



Alessio Fuoco^a, Valentina Crocellà^b

<http://dx.medra.org/10.17374/CI.2025.107.4.20>

^aIstituto per la Tecnologia delle Membrane, CNR-ITM
Rende (CS)

alessio.fuoco@cnr.it

^bDipartimento di Chimica, Università di Torino
valentina.crocella@unito.it

CO₂, DA SCARTO A COMBUSTIBILE

Una corretta gestione del ciclo dell'anidride carbonica deve prevedere sia la sua cattura che il suo riutilizzo. Di grande interesse tecnologico sono i dispositivi capaci di effettuare questi due processi simultaneamente. Un esempio in via di sviluppo sono le membrane innovative con doppia funzionalità, che puntano ad effettuare la cattura e la conversione della CO₂ in combustibili in un unico modulo.

Il cambiamento climatico è una delle sfide più urgenti della nostra epoca. Non si tratta solo di una questione ambientale, ma di una crisi sistemica che coinvolge tutti gli aspetti della società umana. Il riscaldamento globale è attribuibile alle attività antropiche, in particolare all'eccessiva emissione di gas serra come l'anidride carbonica (CO₂) portando la concentrazione di quest'ultima ad oltre 400 ppm (parti per milione). Questi 400 ppm di CO₂, sebbene rappresentino una frazione minima rispetto ad altri gas presenti nella nostra atmosfera, sono responsabili dell'aumento della temperatura media terrestre, con impatti già ben visibili sul nostro delicato ecosistema. Il 2024 è stato l'anno più caldo mai registrato a livello globale e il primo anno solare in cui la temperatura media globale ha superato di 1,5 °C quella del livello preindustriale [1], valore critico definito nell'accordo di Parigi. Di fronte a questi scenari, la principale sfida dell'umanità è invertire l'aumento delle emissioni di gas serra per mitigare le gravi conseguenze sul clima globale. In questo contesto, la transizione della società moderna verso un'economia più sostenibile e circolare deve essere accelerata. Tuttavia, per poter vincere questa sfida, soluzioni incrementali, come il miglioramento dell'efficienza energetica o la semplice sostituzione di tecnologie obsolete, non sono più sufficienti. È necessario un cambio di paradigma, un ripensamento radicale del nostro modello di sviluppo, che coinvolga ogni settore della società. Bisogna quindi creare una rete in cui ricerca scientifica, industria, agricoltura, società e governi collaborino al fine di modificare struttu-

ralmente tutto il ciclo di vita dei diversi prodotti e processi caratteristici della nostra era, con l'implementazione di soluzioni su larga scala.

Uno dei pilastri fondamentali di questa transizione è il passaggio da un'economia lineare, basata sul concetto "estrai-produci-consuma-smaltisci", a un'economia circolare, in cui gli scarti vengano riutilizzati e trasformati. Questo concetto può essere utilizzato anche su uno "scarto" come la CO₂, implementando un ciclo sostenibile della CO₂, basato su processi di cattura e utilizzo il cui bilancio finale di emissioni nette sia zero o negativo. La gestione dell'intero ciclo del carbonio è essenziale per raggiungere l'obiettivo alla base del Green Deal europeo. L'Unione Europea ha tracciato un percorso chiaro con il Green Deal, una strategia che mira a rendere l'Europa il primo continente climaticamente neutrale entro il 2050. Per raggiungere questo obiettivo è necessario promuovere soluzioni integrate per ridurre le emissioni, salvaguardare la biodiversità, migliorare l'uso delle risorse naturali e trasformare l'intero sistema produttivo. Anche in questo caso è necessario un cambio di paradigma, in cui, l'anidride carbonica si tramuti da rifiuto (minaccia) a materia prima seconda (risorsa) per poter essere convertita in prodotti utili e che oggi sono realizzati utilizzando fonti non rinnovabili.

Nel 2022, l'Unione Europea, tramite il Consiglio Europeo per l'Innovazione (European Innovation Council - EIC), ha deciso di giocare un ruolo di primo piano nello sviluppo di nuove tecnologie in grado di ridurre le emissioni di CO₂ (e di azoto) e di trasformarle in sostanze utili. A tal fine, ha lanciato la

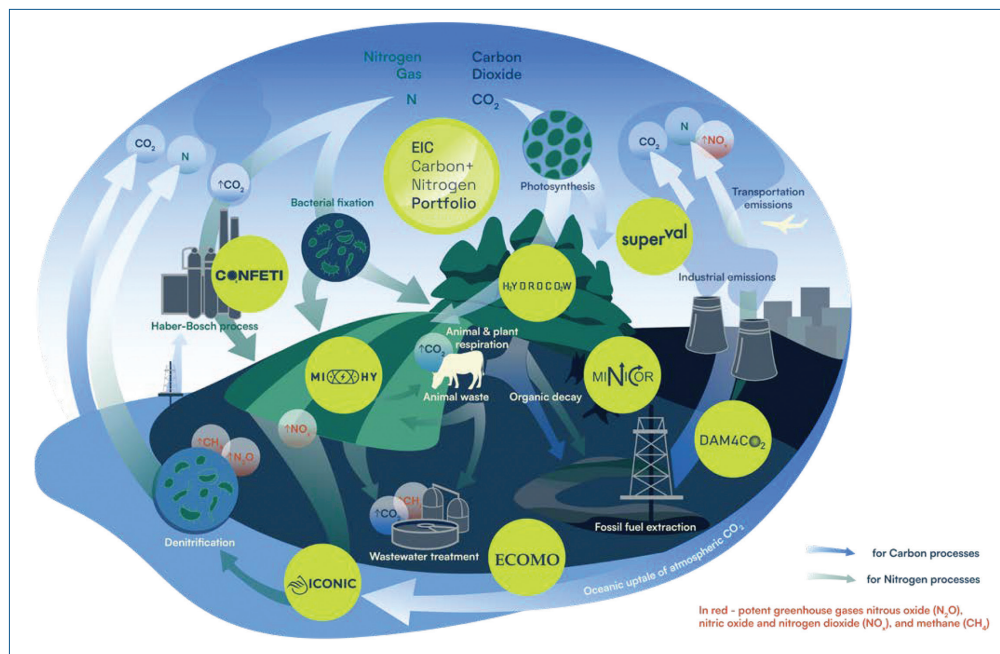


Fig. 1 - Schematizzazione dei cicli della CO₂ e dell'azoto e posizionamento dei progetti afferenti al EIC-CO₂ and Nitrogen portfolio [2]

EIC Pathfinder Challenge intitolata “Carbon dioxide and nitrogen management and valorisation” con un duplice obiettivo: abbattere l’impatto ambientale e, allo stesso tempo, generare valore economico. L’idea alla base di questa sfida era quella di creare un ciclo virtuoso in cui le emissioni non siano più un problema da eliminare, ma una risorsa da gestire e valorizzare, sviluppando tecnologie energetiche efficienti, economicamente sostenibili, scalabili a livello industriale e che non richiedano l’uso di materie prime critiche. Tra le oltre 100 proposte progettuali presentate, ne sono state selezionate 8 che hanno avviato le attività a fine 2023 e costituiscono il “CO₂ and Nitrogen Portfolio” [2].

La composizione del portfolio comprende un ampio ventaglio di tecnologie, selezionate per garantire una diversificazione delle soluzioni per la cattura e la conversione di CO₂ e azoto (Fig. 1). Le soluzioni proposte spaziano dalla conversione elettrochimica per la produzione di urea (CONFETI [3] e ICONIC [4]) alla conversione bio-elettrochimica per la produzione di acetati (ECOMO [5]). Altri progetti si basano sulla conversione fotochimica per la produzione di formiato (SUPERVAL [6]) o combustibili rinnovabili di origine non biologica (DAM4CO₂ [7]) e sulla conversione termica per la produzione di carbone vegetale e gas di sintesi (MINICOR [8]). La conversio-

ne biologica è esplorata nei progetti Mi-Hy [9] e HYDROCOW [10]: il primo mirato a migliorare la crescita delle piante, il secondo dedicato alla produzione di proteine alimentari. Maggiori informazioni sulla tipologia di conversione impiegata, sulla sorgente di CO₂ e sui campi di applicazione finali sono disponibili nel documento ad accesso aperto: “Carbon dioxide and nitrogen management and valorisation portfolio: strategic plan” [11].

All’interno del portfolio, DAM4CO₂ riveste un particolare interesse per il contesto nazionale, poiché è coordinato dall’Istituto per la Tecnologia delle Membrane del Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR-ITM) e coinvolge altri enti di eccellenza del sistema della ricerca italiana, come l’Istituto di Chimica dei Composti Organometallici (CNR-ICCOM) e il Consorzio Interuniversitario Nazionale per la Scienza e Tecnologia dei Materiali (INSTM). L’unità di ricerca INSTM è costituita da diversi/e ricercatori/ricercatrici operanti presso le Università di Perugia (UniPg), di Pisa (UniPi) e di Torino (UniTo). Il consorzio, di natura fortemente multidisciplinare, include inoltre partner internazionali dell’Università Politecnica di Valencia (Spagna), delle Università di Swansea e di Edimburgo (Regno Unito), e due imprese europee: Primalchit Solutions (Spagna) e Me-Sep Sp. z o.o. (Polonia), come illustrato in Fig. 2.

Il progetto DAM4CO₂ propone una tecnologia integrata e innovativa basata sull’impiego di membrane, alimentata da fonti di energia rinnovabile, con l’obiettivo di ridurre in modo significativo le emissioni di CO₂, nei settori energetico, industriale e agricolo. Il progetto si inserisce nel quadro degli ambiziosi obiettivi fissati dal Green Deal Europeo per la neutralità climatica.

Le unità di ricerca coinvolte nel progetto stanno sviluppando una nuova tecnologia a emissioni

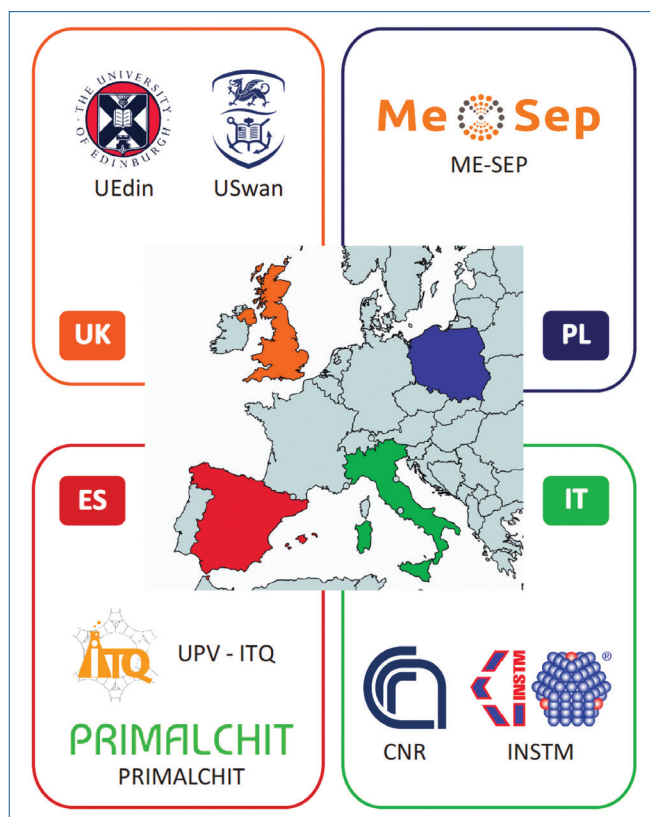


Fig. 2 - Mappa dell'Europa e provenienza dei partner coinvolti in DAM4CO₂

zero, capace di catturare la CO₂ dai gas di scarico industriali e di convertirla in prodotti ad alto valore aggiunto (Fig. 3). L'ambizioso obiettivo è quello di sviluppare una membrana bifunzionale in grado di separare selettivamente la CO₂ e simultaneamente di convertirla foto-cataliticamente in molecole C₄₊, utilizzabili come combustibili. DAM4CO₂ mira a superare i limiti delle tecnologie a membrana convenzionali, sviluppando membrane con doppia funzionalità, dotate di uno strato altamente selettivo e resistente per la separazione dei gas, e di uno strato fotocatalitico in grado di integrare in un unico processo la reazione di spostamento del Gas d'Acqua inversa (Reverse Water Gas Shift - RWGS) e la sintesi di Fischer-Tropsch (FT), necessarie per la produzione diretta di idrocarburi.

Per entrambi gli strati viene utilizzato il concetto di Membrana a Matrice Mista (MMM). Una MMM è formata da una fase continua (un polimero solubile), e da una fase dispersa (riempitivo insolubile) che combina la buona processabilità del polimero con le proprietà di trasporto e/o catalitiche della fase dispersa. Al fine di produrre le membrane bi-

funzionali, la fase continua di entrambi gli strati è costituita da polimeri solubili a microporosità intrinseca (PIM). La fase dispersa, invece, è realizzata utilizzando strutture metallo-organiche (MOF) o PIM insolubili che migliorano la capacità di cattura della CO₂, o da fotocatalizzatori mono o bifunzionali per promuovere la conversione della CO₂, attraverso le reazioni di RWGS e FT.

Un aspetto cruciale nello sviluppo di queste membrane è la compatibilità tra la fase continua e quella dispersa che consente di ottenere MMM prive di difetti, e, quindi, con prestazioni ottimali. Considerando che lo spessore dello strato selettivo in una membrana è dell'ordine del micrometro, i materiali che compongono la fase dispersa devono avere dimensioni comparabili o inferiori, al fine di evitare dei veri e propri "cortocircuiti" degli strati attivi. Parte dell'attività di ricerca è quindi dedicata anche alla modifica dei processi di sintesi dei MOF, dei PIM insolubili e dei catalizzatori, al fine di ridurre le dimensioni delle loro particelle senza però compromettere le proprietà funzionali. Un approccio alternativo consiste nella funzionalizzazione della superficie esterna dei MOF con gruppi chimici, in grado di migliorare l'affinità con i polimeri usati nella fase continua. Parallelamente, si sta lavorando anche per aumentare la sostenibilità ambientale dei materiali sintetizzati, siano essi innovativi o di letteratura. Questo implica la sostituzione di solventi organici tradizionali ad alto impatto ambientale, a favore di sintesi in soluzione acquosa, con solventi più sostenibili, o tramite processi meccanochimici, che riducono i prodotti di scarto.

Lo stesso approccio sostenibile viene applicato ai protocolli di preparazione delle membrane e dei supporti porosi. Sebbene le tecnologie a membrana siano generalmente considerate "green" e sostenibili, l'attuale produzione delle membrane è ben lungi dall'essere sostenibile, poiché prevede l'utilizzo di solventi tossici e nocivi per la lavorazione di polimeri, per la maggior parte derivati da fonti fossili. A livello industriale, si stima che ogni anno vengano prodotti oltre 50 miliardi di litri di acque reflue contaminate da solventi ad alto impatto ambientale, quali la *N,N*-dimetilformammide (DMF) e *N*-metil-2-pirrolidone (NMP), solo nel settore della produzione di membrane [13]. Pertanto, la preparazione di supporti porosi sostenibili utilizzando solventi ecologici e polimeri rinnovabili rappre-

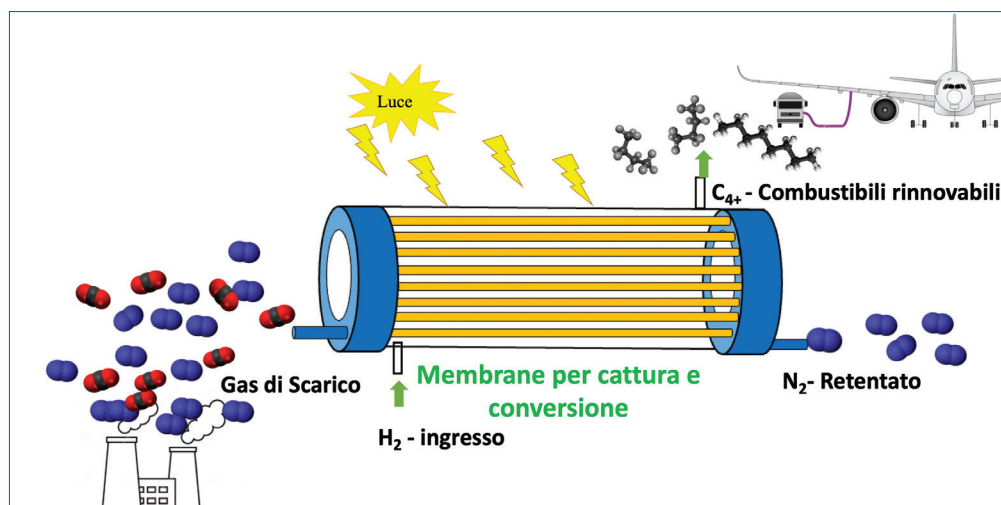


Fig. 3 - Rappresentazione schematica della membrana bifunzionale di DAM4CO₂ (GA: 101115488) [12] DAM4CO₂

senta un passo fondamentale non solo per ridurre l'impatto ambientale complessivo, ma anche per rafforzare la competitività industriale dell'Europa e dell'Italia nel settore delle membrane, non solo per la separazione dei gas, ma anche per i processi a membrana che coinvolgono liquidi.

Alla fine del progetto sarà realizzato un prototipo di laboratorio, sviluppato secondo l'approccio Progetta - Realizza - Testa - Impara (in inglese Design-Build-Test-Learn - DBTL), per la validazione del "proof-of-concept". Questo metodo prevede la realizzazione di moduli con configurazioni diverse, utili per comprendere i limiti pratici della tecnologia. Tali limiti possono comprendere, ad esempio, un'esposizione non uniforme dei fotocatalizzatori alla luce, o un'inefficiente diffusione dell'idrogeno verde, necessario per la reazione FT, all'interno del modulo, con conseguente abbassamento della selettività verso idrocarburi a catena più lunga. Limiti ingegneristici possono derivare anche da componenti apparentemente secondari, come raccordi o colle che devono resistere alle temperature e pressioni di esercizio e non reagire con i prodotti di reazione.

Il dispositivo finale di validazione su scala di laboratorio integrerà in un unico sistema sia la cattura che la conversione della CO₂, minimizzando problemi logistici e di spazio derivanti dalla messa in opera di una nuova tecnologia in impianti già esistenti. Infatti, questa nuova tecnologia integrata a membrana consentirà di compattare il processo e abbattere i costi, sia di costruzione che di esercizio,

rispetto alle tecnologie attualmente disponibili. Un altro punto chiave del progetto è l'impiego esclusivo di materie prime non critiche nella sintesi dei nuovi materiali e nella preparazione delle membrane e dei moduli. La lista delle materie prime critiche viene definita dalla Commissione Europea combinando la rilevanza economica del materiale per i settori produttivi europei e il rischio

di interruzioni nella catena di approvvigionamento nell'UE [14]. Questo significa che anche materiali abbondanti nel mondo possono diventare critici se si trovano in Paesi con cui l'UE ha rapporti instabili. Di conseguenza, il paniere di materie prime da utilizzare per la produzione dei materiali per la cattura della CO₂, ma soprattutto per la sua conversione fotocatalitica, è esiguo e rappresenta una delle principali sfide di DAM4CO₂. Un'ulteriore difficoltà consiste nel trovare il miglior compromesso tra le condizioni operative tipiche delle membrane per la cattura della CO₂, che generalmente lavora a temperature prossime a quelle ambientali, e quelle richieste dallo strato catalitico, che invece necessita di temperature più elevate. Per ottimizzare il processo e valutarne la sostenibilità economica viene condotta un'analisi tecnico-economica, che simula diversi scenari operativi, variando temperatura, pressione e proprietà della membrana. Questo studio permette di valutare l'efficienza di recupero della CO₂, il grado di conversione e la selettività verso prodotti C₄₊, tenendo conto anche di eventuali perdite di idrogeno. Infine, viene anche eseguita la valutazione del ciclo di vita (LCA) sia dei materiali sia dell'intero processo, per verificarne la reale sostenibilità ambientale e garantire che il bilancio finale delle emissioni sia neutro in termini di carbonio.

Il cambiamento climatico è una realtà attuale che richiede azioni concrete e immediate. Progetti come DAM4CO₂ dimostrano come la CO₂ possa trasformarsi da problema ambientale a risorsa

preziosa, contribuendo alla creazione di un'economia circolare e sostenibile. Attraverso l'innovazione tecnologica e la collaborazione internazionale, possiamo costruire un futuro più pulito, resiliente e giusto per le generazioni presenti e future.

BIBLIOGRAFIA

- [1] <https://climate.copernicus.eu/copernicus-2024-first-year-exceed-15degc-above-pre-industrial-level>
- [2] <https://eic.co2nitrogen.eu/about/>
- [3] <https://cordis.europa.eu/project/id/101115182>
- [4] <https://cordis.europa.eu/project/id/101115204>
- [5] <https://cordis.europa.eu/project/id/101115403>
- [6] <https://cordis.europa.eu/project/id/101115456>
- [7] <https://cordis.europa.eu/project/id/101115488>
- [8] <https://cordis.europa.eu/project/id/101115506>
- [9] <https://cordis.europa.eu/project/id/101114746>
- [10] <https://cordis.europa.eu/project/id/101115118>
- [11] <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/cad9bc52-43e-a-11ef-865a-01aa75ed71a1>
- [12] <http://www.dam4co2.eu/>
- [13] M. Razali, J.F. Kim *et al.*, *Green Chem.*, 2015, **17**, 5196.
- [14] https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/raw-materials/areas-specific-interest/critical-raw-materials_en

CO₂ from Waste to Fuel

Proper management of the carbon dioxide cycle must include both its capture and its reuse. Of great technological interest are devices capable of carrying out these two processes simultaneously. An example under development are innovative double active membranes that aim to capture and convert CO₂ in renewable fuels in a single module.



European Chemical
Societies Publishing

WILEY-VCH

The Journal for Excellence in Chemistry, Open to All

Why publish with *ChemistryEurope*?

- Fully open access for global reach and impact
- No article publication charges until June 2026
- Highest publishing standards backed by a team of academic Editors-in-Chief and expert in-house editors
- Rapid dissemination of your research through fast editorial decisions and efficient article processing



The flagship journal of the Chemistry Europe publishing association