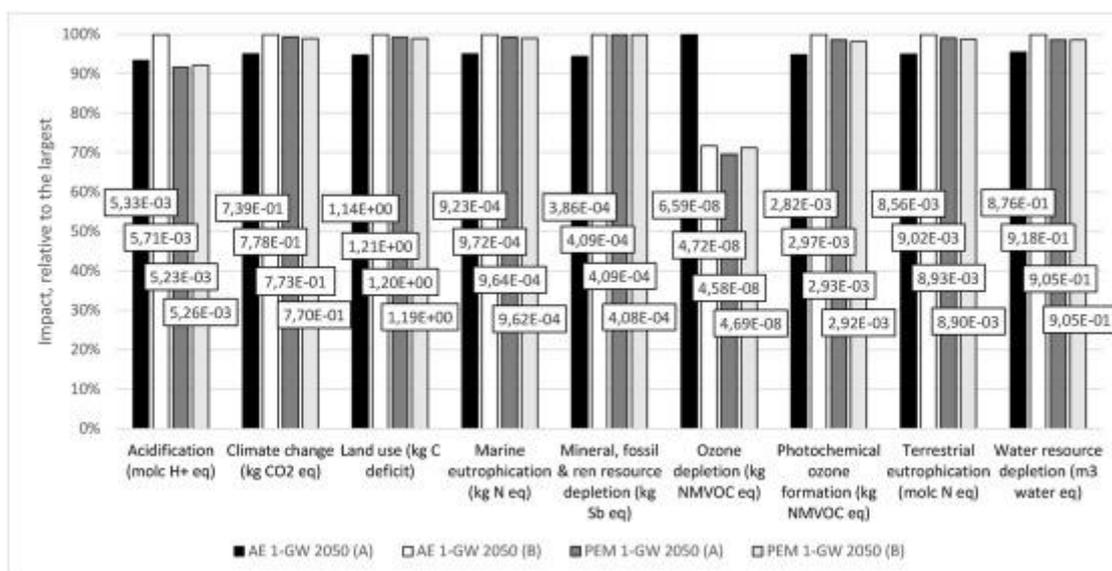


Figura 40 Confronto impatti ambientali

Confrontando i risultati, lo scenario A fornisce prestazioni ambientali inferiori (<6%) o equivalenti rispetto allo scenario B; solo la categoria di impatto "Riduzione dell'ozono" mostra che lo scenario A ha prestazioni peggiori rispetto allo scenario B ma solo a causa delle emissioni durante la costruzione dell'impianto.

Nel complesso, nello scenario A, l'alternativa PEM ha impatti ambientali maggiori rispetto all'AE per tutte le categorie di impatto, ad eccezione di "Acidificazione" e "Riduzione dell'ozono"; mentre nello scenario B, appare la situazione opposta.

Questi risultati mostrano, quindi, che i sistemi AE potrebbero beneficiare maggiormente sull'ambiente rispetto agli elettrolizzatori PEM. [23.]

- Austria, Belgio, Islanda

Un recente studio basato su tre Paesi quali Austria, Belgio e Islanda, confronta gli impatti associati alla produzione di idrogeno green con l'elettrolisi tramite gli elettrolizzatori alcalini (AEC), elettrolitici polimerici (PEM) e ossidi solidi (SOEC); valutando, anche, i loro scenari futuri.

I tre casi di studio rispondono a tre scenari differenti: per l'Austria viene analizzato un sistema energetico, per la produzione di idrogeno green, misto; per il Belgio abbiamo un sistema energetico basato sull'energia solare, eolica e di rete; mentre per l'Islanda esso si basa sull'energia geotermica di Hellisheiði e su quella prelevata dalla rete nazionale.

L'attuale quota di elettricità rinnovabile in Belgio, Austria e Islanda e le loro proiezioni fino al 2040, sono le seguenti:

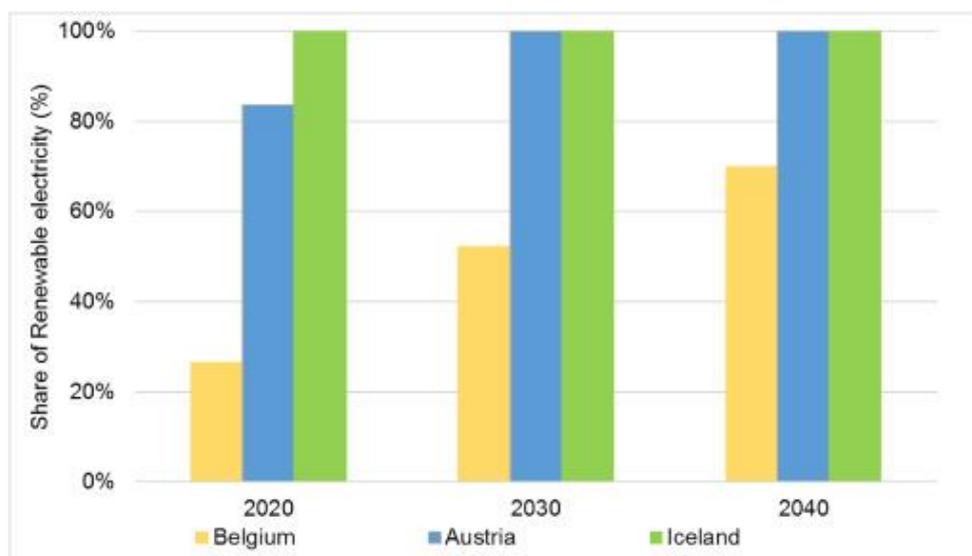


Figura 41 Elettricità rinnovabile

Da questo grafico capiamo che, l'obiettivo dell'attuale governo austriaco è quello di raggiungere la neutralità climatica entro il 2040, ovvero 10 anni prima dell'obiettivo fissato dall'Unione Europea. Di conseguenza, la produzione annua di elettricità da fonti energetiche rinnovabili dovrebbe aumentare di 27 TWh; dei quali 11 TWh devono essere generati dal fotovoltaico, 10 TWh dall'eolico, 5 TWh dall'energia idroelettrica e 1 TWh dalla biomassa.

Per il caso belga, invece, lo scenario si basa sulla generazione aggiuntiva di energie rinnovabili tramite fonti decentralizzate come un gran numero di impianti fotovoltaici e dispositivi di accumulo. Avremo, pertanto, una completa rivoluzione del mix di rete belga in quanto, attualmente, essa dipende fortemente dall'energia nucleare ma, dalla quale, vuole prendere la completa distanza entro il 2025.

Infine, per la centrale geotermica di Hellisheiði, l'Islanda mira a catturare il 95% delle emissioni associate al funzionamento della stessa centrale entro il 2025; pertanto a tale centrale, saranno associati, su larga scala, due metodi di cattura e stoccaggio rispettivamente del carbonio, chiamato Carbfix, e dell'idrogeno solforato, chiamato Sulfix.

In tali termini si studia anche l'efficienza degli elettrolizzatori, i quali influenzano sia la quantità di idrogeno prodotto, sia le emissioni totali ad esso associate:

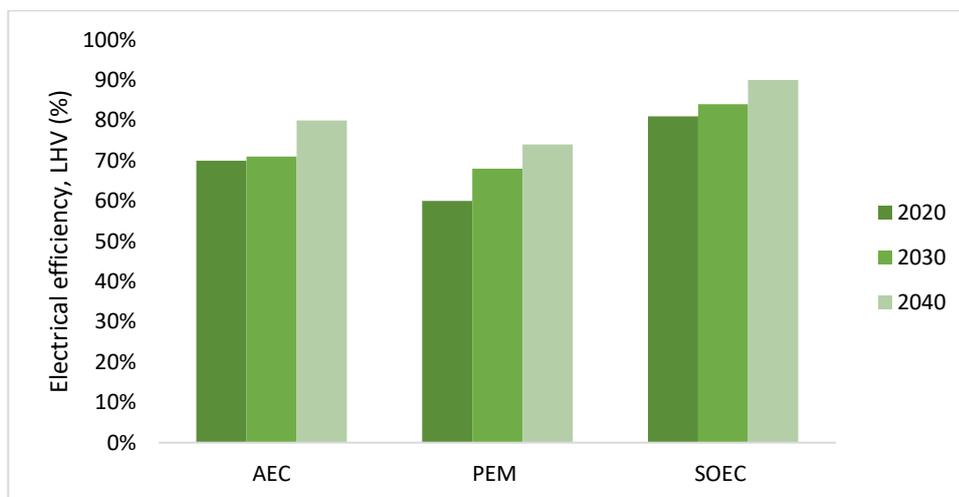


Figura 42 Idrogeno prodotto

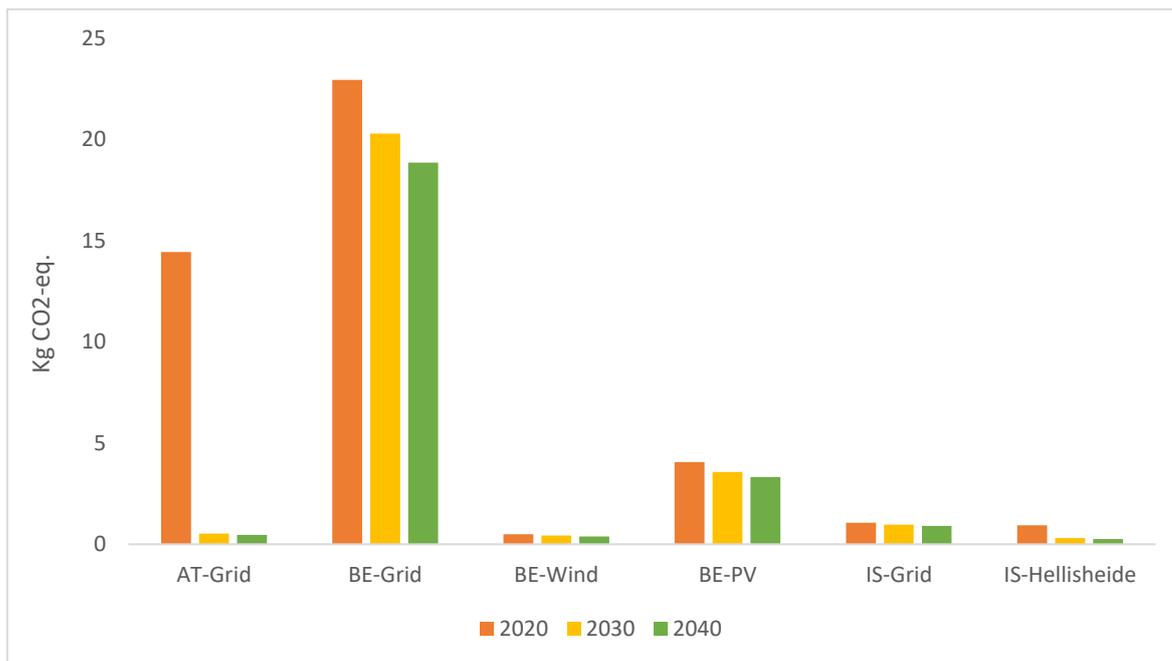


Figura 43 Emissioni totali

Dagli studi effettuati emerge che gli scenari peggiori, in ciascun Paese, sono quelli i cui sistemi sono alimentati in modo misto, dall'elettricità della rete e da fonti rinnovabili; mentre i risultati migliori, in termini di emissioni, si basano sull'uso esclusivo di sole e vento per alimentare gli elettrolizzatori, quindi in generale, dalle sole energie rinnovabili.

Inoltre, possiamo concludere dicendo che, tra tutti i tipi di elettrolisi proposti, il metodo SOEC è il più sostenibile ed il più produttivo, sia attualmente che nel prossimo e lontano futuro. [24.]

## 14) Conclusioni

Gli argomenti ed i vari esempi finora trattati hanno lo scopo, attraverso la stesura di questa tesi, di mostrare come l'andamento energetico attuale, ottenuto mediante l'utilizzo principale di combustibili fossili e fonti energetiche non rinnovabili e, pertanto, non sostenibili, causino livelli di emissione di anidride carbonica molto elevati i quali stanno portando il Mondo ad un repentino e non lontano collasso.

Tale elaborato, pertanto, mira a sensibilizzare la scelta di fonti rinnovabili, nello specifico dell'idrogeno green, come principale vettore energetico in quanto, da come abbiamo ampiamente dimostrato, esso sia il solo, attualmente, a trasportarci verso prospettive energetiche a zero emissioni e quindi completamente sostenibili.

Abbiamo visto come, nei vari Paesi del mondo, le fonti più promettenti per la produzione di idrogeno green dipendono dalla posizione geografica degli stessi, che gli permetterà di sfruttare le maggiori risorse energetiche naturali disponibili nel loro territorio. In generale, però, abbiamo dimostrato, attraverso gli esempi precedenti, che la fonte energetica più favorevole, grazie al suo potenziale e alla sua grande disponibilità, è l'energia solare che, né singolarmente, né nel prossimo futuro, ci permetterà di avere una realtà completamente a zero emissioni, ma è l'unica certezza che ci proietta verso uno scenario auspicabile in cui i combustibili fossili occuperanno solo il 10% del settore energetico lasciando l'85% alle fonti rinnovabili.

L'ulteriore aspetto considerato in questa tesi è il ciclo di vita dell'idrogeno green; infatti abbiamo esaminato ed approfondito diversi esempi di produzione dello stesso facendo riferimento ai vari LCA, i quali concordavano tutti sulle stesse conclusioni, ovvero che l'intero ciclo di vita dell'idrogeno sia molto positivo se confrontato con i combustibili fossili attualmente ampiamente utilizzati, soprattutto dal punto di vista industriale; ma di come lo stesso non sia ancora pienamente pronto ad essere utilizzato in ambito domestico, per esempio, perché non varrebbe, per adesso, "la spesa per l'impresa", come si suol dire. Quest'ultima considerazione è data dal fatto che non vi siano sistemi, in termini di condutture o infrastrutture attualmente in utilizzo, che siano abbastanza sviluppate da poter rendere possibile, senza incorrere in incidenti, l'utilizzo dell'idrogeno come carburante o come fonte per alimentare i piani cottura.

Concludiamo con il dire che, tutte le analisi e confronti effettuati, ci hanno portato a definire l'idrogeno green prodotto mediante l'elettrolisi SOEC, il metodo di produzione più efficace e meno inquinante, seguito dal metodo PEM e dalla biomassa, la quale è ancora in fase di studio.

## 15)References

- [1.] Timoteo D. Donaghy. "Fossil fuel racism in the United States: How phasing out coal, oil, and gas can protect communities", *Sciencedirect.com*  
<https://doi.org/10.1016/j.erss.2023.103104>
- [2.] SMET: <https://www.smet.it/blog/idrogeno/>
- [3.] Li.Xiaoana. *Latest approaches on green hydrogen as a potential source of renewable energy towards sustainable energy: Spotlighting of recent innovations, challenges, and future insights*. *Sciencedirect.com*.  
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.126684>
- [4.] A. Ajanovic. *The economics and the environmental benignity of different colors of hydrogen*. *Sciencedirect.com*.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.02.094>
- [5.] S. Shiva Kumar. *An overview of water electrolysis technologies for green hydrogen production*. *Sciencedirect.com*.  
<https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.10.127>
- [6.] Maria Chiara Cavuoto, *Elettrolisi solare, come produrre idrogeno pulito e sostenibile*, [Elettrolisi solare, come produrre idrogeno pulito e sostenibile \(energycue.it\)](https://www.energycue.it)
- [7.] Pagano.M. *Hydrogen production by water electrolysis and off grid solar PV*. *Sciencedirect.com*. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.09.098>
- [8.] (Li.R. *Chapter One-Photocatalytic Water Splitting on Semiconductor-based Photocatalysts*. *Sciencedirect.com*.  
<https://doi.org/10.1016/bs.acat.2017.09.001>
- [9.] Xueli Xing, *Concentrated solar photocatalysis for hydrogen generation from water by titania-containing gold nanoparticles*, *Sciencedirect.com*,  
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.01.197>
- [10.] Abas.Naeem. *Nature inspired artificial photosynthesis technologies for hydrogen production:Barriers and challenges*. *Sciencedirect.com*.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.12.010>
- [11.] Fatma Kourdourli, *Modeling of hydrogen production from biomass bio-digestion under Aspen Plus*, *Sciencedirect.com*,  
<https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2023.108273>
- [12.] M. Germani, *La metodologia Life Cycle Assessment; la normativa di riferimento per il Life Cycle Assessment*, [1 - La metodologia life Cycle Assessment.pptx](#), [2 - La normativa di riferimento per il Life Cycle Assessment.pptx](#)
- [13.] Sara Bellocchi, *Hydrogen blending in Italian natural gas grid: Scenario analysis and LCA*, *Sciencedirect.com*,  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137809>

- [14.] Sanghyun Hong, *Evaluating the sustainability of the hydrogen economy using multi-criteria decision-making analysis in Korea*, Sciencedirect.com, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.01.037>
- [15.] Marina Blohm, *Green hydrogen production: Integrating environmental and social criteria to ensure sustainability*, Sciencedirect.com, <https://doi.org/10.1016/j.segy.2023.100112>
- [16.] Duygu Gu"ndu"z Han, *Investigation of hydrogen production via waste plastic gasification in a fluidized bed reactor using Aspen Plus*, Sciencedirect.com , <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.07.038>
- [17.] Willian C´ezar Nadaleti, *Green hydrogen production from urban waste biogas: An analysis of the Brazilian potential and the process' economic viability*, Sciencedirect.com, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113669>
- [18.] Bailey.Mary. *New waste-to-hydrogen facility planned in Egypt*. Chemengonline.com [New waste-to-hydrogen facility planned in Egypt - Chemical Engineering \(chemengonline.com\)](https://www.chemengonline.com/new-waste-to-hydrogen-facility-planned-in-egypt-chemical-engineering/)
- [19.] Joel A. Gordon, *Socio-technical barriers to domestic hydrogen futures: Repurposing pipelines, policies, and public perceptions*, Sciencedirect.com, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.120850>
- [20.] Sonal Singh, *Hydrogen: A sustainable fuel for future of the transport sector*, Sciencedirect.com, <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.06.040>
- [21.] Muhammad Amin, *Hydrogen production through renewable and nonrenewable energy processes and their impact on climate change*, Sciencedirect.com, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.07.172>
- [22.] Leonardo Iannuzzi, *Life Cycle Assessment (LCA) for use on renewable sourced hydrogen fuel cell buses vs diesel engines buses in the city of Rosario, Argentina*, Sciencedirect.com, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.01.065>
- [23.] Mathieu Delpierre, *Assessing the environmental impacts of wind-based hydrogen production in the Netherlands using ex-ante LCA and scenarios analysis*, Sciencedirect.com, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126866>
- [24.] Kristjan V. Vilbergsson, *Can remote green hydrogen production play a key role in decarbonizing Europe in the future? A cradle-to-gate LCA of hydrogen production in Austria, Belgium, and Iceland*, Sciencedirect.com, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.01.081>