



CATTURARE LA CO₂ DIRETTAMENTE DALL'ARIA

Tra le soluzioni tecnologiche di mitigazione al cambiamento climatico, la Direct Air Capture (DAC) combinata con lo stoccaggio permanente della CO₂ è una delle più promettenti. La DAC sfrutta materiali filtranti che permettono di trattenere selettivamente la CO₂ lasciando andare gli altri gas. CarpeCarbon, prima start-up italiana DAC, ha sviluppato un processo innovativo che taglia i costi e i consumi.

Introduzione

A causa dell'uso di combustibili fossili, la concentrazione atmosferica di CO₂ è raddoppiata rispetto al periodo preindustriale, causando un aumento della temperatura globale di circa +1,1°C [1]. Durante la COP21 di Parigi (2015), le Nazioni Unite hanno stabilito di raggiungere la neutralità climatica entro il 2050 per contenere il riscaldamento sotto i +2 °C. Gli scenari individuati (Fig. 1a) mostrano che, oltre alla riduzione delle emissioni, è necessaria anche la rimozione di parte della CO₂ atmosferica. Ciò richiede soluzioni naturali e tecnologiche di Carbon Dioxide Removal (CDR), come la riforestazione e il biochar, tra quelle naturali, e la Direct Air Carbon Capture and Storage (DACCS o più semplicemente DAC), tra quelle tecnologiche. Questo articolo si concentra sulla Direct Air Capture (DAC o DACCS) e sull'approccio di CarpeCarbon per superare le sfide attuali.

Attualmente, la DAC rimuove meno di 0,05 Mt di CO₂/anno, ma l'International Energy Agency (IEA) mostra come necessario un incremento a 80 Mt/anno entro il 2030 (Fig. 1b) [2]. Ciò richiede investimenti economici e infrastrutturali nel settore CDR. Proposta per la prima volta nel 1999 da K. Lackner [3] come una delle tecnologie più promettenti, la DAC ha avuto una rapida evoluzione con varie realtà industriali in forma di start-up e PMI [4]. Questa tecnologia funziona convogliando grandi volumi d'aria attraverso filtri selettivi per la CO₂, rigenerati tramite trasferimento di energia (solitamente termica) per rilasciare CO₂ pura da stoccare o riutilizzare. Rispetto alle soluzioni naturali, la DAC è geograficamente meno vincolata, chimicamente più efficiente quando scalata a livello industriale, e offre la possibilità di misurare e verificare l'intero processo di cattura e rimozione.

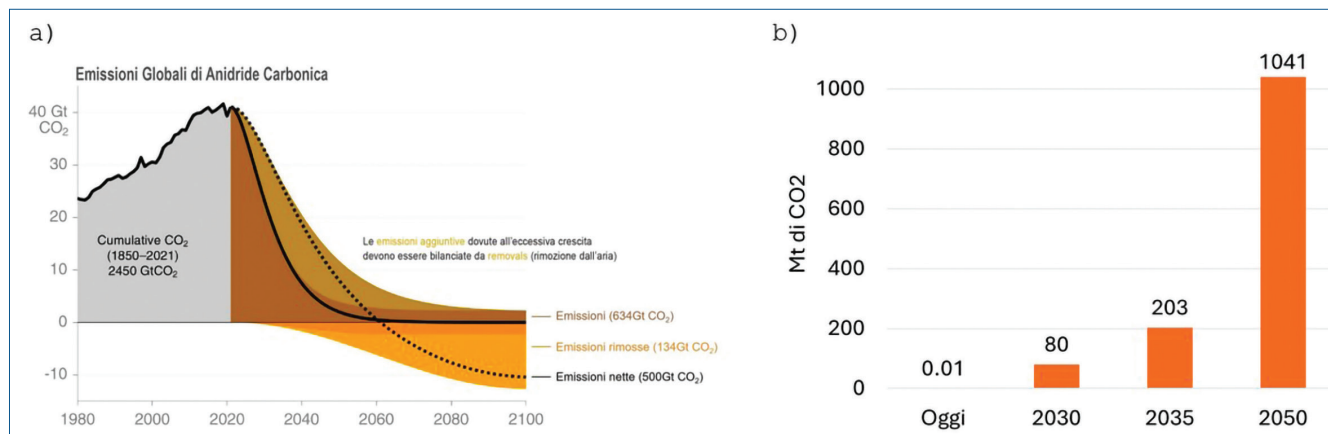


Fig. 1 - a) Obiettivi di rimozione di CO₂ entro fine secolo;
b) rimozioni totali tramite Direct Air Carbon Capture and Storage secondo lo scenario di emissioni nette zero nel 2050

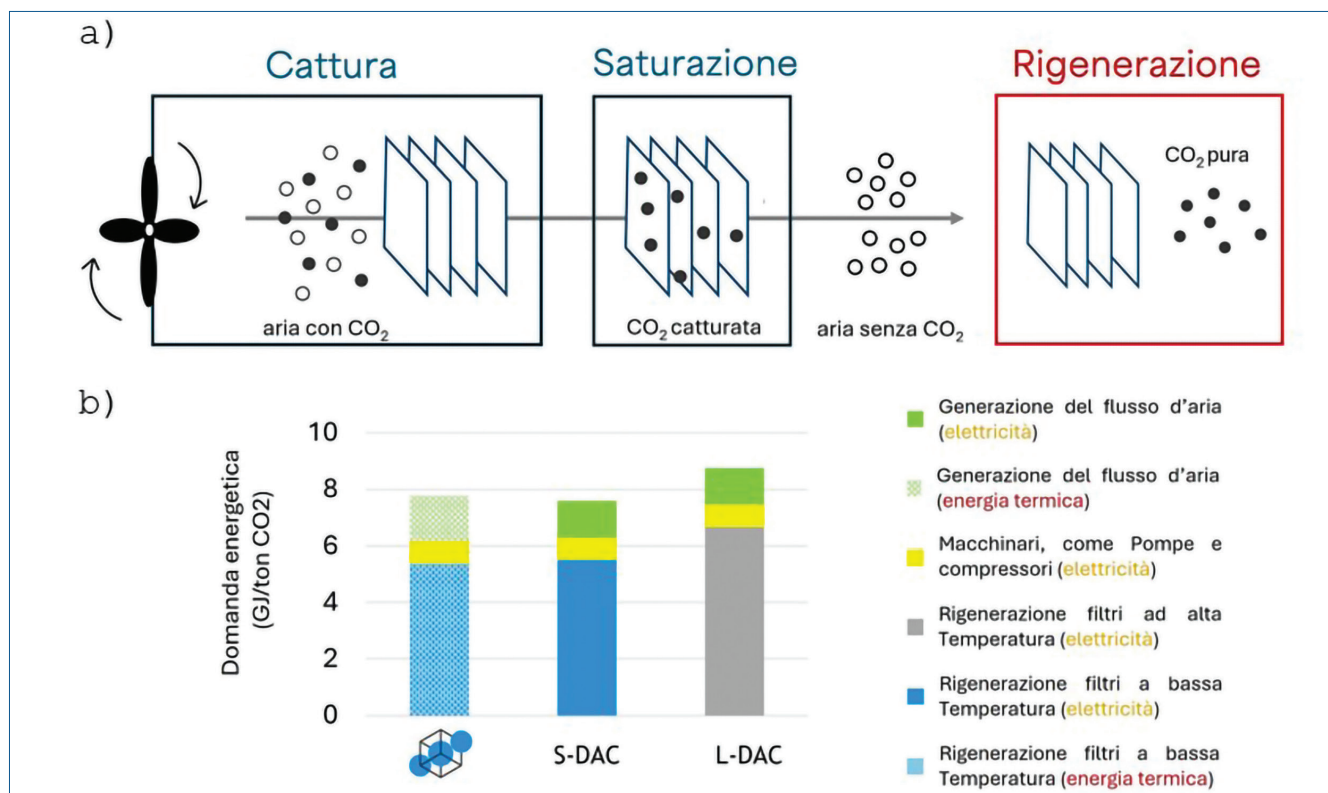


Fig. 2 - a) Rappresentazione schematica degli attuali processi DAC;
b) domanda energetica degli attuali processi DAC (Liquid-DAC e Solid-DAC) paragonati a CarpeCarbon

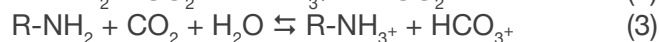
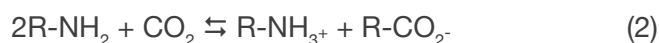
Tuttavia, le tecnologie DAC più avanzate al momento richiedono 7,2-10⁻⁸ GJ per tonnellata di CO₂ rimossa [5]: circa il 30% serve a movimentare l'aria tramite grosse ventole, il resto serve per rigenerare i filtri (Fig. 2). È quindi fondamentale alimentare gli impianti con energie rinnovabili a basso costo per garantire un bilancio di CO₂ negativo. Tuttavia, essendo la CDR una soluzione complementare alla riduzione delle emissioni, è necessario garantire l'assenza di competizione per energia rinnovabile necessaria alla transizione energetica di altri settori.

Materiali per la DAC

Una sfida tecnologica per la DAC è identificare materiali filtranti efficaci e selettivi per la CO₂, che operino con bassa richiesta energetica. La tecnologia Liquid-DAC di Carbon Engineering [6] impiega soluzioni acquose di basi forti (NaOH, KOH), che reagiscono con la CO₂ formando bicarbonati (reazione (1)):



Sebbene efficaci e a basso costo come materie prime, queste soluzioni richiedono più fasi di separazione e calcinazione con T > 800 °C per il rilascio della CO₂. La tecnologia Solid-DAC invece, come quella di Climeworks [7], utilizza adsorbenti solidi classificabili come fisisorbenti (interazioni non covalenti) o chemisorbenti (legami covalenti con la CO₂). Ad oggi, i più diffusi sono i chemisorbenti con gruppi amminici, che reagiscono secondo le reazioni (2) e (3), formando carbammati e carbonati d'ammonio:



Queste due reazioni sono reversibili fornendo calore (80-120 °C) e riducendo la pressione per favorire la cinetica. Le ammine sono versatili e modulabili chimicamente [8], ma meno stabili rispetto alle soluzioni liquide, poiché vanno incontro a degradazione e ossidazione [9]. Tra gli adsorbenti amminici più studiati c'è la PEI (polyethyleneimine) [10, 11], un polimero ricco di ammine capace di catturare

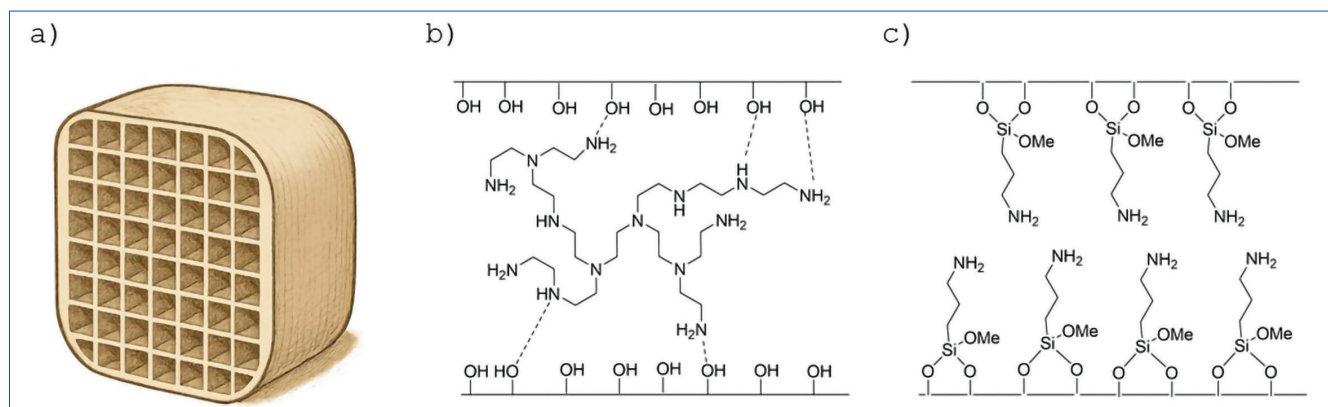


Fig. 3 - Esempi di funzionalizzazione di un honeycomb (a), tramite impregnazione con polietilenimina, o PEI (b), e grafting, tramite formazione di legame covalente, con silanolammine (c)

CO₂ anche a basse concentrazioni. La PEI viene depositata su supporti porosi come biossido di silicio o γ -allumina [12] mediante impregnazione, tecnica semplice che consente l'utilizzo di strutture tridimensionali ottimizzate per la filtrazione come gli honeycomb, strutture a nido d'ape (Fig. 3) [13]. Tuttavia, la debole interazione tra PEI e supporto può causare lisciviazione e bassa stabilità operativa. Inoltre, l'alta massa molecolare della PEI rallenta le cinetiche di cattura e rilascio.

In alternativa, le ammine possono essere legate covalentemente al supporto, ad esempio formando silanolammine su superfici silicee, migliorando la stabilità operativa [8, 14]. Un'altra classe promettente è quella dei MOF (Metal-Organic Frameworks), strutture porose che combinano ioni metallici e leganti organici creando strutture ad altissima area superficiale. I MOF possono funzionare sia come fisisorbenti che chemisorbenti, a seconda che venga effettuata una funzionalizzazione. A livello sperimentale, queste sostanze presentano elevate prestazioni in capacità di cattura e ridotta richiesta energetica. Tuttavia, la loro instabilità agli agenti atmosferici, la fragilità meccanica delle strutture e l'alto costo delle materie prime ne limitano per il momento l'applicazione industriale [11, 15].

La ricerca di un materiale "ideale" continua: esso dovrebbe combinare alta capacità di cattura, bassa energia di rigenerazione e stabilità a più cicli di cattura e rilascio. Inoltre, il materiale adsorbente deve essere adattabile alle condizioni operative (es. umidità e temperatura dell'aria) senza perdere in performance.

Infine, è cruciale considerare anche il destino della CO₂ catturata. Essa può essere riutilizzata in ambi-

ti industriali (es. bevande gassate, solventi, sintesi chimiche, etc.), e convertita in prodotti secondari, ad esempio combustibili net-zero (e-fuels) [16], o stoccata permanentemente in forme più stabili climaticamente inattive. L'utilizzo della CO₂ atmosferica in sostituzione di quella fossile rende i cicli produttivi più circolari. Mentre lo stoccaggio della CO₂ ha come obiettivo la sua effettiva rimozione dall'atmosfera. La CO₂ catturata può essere stoccata in giacimenti di idrocarburi ormai esausti o in rocce vulcaniche. Mentre nel primo caso la CO₂ viene fisicamente confinata nelle rocce in cui è iniettata, nel secondo reagisce con le rocce con cui è in contatto e si trasforma in carbonato minerale. Questo processo naturale e veloce, detto "mineralizzazione", garantisce lo stoccaggio permanente e sicuro e abbatte i costi e i tempi di monitoraggio del sito in cui avviene.

La tecnologia di CarpeCarbon

CarpeCarbon nasce in Italia nel 2022 con lo scopo di sviluppare una tecnologia DAC a basso costo, rendendo un processo altamente energivoro, com'è quello della DAC, termicamente efficiente, evitando così di entrare in competizione con gli sforzi per la transizione energetica. L'innovazione principale consiste nell'utilizzare energia termica a bassa entalpia per operare durante le fasi più energivore della DAC (Fig. 4a). Infatti, il processo proprietario permette di sfruttare in maniera efficiente l'energia termica proveniente da diverse fonti (e.g., radiazione solare e calore di scarto derivante da processi industriali) per generare un flusso d'aria costante che non necessita ventole e rigenerare i filtri saturati durante la cattura. In questo modo, si

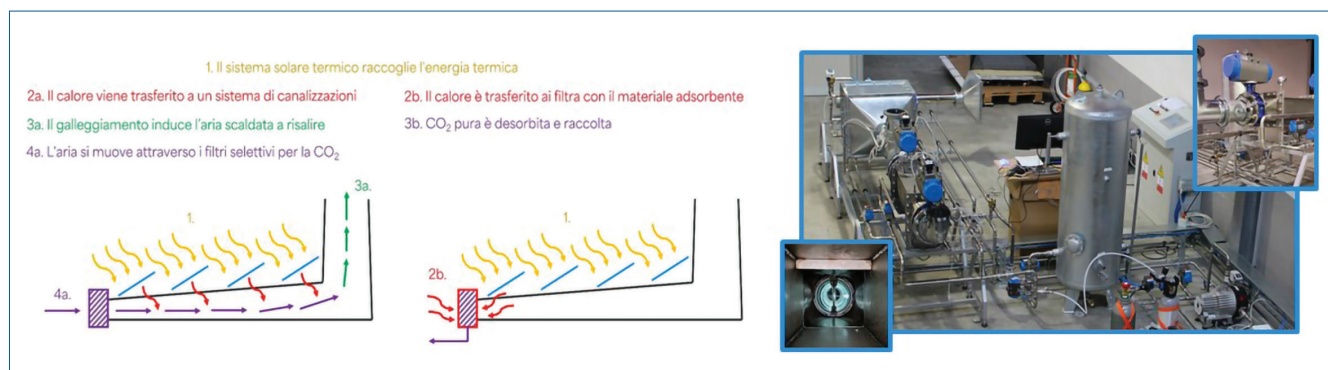


Fig. 4 - a) Schema semplificato del processo proprietario di CarpeCarbon;
b) prototipo dell'intero processo DAC, dalla cattura dall'aria allo stoccaggio temporaneo in bombola

riesce a ridurre fino al 90% i consumi di energia elettrica e i costi operativi.

In configurazione stand-alone, CarpeCarbon è in grado di sfruttare la radiazione solare, accumulare calore e utilizzarlo in modo preciso e controllato durante l'arco della giornata. Il sistema è modulare ed è composto da unità filtranti che operano simultaneamente cattura della CO_2 e rigenerazione del materiale adsorbente, con l'obiettivo di incrementare l'efficienza energetica e la produttività dell'impianto. Inoltre, i moduli filtranti sono pensati per utilizzare diverse tipologie di materiali adsorbenti e richieste energetiche, senza che questo si traduca in un aumento del costo di cattura. L'impianto è progettato per operare in modo automatizzato e senza la necessità di allacciarsi alla rete elettrica. Quest'ultimo aspetto conferisce un'alta flessibilità nella localizzazione dell'impianto, ad esempio in zone desertiche e in prossimità di un sito di stoccaggio.

La tecnologia che integra la chimica dei materiali adsorbenti con l'ingegneria dell'impiantistica è in fase di validazione, con i primi prototipi (un esempio in Fig. 4b) assemblati e testati in condizioni reali. L'azienda sta attualmente lavorando alla costruzione del suo impianto pilota che validerà il processo ad una scala significativa.

BIBLIOGRAFIA

- [1] **Priestley Centre for Climate Futures**, 2024.
- [2] **International Energy Agency (IEA)**, Reports, 2023.
- [3] K.S. Lackner *et al.*, Conference "Carbon Dioxide Extraction from Air: Is It An Option?", 1999.
- [4] **Climeworks**, 2024.

- [5] A Research Agenda, National Academies of Sciences, Washington, DC, 2019.
- [6] **Carbon Engineering**, 2023.
- [7] C. Gebald *et al.*, Patent WO2014170184A1, 2014.
- [8] X. Shi *et al.*, *Angewandte Chemie*, 2020, **59**, 6984.
- [9] G.T. Rochelle *et al.*, *Current Opinion in Chemical Engineering*, 2012, **1**, 183.
- [10] A. Goeppert *et al.*, *Chem. Sus. Chem.*, 2014, **7**, 1386.
- [11] A. Sinha *et al.*, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2017, **56**, 750.
- [12] P. Priyadarshini *et al.*, *ACS Environ. Au.*, 2023, **3**, 295.
- [13] K. Maresz *et al.*, *Chemical Engineering Journal*, 2020, **383**, 123175.
- [14] J.A. Wurzbacher, C. Gebald, A. Steinfeld, *Energy & Environmental Science*, 2011, **4**, 3584.
- [15] T.M. McDonald *et al.*, *J. Am. Chem. Soc.*, 2012, **134**, 7056.
- [16] C.G. Visconti, Avogadro Colloquia, Politecnico di Milano, 2023.

Capturing CO_2 Directly from the Air

Among the technological solutions for mitigating climate change, Direct Air Capture (DAC) combined with permanent CO_2 storage is one of the most promising. DAC uses filter materials that selectively retain CO_2 while letting other gases go. CarpeCarbon, the first Italian DAC start-up, has developed an innovative process that cuts costs and consumption.