



## LA TRANSIZIONE ENERGETICA È ANCHE MATERIALE

*La transizione energetica è spesso interpretata come un problema di fonti e di emissioni. In realtà, è anche un problema di materiali. A partire dal paradigma del nesso materiali-energia proposto da Pasquali e Mesters e sviluppato nell'ambito del Carbon Hub, questo contributo illustra il ruolo degli idrocarburi come feedstock per la produzione congiunta di idrogeno pulito e materiali carboniosi, nonché le sfide associate alla loro scalabilità industriale.*

Questo contributo illustra il paradigma del nesso materiali-energia e le sue implicazioni per la transizione energetica, proposto da Pasquali e Mesters [1] e ulteriormente sviluppato nell'ambito del Carbon Hub, nel cui campo l'autore e il suo gruppo di ricerca del Politecnico di Milano sono attivi fin dalla sua fondazione nel 2020, contribuendo alle fasi di sviluppo dell'iniziativa sin dal 2018.

### Il nesso tra materiali ed energia

Negli ultimi decenni il dibattito energetico si è concentrato quasi esclusivamente sulle fonti e sulle emissioni. Tuttavia, un aspetto altrettanto cruciale è rimasto relativamente in ombra: il legame profondo tra utilizzo di energia e produzione di materiali. Comprendere questo nesso è essenziale per delineare strategie realmente sostenibili. Questa separazione è in larga parte storica: per oltre un secolo, gli idrocarburi sono stati considerati principalmente come fonti di energia, mentre i materiali strutturali come l'acciaio e l'alluminio sono stati ottenuti da risorse minerali [1]. Oggi, tuttavia, questa distinzione appare sempre meno giustificata alla luce delle sfide climatiche e della disponibilità delle risorse.

Ogni anno l'economia globale consuma enormi quantità di idrocarburi - oltre 4 Gt di petrolio, 2,5 Gt di gas naturale e 3,4 Gt di carbone - che vengono quasi interamente convertite in

energia, generando più di 30 Gt di CO<sub>2</sub> [1, 2]. Solo una frazione marginale (circa il 3%) viene invece utilizzata per produrre materiali, come i polimeri. Parallelamente, la produzione di materiali strutturali richiede quantità ingenti di energia: circa il 12% dell'energia globale è impiegato per estrarre e processare metalli (Fig. 1) [3]. Questo processo è intrinsecamente inefficiente. Infatti, i metalli sono ottenuti da minerali a bassa concentrazione e in forma ossidata, e devono essere ridotti utilizzando carbonio, con ulteriori emissioni di CO<sub>2</sub>, pari a diverse gigatonnellate all'anno (Fig. 2) corrispondenti a quasi al 10% delle emissioni totali per anno. Anche la produzione di materiali non metallici presenta impatti rilevanti. Il cemento, ad esempio, comporta emissioni dell'ordine di 0,6-0,9 t CO<sub>2</sub> per tonnellata prodotta e contribuisce per circa 2-3 Gt CO<sub>2</sub> all'anno, pari a una quota significativa delle emissioni globali.

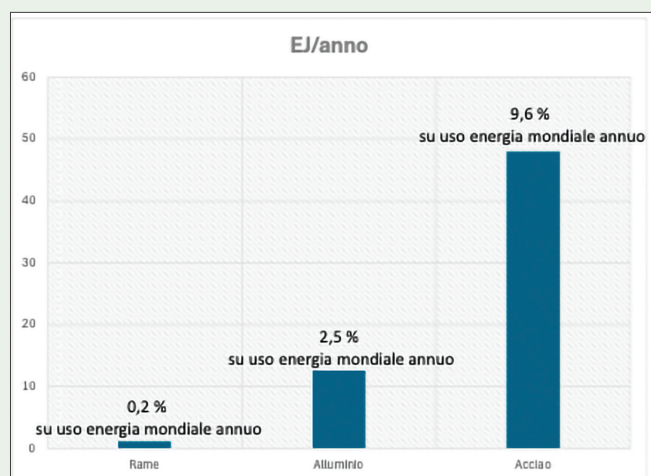


Fig. 1 - Energia annua richiesta e % sulla richiesta mondiale di energia per anno (~500 EJ) associate ai processi per la produzione di rame, alluminio e acciaio

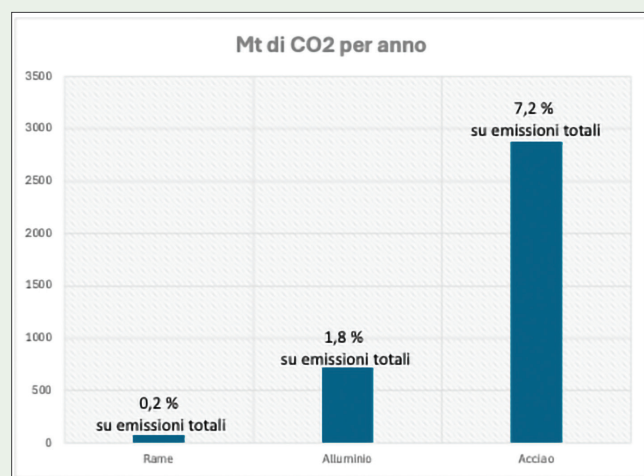


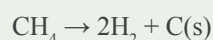
Fig. 2 - Emissioni di CO<sub>2</sub> all'anno e % sulle emissioni totali associate ai processi per la produzione di rame, alluminio e acciaio

Questa inefficienza deriva anche dalla natura stessa delle risorse: mentre gli idrocarburi sono disponibili in forma concentrata e chimicamente ridotta, i metalli devono essere estratti da minerali diluiti e ossidati, con elevati costi energetici e ambientali. Ne emerge un paradosso evidente: da un lato, gli idrocarburi vengono bruciati generando emissioni; dall'altro, si consumano grandi quantità di energia, destinate ad aumentare, per produrre materiali che potrebbero, almeno in parte, essere ottenuti proprio a partire da quegli stessi idrocarburi [1].

Questo quadro è destinato ad accentuarsi. La crescente elettrificazione dei processi industriali e degli usi finali, dai trasporti alla distribuzione di energia, comporta infatti un aumento significativo della domanda di materiali critici e strategici per le tecnologie elettriche, tra cui metalli conduttori, materiali per batterie e componenti funzionali per reti e sistemi energetici. Senza un cambiamento nei paradigmi produttivi, questo incremento rischia di tradursi in ulteriori emissioni di CO<sub>2</sub> associate alla produzione dei materiali stessi.

### Un cambio di paradigma

Questo scenario suggerisce un cambio di prospettiva: utilizzare gli idrocarburi non solo come fonte di energia, ma anche come materia prima per materiali avanzati. Un esempio emblematico è la pirolisi del metano, che consente di separarlo nei suoi elementi costitutivi producendo idrogeno e carbonio solido senza emissioni dirette di CO<sub>2</sub>:



Questo approccio consente di valorizzare contemporaneamente entrambe le componenti del metano: l'idrogeno come vettore energetico e il carbonio come materiale. Dal punto di vista energetico, il processo è particolarmente interessante: a fronte di un modesto input energetico per la reazione, si ottiene idrogeno con elevato contenuto energetico, rendendo il bilancio complessivo favorevole. Inoltre, rispetto ad altre vie di produzione dell'idrogeno, la pirolisi può richiedere quantità significativamente inferiori di energia rinnovabile. Tuttavia, proprio questa co-produzione introduce una sfida cruciale: per ogni tonnellata di idrogeno si generano circa tre tonnellate di carbonio. Su scala energetica, la produzione di idrogeno in quantità rilevanti implicherebbe la generazione di centinaia di milioni di tonnellate di carbonio solido [1]. Su scala energetica, questa relazione assume dimensioni rilevanti: la produzione di 1 EJ di idrogeno (1 EJ = 10<sup>18</sup> J) - pari a circa l'1% del consumo energetico annuo degli Stati Uniti - comporterebbe la co-generazione di oltre 20 Mt di carbonio solido, una quantità già superiore all'attuale mercato globale delle principali forme di carbonio. Su scala tipica dei

sistemi energetici, dell'ordine di decine di EJ all'anno, ciò implicherebbe la necessità di valorizzare centinaia di milioni di tonnellate di carbonio. Attualmente, solo sistemi materiali caratterizzati da volumi comparabili - come i metalli (in particolare l'acciaio) e i materiali da costruzione (cemento e calcestruzzo) - sono in grado di assorbire quantità di questa entità [3]. Pertanto, senza un utilizzo su larga scala di questo carbonio, il modello non è sostenibile né economicamente né industrialmente.

### Il ruolo dei nuovi materiali

Storicamente, le forme tradizionali di carbonio (come carbon black e coke) hanno trovato applicazioni limitate e, in molti casi, vengono nuovamente ossidate a CO<sub>2</sub>, riducendo il beneficio ambientale complessivo. Il mercato globale dei materiali carboniosi convenzionali è infatti troppo piccolo per assorbire i volumi richiesti da una produzione energetica basata sulla pirolisi. La vera discontinuità tecnologica è rappresentata dall'emergere dei materiali carboniosi nanostrutturati, come nanotubi di carbonio e grafene. A differenza delle forme tradizionali, questi materiali presentano proprietà strutturali e funzionali che consentono il loro impiego come materiali ingegneristici di larga scala [1].

Questi materiali combinano leggerezza, resistenza meccanica e conducibilità elettrica e termica, rendendoli potenziali sostituti di metalli come acciaio, alluminio e rame. In prospettiva, potrebbero essere utilizzati in applicazioni ad alto volume - dai trasporti alle infrastrutture, fino ai sistemi energetici - contribuendo a ridurre sia il consumo energetico sia le emissioni associate alla produzione di materiali. Tuttavia, il passaggio da materiali di nicchia a materiali di massa richiede molto più di un avanzamento scientifico: implica lo sviluppo di processi efficienti, la standardizzazione dei materiali e, soprattutto, la costruzione di intere catene del valore industriale. Questo aspetto è spesso sottovalutato, ma rappresenta uno dei principali colli di bottiglia per l'adozione su larga scala.

### La scala del problema e i limiti industriali

Se l'intervenire sul paradigma materiali-energia appare promettente dal punto di vista concettuale, la sua realizzazione su scala industriale pone sfide di grande rilevanza.

Il primo elemento critico è la scala. Senza applicazioni in grado di utilizzare grandi volumi di carbonio, il modello basato sulla co-produzione di idrogeno e materiali rischia di non essere economicamente sostenibile. Le applicazioni attuali dei materiali carboniosi avanzati, infatti, sono ancora limitate a nicchie ad alto valore aggiunto, con volumi molto inferiori rispetto a quelli richiesti da un sistema energetico.

Un secondo elemento riguarda i costi e la maturità tecnologica-

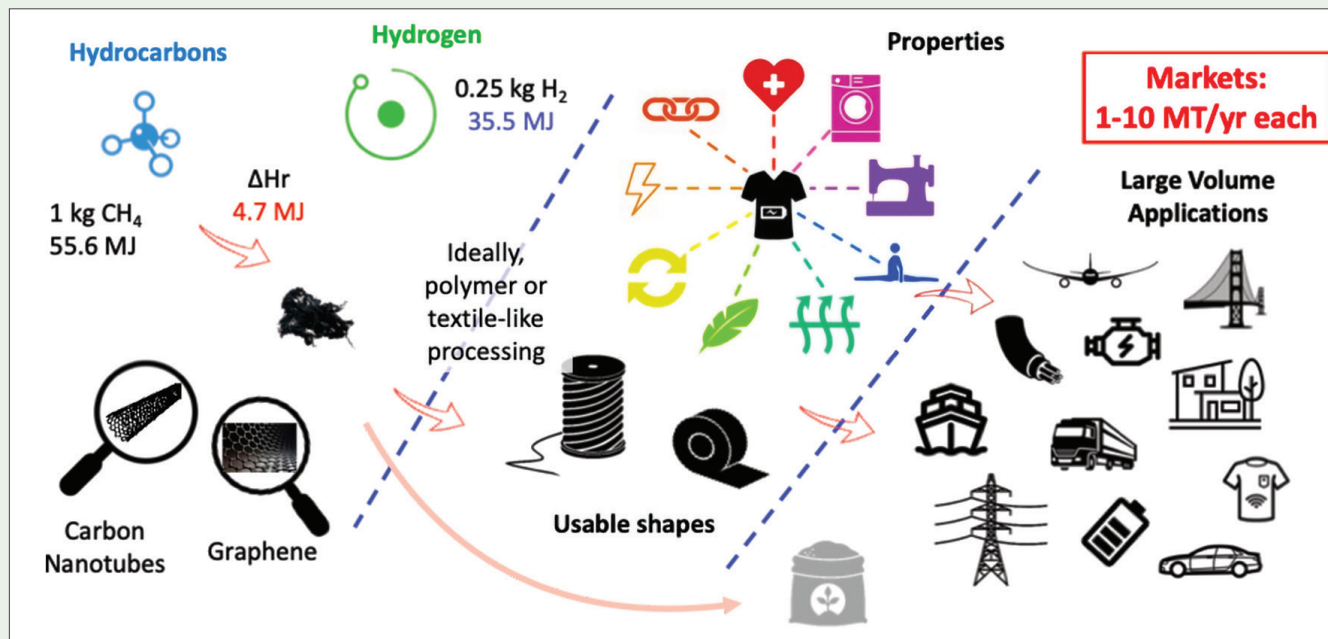


Fig. 3 - Schema del percorso di valorizzazione degli idrocarburi nella visione del Carbon-Hub: produzione congiunta di idrogeno e materiali carboniosi e loro integrazione in applicazioni su larga scala. Figura adattata e rielaborata da Pasquali e Mesters [1]

ca. I materiali carboniosi nanostrutturati, come i nanotubi di carbonio, presentano oggi costi significativamente superiori rispetto ai materiali tradizionali, riflettendo processi produttivi ancora poco efficienti e difficilmente scalabili. La transizione verso applicazioni di massa richiederà non solo miglioramenti nei processi di sintesi, ma anche innovazioni nella trasformazione dei materiali e nella loro integrazione nei prodotti finali. Infine, un limite spesso sottovalutato è rappresentato dalla necessità di sviluppare intere catene del valore. La produzione di nuovi materiali non può essere considerata isolatamente: è necessario coordinare la sintesi, la lavorazione, la standardizzazione e l'applicazione finale. Questo implica la creazione di nuove infrastrutture industriali, competenze e modelli di business, con tempi e investimenti comparabili a quelli che storicamente hanno accompagnato l'introduzione di materiali come l'acciaio o i polimeri. Queste considerazioni evidenziano come il passaggio da una visione promettente a una realtà industriale richieda un approccio sistemico, capace di integrare sviluppo tecnologico, analisi economica e costruzione di mercati.

### Dalla visione alla filiera: l'esempio del Carbon Hub

È proprio su questo punto che emergono iniziative sistemiche come il Carbon Hub, un consorzio internazionale con sede presso la Rice University, che riunisce università, industria e istituzioni con l'obiettivo di ripensare il ruolo degli idrocarburi: non più semplicemente come combustibili, ma come materia prima per la produzione congiunta di idrogeno e materiali carboniosi avanzati [4, 5].

L'approccio è significativo perché affronta il problema in modo esplicitamente sistemico: lo sviluppo di nuovi materiali richiede la costruzione di intere filiere, dalla produzione alla trasformazione fino all'applicazione industriale. In questa prospettiva, la decarbonizzazione non passa solo dalla sostituzione delle fonti energetiche, ma anche dalla trasformazione dei cicli materiali e delle catene del valore. Il Carbon Hub si propone quindi di integrare ricerca, sviluppo e applicazione lungo tutta la filiera, coinvolgendo attori diversi e coordinando lo sviluppo tecnologico con le esigenze industriali e di mercato.

A questa iniziativa partecipano anche istituzioni accademiche italiane, tra cui il Politecnico di Milano (in particolare, il gruppo dell'autore, insieme ai collaboratori Mauro Bracconi e Matteo Pelucchi), impegnato nello sviluppo di modelli e processi per la conversione degli idrocarburi attraverso approcci di modellazione multiscale, dalla cinetica di reazione fino alla progettazione di reattori e alla descrizione dettagliata dei processi di sintesi e trasformazione dei materiali carboniosi. Il contributo italiano al Carbon Hub si estende inoltre ad altri gruppi di ricerca: Gianni Royer Carfagni dell'Università di Parma studia la meccanica delle strutture in fibre di nanotubi di carbonio su un ampio spettro di scale dimensionali, dalle fibre singole fino a strutture di grande scala; Maria Anna Murmura e Maria Cristina Annellini dell'Università di Roma "La Sapienza" si occupano della formazione di impurità carboniose durante la sintesi dei CNT; mentre Valerio Cozzani e Alessandro Dal Pozzo dell'Università di Bologna analizzano gli aspetti di ciclo di vita e le valutazioni tecnico-economiche dei processi di sintesi e delle applicazioni. In questo quadro, è inoltre rilevante il contributo di una real-



tà industriale italiana attiva nel Carbon Hub, come Prysmian, che rappresenta un esempio concreto di come la decarbonizzazione delle filiere dei materiali conduttivi possa beneficiare dell'introduzione di nuovi materiali carboniosi. In particolare, i nanotubi di carbonio offrono prospettive interessanti come alternativa ad alte prestazioni ai metalli convenzionali, con un potenziale ridotto impatto emissivo. In questo contesto, l'Italia - forte di una consolidata competenza nella manifattura avanzata e nell'innovazione di prodotto - può giocare un ruolo strategico nei segmenti a valle della filiera, dove l'integrazione dei nuovi materiali in soluzioni tecnologiche complesse determina il valore industriale e competitivo. In questa visione, l'idrogeno rappresenta il vettore energetico, mentre il carbonio solido diventa una risorsa materiale strategica, capace di sostituire materiali ad alta intensità energetica. Il risultato è un potenziale doppio beneficio: riduzione delle emissioni da un lato e creazione di nuovi sistemi materiali dall'altro.

### **Verso una nuova integrazione tra energia e materiali**

Il nesso tra materiali ed energia suggerisce che la transizione energetica non può essere affrontata esclusivamente sul

lato della produzione energetica [1]. È necessario ripensare anche il modo in cui produciamo e utilizziamo i materiali. In questa prospettiva, gli idrocarburi potrebbero evolvere da combustibili a risorse per una nuova generazione di materiali avanzati, contribuendo contemporaneamente alla produzione di energia pulita. La sfida non è solo tecnologica, ma sistemica: richiede l'integrazione di ricerca, industria e politiche per costruire nuove catene del valore su scala globale. In assenza di questa integrazione, la transizione energetica rischia di spostare il problema delle emissioni, più che risolverlo.

### **BIBLIOGRAFIA**

- [1] M. Pasquali, C. Mesters, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 2021, **118**, e2112089118.
- [2] International Energy Agency (IEA), *Global Energy Review*, 2023.
- [3] M.F. Ashby, *Materials and the Environment*, 2<sup>nd</sup> Ed., Butterworth-Heinemann, 2013.
- [4] M. Pasquali, *Carbon Hub: A Universal New Blue Deal*, Rice University, 2019.
- [5] Carbon-Hub, <https://carbonhub.rice.edu>

**NUOVA  
ENERGIA PER LA  
TUA AZIENDA**

**AGICOM** S.r.l.

CONCESSIONARIA DI PUBBLICITÀ PER QUESTA RIVISTA  
[www.agicom.it](http://www.agicom.it)