



Seminario del Levi Cases:

**CATTURA E SEQUESTRO DELLA CO<sub>2</sub>.  
CCS, CCU, BECCS, BECCU:  
FATTI, OPINIONI, BALLE**

*ALBERTO BERTUCCO*

*PROFESSORE EMERITO, UNIVERSITÀ DI PADOVA*

AULA DE, DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE, UNIVERSITÀ DI PADOVA, 20 APRILE 2026

# OBIETTIVI E LIMITI DI QUESTA RELAZIONE

1. **Obiettivo principale:** richiamare ed integrare il *know-how* necessario per affrontare e discutere in modo scientificamente corretto ed efficace questioni relative a cattura e sequestro della CO<sub>2</sub>
2. **Trattare l'argomento** con un approccio tecnologico tipico dell'ingegneria chimica, che costituisce la mia competenza specifica. Non sono esperto di questioni economiche e finanziarie
3. **Disclaimer: sono un docente universitario, non un pianificatore della transizione energetica.** Mi limiterò a presentarvi i fatti, basandomi su calcoli e dati verificabili, e lasciando solo due slide (questa ed una conclusiva) per le mie personali opinioni sull'argomento
4. Non tirerò in ballo due temi che nulla hanno a che fare con il net-zero entro il 2050: l'energia da fusione nucleare e la fotosintesi artificiale. Si tratta di due interessanti argomenti per la ricerca di base, che purtroppo non hanno nessun impatto sul raggiungimento di una soluzione del problema del riscaldamento globale in tempi brevi. Giusto che i ricercatori se ne interessino, ma guai ad invocare queste tecnologie per dare speranze in tal senso! Sono soltanto **due miraggi**
5. Sono stato un **ricercatore**, ho studiato questi argomenti solo negli ultimi 15 anni della mia carriera. Contrariamente ad altri temi di ricerca, che ho affrontato con successo di pubblicazioni scientifiche, sulla transizione energetica credo di aver lavorato con un'ottica diversa: applicare la scienza per capire i motivi, ed entrare nella discussione, di ciò che propongono politici, media e mercato
6. Ciononostante, resto un professore universitario, e soffro dell'approccio didascalico e di visione un po' ristretta che caratterizza la mia categoria (pazienza: le cose che dico o scrivo circolano poco)

# QUESTIONI CHE AFFRONTIAMO IN QUESTO SEMINARIO

1. perché è **necessario decarbonizzare** e come si può fare (breve sommario)
2. significato delle sigle: **CCS, CCU, BECCS, BECCU**, net-zero (neutralità carbonica)
3. quali contributi da **biocarburanti** e **idrogeno** per la decarbonizzazione? (2 slide)
4. analisi delle **Tecnologie per catturare la CO2 e fissarla** (modificarla chimicamente) **in composti non volatili**
5. quali sono i **costi energetici ed economici** per applicare queste tecnologie (cenni)
6. importanza dei **bilanci di materia e di energia** come base per analizzare i processi industriali di cattura e sequestro di CO2, e proporre di innovativi
7. che cosa si può fare concretamente prima di raggiungere il net-zero, e dopo: **obiettivi e conseguenze nel breve e medio periodo**
8. Conclusioni: **fatti vs. opinioni** (e **balle**, che fanno solo perdere tempo e denaro!)
9. **Q&A**

# PERCORSO LOGICO 1/3

## 1. Il problema: Lo squilibrio storico della concentrazione di CO<sub>2</sub> nell'atmosfera

- **Il punto di partenza:** bruciare un combustibile è il modo più semplice per produrre energia. Ma che cosa succede quando si brucia un combustibile fossile, o anche un biocombustibile?
- **La causa dello squilibrio:** da oltre 150 anni, le attività umane (civili e industriali) rilasciano **CO<sub>2</sub>** in atmosfera a un ritmo molto più rapido di quanto l'ecosistema riesca ad assorbirla tramite la fotosintesi. Attualmente l'accumulo è di **25-30 miliardi di tonnellate all'anno**
- **La conseguenza:** Questo accumulo nell'atmosfera è il motore principale del **riscaldamento globale** e dei cambiamenti climatici accelerati degli ultimi anni

## 2. L'obiettivo: Ripristinare una composizione di equilibrio che sia ecosostenibile

- **Non basta ridurre le emissioni:** Per tornare alla situazione preindustriale, è necessario catturare le circa **2.000 miliardi di tonnellate** di CO<sub>2</sub> già accumulate, che hanno portato all'attuale aumento di +1,5°C della temperatura globale
- **Il problema è la stabilità della CO<sub>2</sub>:** La molecola di CO<sub>2</sub> è chimicamente molto stabile e, in natura, viene degradata solo lentamente dalla fotosintesi (circa **10 miliardi di tonnellate all'anno**).

# La dimensione del problema: tre semplici domande per iniziare

## 1. Quanta CO<sub>2</sub> viene emessa se si brucia 1 kg di carburante?

- dipende dal combustibile e dal suo contenuto di carbonio
- per combustibili fossili, da 2,75 a 3,67 chilogrammi

## 2. Quanta CO<sub>2</sub> viene emessa per produrre 1 kWh di energia elettrica?

**NON serve essere scienziati o ingegneri per rispondere.  
Basta usare un po' di Intelligenza Artificiale, ma con intelligenza!**

## 3. Che cosa si può fare con 1 kWh di energia elettrica?

- percorrere 5–6 chilometri con 1 auto completamente elettrica
- scaldare 20 litri d'acqua a 50 °C con una resistenza elettrica (1 doccia)
- scaldare 60 litri d'acqua a 50 °C con una pompa di calore (3 docce)

# 1. IL PROBLEMA DELLA DECARBONIZZAZIONE (1/3)

**Bruciare un combustibile è un modo semplice (e stupido) per produrre energia.**

**Infatti, che cosa succede quando si brucia un combustibile fossile o, un biocombustibile?**

- Gli atomi del combustibile si combinano con l'ossigeno dell'atmosfera.  
Se il combustibile contiene solo carbonio e idrogeno (x sono le molecole di H per molecola di C):



- Se ci sono **altri atomi**, si combinano con l'ossigeno per dare **altri composti volatili** (ossidi di zolfo, ...)
- Se c'è **poco ossigeno**, la combustione è incompleta e **si forma particolato** (PM5, PM10, PM25,...)
- E anche l'**azoto reagisce con l'ossigeno**, formando **ossidi di azoto** (Nox)

**TUTTE QUESTE SOSTANZE SONO INQUINANTI NOCIVI ALLA SALUTE (altro che la CO2!)**

# 1. IL PROBLEMA DELLA DECARBONIZZAZIONE (2/3)

1. da due secoli la produzione di energia, elettrica e termica, è fatta bruciando combustibili fossili (carbone, petrolio, gas naturale) per produrre vapor d'acqua:
2. la reazione di combustione sprigiona moltissima energia per unità di combustibile impiegato, ma anche libera (emette) enormi quantità di CO2 in atmosfera: 3.5 kg per kg di carbone; 3.1 kg per kg di petrolio; 2.8 kg per kg di gas naturale
3. questo modo di fare tratta l'atmosfera come pattumiera:
  - spostando masse enormi di carbonio dal sottosuolo all'atmosfera
  - producendo ed immettendo nell'aria composti dannosi alla salute ed all'ambiente
4. anche solo per il problema dell'inquinamento si potrebbe concludere che bruciare combustibili per ottenere energia è un'enorme stupidaggine
5. una semplice domanda: non è che ci sono altri modi per produrre l'energia che serve a sostenere il benessere del genere umano? (sì, ma dipende dall'uso finale!)
6. un fatto che aggrava la situazione: CO2 è chimicamente stabile (si degrada naturalmente soltanto per fotosintesi), per cui succede che:

# 1. IL PROBLEMA DELLA DECARBONIZZAZIONE (3/3)

7. da almeno 150 anni la portata totale (le tonn/anno) con cui la CO2 viene emessa nell'atmosfera a causa delle emissioni antropogeniche (per combustione di combustibili, fossili e non) è superiore a quella con cui l'ecosistema la cattura
8. questo sbilanciamento fra CO2 emessa e CO2 assorbita naturalmente (grazie alla fotosintesi nelle acque marine e dolci) provoca allo stato attuale un accumulo di CO2 nell'atmosfera, misurato e calcolabile, di circa 25-30 miliardi di tonnellate all'anno
9. l'aumento della concentrazione di CO2 in atmosfera a causa di questo accumulo è in relazione diretta con il riscaldamento del pianeta, che negli ultimissimi anni procede ad una velocità senza precedenti
10. per contrastare il fenomeno occorre adottare su larga scala tecnologie che riducono l'eccesso di emissioni di CO2 e/o la catturano in modo permanente per impedirle di entrare in contatto con l'atmosfera. Ma non basta. In più ...
11. per tornare alla situazione preindustriale occorre catturare la CO2 accumulata negli ultimi 150 anni, stimata attorno a 2000 Gton (2900 Gton comportano + 2°C)

# PER COMPRENDERE IL PROBLEMA QUANTITATIVAMENTE: BILANCI DI MATERIA E DI ENERGIA

1. i bilanci di conservazione di materia e di energia sono **principi fisici fondamentali** che si traducono in vincoli oggettivi per la comprensione e la soluzione del problema
2. **Questi bilanci dovrebbero costituire la base per sviluppare qualunque ragionamento ed opinione** su come raggiungere la neutralità carbonica
3. in tema di materia ed energia «**nulla si crea e nulla si distrugge**» all'interno di qualunque porzione (o volume) di spazio che venga presa in esame
4. con **riferimento al volume considerato**, in termini di equazioni si può scrivere che:  
bilanci di materia: uno per ciascun composto chimico coinvolto,  $i$

$$ACC_i = INP_i - OUT_i + (PRO - DES)_i$$

bilancio di energia: uno solo

$$ACC = INP - OUT + (PRO - DES)$$

NB: i termini (*PRO-DES*) descrivono l'effetto delle reazioni chimiche/biologiche

## SE IL VOLUME CONSIDERATO È L'ATMOSFERA TERRESTRE...

Se ci riferiamo alla **CO<sub>2</sub>** il termine **PRO** dipende dalle reazioni di **combustione** di combustibili fossili e di biomasse, mentre il termine **DES** dall'unica reazione in grado di distruggerla (la **fotosintesi**).

L'equazione di bilancio di materia si può usare per **calcolare l'accumulo di CO<sub>2</sub>**, ma si dovrebbero stimare con precisione i termini **INP** e **OUT**. Il valore di **OUT** è zero, ma **il calcolo di INP e DES è difficile e non è preciso**.

Viceversa, **l'accumulo annuale si può facilmente calcolare a partire dall'incremento annuo della concentrazione media misurata di CO<sub>2</sub>**.

Se ad. es. questo è 3 ppm (molari, cioè 4,5 ppm massive), conoscendo la massa totale di aria:  $5.15 \cdot 10^{15}$  ton,

**la quantità di CO<sub>2</sub> accumulata in un anno è**  
 $5.15 \cdot 10^{15} \times 4.5 \cdot 10^{-6} \text{ ton/anno} = 23.5 \cdot 10^9 \text{ ton/anno} = \mathbf{23.5 \text{ Gton/anno}}$

# IL PROBLEMA DELLA DECARBONIZZAZIONE (DA F. GNESOTTO, MARZO 2025)

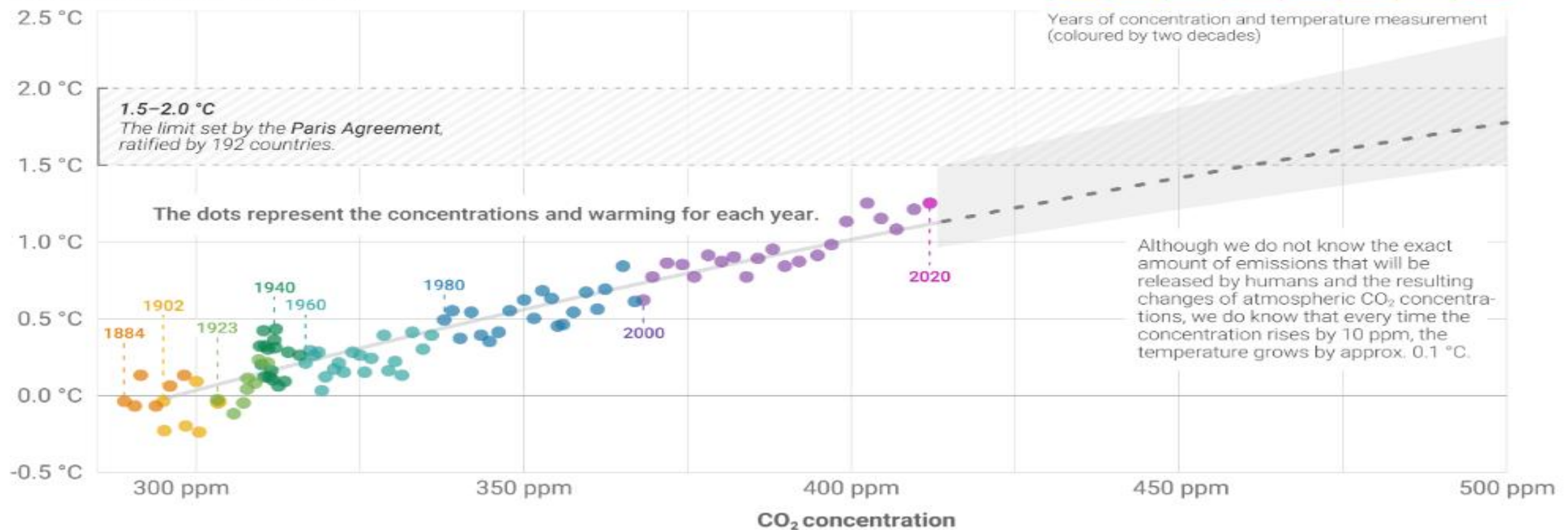
## HOW ARE CO<sub>2</sub> CONCENTRATIONS RELATED TO WARMING?



The higher the CO<sub>2</sub> concentration in the atmosphere, the higher the Earth's temperature. The levels of atmospheric CO<sub>2</sub> depend on the amount of emissions produced by humankind.

### Warming

relative to the 1850–1900 period



CO<sub>2</sub> concentration is measured in ppm (parts per million). The CO<sub>2</sub> concentration of 400 ppm means that one million of air molecules contains 400 molecules of CO<sub>2</sub>. Carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) contributes to global warming more than any other greenhouse gas: the greenhouse effect is intensifying and 70% of this change is caused by CO<sub>2</sub>.

VERSION 2022-05-12 LICENCE CC BY 4.0

Read more at [factsonclimate.org/concentration-warming-relationship](https://factsonclimate.org/concentration-warming-relationship)

Data source: NOAA, NASA Goddard Institute for Space Studies

# IL PROBLEMA DELLA DECARBONIZZAZIONE (DA F. GNESOTTO, MARZO 2025)

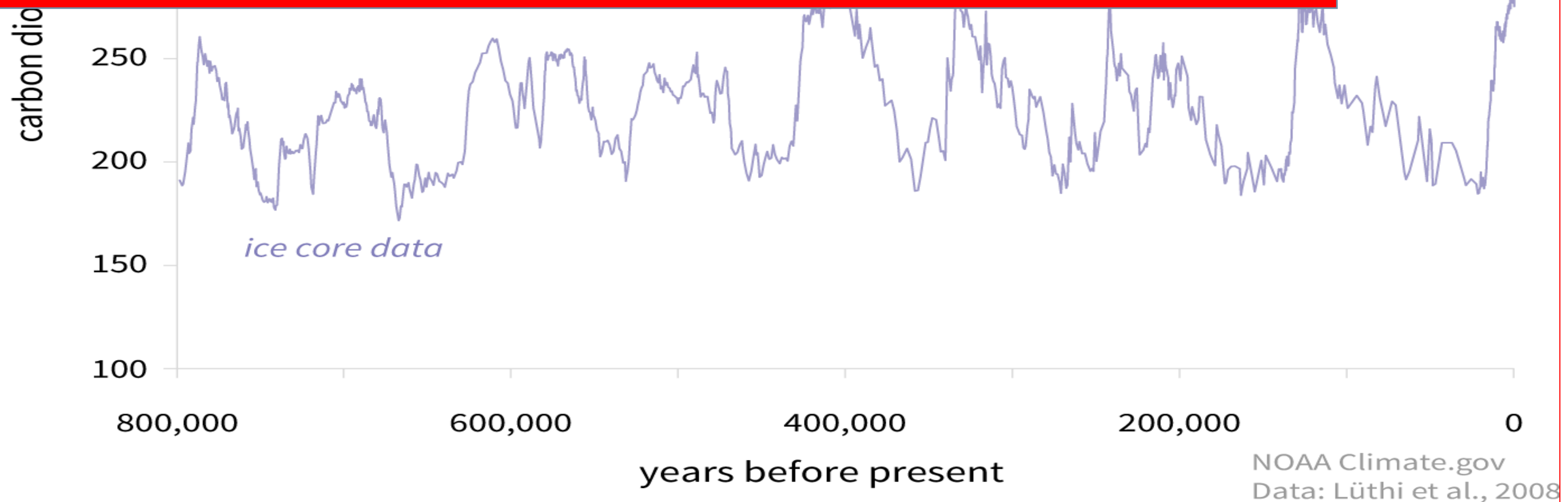
## CARBON DIOXIDE OVER 800,000 YEARS

Fra 180 ppm e 280 ppm si sono sviluppate tutte le ere glaciali e quelle tropicali

average  
419.3 ppm

Attenzione! C'è differenza fra situazione a stazionario e dinamica!

Emissioni nette nulle di CO2 a livello globale non bastano per fermare il riscaldamento!



## PERCORSO LOGICO 2/3

### 3. La sfida della cattura

- **Concentrazione vs Diluizione:** Mentre è possibile catturare la CO<sub>2</sub> dai fumi industriali, dove è concentrata (>5%), prelevarla direttamente dall'aria (**DAC - Direct Air Capture**) è difficile perché nell'atmosfera è molto diluita (0,042%)
- **Sostenibilità economica:** Attualmente, le tecnologie di cattura dai fumi sono disponibili e largamente applicate, quelle di cattura diretta dall'aria sono di gran lunga economicamente insostenibili e ferme a una fase dimostrativa

### 4. Le opzioni tecnologiche per il sequestro e i loro limiti

- **Stoccaggio geologico:** Seppellire CO<sub>2</sub> in cavità sotterranee. **Limiti:** Le cavità non sono a tenuta stagna; servirebbe un monitoraggio per un secolo e non ci sono ancora tecnologie adeguate per controllare eventuali perdite
- **Mineralizzazione:** Trasformare la CO<sub>2</sub> in carbonati solidi attraverso la reazione con ossidi metallici. **Limiti:** Non ci sono abbastanza ossidi metallici sulla Terra per la massa di CO<sub>2</sub> accumulata
- **e-fuel:** Trasformare la CO<sub>2</sub> in carburanti sintetici. **Limiti:** Se bruciati, rilasciano nuovamente la CO<sub>2</sub>; servirebbe un cambio di mentalità per produrli solo a scopo di smaltimento
- **Fotosintesi intensificata:** Utilizzo di fotobioreattori a luce LED. **Limiti:** Processo energeticamente inefficiente e costi operativi altissimi (800-1.000 dollari per tonnellata di CO<sub>2</sub>), che lo rendono insostenibile.

## 2. SIGNIFICATO DELLE SIGLE PER RAGGIUNGERE NET-ZERO

1. **CCS: Carbon Capture and Storage.** *Ways of collecting the carbon produced when fuel is burned, so that it is not released into the air*
2. **CCU(S): Carbon Capture, Utilization (and Storage).** *Capturing of CO<sub>2</sub> to be either **used** in a range of applications, as well as injected and permanently stored into **deep geological formations** such as depleted oil and gas reservoirs or saline aquifers (NOT into the oceans!)*
3. **BECCS: BioEnergy with Carbon Capture and Storage.** *Ways of capturing and permanently storing CO<sub>2</sub> from processes where biomass is converted into fuels or directly burned to generate energy. Because plants absorb CO<sub>2</sub> as they grow, this is a way of removing CO<sub>2</sub> from the atmosphere (this may be a **negative emissions technology**)*
4. **BECCU(S):** *capturing CO<sub>2</sub> emissions from processes where biomass is used to produce energy, and using them later in a range of applications. It means keeping CO<sub>2</sub> emitted for some longer time in use, but in this way CO<sub>2</sub> emissions are not permanently stored and prevented from entering the atmosphere (this is **NOT a negative emissions technology**)*
5. **net-zero emissions (neutralità carbonica):** obiettivo di raggiungere l'equilibrio tra la quantità annua di CO<sub>2</sub> emessa e quella rimossa dall'atmosfera. Significa **bilanciare le emissioni residue e considerate inevitabili con una cattura equivalente e permanente di CO<sub>2</sub> dall'atmosfera**

**MA questo NON BASTA** a ripristinare la situazione dell'era preindustriale!

### 3. BIOCARBURANTI PER LA DECARBONIZZAZIONE? (1/2)

1. **Che cos'è un biocarburante:** un carburante ottenuto partendo da **biomasse**
2. **Bioetanolo?** Fermentazione di glucosio catalizzata da lieviti
3. **Biodiesel?** Reazione metanolo+trigliceridi di acidi grassi vegetali, produce FAME
4. **Bio-syngas da gassificazione?** Trattamento termico ad alta temperatura (1150°C)
5. **Bio-olio da pirolisi?** Trattamento termico ad alta temperatura (800°C)
6. **Biometano.** Digestione anaerobica di materia organica+separazione della CO<sub>2</sub>
7. i biocarburanti possono dare solo **un piccolo contributo, non c'è biomassa a sufficienza** per produrre i quantitativi richiesti a rimpiazzare i carburanti fossili
8. quando **vengono bruciati**, comunque **emettono in atmosfera CO<sub>2</sub> ed inquinanti**
9. ai fini della decarbonizzazione **sembrano poco promettenti** (salvo eccezioni)

**Biocarburanti? Anche no, grazie!**

### 3. IDROGENO: SOLUZIONE O SPECCHIETTO PER ALLODOLE? (2/2)

- l'idrogeno (H<sub>2</sub>) è una fonte rinnovabile o non rinnovabile? → **domanda sbagliata!**
- **H<sub>2</sub> non è una fonte di energia!** Come l'elettricità, potrebbe essere un modo per trasportare energia (e per **immagazzinare energia** in modo chimico)
- H<sub>2</sub> può essere definito di tipo rinnovabile (*green hydrogen*) unicamente se viene prodotto usando energia da sole fonti rinnovabili
- fatto positivo: **quando H<sub>2</sub> brucia, emette solo** vapor d'acqua ( $2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$ )
- fatti negativi. **H<sub>2</sub> è una sostanza molto dannosa e pericolosa:** ad. es. diffonde

Per chi desiderasse approfondire, suggerisco di ascoltare che cosa ne pensa un economista, **Michael Liebreich**, in una sua lezione al Future Energy Labs dello Imperial College London nel giugno 2024, dal titolo: **Global Energy Transition Trends and Hydrogen**

meglio <https://www.youtube.com/watch?v=w0Q9cuF8zKg>

- da ingegnere chimico vorrei avere il tempo per convincervi che l'idrogeno dovrebbe essere impiegato solo in prossimità al luogo in cui viene prodotto
- in quale misura H<sub>2</sub> può contribuire alla decarbonizzazione? **Non molto**

## 4. TECNOLOGIE PER CATTURARE LA CO<sub>2</sub> (1/2)

1. distinguiamo: cattura da fumi, da camini o cattura dall'atmosfera? **Le tecnologie per catturare CO<sub>2</sub> da emissioni concentrate** come quelle dei camini (> 10%) **sono disponibili** sul mercato (sono «a sportello»), **a differenza di quelle per catturarla direttamente dall'atmosfera (DAC)**, dove la CO<sub>2</sub> è molto diluita (0,042%)
2. **le tecnologie di cattura mediante assorbimento in soluzioni acquose di ammine oppure in soluzioni acquose di carbonati sono consolidate** e funzionano molto bene anche in impianti di grandi dimensioni (> 90% di CO<sub>2</sub> catturata). Il fabbisogno energetico di queste tecnologie è elevato (1 kWh/kg<sub>CO<sub>2</sub></sub> di energia termica+elettrica)
3. **altre tecnologie** (adsorbimento mediante «filtri» e colonne, cattura con membrane, liquefazione a bassa temperatura) sono in fase di miglioramento e/o di sviluppo, ed al momento **restano di nicchia**, non su larga scala e per applicazioni specifiche
4. Per la **DAC esistono solo impianti dimostrativi** (dimensioni di laboratorio o di piccolo pilota)
5. In ogni caso **catturare la CO<sub>2</sub> ha costi energetici ed economici importanti**

## 4. TECNOLOGIE PER «FISSARE» LA CO<sub>2</sub> (2/2)

1. **fissare NON significa sotterrare**: le cavità geologiche non sono a tenuta stagna, se si vuole percorrere questa strada occorrono: a) un'azione di **monitoraggio** continuo del giacimento, e b) un'azione di **controllo (*feed-back*)**, cioè un piano di intervento nel caso venissero monitorate fughe di CO<sub>2</sub>
2. **fissare significa far reagire chimicamente** oppure **biologicamente la CO<sub>2</sub>** per ottenere un composto non volatile (solido o liquido), in modo che la CO<sub>2</sub> non venga liberata e restituita all'atmosfera nel breve o medio termine
3. molti processi chimici sono stati proposti per trasformare la CO<sub>2</sub> in composti di valore commerciale, **nessuno finora allo scopo di ottenere composti da sotterrare** (necessario un cambiamento di approccio!)
4. **processi chimici naturali** possono avvenire in cavità geologiche profonde purchè vi sia la presenza di **ossidi di metalli**. La conversione da ossidi a carbonati per opera della CO<sub>2</sub> è semplice e veloce,....ma **NON ci sono ossidi** a sufficienza!
5. Il processo biologico naturale si chiama **fotosintesi**, ma è dannatamente lento!

# SOTTERRARE CO2: A CHE PUNTO SIAMO?

1. **IEA** (International Energy Agency) pubblica ed aggiorna un **CCUS Projects Database**. È un file Excel™ scaricabile: *IEA CCUS Projects Database 2025.xlsx*
2. nell'ultima versione pubblicata (aprile 2025) sono elencati 844 progetti, di cui:
  - 743 «planned»
  - 43 in costruzione (per il 95% sotto 1 MT/anno di CO2, cioè piccoli pilota)
  - 50 operativi (di tutto e di più...)
  - 5 dismessi
3. **EOR**: Enhanced Oil Recovery. Molte installazioni. Che cos'è e perché non funziona ai fini della sottrazione di CO2 dall'atmosfera
4. **produzione di energia elettrica con CCS**: impianto USA dismesso  
<https://www.eenews.net/articles/the-kemper-project-just-collapsed-what-it-signifies-for-ccs/>
5. della **CCS in cavità geologiche** si parla molto ma: a) non sembra ci sia grande interesse per sotterrare la CO2 senza trarne qualche altro vantaggio, b) la tecnologia per il controllo di eventuali fughe è di là da venire

# Problemi termodinamici (*ter*) e cinetici (*cin*) per fissare chimicamente la CO<sub>2</sub>, che significa trasformare (ridurre) la CO<sub>2</sub> in C

## 1. Energia libera di formazione di Gibbs (costante di equilibrio chimico, problema *ter*):

- $C + O_2 \rightleftharpoons CO + \frac{1}{2}O_2 \rightleftharpoons CO_2$
- sfavorevole: per spostare l'equilibrio verso sinistra occorre operare ad almeno 2500 °C

## 2. Entalpia di formazione della CO<sub>2</sub> (problema *ter*)

- è l'opposto dell'entalpia rilasciata nella reazione di ossidazione di C a CO<sub>2</sub>: -393.5MJ/kmol
- esprime il fabbisogno energetico per sostenere la reazione di riduzione della CO<sub>2</sub> a C
- sfavorevole: per ridurre la CO<sub>2</sub> a C occorre trasferire moltissima energia al reattore

## 3. Energia di legame nella molecola di CO<sub>2</sub> (problema *cin*)

- molto elevata: 532 MJ/kmol
- anche superando i problemi termodinamici 1. e 2., **devono essere usati catalizzatori adatti** per ridurre l'energia di attivazione ed assicurare una cinetica di reazione veloce

## 4. **alternativamente**, per risolvere il problema si dovrebbe **seguire un'altra strada**

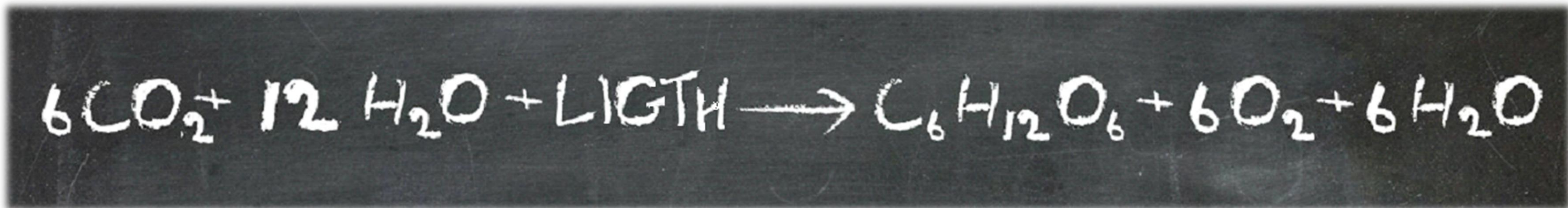
- ricavare **energia** dagli idrocarburi **senza bruciare** (pirolisi), ad esempio:  $CH_4 \rightleftharpoons C + 2H_2$

# FAR REAGIRE CO<sub>2</sub> CHIMICAMENTE: A CHE PUNTO SIAMO?

1. sono **molti i processi chimici** in fase di **studio/ricerca**
2. in ogni caso, per far reagire un composto così stabile come la CO<sub>2</sub> **servono: a) un sacco di energia, b) tanto idrogeno e c) catalizzatori adeguati**
3. esempi con composti gassosi o liquidi: produzione di **syngas, metano, metanolo, acido formico, e-fuels**. Esempi con composti solidi: **fertilizzanti, policarbonati...**
4. una **domanda**: quando si è ottenuto il prodotto, per cosa viene impiegato? Se dopo poco tempo il composto si decompone e libera CO<sub>2</sub> gassosa che cosa succede?
5. ad esempio **se mettiamo gli e-fuels nelle auto a motore endotermico** e non nei giacimenti esausti, dopo breve tempo la CO<sub>2</sub> torna in atmosfera a seguito dell'impiego che se ne fa (vale per gli e-fuels ma anche per i fertilizzanti)
6. in ogni caso **si deve avere a disposizione idrogeno**, che deve essere prodotto:
  - processo di **steam reforming + water gas shift**: emette **9,4 kg<sub>CO2</sub>/kg<sub>H2</sub> prodotto**
  - processi di pirolisi, cioè di reazione in assenza di ossigeno: in questo caso si deve considerare il *carbon black* come prodotto da sotterrare e non da valorizzare

# PER FISSARE LA CO<sub>2</sub> LA NATURA HA PREDISPOSTO UN'ALTRA TECNOLOGIA: LA FOTOSINTESI (DA SFORZA, 2012)

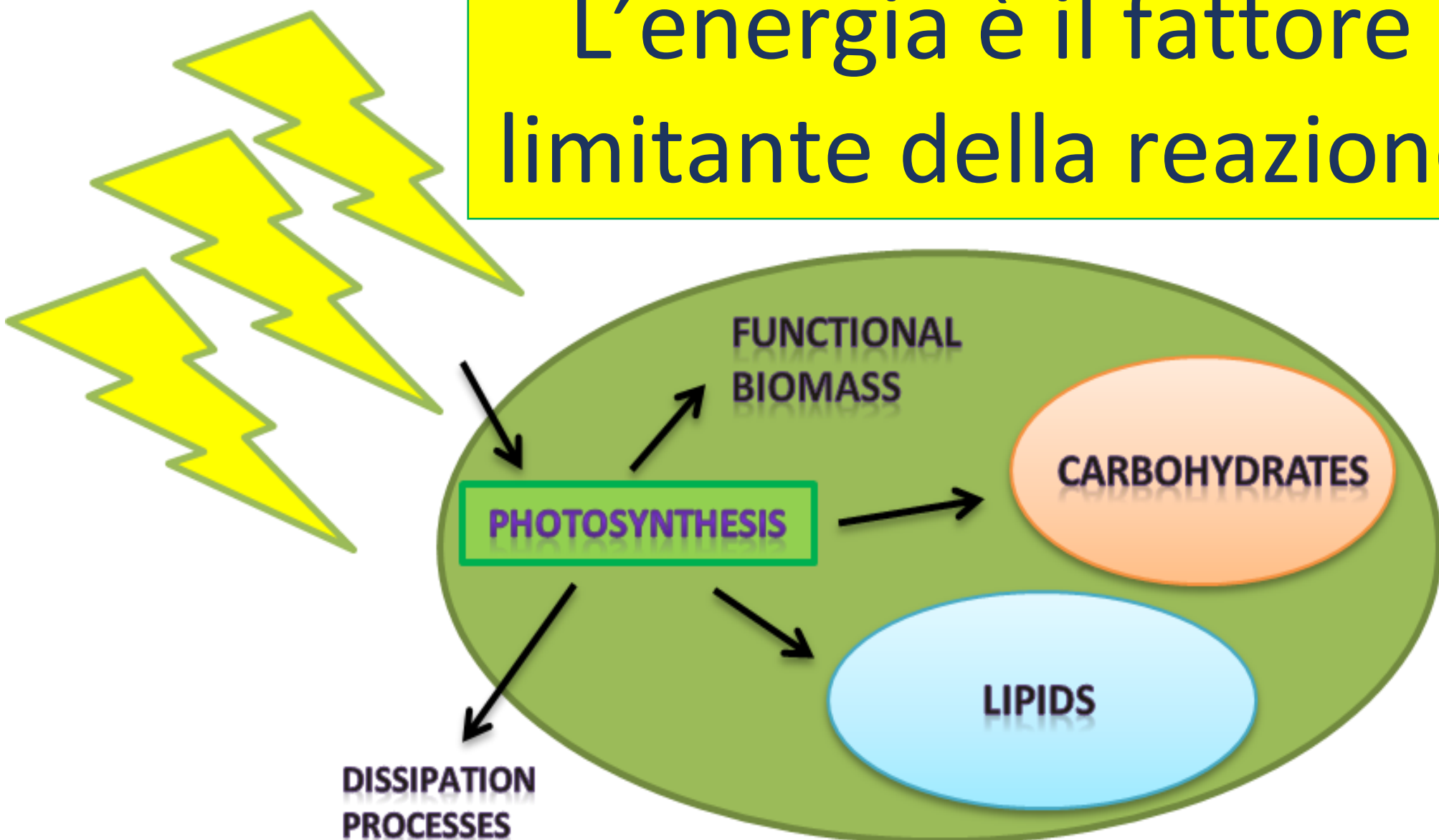
stechiometria semplificata dei processi fotosintetici



*stato ossidato*

*stato ridotto*

L'energia è il fattore limitante della reazione



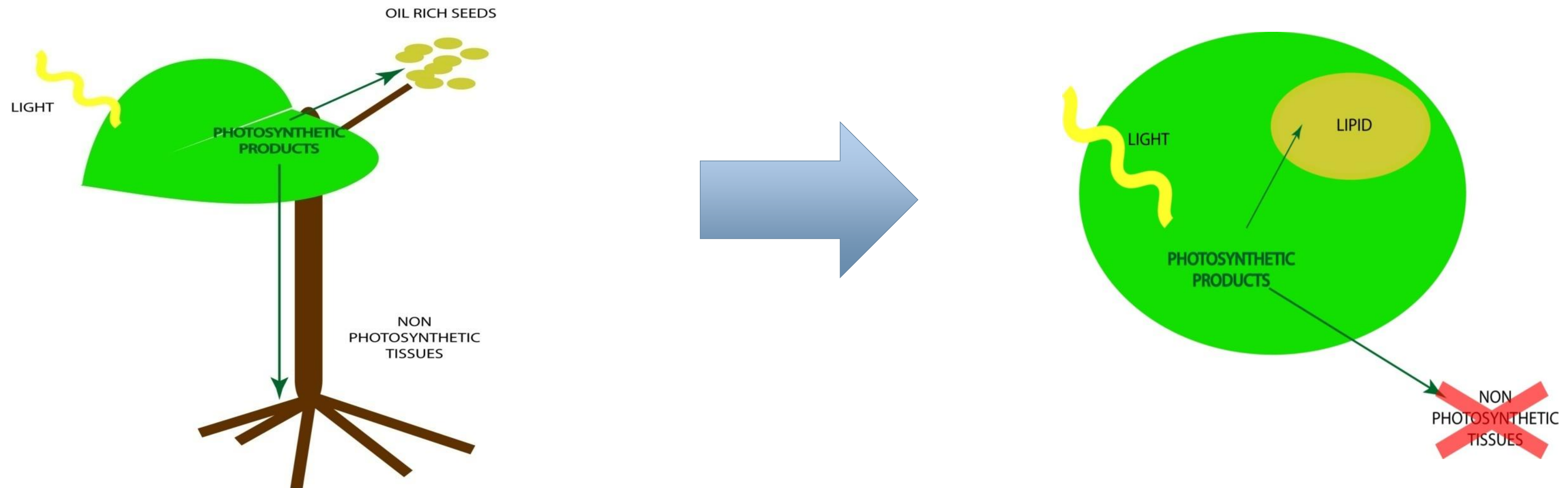
Ma altri atomi sono coinvolti, con altri vincoli stechiometrici. Ad esempio, la composizione di una microalga su base molare potrebbe essere espresso come:



Per coltivare microalghe, si devono fornire essenzialmente C, N e P. Servono però anche molti altri "micronutrienti" (Fe, S, ...).

# FOTOSINTESI nelle PIANTE e nei MICROORGANISMI

(DA SFORZA, 2012)



Nelle **piante superiori** non tutti i tessuti vegetali contribuiscono alla fotosintesi. Il contenuto lipidico è al massimo 5% (nei semi)

Le **microalge** sono come una pianta interamente attiva per la fotosintesi. Il contenuto lipidico può arrivare al 40-80%.  
Circa 2 kg di CO<sub>2</sub> vengono fissati per kg di microalga

**Potere calorifero delle microalge: 20-22 MJ/kg, ma sul peso secco**

# FOTOSINTESI NATURALE E INDUSTRIALE PER FISSARE LA CO<sub>2</sub>

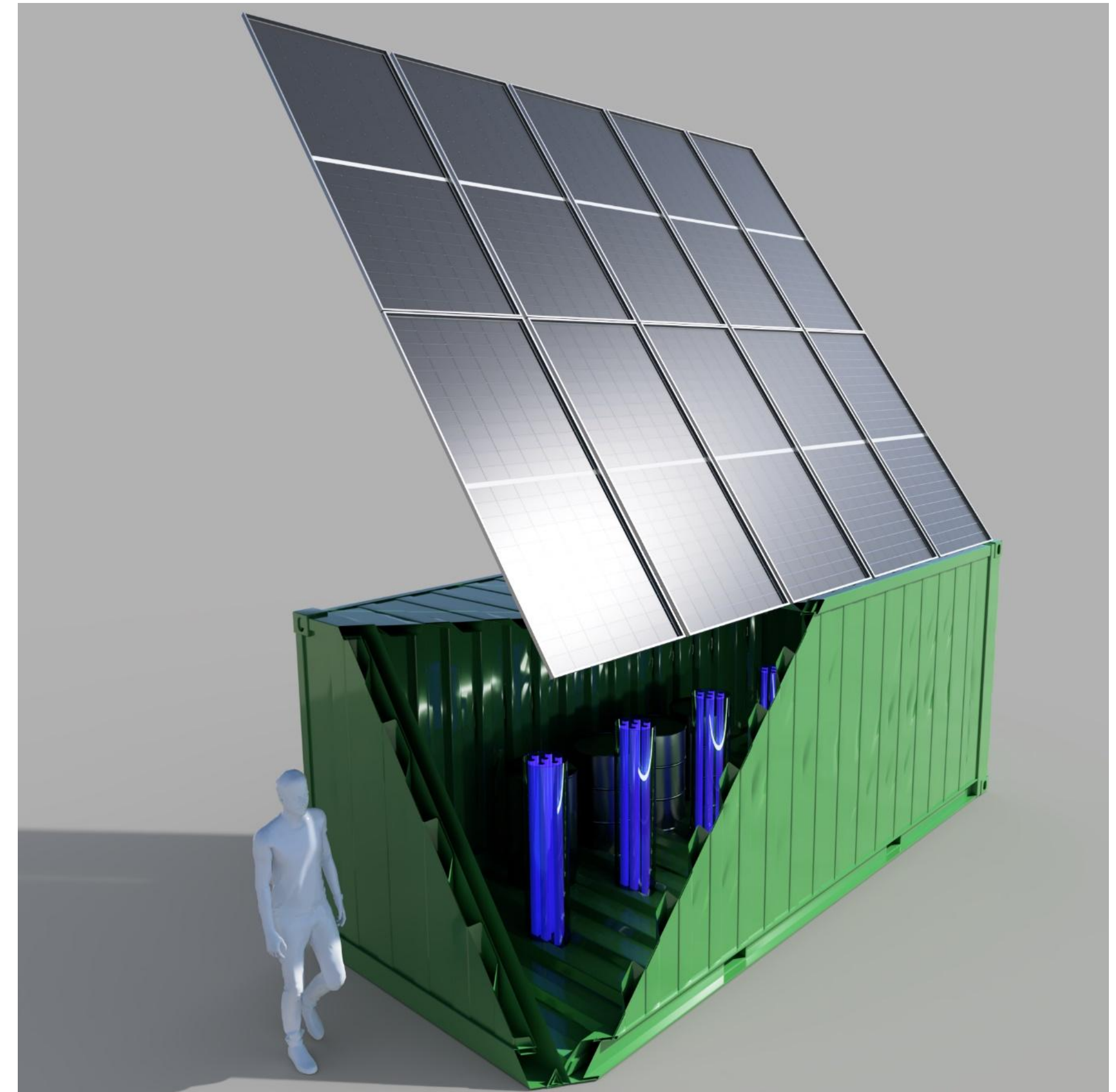
1. il **PAR** è il 42% della radiazione solare (il **58% NON** è **utile** alla fotosintesi). Il limite termodinamico è che max 26% del PAR può essere assorbito, l'**11%** della luce totale
2. nella **realtà** la **fotosintesi naturale** delle piante superiori è un processo **poco efficiente** (sfrutta circa l'**1 per mille** dell'energia solare incidente, e gran parte della pianta non ha attività fotosintetica)
3. **microalghe e cianobatteri** presenti nei mari, fiumi e laghi massimizzano l'attività fotosintetica: le **vasche aperte per produrre biomassa microalgale** sfruttano l'**1 per cento** dell'energia solare incidente, ma richiedono **aree enormi**
4. in ogni caso il **60% circa dell'assorbimento naturale di CO<sub>2</sub>** avviene grazie a questa presenza di questi microorganismi **nei mari**
5. dal punto di vista cinetico la **limitazione principale** è la **bassa concentrazione** del reagente (quella **della CO<sub>2</sub> in atmosfera**), che comporta **volumi enormi** di reattore
6. **fotosintesi industriale**: usa luce con lunghezze d'onda adeguate e concentrazione di CO<sub>2</sub> sufficiente (almeno 3%, cioè 80 volte di più di quella atmosferica) per ridurre questi volumi

# FOTOSINTESI INDUSTRIALE E FOTOBIOREATTORI

1. i **fotobioreattori sono recipienti confinati** dove la fotosintesi viene condotta in condizioni ottimali per raggiungere efficienze attorno al 10% (24% rispetto al PAR)
2. **la fonte di energia è radiazione luminosa prodotta artificialmente** con sistemi ad alta efficienza (LED)
3. **l'energia elettrica** per i LED deve essere prodotta **da fonte rinnovabile**
4. la **velocità** (cinetica di reazione) della fotosintesi è intrinsecamente **molto bassa**: per produrre quantità significative di microalghe/cianobatteri servono **grandi volumi** di fotobioreattori
5. nella reazione di fotosintesi **il carbonio (la CO<sub>2</sub>) non è l'unico reagente (nutriente)**: occorre fornire anche azoto, fosforo e molti «micronutrienti»
6. il solvente di reazione è acqua, **la soluzione è molto diluita** (trasmettere la luce!)
7. di conseguenza, **il costo di produzione di biomassa microalgale è elevato**, dal punto di vista sia energetico sia economico

# UN ESEMPIO DI FOTOBIOREATTORE INDUSTRIALE\*

1. alloggiato in un container standard può produrre circa **120 kg/anno** di biomassa (peso secco), con 5 fotobioreattori in parallelo da 100 litri l'uno
2. dimensionato **per produrre tutta l'elettricità necessaria**, ma collegato alla rete elettrica per scambiare energia quando necessario
3. per lavorare *off-grid* ha bisogno di **batterie di accumulo**



\*Tormena N., Borella L., Sforza E., Bertucco A., Trivellin N., 2026. Net-zero energy microalgae production: Photovoltaic integration in light-emitting diode-based photobioreactors. *Energy Conversion and Management* 348 (2026) 120775

# RIASSUMIAMO L'IDEA, AI FINI DELLA DECARBONIZZAZIONE

1. **la CO<sub>2</sub> catturata va ad alimentare un fotobioreattore a LED** funzionanti grazie ad energia elettrica rinnovabile
2. si produce così una **biomassa** nel modo più efficiente possibile
3. dalla biomassa **si tolgono azoto e fosforo**, per riciclarli al fotobioreattore, e **si sotterra il resto**, per impedire che il carbonio venga rilasciato nel breve e medio periodo (questo succede se le microalghe vengono usate come ammendante)
4. **l'effetto complessivo** è che una **buona parte della CO<sub>2</sub> fossile catturata viene fissata** in una sostanza solida (biomassa) che non è più in contatto con l'atmosfera
5. **ci chiediamo** se l'intero processo :
  - è energeticamente **sostenibile?**
  - è economicamente **sostenibile?**

Le due domande **sono correlate** perché la fornitura di energia incide sui costi di produzione (Capex+Opex) per più dell'80%

# UNA TABELLA INDICATIVA DEI COSTI DI PRODUZIONE (OPEX)

| EFF FOTOSINT →<br>COSTO EN EL ↓ | 5%                   | 10%                  | 15%                  | 20%                  | 25%                  |
|---------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| €/kWh                           | €/ton <sub>CO2</sub> | €/ton <sub>CO2</sub> | €/ton <sub>CO2</sub> | €/ton <sub>CO2</sub> | €/ton <sub>CO2</sub> |
| 0,025                           | 1.363                | 682                  | 454                  | 341                  | 273                  |
| 0,05                            | 2.727                | 1.363                | 909                  | 682                  | 545                  |
| 0,075                           | 4.090                | 2.045                | 1.363                | 1.022                | 818                  |
| 0,10                            | 5.453                | 2.727                | 1.819                | 1.363                | 1.091                |

1. calcolata sulla base di una **simulazione rigorosa del processo**, più Opex
2. i soli costi di funzionamento dovuti alla produzione di energia elettrica per i LED eccedono di gran lunga il **valore attuale della quota ETS di emissione di CO2**
3. **perché non** usare un processo di **compostaggio** di biomassa agricola, e sotterrare il compost, con costi ben minori (circa 3 €/kg CO2 equivalente sotterrata)?
4. **ma quanta biomassa si dovrebbe dedicare al compostaggio?** Il conto non torna

## 5. COME CALCOLARE I COSTI ENERGETICI/ECONOMICI DI CCS/CCU

1. nel caso di CCS, CCU, BECCS e BECCU si tratta di progettare e costruire processi ed impianti su larga scala (dimensione industriale, milioni di tonnellate all'anno)
2. la chimica insegna come modificare natura e caratteristiche delle molecole, ed in particolare come trasformare composti non desiderati in altri più sostenibili per l'ecosistema
3. i metodi sviluppati (e ben consolidati) dell'ingegneria chimica consentono di descrivere quantitativamente ogni processo di trasformazione chimica, in particolare di prevedere e calcolare le implicazioni e ricadute per quanto riguarda: consumi di materie prime e di energia, quantità e qualità di emissioni solide, liquide e gassose
4. sulla base di questi calcoli è possibile prevedere, sempre in termini numerici, i costi economici di investimento e di funzionamento dell'impianto che realizza il processo
5. questi metodi devono essere applicati ai processi ed agli impianti proposti per CCS, CCU, BECCS e BECCU, al fine di valutarne gli impatti in termini di consumi energetici e di emissioni

## 6. COME PREDIRE (VALUTARE IN ANTICIPO) LE PRESTAZIONI DI PROCESSI/IMPIANTI INDUSTRIALI (1/6)

1. i **simulatori di processo** sono programmi di calcolo utilissimi per la progettazione degli impianti industriali di CCS, CCU, BECCS, BECCU
2. i principi su cui si basano questi programmi di calcolo sono leggi fondamentali (**bilanci di conservazione di materia e di energia**), che forniscono le equazioni per la rappresentazione matematica (=il modello) del processo
3. per ogni operazione/apparecchiatura presente nel processo è possibile scrivere:  
bilanci di materia: uno per ciascun composto chimico coinvolto,  $i$

$$ACC_i = INP_i - OUT_i + (PRO - DES)_i$$

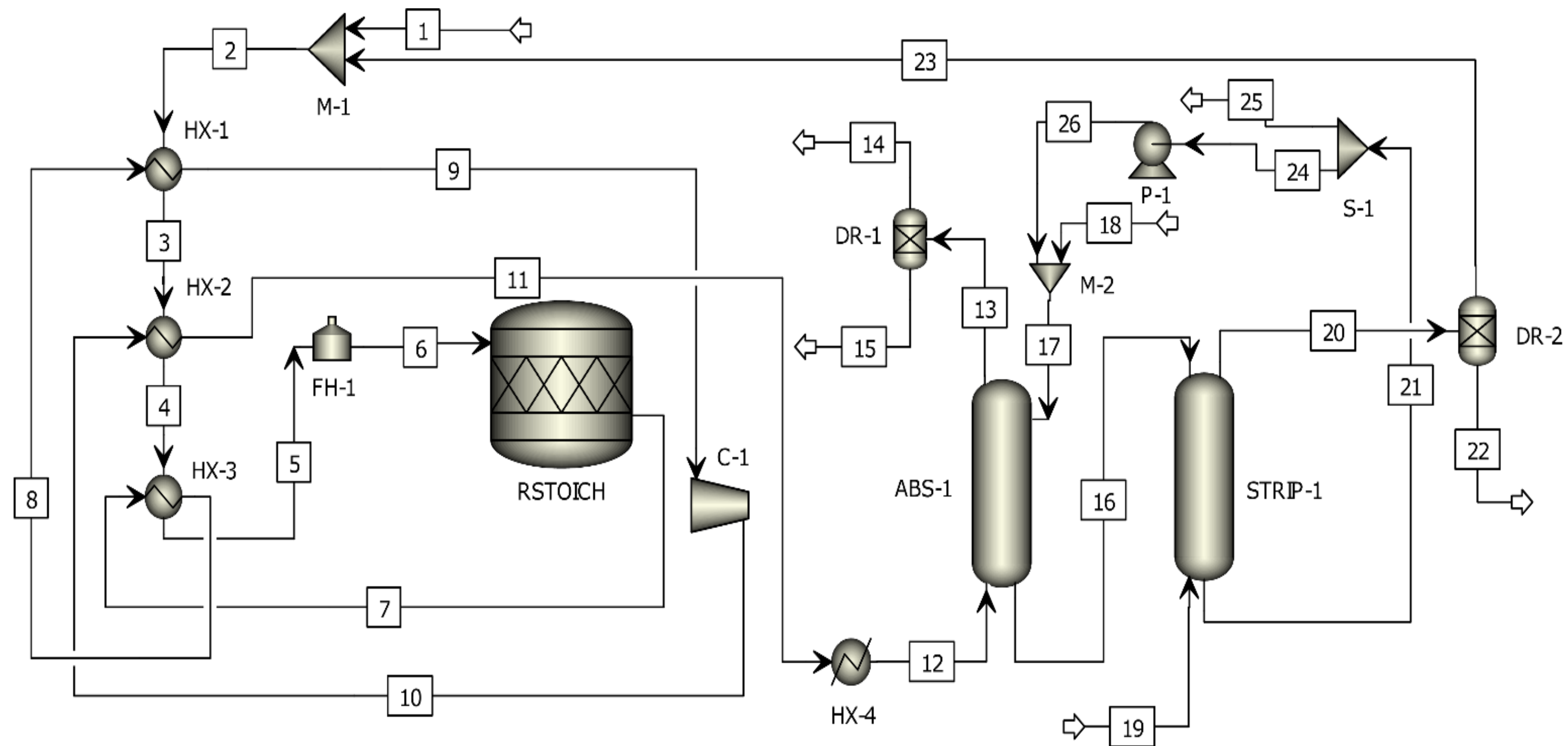
bilancio di energia: uno solo

$$ACC = INP - OUT + (PRO - DES)$$

NB: i termini (*PRO-DES*) descrivono l'effetto delle reazioni chimiche

# 6. ESEMPIO: PRODUZIONE DI GAS METANO DA CO<sub>2</sub> E H<sub>2</sub> (2/6)

- questo processo chimico, come tutti, è rappresentato da un insieme di unità (apparecchiature) collegate da segmenti (flussi di materia e di energia)



- il simulatore di processo consente di **calcolare a priori** i valori di portata, composizione e temperatura, per tutti i flussi

# 6. ESEMPIO: PREVISIONE DELL'EFFETTO DELLA CCS NEL PROCESSO NGCC DI PRODUZIONE DI ELETTRICITÀ DA METANO (3/6)

1. Sviluppo e analisi di un nuovo processo NGCC+CCS
2. Simulazione di processo dettagliata e completa del processo industriale
3. Calcolo degli indici di prestazione sulla base dei risultati della simulazione
4. Confronto e valutazioni comparate: effetti della CCS su consumi, emissioni e costi

Energy Conversion and Management 252 (2022) 115072

Contents lists available at ScienceDirect

Energy Conversion and Management

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/engconman](http://www.elsevier.com/locate/engconman)




Fuelling power plants by natural gas: An analysis of the economical aspects and environmental footprint by process simulation of the whole carbon capture and storage system

Elena Barbera<sup>a</sup>, Andrea Mio<sup>b,d,\*</sup>, Alessandro Massi Pavan<sup>b,d</sup>, **Maurizio Fermeglia<sup>d</sup>**

<sup>a</sup> Department of Industrial Engineering (DII), University of Padova, Italy  
<sup>b</sup> Department of Engineering and Architecture, University of Trieste, Italy  
<sup>c</sup> Centro Studi "Levi Cases" for Energy Economics and Technology, University of Padova, Italy  
<sup>d</sup> Center for Energy, Environment and Transport Giacomo Ciamician, University of Trieste, Italy

ARTICLE INFO

Keywords:  
 Energy  
 EROEI  
 LCA  
 Process simulation  
 CCS  
 LCOE

ABSTRACT

In view of the low-carbon transformation of the power sector, natural gas-fired power generation is the only technology, among fossil resources, that will continue to provide an important source of flexibility for the power system in the coming years. However, the carbon dioxide emissions produced by the operation of such plants call for carbon capture and storage equipment, whose deployment needs to be assessed and compared with the main renewable technologies: wind power and photovoltaics. This work uses process simulation in order to assess two different carbon capture processes: a traditional one, based on monoethanolamine, and an innovative one, based on hot potassium carbonate. Process simulation is also used for the transportation of carbon dioxide to the sequestration site. Mass and energy balances from the simulations are then used for the calculation of the Energy Return on Energy Invested, the Levelized Cost of Energy and as inputs for the Life Cycle Assessments of both alternative designs. The life cycle analyses of the considered power technologies exhibited higher contributions due to fossil-based power plants towards climate-related impact categories, while renewable sources were revealed to be more burdensome for the exploitation of mineral resources. The calculated Energy Return on Energy Invested for gas-fired power plants with carbon capture and storage is between 5.2 and 12.4, comparable with the values of photovoltaics and wind power. On the other hand, their Levelized Cost of Energy is between 10.2 and 20.0 eurocent per kilowatt-hour, much higher than that of renewables. The conclusion is that, at present, the sustainability of gas-fired power stations equipped with carbon capture and storage should be carefully considered and not taken for granted.

Flexibility of the power system to balance supply and demand: the future



# 6. ESEMPIO: PREVISIONE DELLE PRESTAZIONI DEL PROCESSO NGCC+ CCS: EROEI, EROC, LCOE (4/6)

$$EROEI = E_{out}/E_{in}$$

**Energia elettrica prodotta rispetto al totale consumo di energia** per la produzione dell'elettricità

$$E_{out} = P \cdot cf \cdot L \qquad E_{in} = E_{cap} + E_{o\&m} + E_f \qquad E_f = \frac{P \cdot cf \cdot L}{\eta \cdot EROEI_{Fuel}}$$

$$EROC = \frac{(1 - 1/EROEI)}{(carbon\ emission\ factor)}$$

**Energia elettrica prodotta per unità (di massa) di CO2 emessa** nella produzione (GJ/ton<sub>CO2</sub>)

$$LCOE = \frac{OC \cdot P \cdot CRF \cdot FO\&MC}{8760 \cdot cf} + VO\&MC$$

**Costo di produzione dell'unità di energia elettrica (€/MWh)**

# 6. RISULTATI: EFFETTO DI CCS SU EROEI, EROC, LCOE (5/6)

| PROCESS        | C <sub>F</sub> | EROEI | EROC  |
|----------------|----------------|-------|-------|
| NGCC NO CCS    | 0.40           | 17.60 | 16.81 |
|                | 0.85           | 21.37 | 16.99 |
| NGCC + CCS MEA | 0.40           | 7.73  | 163.1 |
|                | 0.85           | 12.36 | 167.1 |
| NGCC + CCS HPC | 0.40           | 5.21  | 163.1 |
|                | 0.85           | 9.06  | 167.1 |

**LCOE** (€/KWH)

| CF   | NGCC WITH MEA | EXTRA COST DUE TO MEA | NGCC WITH HPC | EXTRA COST DUE TO HPC |
|------|---------------|-----------------------|---------------|-----------------------|
| 0.40 | [131 – 153]   | 53                    | [178 – 200]   | 100                   |
| 0.85 | [102 – 124]   | 24                    | [126 – 148]   | 48                    |

## 6. PREVISIONE DELLE PRESTAZIONI DEL PROCESSO NGCC+ CCS: EROEI, EROC, LCOE (6/6)

1. Rispetto a NGCC senza CCS, il valore di **EROEI si riduce del 57%** se l'assorbimento di CO<sub>2</sub> viene fatto con soluzione di **MEA** e **del 71%** se si usa soluzione di **HPC**
2. Rispetto a NGCC senza CCS, il valore di **EROC aumenta di circa 10 volte** in entrambi i casi
3. Rispetto a NGCC senza CCS, il valore di **LCOE aumenta sensibilmente**:
  - con soluzione di MEA del 53-68% a Cf=0,4, del 24-31% a Cf=0,85
  - con soluzione di HPC del 128-156% a Cf=0,4, del 62-90% a Cf=0,85
4. **Molto meglio prevenire** (decarbonizzare i processi produttivi) **che emettere CO<sub>2</sub> fossile e poi catturarla**

# PERCORSO LOGICO 3/3

## 5. Conclusione

- La **cattura di CO2 dai fumi di combustione** è tecnologia consolidata
- A tutt'oggi, la possibilità concreta di **ridurre l'accumulo di CO2 nell'atmosfera attraverso la tecnologia rimane una sfida aperta**, poiché mancano soluzioni tecnologiche che siano contemporaneamente:
  - efficaci su larga scala,
  - sicure nel tempo
  - economicamente sostenibili
- **ogni proposta** di nuovi processi per la cattura ed il sequestro della CO2 va prima di tutto verificata sulla base dei **bilanci di materia e di energia**
- se la proposta supera la valutazione precedente, va effettuata una **valutazione tecnico-economica degli impianti** in cui realizzare la cattura ed il sequestro, tenendo conto di Capex ed Opex, per verificarne la fattibilità e sostenibilità tecnoeconomica
- la soluzione del problema della cattura e sequestro della CO2 in eccesso è **un'emergenza globale**, una **lotta contro il tempo**: non ci sono scuse, **non possiamo permetterci di perdere tempo** correndo dietro ai miraggi!

## 7. CONSEGUENZE ED OBIETTIVI NEL BREVE E MEDIO PERIODO (1/2)

1. l'idea della **CCS** non è realtà ma un obiettivo da raggiungere, non c'è un piano B
2. l'idea della **CCU** è **greenwashing**, se U significa riutilizzo con emissione di CO2
3. lo storage migliore (S): **non CO2 sotto pressione e sotto terra, ma produzione di composti liquidi e solidi, che però vanno sotterrati**
4. solo **BECCS** consente **bilancio di emissioni di carbonio negativo**. BECCU al  
me «CCU, laddove il carbonio rimosso è di origine fossile  
con e i prodotti generati con il carbonio catturato sono destinati  
5. **tec** ad essere consumati con generazione di emissioni, tanto  
6. per comporta soltanto un piccolo spostamento temporale delle emissioni, u  
lung e rappresenta in gran parte dei casi un'occasione di greenwashing, u  
nec anche questa non utilizzabile in un quadro di net-zero» (A. Tilche) i  
irrinunciabili di CO2 fossile, garantendo globalmente emissioni nette nulle
7. come per ogni nuova attività **vanno valutati preventivamente i rischi sanitari e ambientali** delle tecnologie e impianti necessari per CCS, CCU, BECCS, BECCU

## 7. CONSEGUENZE ED OBIETTIVI NEL BREVE E MEDIO PERIODO (2/2)

8. due punti essenziali da affrontare quantitativamente perchè BECCS sia fattibile:
  - a. **Bilancio di materia sulla biomassa disponibile**
  - b. **Bilanci di materia e di energia sui processi industriali**, per calcolare le emissioni aggiuntive di CO<sub>2</sub> che essi comportano (simulazioni di processo)
9. per valutazione e riduzione dei **rischi**: c'è **l'ingegneria della sicurezza**
10. **obiettivo 1: arrivare al net-zero**, cioè fermare l'accumulo delle emissioni di CO<sub>2</sub>
11. **obiettivo 2**: il net-zero non basta. È anche necessario **ripulire l'atmosfera dalla CO<sub>2</sub> accumulata** negli ultimi 150 anni. Questo si può fare soltanto con **tecnologie BECCS**, che devono essere definite e consolidate al più presto
12. solo **realizzando i due obiettivi** la concentrazione di CO<sub>2</sub> in atmosfera potrà diminuire e **tornare a livelli climaticamente sostenibili**
13. Ma c'è di più: occorre superare le abitudini correnti (BAU), per ridurre le dimensioni del problema alla radice **riducendo la necessità di BECCS**. Ciò significa **avviare percorsi di risparmio energetico** attraverso **moderazione, efficientamento, elettrificazione** dei consumi di energia, che va prodotta **da fonti rinnovabili**

## 8. CONCLUSIONI: FATTI, OPINIONI E BALLE (OPINIONI FASULLE)

1. **fin qui sono stati presentati fatti e dati** la cui attendibilità può essere dimostrata su impianti e tecnologie installate ed in funzione oppure, se non ce ne sono, con simulazioni di processo eseguite correttamente
2. il metodo della **simulazione di processo** si basa sull'applicazione di leggi fisiche fondamentali e **consente di ottenere risultati la cui validità non può essere contestata**
3. **le opinioni sulla validità o meno delle varie opzioni tecnologiche debbono essere fondate su dati e calcoli di questo tipo** e sulla loro interpretazione
4. gli stessi dati e calcoli dovrebbero costituire **il punto di partenza per le scelte da parte dei decisori che consentano la transizione ad un sistema di produzione dell'energia senza impatti ambientali negativi (*decision support system*)**
5. le opinioni e **le scelte non basate su dati/calcoli certi e verificati sono non solo scientificamente fasulle** ma anche **inutili** dal punto di vista operativo, e diventano **miraggi**, o strumenti di distrazione di masse

## 8. CONCLUSIONI: LA MIA OPINIONE

6. - l'approccio del politicamente corretto,
- l'accumulo di ritardi per la ricerca del consenso,
- il relativismo tecnologico («tutte le tecnologie daranno un contributo»),
- la scelta di puntare soltanto sull'adattamento piuttosto che sulla mitigazione **sono prese di posizione molto dannose** perché ritardano la soluzione di un problema urgentissimo, provocando **conseguenze sanitarie, ambientali ed economiche** che non è ancora possibile quantificare con precisione ma che, alla luce delle stime attualmente disponibili, rischiano di essere **catastrofiche**
7. purtroppo **chi governa il mondo fa colpevolmente finta di non accorgersene**
8. fortunatamente **abbiamo strumenti e tecnologie a sufficienza**, già pronti all'uso
9. è **ORA il momento di agire**, anche se siamo già in cospicuo ritardo
10. è essenziale **sviluppare una consapevolezza diffusa e condivisa sul problema e sulle possibili soluzioni**, soprattutto fra i **giovani**, per **contrastare tutte le BALLE che circolano** (in: giornali, letteratura scientifica, internet, Algen,...)

# Un nostro studio uscito il 16 aprile 2026

QUO-71942-... VERBALE R... Bilancio pre... PX\_MOD\_S... PX\_CONF\_... 2. Conversa... 3. LArchivist... PoliticheIndi... ☆ Hydrogen production ... x


Tutti gli strumenti Modifica Converti Firma elettronica Trova testo o strumenti 🔍 | 📄 🔄 🖨️ | Condividi Chiedi all'Assistente IA

Questo documento sembra lungo. Per risparmiare tempo, usa l'Assistente IA per leggerne un riepilogo. [Visualizza riepilogo](#) x

Utilizzando questo servizio, accetti le [Condizioni d'uso di Adobe](#) e l'[Informativa sulla privacy](#)

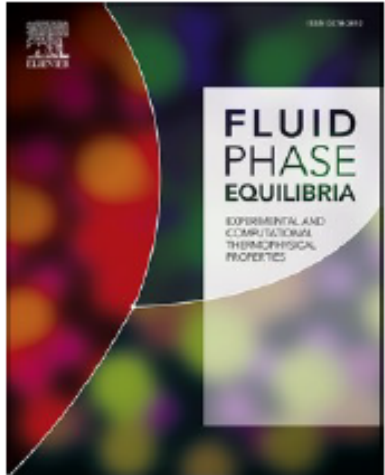
Fluid Phase Equilibria 609 (2026) 114738

Contents lists available at [ScienceDirect](#)

 **ELSEVIER**

Fluid Phase Equilibria

journal homepage: [www.journals.elsevier.com/fluid-phase-equilibria](http://www.journals.elsevier.com/fluid-phase-equilibria)



---

## Hydrogen production by methane-pyrolysis processes: an evaluation of CO<sub>2</sub> emissions and carbon footprint based on material and energy balances

Elena Barbera<sup>a</sup>, Marco Fontana<sup>b</sup>, Alberto Bertucco<sup>c,\*</sup>

<sup>a</sup> Department of Industrial Engineering, University of Padova, Italy  
<sup>b</sup> Independent Consultant, Brescia, Italy  
<sup>c</sup> University of Padova, Italy

---

ARTICLE INFO ABSTRACT



Il libro di Marco Giusti: una *road map*  
verso un sistema energetico  
100% rinnovabile e decarbonizzato

**VI RINGRAZIO DELL'ATTENZIONE:  
SPAZIO ALLA DISCUSSIONE!**