AIRI - ASSOCIAZIONE ITALIANA PER LA RICERCA INDUSTRIALE

LE INNOVAZIONI DEL PROSSIMO FUTURO

XI EDIZIONE 2025

CHIMICA E MATERIALI



Airi
ASSOCIAZIONE ITALIANA PER LA RICERCA INDUSTRIALE
50 1974-2024

AGRA

AIRI - ASSOCIAZIONE ITALIANA PER LA RICERCA INDUSTRIALE

Airi – Associazione Italiana per la Ricerca Industriale, rappresenta da 50 anni un punto di riferimento per il sistema italiano della ricerca industriale.

Dal 1974 opera come associazione senza scopo di lucro con l'obiettivo di sostenere la ricerca, l'innovazione, lo sviluppo tecnologico e il relativo trasferimento di conoscenze e promuove un'innovazione che contemperi il valore economico, il valore ambientale e quello sociale.

Rappresenta e supporta un'ampia rete di soci tra Industrie, PMI, Enti di ricerca pubblici, Università, Organismi di ricerca e Società di consulenza, permettendo lo scambio di esperienze e di buone prassi nella ricerca industriale.

Questa significativa rappresentatività fa di Airi opinion leader e interlocutore autorevole per gli orientamenti tecnologici nelle politiche della ricerca, per l'adeguata gestione e attuazione del sostegno pubblico, e più in generale per la più ampia diffusione della cultura della ricerca industriale italiana.

www.airi.it

LE INNOVAZIONI DEL PROSSIMO FUTURO

XI EDIZIONE

UNA PUBBLICAZIONE DEL GRUPPO DI LAVORO AIRI TECNOLOGIE PRIORITARIE

CHIMICA E MATERIALI

PARTE 1: PROFILO DI SETTORE
PARTE 2: SCENARI TECNOLOGICI

AIRI - ASSOCIAZIONE ITALIANA PER LA RICERCA INDUSTRIALE

LE INNOVAZIONI DEL PROSSIMO FUTURO
XI edizione Settore: Chimica e Materiali

ISBN 978-88-98935-73-4
copyright © 2025 Airi
Associazione Italiana per la Ricerca Industriale
viale Aventino, 102 00153 Roma tel +39 068848831 e-mail info@airi.it www.airi.it

finito di stampare
nel mese di maggio 2025
Realizzazione editoriale
Airi
progetto grafico
Goodlab srl (www.goodlab.it)

Edizioni:
Agra Editrice srl, Roma (www.agraeditrice.it)

Disponibile in versione online su
www.airi.it

Attribuzione-Non Commerciale-Non Opere Derivate 4.0
https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/

indice - profilo di settore

PREFAZIONE 9

INTRODUZIONE 11

MEMBRI DEL GRUPPO DI LAVORO profilo di settore 17

MEMBRI DEL GRUPPO DI LAVORO scenari tecnologici 19

L'INDUSTRIA CHIMICA 23

RUOLO E CARATTERISTICHE DELL'INDUSTRIA CHIMICA IN ITALIA 27

RICERCA E SVILUPPO SEMPRE PIÙ ORIENTATI ALLA TRANSIZIONE ECOLOGICA 31

FATTORI DI COMPETITIVITÀ E SISTEMA PAESE 35

GLI SCENARI TECNOLOGICI 37

indice - scenari tecnologici

EFFICIENTAMENTO E SOSTENIBILITÀ DEI PROCESSI 47

PROCESSI ELETTROCHIMICI PER LA SINTESI DI PRODOTTI CHIMICI DI BASE 49

SINTESI DI NUOVI SOSTITUENTI RINNOVABILI DEL BISFENOLO A PER DIVERSI SETTORI APPLICATIVI 59

CATALIZZATORI PER L'ABBATTIMENTO DI PROTOSSIDO D'AZOTO (N_2O) 65

VALORIZZAZIONE DELLA CO_2 A CHEMICAL E FUELS 73

EFFICIENTAMENTO E SOSTENIBILITÀ DI MATERIALI E PRODOTTI 81

MATERIALI INNOVATIVI PER I SISTEMI DI ACCUMULO DI ENERGIA 83

FUNZIONALIZZAZIONE CHIMICA DI SMART SENSORS PER IL RILEVAMENTO SELETTIVO 95

MATERIALI "ECO-FRIENDLY" PER PALE EOLICHE: VITRIMERI E ALTRE RESINE TERMO-RESPONSIVE 109

MATERIALI SECONDARI E NUOVI ADDITIVI PER CALCESTRUZZO 117

CIRCOLARITÀ E RICICLABILITÀ DI PROCESSI E PRODOTTI 125

RICICLO CHIMICO DELLE PLASTICHE 127

TECNOLOGIE E MATERIALI PER LA CIRCOLARITÀ E IL RIUSO DI MANUFATTI MULTIMATERIALE, INCLUSI GLI PNEUMATICI 139

TECNOLOGIE PER INTRODURRE BIOPOLIMERI IN PNEUMATICI HIGH PERFORMANCE 147

ADDITIVI FUNZIONALI PER SOLUZIONI SOSTENIBILI 153

SVILUPPO DI PACKAGING COMPOSTABILI/RICICLABILI FUNZIONALIZZATI CON PRINCIPI ATTIVI DERIVANTI DA BIOMASSE DI SCARTO 161

UPCYCLING DEL SILVERSKIN, IL RESIDUO DELLA TORREFAZIONE DEL CAFFÈ 173

Prefazione

Da oltre venticinque anni, Airi coinvolge manager e ricercatori provenienti da alcune delle principali imprese, centri di ricerca e università, italiane per identificare e analizzare quali siano le tecnologie ad alto impatto socioeconomico destinate a trasformare il sistema industriale.
Giunto alla XI edizione, il Rapporto Airi Le Innovazioni del Prossimo Futuro è uno studio di technology assessment e foresight unico a livello nazionale. E un quadro aggiornato degli scenari tecnologici che contribuiranno, nel breve-medio periodo e in maniera trasversale e abilitante, all'innovazione nei principali settori produttivi.
Dieci settori e oltre 130 scenari tecnologici che fotografano la ricerca industriale italiana, che da sempre ha una significativa propensione all'esportazione nel mondo della tecnologia.
Il presente volume monografico è dedicato al settore della chimica e materiali

La tecnologia è oggi un fattore determinante per la competitività del sistema Paese. L'impegno e gli investimenti in Ricerca e Innovazione aiutano le imprese a adattarsi alle rapide dinamiche del contesto socioeconomico e ai mutamenti della domanda. Oggi più che mai, la tecnologia è il fulcro della competitività del sistema Paese, condizionando in modo decisivo le traiettorie di crescita, innovazione e autonomia strategica. Le scelte di oggi determineranno la posizione del sistema Paese nelle diverse catene del valore globali per i prossimi anni, se saremo in grado di presidiare le nostre nicchie e posizioni da leader o se ci riserva un futuro da follower.

Lo studio si propone come una guida per i decision-maker di istituzioni, industrie e investitori, con l'obiettivo di anticipare e comprendere l'evoluzione del futuro tecnologico e i suoi impatti più rilevanti sulla società.

Nel corso degli anni, le analisi condotte da Airi hanno identificato in anticipo numerose tecnologie, oggi ritenute ad alto impatto e abilitanti per l'innovazione. Si ricordano ad esempio gli impieghi avanzati delle biomasse per uso industriale ed energetico, le tecnologie di riciclo delle materie prime, automazione e tecnologie digitali per il monitoraggio ambientale e l'efficienza energetica, le tecnologie di conversione e

valorizzazione della CO2, già presenti a partire dal 2012 e che si ritrovano anche in questa edizione, in forma più avanzata e diversificata.
L'obiettivo del nostro lavoro è stimolare una riflessione puntuale sulle priorità, le risorse, gli strumenti più opportuni per promuovere uno sviluppo sostenibile a livello sociale, ambientale ed economico. Per un futuro tecnologico promettente è necessario lavorare insieme – istituzioni, imprese e ricerca pubblica – per comprendere e condividere gli asset e le risorse su cui investire. Aggiungo che gli scenari descritti nei volumi hanno anche un significativo valore per le Istituzioni educative come materiali di orientamento e di formazione nell'istruzione tecnico scientifica.

Un sentito ringraziamento ai coordinatori di settore, ai numerosi esperti, ai soci e non soci, e allo staff Airi, che hanno generosamente messo a disposizione il loro tempo e le loro competenze. Senza il loro contributo, la loro competenza e le loro visioni, la realizzazione di questo studio non sarebbe stata possibile.

Tutti nutrono la speranza che questo sforzo possa essere utile ai Programmi operativi e alle prossime Strategie europee, e possa essere utile indicazione per le Istituzioni di ricerca che devono programmare linee di ricerca coerenti con le future sfide della nuova industria.
È un contributo collaborativo alla cultura industriale del Paese che ci rende particolarmente orgogliosi.

Andrea Bairati, Presidente Airi

Introduzione

Il Rapporto «Le Innovazioni del prossimo futuro», giunto all'undicesima edizione, riporta a cadenza regolare dal 1995 le previsioni tecnologiche che Airi elabora grazie al contributo delle imprese, degli enti di ricerca, delle istituzioni finanziare associati, in collaborazione con qualificati partner pubblici e privati. È uno studio di *technology assessment* e di f*oresight* che svolge un'analisi di tecnologie e famiglie di tecnologie ad alto impatto socioeconomico su dieci settori produttivi di rilievo per l'economia nazionale. L'analisi di tipo verticale (per settore) viene poi integrata da una valutazione complessiva (orizzontale) delle sinergie, convergenze e trasversalità delle tecnologie selezionate lungo tutti i settori produttivi.

Come nella precedente edizione, pur mantenendo la tradizionale impostazione per settori produttivi, abbiamo diviso il rapporto in due parti: nella prima analizziamo la posizione della ricerca industriale italiana rispetto alla competitività globale e la relazione tra sviluppo tecnologico e sostenibilità; nella seconda illustriamo le azioni e gli investimenti che il nostro sistema industriale sta definendo, anche in collaborazione con gli attori più significativi della ricerca pubblica.

I settori che analizziamo in questa edizione sono dieci: Ambiente e transizione circolare, Costruzioni, Chimica e Materiali, Energia e Decarbonizzazione, Farmaceutica, Meccatronica, Microelettronica e semiconduttori, Tecnologie Digitali, Trasporti e Mobilita, Spazio.

Per ogni settore, sono riportati il quadro o profilo generale che lo caratterizza (imprese, mercato, occupazione, tendenze e criticità, impatti socioeconomici, investimenti in R&S) e gli scenari tecnologici (descrizione, motivazioni per lo sviluppo, stato dell'arte, risorse economiche necessarie) sui quali il sistema della ricerca industriale italiana intende concentrare risorse economiche e intellettuali nel breve-medio periodo.

La definizione di tecnologie prioritarie

Le tecnologie prioritarie sono definite come tecnologie ad alto impatto socioeconomico per il tessuto imprenditoriale e l'economia nazionale. Sono tecnologie abilitanti e sistemiche su catene del valore legate a uno o più settori produttivi, caratterizzate da un rilevante impatto rispetto a una o più delle seguenti dimensioni: industriale (investimenti, capacità abilitante), politico ed economico (es. competitività,

lavoro, politiche di investimento), sostenibilità etico, sociale e ambientale, implicazioni legali (es. necessità o capacità di rispondere a sfide e driver normativi).

I criteri di selezione

Abbiamo individuato oltre 130 tecnologie su dieci settori produttivi analizzati , quasi sempre presentate e raggruppate in scenari tecnologici che fungono da famiglia di riferimento o cluster, attraverso i seguenti criteri:

- Impatto politico ed economico
- Impatto industriale
- Innovatività e time to market
- Impatto etico, legale, sociale e ambientale

Il nostro obiettivo è stato di identificare tecnologie e famiglie di tecnologie con un carattere abilitante per una o più catene del valore e sistemi dell'innovazione. L'orizzonte applicativo o di lancio della ricerca che mette a punto la tecnologia è nel breve medio termine (indicativamente 1 -3 anni, anche a seconda delle caratteristiche del settore), pur non trascurando eventuali tecnologie dirompenti con un ciclo di sviluppo più lungo.

Le tecnologie individuate nelle precedenti edizioni sono state utilizzate come uno dei riferimenti iniziali dello studio, riconoscendo il valore che hanno i dati storici nella validità e affidabilità degli studi *foresight* (la presenza di un ambito tecnologico nel corso di più edizioni dello studio, nelle sue diverse declinazioni e livelli di sviluppo, ne conferma l'importanza).

A chi è rivolto lo studio?

La pubblicazione è rivolta a direttori e manager della ricerca pubblici e privati, ricercatori, istituzioni, investitori, *opinion leader*. Il nostro obiettivo è fornire una guida per le strategie e gli investimenti privati e pubblici in ricerca e innovazione e stimolare una riflessione sulle priorità, le risorse, gli strumenti più opportuni per promuovere uno sviluppo sostenibile a livello sociale, ambientale ed economico.

La metodologia

Lo studio è realizzato mediante l'impegno diretto di esperti della rete Airi, soci e non soci, che nel loro insieme hanno competenze approfondite e riconosciute in relazione

sia ai settori produttivi sia alle diverse tecnologie trattate.
Le attività iniziano con la scelta dei coordinatori dello studio, indicativamente due per settore, nominati in accordo con il Consiglio Direttivo di Airi. Viene costituito quindi il Board dei coordinatori settoriali, che rappresenta il primo nucleo del Gruppo di Lavoro (GdL) Tecnologie Prioritarie. Il coordinamento del GdL è a cura di Airi.
Prima fase: Gruppo di Lavoro e selezione delle tecnologie
Il Gruppo di Lavoro, composto inizialmente dai coordinatori, svolge una prima analisi delle tecnologie da trattare. Vengono considerate diverse fonti, quali piani strategici di sviluppo a livello industriale e politiche per la ricerca e innovazione europee e nazionali. Come dato storico si utilizza il catalogo delle tecnologie trattate nell'edizione precedente (2020). Il coinvolgimento della compagine associativa permette di raccogliere suggerimenti per definire il nuovo catalogo delle tecnologie e gli esperti da coinvolgere.
Vengono riviste le definizioni, la struttura, i modelli da utilizzare per lo svolgimento dello studio.
I risultati della prima fase sono un primo catalogo di tecnologie suddivise per settore, un elenco di esperti collegati a tali tecnologie e settori, delle linee guida condivise per la preparazione dello studio.
Seconda fase: Elaborazione dei profili di settore e degli scenari tecnologici.
I lavori vengono svolti principalmente a livello settoriale. Sulla base del catalogo di tecnologie selezionate nella prima fase, coordinatori ed esperti di ciascun settore si incontrano ed elaborano una versione sintetica degli scenari tecnologici. Il Board dei coordinatori supervisiona regolarmente il programma di attività e fornisce eventuali suggerimenti sulle scelte prese a livello settoriale. Il processo è iterativo, durante l'analisi è possibile rivedere, eliminare o aggiungere tecnologie ed includere, ove necessario, altri esperti.
Il risultato della seconda fase è una prima versione del profilo di settore e degli scenari tecnologici.
Terza fase: Revisione ed integrazione
Il GdL svolge un'attività di revisione complessiva dal punto di vista sia tecnico-

scientifico sia editoriale. L'obiettivo è di arricchire ed integrare i singoli scenari e valutare sovrapposizioni e sinergie tra i diversi settori. Si cerca inoltre, per quanto possibile data la diversità dei temi affrontati e le diverse esigenze settoriali in termini di granularità e di tempi, di dare uniformità al lavoro nel suo complesso.

Il profilo di settore e gli scenari tecnologici vengono rivisti e finalizzati. Il risultato sono le bozze finali del lavoro. Viene infine svolta una revisione editoriale dei singoli capitoli e preparato l'impaginato finale.

Il processo sopra riportato è indicativo e alcune fasi del lavoro sono svolte in parallelo. I lavori di preparazione dell'intero volume, comprensivo dei dieci settori produttivi, si svolgono in un periodo di circa due anni.

Questa edizione dello studio Airi ha coinvolto oltre 180 esperti, tra coordinatori e membri dei gruppi di lavoro settoriali, che sono riportati nelle prime pagine dei capitoli relativi a ciascuno dei diversi settori.

Per la presente edizione, si è scelto di pubblicare in anteprima alcuni dei settori nella forma di volume monografico.

Le limitazioni dello studio

Il lavoro è il risultato delle competenze e della visione di Airi e degli esperti coinvolti nello studio, che determina la tipologia e ampiezza degli ambiti trattati, tra cui in particolare la scelta dei settori e degli scenari tecnologici.

A titolo di esempio, in questa edizione non viene trattato in maniera approfondita il settore agroalimentare (se non come ricaduta di alcune tecnologie settoriali), che invece è di evidente rilievo per l'economia nazionale.

L'approfondimento dei temi trattati è limitato dalla necessità di contenere sia la lunghezza sia l'impegno richiesti dallo studio, anche considerata la partecipazione a carattere volontario di tutti gli esperti coinvolti.

Sono utilizzati dati provenienti da un numero selezionato e limitato di fonti bibliografiche, sia pubbliche sia provenienti da dati interni delle aziende e centri di ricerca coinvolti, che coprono l'intero spettro dei settori selezionati ma che non si possono considerare esaustive.

I contenuti e le opinioni espresse sui possibili scenari di sviluppo tecnologico per il

sistema paese rimangono un esercizio di analisi, deduzione e previsione, come tale soggetto a variabilità ed imprecisioni.

I contenuti

Lo studio analizza una parte rilevante del portafoglio tecnologico del sistema paese. Per ogni settore, viene riportato il quadro o profilo generale che lo caratterizza (imprese, mercato, occupazione, tendenze e criticità, impatti socioeconomici, investimenti in R&S) e gli scenari tecnologici (descrizione, motivazioni per lo sviluppo, stato dell'arte, risorse economiche necessarie) sulle quali il sistema della ricerca industriale italiana intende concentrare risorse economiche ed intellettuali nel breve-medio periodo.

È prevista la pubblicazione delle analisi dei dieci settori sia in forma integrale in due volumi (volume 1, profilo di settore; volume 2, scenari tecnologici), sia in pubblicazioni monografiche (per settore).

Il presente volume rappresenta la pubblicazione settoriale dello studio relativa al settore Chimica e materiali.

CHIMICA E MATERIALI

PROFILO DI SETTORE

MEMBRI DEL GRUPPO DI LAVORO

COORDINATORI

FAST - Federazione delle Associazioni Scientifiche e Tecniche e CNR SCITEC	**Rinaldo Psaro**

ESPERTI

FEDERCHIMICA	**Juliette Vitaloni**

CHIMICA E MATERIALI

SCENARI TECNOLOGICI

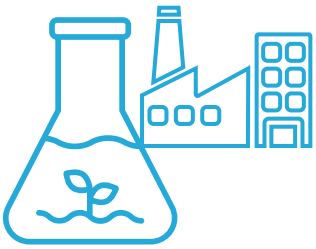
MEMBRI DEL GRUPPO DI LAVORO

COORDINATORI

FAST - Federazione delle Associazioni Scientifiche e Tecniche e CNR SCITEC	**Rinaldo Psaro**

ESPERTI

ARCHA	**Francesca Gambineri, Massimiliano Franceschi**
CLARIANT PRODOTTI (ITALIA) SPA	**Corrado Colombo, Alberto Cremona**
CNR ISSMC	**Alessandra Sanson**
CNR SCITEC	**Nicoletta Ravasio**
ENI SPA	**Paolo Pollesel, Giuseppe Sabetta, Alessandra Tacca, Michele Tomaselli**
INNOVHUB SSI	**Angelo Lunghi, Pierangela Rovellini**
MAPEI S.P.A.	**Giorgio Ferrari**
PIRELLI S.P.A	**Luca Giannini, Luciano Tadiello, Francesco Parazzoli**
POLITECNICO MILANO	**Luca Lietti**
POLITECNICO TORINO	**Federico Bella**
UNIVERSITÀ DI PISA	**Anna Maria Raspolli Galletti**
VERSALIS S.P.A.	**Nicola Vecchini**



SETTORE

CHIMICA E MATERIALI

PROFILO DI SETTORE

L'INDUSTRIA CHIMICA

L'industria chimica rappresenta un settore essenziale e strategico per lo sviluppo e la transizione ecologica. Il 95% dei beni manufatti incorpora componenti chimici, che si tratti di beni di uso quotidiano o abilitanti per la transizione ecologica, quali pale eoliche, pannelli solari e batterie per la mobilità sostenibile. A livello nazionale, il settore chimico rappresenta il quinto per fatturato e, a livello europeo, quella italiana è la terza industria chimica per valore della produzione (oltre 67 miliardi) e numero di addetti (oltre 113 mila)[1].

Si tratta di un settore che vede le proprie imprese pienamente inserite all'interno delle catene globali del valore. Il 61% della produzione domestica viene, infatti, realizzato da imprese multinazionali a capitale sia nazionale che estero, accomunate da un elevato grado di specializzazione in funzione dei fattori di competitività locali e da una forte proiezione verso l'export.



Figura 1: Saldo commerciale della chimica (elaborazione Federchimica)

Grazie all'elevata qualificazione delle risorse umane, le retribuzioni nel settore risultano del 38% superiori alla media nazionale in presenza, e negli anni recenti si è registrata una crescita di occupati under-35 decisamente più sostenuta rispetto alla media industriale (19% versus 8% nel 2015-2022)[2]. Le imprese chimiche in Italia sono consapevoli che la ricerca rivesta un ruolo fondamentale, sia in prospettiva di sostegno alla competitività sia per poter affrontare con successo la

[1] *Elaborazione su dati Istat (2021, ultimo anno disponibile), Eurostat e Cefic Chemdata International.*

[2] *Dato sulle retribuzioni da fonte Istat mentre quello sull'occupazione under-35 da INPS.*

sfida della transizione ecologica. Gli ambiziosi obiettivi del Green Deal Europeo richiederanno ingenti investimenti: in base alle stime di The European House Ambrosetti[3], la transizione ecologica dell'industria chimica in Italia richiederà quasi 20 miliardi di investimenti aggiuntivi entro il 2050 (il 40% in più rispetto alla media del periodo 2016-2020) e, considerando anche i costi operativi, si superano i 30 miliardi.

Secondo Eurostat, nell'ultimo decennio il personale dedicato alla R&S ha mostrato un tasso di crescita del 76%, arrivando a superare le 8.600 persone con una quota sull'occupazione dell'8%, sostanzialmente in linea con la media settoriale europea. Nel contempo, la chimica è il settore industriale che presenta, in Italia, la quota più elevata di imprese (59%) che hanno investito in prodotti a maggior risparmio energetico e in tecnologie per la sostenibilità ambientale (anni 2018-2022)[4]. Il settore chimico è anche uno di quei comparti che ha già conseguito rilevanti conversioni ecologiche dei propri processi produttivi e riduzione dei rispettivi impatti, diretti e indiretti, generati sull'ambiente, con la presenza di imprese tecnologicamente all'avanguardia e dotate di rilevanti capacità di ricerca e investimento nell'ambito della chimica circolare e da biomasse.



Figura 1: Saldo commerciale della chimica (elaborazione Federchimica)

[3] *Rapporto "L'industria chimica come competenza abilitante per il made in Italy e per lo sviluppo sostenibile" Federchimica e Parti Sociali, redatto da TEHA.*

[4] *Fondazione Symbola, Rapporto GreenItaly.*

Tuttavia, la competitività del settore dipende significativamente anche da tutta una serie di fattori esterni all'impresa che compongono il cosiddetto Sistema Paese e, sempre di più, il Sistema dell'Unione Europea. Tra i fattori più penalizzanti vi sono, da un lato, le asimmetrie competitive di costo in ambito energetico (gas ed elettricità); dall'altro, il cosiddetto "tsunami normativo" derivante dal Green Deal Europeo non adeguatamente accompagnato da una politica industriale.

RUOLO E CARATTERISTICHE DELL'INDUSTRIA CHIMICA IN ITALIA

Con più di 2.800 siti produttivi, un valore della produzione nel 2023 pari a oltre 67 miliardi di euro e quasi 113 mila addetti altamente qualificati, l'Italia rappresenta la terza industria chimica europea, sia per produzione che per numero di occupati. La chimica è, per fatturato, la quinta industria del Paese e, grazie alla sua pervasività e collocazione a monte di tutte le filiere, il suo contributo alla creazione di valore per il Paese consente di generare sia direttamente che indirettamente, per via degli effetti moltiplicativi, un volume di affari pari a 3,32 volte l'investimento iniziale. I prodotti chimici sono, infatti, componenti essenziali del 95% dei manufatti, siano essi di uso quotidiano o impiegati in applicazioni centrali per la transizione ecologica quali batterie, pale eoliche o pannelli solari. Di conseguenza, l'industria chimica rappresenta una competenza abilitante strategica per sostenere la competitività di tutte le filiere a valle e affrontare la sfida della transizione ecologica.

In Italia, secondo Federchimica, l'industria chimica vede la presenza equilibrata di tre tipologie di attori: le PMI (41% del valore della produzione), i medio-grandi Gruppi nazionali (21%) e le imprese a capitale estero (38%)[5]. L'importanza delle PMI nell'industria chimica non deve essere sottovalutata: a livello europeo attivano ben il 36% dell'occupazione settoriale, e in Italia tale quota si avvicina al 61%.

Occupazione diretta e attivata dall'industria chimica in Italia
(migliaia di addetti, anno 2023)

Addetti chimici diretti	112,7
Addetti attivati nelle filiere collegate	212,0
Totale posti di lavoro attivati dalla chimica	**324,7**

Note: indotto generato attraverso gli acquisti diretti e indiretti e gli investimenti
Fonte: elaborazioni The European House - Ambrosetti su dati Istat

Figura 3: Posti di lavoro attivati dalla chimica (elaborazione Federchimica)

[5] *I medio-grandi Gruppi italiani sono definiti in base a vendite mondiali superiori a 100 milioni di euro. Fonte: Federchimica, anno 2023*

Esiste, tuttavia, anche un nucleo non ristretto di aziende a capitale italiano che, pur non essendo equiparabili in termini dimensionali con i principali attori della chimica internazionale, possiedono la massa critica per affrontare le impegnative sfide tecnologiche e ambientali. Anche le imprese a capitale estero rappresentano una risorsa importante. La loro attività crea valore sul territorio nazionale dove producono e fanno ricerca (oltre 200 milioni di euro all'anno). In diversi casi l'Italia ospita un vero e proprio centro di eccellenza, che rappresenta il punto di riferimento del Gruppo a livello mondiale per la R&S in determinate aree della chimica o per specifiche produzioni. Le imprese chimiche si sono inserite con successo all'interno delle catene globali del valore. Il 61% della produzione realizzata in Italia, infatti, fa capo a imprese multinazionali a capitale sia domestico sia estero caratterizzata anche da una forte propensione all'export.

In base a dati Istat ed Eurostat, l'Italia è specializzata nella chimica delle specialità e di consumo, che riveste una quota della produzione settoriale complessiva pari al 57% a fronte del 37% a livello UE. Tra gli ambiti che godono di avanzi commerciali rientrano la cosmetica, le pitture e vernici, gli adesivi, gli smalti ceramici, gli additivi per olii lubrificanti e per cementi, i catalizzatori, i detergenti, i plastificanti e gli stabilizzanti per gomma e plastica, i prodotti per il trattamento, la finitura e la tintura del tessile e cuoio. L'Italia riveste, inoltre, posizioni di leadership nel panorama mondiale nei principi attivi farmaceutici, con quote esportate che superano l'85% della produzione. Il Paese, inoltre, è ben posizionato nella chimica circolare e da biomasse, dove sono presenti imprese tecnologicamente all'avanguardia e dotate di rilevanti capacità di ricerca e investimento.

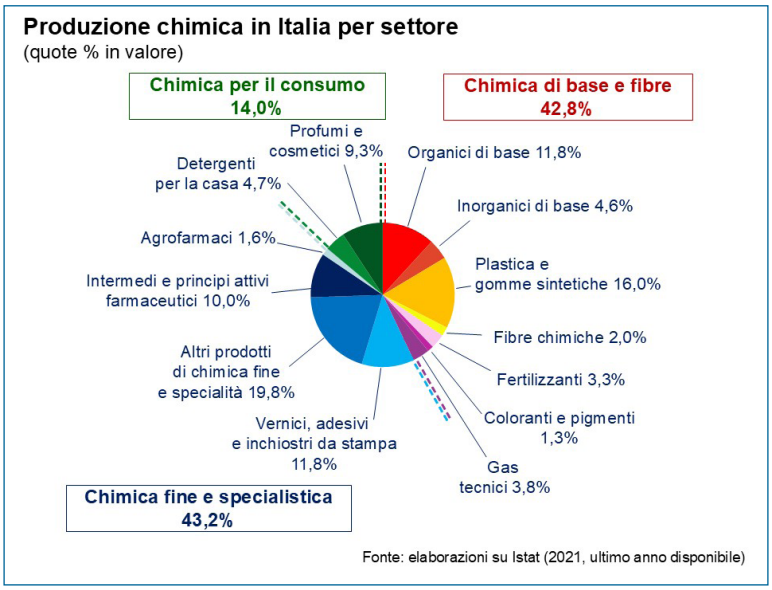


Figura 4: Produzione chimica italiana per settore (elaborazione Federchimica)

Tra i punti di forza del settore – riconosciuti anche dai vertici delle filiali estere in Italia – rientra la qualità delle Risorse Umane, oltre che un solido, moderno ed efficace Sistema di Relazioni Industriali che, attraverso il dialogo continuo tra le Parti Sociali, consente di coniugare la ricerca delle migliori condizioni di competitività con un forte orientamento alla Responsabilità Sociale. La chimica è un settore caratterizzato da una tra le più elevate produttività del lavoro nel panorama industriale, che, secondo Istat, consente retribuzioni del 38% superiori alla media manifatturiera.

Il confronto per titolo di studio evidenzia come nella chimica il fattore competenze sia particolarmente strategico: infatti, secondo Federchimica, la quota di personale laureato, pari al 27%, risulta quasi doppia rispetto alla media dell'industria (15%). L'INPS registra dati molto positivi anche per l'occupazione giovanile:

nel periodo 2015-2022 gli under 35 nella chimica sono cresciuti del 19%, a fronte di un incremento ben più contenuto nell'industria manifatturiera (+8%). In aggiunta, all'interno del settore chimico, l'Istat riporta che la retribuzione di un giovane lavoratore dipendente è superiore del 19% rispetto alla media nazionale. Le imprese acquisiscono nuove competenze, che crescono costantemente anche dopo l'assunzione attraverso azioni per la formazione e lo sviluppo professionale, all'insegna di multidisciplinarietà e soft skills. Tuttavia, una delle nuove sfide è rappresentata dalla difficoltà di reperimento di personale dotato di competenze digitali e green, ma anche con riferimento a mansioni operative quali turnisti e addetti alla produzione. Infatti, nel 2022, oltre un terzo delle nuove assunzioni previste è risultato di "difficile reperimento". In questo contesto assume ancora maggior importanza la formazione: la chimica, insieme alla farmaceutica, è il settore che investe di più in questo ambito che coinvolge, ogni anno, oltre il 30% dipendenti.

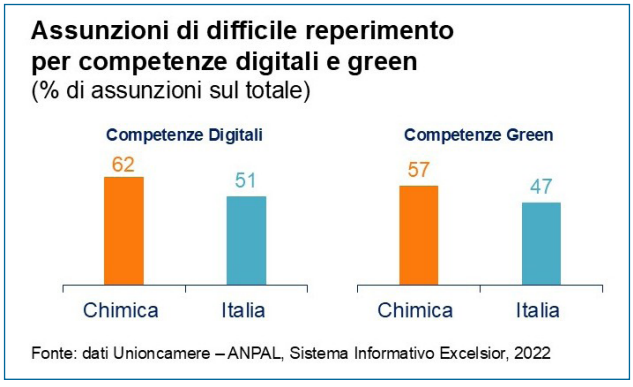


Figura 5: Assunzioni di difficile reperimento (elaborazione Federchimica)

RICERCA E SVILUPPO SEMPRE PIÙ ORIENTATI ALLA TRANSIZIONE ECOLOGICA

Nonostante un contesto complesso e denso di incertezze, le imprese chimiche sono consapevoli che, per affrontare con successo la sfida ambientale e sostenere la competitività, la ricerca rivesta un ruolo essenziale. In particolare, gli obiettivi ambiziosi del Green Deal Europeo potranno essere conseguiti solo attraverso una forte e diffusa spinta verso l'innovazione tecnologica. Le spese in innovazione delle imprese chimiche in Italia superano i 980 milioni di euro, di cui 698 milioni indirizzati alla R&S (anno 2022). Il rapporto tra investimenti in R&S e valore aggiunto – tra i principali indicatori che misurano l'intensità della R&S – nella chimica risulta pari al 5,2%, ben al di sopra della media manifatturiera (4%). Nell'ultimo decennio, il personale dedicato alla R&S ha mostrato una significativa dinamica al rialzo, con un tasso di crescita del 76%. Attualmente gli addetti alla R&S sono più di 8.600, rappresentando l'8% dell'occupazione, una quota sostanzialmente in linea con la media settoriale europea[6].

Spese di innovazione e ricerca della chimica in Italia

	Spese (milioni di €)	Incidenza sul valore aggiunto
Innovazione	983	7,3%
- di cui R&S	698	5,2%

Fonte: elaborazioni su Istat; anno 2022

Figura 6: Spese in R&S e impatto sul valore aggiunto (elaborazione Federchimica)

L'industria chimica è leader nel fornire soluzioni per la sostenibilità ambientale. Come già accennato, infatti, tra i settori manifatturieri si distingue per la quota più alta di imprese che hanno investito in prodotti a maggior risparmio energetico e in tecnologie per la sostenibilità ambientale (59% del totale nel periodo 2018-2022). In effetti, l'impegno per la tutela dell'ambiente nel settore chimico ha

[6] *Elaborazione su dati Istat ed Eurostat.*

una lunga storia con risultati tangibili e di assoluta eccellenza: la riduzione delle emissioni dirette di CO_2 (-64% dal 1990) ha già superato l'obiettivo europeo al 2030 (-55%), i consumi di acqua a parità di produzione sono stati ridotti del 57% dal 2005 e il riciclo rappresenta già oggi la prima modalità di gestione dei rifiuti (quota del 45%)[7].

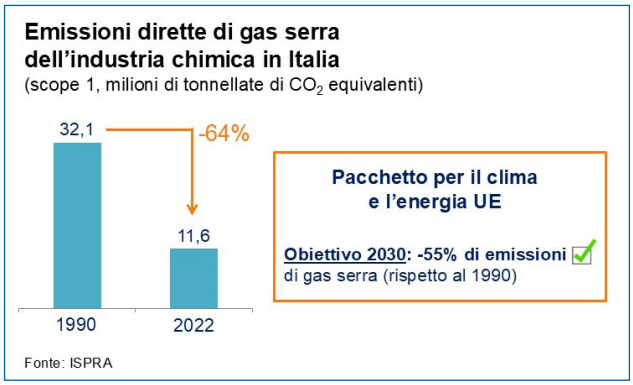


Figura 7: Riduzione delle emissioni di CO2 (elaborazione Federchimica)

Grazie alle sue innovazioni, l'industria chimica non riduce solamente il proprio impatto sugli ecosistemi naturali, ma consente la diffusione di benefici ambientali anche agli utilizzatori presenti praticamente in tutte le filiere. Nuove tecnologie breakthrough sono in fase di sviluppo o industrializzazione (quali riciclo chimico, prodotti da fonti bio e rinnovabili, idrogeno low carbon e rinnovabile, cattura, stoccaggio e riutilizzo della CO_2), così come altrettanto rilevante è il contributo delle innovazioni di processi e prodotti già esistenti in un'ottica di miglioramento continuo. Le imprese chimiche, infatti, sono fortemente impegnate in numerosi ambiti quali l'efficienza e l'autoproduzione energetica, l'ottimizzazione dell'uso di tutte le risorse naturali e lungo l'intero ciclo di vita dei prodotti, lo sviluppo dell'economia circolare e dell'eco-progettazione, il rafforzamento della collaborazione lungo la filiera e dell'informazione/formazione nei confronti di utilizzatori e consumatori finali.

[7] *Dati Ispra e Federchimica, Rapporto Responsible Care.*

La ricerca richiede sempre più un modello di innovazione aperta e di collaborazione pubblico-privato. Il 14% delle imprese chimiche in Italia collabora con Università e Istituti di ricerca per progetti di innovazione, una quota ben superiore alla media manifatturiera nazionale (5%) e non lontana dalla media europea di settore (17%)[8]. Il modello di open innovation comporta per le imprese la gestione di processi innovativi complessi con ritorni aleatori e dilatati nel tempo che richiedono un Responsabile della ricerca con forti competenze manageriali al fine di gestire team allargati con un'attenta programmazione finanziaria e il controllo dei risultati in itinere. D'altra parte, la ricerca pubblica dovrebbe presidiare adeguatamente non solo la chimica di sintesi e i polimeri, ma anche quella delle formulazioni e assumere un atteggiamento proattivo nei confronti delle imprese.

[8] *Fonte: Eurostat Community Innovation Survey.*

FATTORI DI COMPETITIVITÀ E SISTEMA PAESE

La competitività dell'industria chimica è particolarmente sensibile alle condizioni esterne all'impresa, ovvero al cosiddetto Sistema Paese che sempre più coinvolge non solo l'Italia ma anche l'UE. Elementi quali la ricerca e il sistema formativo, l'assetto normativo, l'energia e le infrastrutture costituiscono fattori determinanti che, se carenti nel confronto internazionale, danneggiano la competitività delle imprese. Tali fattori assumono rilevanza ancora maggiore alla luce della sfida della transizione ecologica e degli enormi investimenti necessari a realizzarla (come accennato precedentemente, in base alle stime di The European House Ambrosetti, la transizione ecologica dell'industria chimica in Italia richiederà quasi 20 miliardi di investimenti aggiuntivi entro il 2050[9].

Il settore chimico è tra i più energivori dell'economia, il primo per consumo di gas naturale e il secondo, tra quelli energy-intensive, per consumo di energia elettrica. Per l'industria chimica, i combustibili fossili non solo costituiscono una fonte energetica ancora importante, ma fungono anche da materia prima impiegata nei processi produttivi e, alla luce delle tecnologie disponibili attualmente, la loro integrale sostituzione non è praticabile. La disponibilità di fonti di energia stabili e a costi accessibili è uno dei fattori chiave per la competitività della chimica.

Nonostante il rientro del prezzo del gas su livelli più gestibili, la questione energetica non può dirsi risolta e rischia di condizionare gli investimenti. In particolare, rilevano molteplici fonti di asimmetria competitiva. Secondo la Banca Mondiale, nel 2024 i prezzi del gas si mantengono su livelli pari a circa il quadruplo di quelli statunitensi e rimangono soggetti a rischi al rialzo alla luce delle persistenti tensioni geopolitiche e della dipendenza dalle importazioni di GNL soggette alla concorrenza di una domanda asiatica in continua espansione (anche in vista di una progressiva sostituzione del carbone).

L'Italia, inoltre, risente anche dei differenziali nel prezzo dell'elettricità nei confronti degli altri principali produttori europei. Secondo dati Ember, nel corso del 2024

[9] *Rapporto "L'industria chimica come competenza abilitante per il made in Italy e per lo sviluppo sostenibile" Federchimica e Parti Sociali, redatto da TEHA.*

il prezzo medio all'ingrosso è risultato pari a circa 100€/MWh a fronte dei 50 della Francia, che beneficia del nucleare, e della Spagna, dove lo sviluppo delle rinnovabili procede più spedito e soprattutto il prezzo dell'elettricità all'ingrosso non è più ancorato al prezzo marginale del gas. Per effetto dell'accelerazione impressa dall'Europa agli obiettivi di decarbonizzazione, complici anche fenomeni speculativi, il costo dei permessi per le emissioni di CO_2 – nell'ambito del sistema europeo ETS (Emission Trading Scheme) – ha subito un'escalation, passando dai 25 euro del 2019 ai 65 del 2024 nonostante la debolezza dell'attività industriale[10].

L'industria chimica è tra i settori che più possono contribuire a realizzare concretamente la transizione ambientale, ma è anche tra i più esposti ai rischi connessi a costi non competitivi dell'energia e a un sistema normativo penalizzante a livello europeo che comporta oneri asimmetrici rispetto ai concorrenti e talvolta ostacola l'innovazione invece di promuoverla. La chimica è, a tutti gli effetti, il settore coinvolto dal maggior numero di iniziative legislative connesse al Green Deal ed è impattata trasversalmente in innumerevoli ambiti quali transizione energetica, neutralità climatica, gestione dei rifiuti e circolarità, etichettatura dei prodotti, finanza sostenibile.

[10] *Dati SENDECO2.*

SCENARI TECNOLOGICI

Chimica e materiali rappresenta un ambito estremamente ampio, che abbraccia l'evoluzione delle tecnologie chimiche e dei materiali avanzati, con rilevanti implicazioni per l'industria, la sostenibilità e l'innovazione scientifica. Il tratto distintivo dell'industria chimica risiede proprio nella sua capacità di sviluppare nuovi prodotti, processi e tecnologie, puntando costantemente al miglioramento della sostenibilità e dell'efficienza operativa.
Considerata la vastità del settore e la molteplicità delle sfide emerse, si è resa necessaria una selezione mirata degli scenari tecnologici da approfondire nello studio. A tal fine, sono state individuate tre macroaree tematiche, all'interno delle quali sono state raggruppate tecnologie affini:

Efficientamento e sostenibilità dei processi

Questa area tematica è centrale per l'industria chimica, sempre più orientata verso modelli di economia circolare e responsabilità ambientale. Si focalizza sull'ottimizzazione delle modalità con cui vengono condotte le reazioni chimiche e i cicli produttivi, con l'obiettivo di incrementare le rese, ridurre i consumi e minimizzare l'impatto ambientale.

- Innovazione nella produzione di prodotti chimici

Negli ultimi anni, la produzione elettrochimica di composti chimici a partire da CO_2, azoto e acqua è passata da una fase prettamente accademica a una fase di maturazione avanzata, con la nascita di spin-off e aziende innovative impegnate nel portare queste tecnologie verso l'industrializzazione. A livello globale, il settore è fortemente trainato dalla crescente pressione per la decarbonizzazione dei processi industriali e dalla necessità di sviluppare soluzioni sostenibili nei settori della chimica e dell'energia.

- Innovazione di prodotto

L'introduzione sul mercato italiano dell'acido di fenolico e dei suoi esteri rappresenterebbe un'importante innovazione, sia per la natura bio-based dei composti,

sia per l'ampio spettro di potenziali applicazioni. L'impatto industriale atteso è rilevante, in particolare nei comparti dei polimeri bio-based, come policarbonati, poliesteri, resine epossidiche e benzoxaziniche, ma anche in ambiti quali la cosmetica, la concia delle pelli e la produzione di ritardanti di fiamma.

• Abbattimento catalitico di N_20

Tra i principali processi industriali responsabili dell'emissione di protossido di azoto (N_2O) come sottoprodotto figurano la produzione di acido nitrico e acido adipico. Lo sviluppo di tecnologie per l'abbattimento catalitico del N_2O da questi impianti chimici può generare benefici ambientali significativi e migliorare la sostenibilità complessiva del settore. In questo ambito, l'Italia si distingue per lo sviluppo e l'implementazione di soluzioni tecnologiche avanzate.

• Tecnologie per la conversione diretta della CO_2

La conversione diretta della CO_2 con idrogeno rinnovabile per la produzione di e-chemicals ed e-fuels rappresenta una leva strategica per la transizione energetica. Nel settore chimico, questa tecnologia consente la sintesi sostenibile di composti a basso impatto ambientale (green chemicals), mentre in ambito energetico permette la generazione di combustibili a emissioni nette zero di carbonio (carbon-neutral fuels), sempre più supportati dalle normative europee. Il riconoscimento del valore strategico di queste tecnologie è fondamentale, sia a livello nazionale che internazionale.

Efficientamento e sostenibilità di materiali e prodotti

In questo ambito si affrontano la progettazione, la produzione e l'utilizzo di materiali e beni finiti con un approccio che mira a ridurne l'impatto ambientale lungo l'intero ciclo di vita. Si pone attenzione anche al miglioramento delle prestazioni (durata, leggerezza, funzionalità) e alla possibilità di riciclo o riutilizzo.

• Sensori funzionali

Il settore dei sensori intelligenti funzionalizzati chimicamente è in rapida evoluzione, grazie all'impiego di materiali innovativi e all'integrazione di tecnologie multidisciplinari come la microfluidica e la biosensoristica. Nonostante i rilevanti progressi compiuti negli ultimi anni, il settore deve ancora affrontare sfide importanti, tra cui il miglioramento della stabilità a lungo termine dei dispositivi, la riduzione dei costi di produzione, l'ottimizzazione dell'elaborazione dei dati e la semplificazione dell'interfaccia utente.

• Innovazione nel settore batterie

Nel campo della produzione di batterie, una delle principali sfide è il potenziamento delle prestazioni, al fine di garantire una maggiore autonomia per veicoli elettrici e dispositivi portatili. Le attività di ricerca e sviluppo si concentrano non solo sulla selezione di nuovi materiali, ma anche sull'innovazione dei processi produttivi, con l'obiettivo di migliorare l'efficienza energetica e la sostenibilità del ciclo di vita delle batterie.

• Nuovi materiali avanzati

Le resine termo-responsive rappresentano una promettente alternativa alle tradizionali resine termoindurenti in molteplici ambiti applicativi. Questi materiali avanzati sono in grado di rispondere agli stimoli termici e soddisfano sia i requisiti prestazionali che quelli ambientali imposti dalla crescente domanda di soluzioni sostenibili, contribuendo in modo significativo allo sviluppo di un'economia circolare.

• Additivi chimici innovativi

La chimica dei materiali gioca un ruolo strategico nella transizione dal calcestruzzo tradizionale a quello sostenibile. I nuovi cementi a bassa impronta carbonica, caratterizzati da un ridotto contenuto di clinker e da un'elevata percentuale di materiali cementizi supplementari, richiedono lo sviluppo di additivi chimici

innovativi in grado di garantire prestazioni comparabili a quelle del cemento Portland. In tale contesto, è stata introdotta una nuova classe di additivi – i Low Carbon Concrete Admixtures – appositamente progettata per soddisfare le esigenze di sostenibilità e di efficienza prestazionale del calcestruzzo di nuova generazione.

Circolarità e riciclabilità di processi e prodotti

Si tratta di un tema chiave nell'ambito della chimica industriale, che promuove la progettazione e la gestione di materiali e processi affinché le risorse non vengano disperse, ma possano essere continuamente riutilizzate, recuperate o riciclate.

- Riciclo chimico e tecnologie emergenti

I processi di riciclo chimico, come precedentemente illustrato, si basano su diverse tecnologie. Tra queste, la pirolisi – sia nella sua forma termica che catalitica – risulta attualmente la più diffusa. Diventa quindi essenziale adottare e implementare soluzioni tecnologiche in grado di garantire un riciclo pressoché totale della plastica a fine vita. L'introduzione di questi nuovi processi potrà generare effetti positivi non solo in termini occupazionali e di avanzamento tecnologico, ma anche nel miglioramento delle attività di raccolta e selezione dei rifiuti plastici.

- Gestione degli pneumatici a fine vita

L'accumulo crescente di pneumatici fuori uso rappresenta una sfida ambientale di rilievo. La produzione di pneumatici richiede grandi quantità di risorse naturali – come petrolio e gomma naturale – il cui sfruttamento ha un impatto ambientale significativo. Le principali difficoltà tecnologiche legate al recupero degli pneumatici riguardano l'efficiente separazione dei componenti (gomma, acciaio e fibre tessili) e il miglioramento della qualità dei materiali riciclati per renderli competitivi rispetto alle materie prime vergini. In questo ambito, la ricerca e sviluppo si concentra su tecnologie avanzate di pirolisi, micronizzazione e devulcanizzazione, mirate alla produzione di materiali ad alte prestazioni.

• Sostenibilità nella filiera degli pneumatici

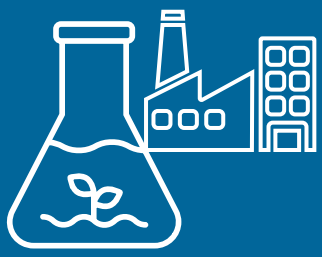
I target di sostenibilità fissati dalle case automobilistiche sono ormai un elemento competitivo cruciale nel settore della componentistica, in particolare per quanto riguarda gli pneumatici. Oggi, ogni nuovo prodotto di alta gamma lanciato sul mercato europeo deve includere una percentuale crescente di materiali bio-based, in linea con gli obiettivi di decarbonizzazione definiti nei piani industriali delle aziende produttrici. I biopolimeri rappresentano una fonte estremamente interessante di materie prime ad alte prestazioni, anche se il loro impiego nella tecnologia dello pneumatico non è ancora pienamente maturo.

• Innovazione nel packaging e coating

Il mercato globale dei coating per imballaggi è in costante evoluzione, spinto dalla crescente richiesta di prestazioni elevate: durabilità, resistenza meccanica, compatibilità con il contatto alimentare e sostenibilità del fine vita sono solo alcune delle caratteristiche richieste. In questo contesto, lo sviluppo di packaging compostabili, funzionalizzati con principi attivi derivati da biomasse di scarto, rappresenta una delle frontiere più promettenti, con ricadute positive sia dal punto di vista ambientale che tecnologico.

• Valorizzazione degli scarti agroindustriali

L'agroindustria genera una vasta gamma di scarti: dai residui in campo e quelli di produzione, fino ai rifiuti della distribuzione e del consumo. Ciascuna di queste categorie può essere valorizzata grazie all'identificazione di principi attivi e di altri componenti presenti nella biomassa residua, aprendo la strada alla progettazione di percorsi di simbiosi industriale. Un esempio concreto è rappresentato dal silverskin, sottoprodotto della tostatura del caffè: la raccolta, l'estrazione dei principi attivi e la loro valorizzazione tramite processi di funzionalizzazione costituiscono una innovazione tecnologica.



SETTORE

CHIMICA E MATERIALI

SCENARI TECNOLOGICI

indice - scenari tecnologici

indice - scenari tecnologici

EFFICIENTAMENTO E SOSTENIBILITÀ DEI PROCESSI 47

PROCESSI ELETTROCHIMICI PER LA SINTESI DI PRODOTTI CHIMICI DI BASE 49

SINTESI DI NUOVI SOSTITUENTI RINNOVABILI DEL BISFENOLO A PER DIVERSI SETTORI APPLICATIVI 59

CATALIZZATORI PER L'ABBATTIMENTO DI PROTOSSIDO D'AZOTO (N_2O) 65

VALORIZZAZIONE DELLA CO_2 A CHEMICAL E FUELS 73

EFFICIENTAMENTO E SOSTENIBILITÀ DI MATERIALI E PRODOTTI 81

MATERIALI INNOVATIVI PER I SISTEMI DI ACCUMULO DI ENERGIA 83

FUNZIONALIZZAZIONE CHIMICA DI SMART SENSORS PER IL RILEVAMENTO SELETTIVO 95

MATERIALI "ECO-FRIENDLY" PER PALE EOLICHE: VITRIMERI E ALTRE RESINE TERMO-RESPONSIVE 109

MATERIALI SECONDARI E NUOVI ADDITIVI PER CALCESTRUZZO 117

CIRCOLARITÀ E RICICLABILITÀ DI PROCESSI E PRODOTTI 125

RICICLO CHIMICO DELLE PLASTICHE 127

TECNOLOGIE E MATERIALI PER LA CIRCOLARITÀ E IL RIUSO DI MANUFATTI MULTIMATERIALE, INCLUSI GLI PNEUMATICI 139

TECNOLOGIE PER INTRODURRE BIOPOLIMERI IN PNEUMATICI HIGH PERFORMANCE 147

ADDITIVI FUNZIONALI PER SOLUZIONI SOSTENIBILI 153

SVILUPPO DI PACKAGING COMPOSTABILI/RICICLABILI FUNZIONALIZZATI CON PRINCIPI ATTIVI DERIVANTI DA BIOMASSE DI SCARTO 161

UPCYCLING DEL SILVERSKIN, IL RESIDUO DELLA TORREFAZIONE DEL CAFFÈ 173

EFFICIENTAMENTO E SOSTENIBILITÀ DEI PROCESSI

PROCESSI ELETTROCHIMICI PER LA SINTESI DI PRODOTTI CHIMICI DI BASE

Transizione ecologica e transizione energetica richiedono da un lato l'ideazione di processi chimici per la conversione di sostanze inquinanti in prodotti a valore aggiunto (es: da CO_2 a combustibili), dall'altro la riprogettazione di processi già esistenti ma fortemente energivori e/o ad alto tasso di emissioni atmosferiche (es: la produzione di ammoniaca e fertilizzanti). La sostenibilità di tali processi va attenzionata fin dalla loro progettazione iniziale e, in particolare, va delineato l'apporto energetico che tali processi richiedono, a seconda dei tempi, temperature, pressioni, e operazioni unitarie necessarie. A ciò fa riferimento, ad esempio, il framework "Safe and sustainable by design" (SSbD), un approccio volontario per guidare il processo di innovazione in tema di produzione di sostanze chimiche e materiali, promosso dalla Commissione Europea: si mira a orientare il processo di innovazione verso la transizione industriale verde e sostenibile, sostituire o ridurre al minimo la produzione e l'uso di sostanze preoccupanti dal punto di vista della salute, del clima e dell'ambiente.

In questo scenario, è strategico investire su metodologie elettrochimiche di sintesi, cioè processi che avvengono in condizioni pressoché blande (pressione e temperatura non lontane da quelle ambientali) e utilizzando elettricità derivata da fonti rinnovabili come fonte di alimentazione energetica. In particolare, il settore dell'elettrochimica che viene considerato per tali applicazioni è quello dell'elettrocatalisi, ossia – per brevità – una combinazione di elettrochimica e catalisi. L'elettrochimica trasforma energia elettrica in prodotti chimici (e viceversa), mentre la catalisi aumenta la velocità di una reazione chimica. Poiché l'elettrocatalisi realizza una trasformazione chimica sulla superficie di un elettrodo, essa può essere considerata come una forma speciale di catalisi eterogenea che coinvolge l'interazione e lo scambio di elettroni tra i reagenti e un elettrocatalizzatore (quest'ultimo costituente l'elettrodo o un suo componente). Un processo elettrocatalitico è complessivamente costituito da processi catodici e anodici che si verificano in due compartimenti separati, nonché da una membrana per impedire la miscelazione dei prodotti di reazione catodica e anodica. Durante questo processo, una reazione di trasferimento di elettroni (non spontanea)

viene permessa da un apporto energetico dall'esterno (ad esempio un modulo fotovoltaico che converte luce solare in elettricità), in modo che l'energia elettrica venga convertita – all'interno del reattore elettrochimico – nell'energia chimica immagazzinata nei prodotti della reazione. I componenti catodici/anodici del processo coinvolgono fasi conduttrici di elettroni (elettrodi) collegate da una fase conduttrice di ioni (mezzo elettrolitico). Uno schema che riassume un processo elettrocatalitico alimentato da energia solare è illustrato in Figura 8.

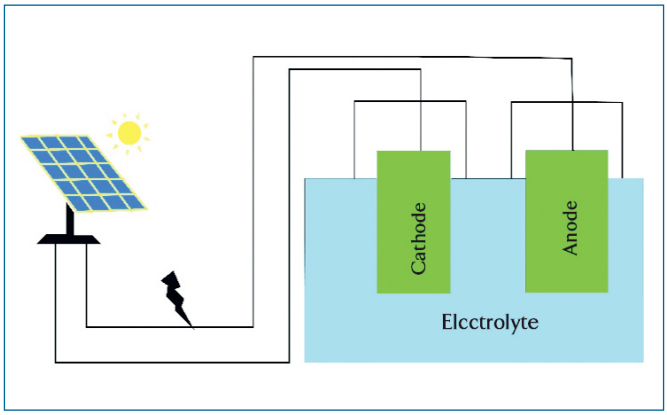


Figura 8: Reattore elettrochimico alimentato da modulo fotovoltaico

L'approccio elettrocatalitico è estremamente versatile e, selezionando opportunamente l'elettrocatalizzatore, la soluzione elettrolita e i reagenti in ingresso, è possibile sfruttarlo per la conduzione di molteplici processi. Di seguito se ne elencano cinque ritenuti estremamente strategici nel contesto della transizione energetica ed ecologica:

• **1.** Conversione della CO_2 atmosferica in piccole molecole utili all'industria chimica (CO, metano, acido formico, etilene, etanolo, acetato). La conversione della CO_2 atmosferica in composti come CO, metano, acido formico, etilene, etanolo e acetato rappresenta una frontiera cruciale per la chimica sostenibile. Questo processo permette di valorizzare una risorsa abbondante e altrimenti dannosa

per il clima, trasformandola in materie prime per numerosi settori industriali. L'innovazione si concentra su catalizzatori efficienti e processi a basso consumo energetico. Le principali sfide includono il miglioramento delle rese, la selettività dei prodotti e la riduzione dei costi. La sua importanza risiede nel contributo alla riduzione delle emissioni di gas serra e nella creazione di una chimica circolare e carbon-neutral.

• **2.** Conversione dell'azoto atmosferico in ammoniaca e fertilizzanti. La produzione di ammoniaca tramite la conversione dell'azoto atmosferico è essenziale per la fertilizzazione agricola e la sicurezza alimentare globale. Le tecnologie emergenti mirano a superare i limiti del processo Haber-Bosch, sviluppando metodi elettrochimici o a pressione più bassa per ridurre l'impatto ambientale. Le sfide principali includono l'integrazione con fonti di energia rinnovabile e l'aumento dell'efficienza catalitica. Questo settore è cruciale per garantire la sostenibilità dell'agricoltura globale, contribuendo a ridurre la dipendenza da processi ad alta intensità energetica e a mitigare le emissioni associate.

• **3.** Conversione dello ione nitrato presente nelle acque reflue di aziende agricole in ammoniaca e fertilizzanti. Il trattamento delle acque reflue agricole per convertire i nitrati in ammoniaca e fertilizzanti è una strategia promettente per ridurre l'inquinamento idrico e promuovere l'economia circolare. L'innovazione si concentra su tecnologie catalitiche ed elettrochimiche per trasformare un rifiuto in una risorsa utile. Le sfide includono la complessità dei flussi di rifiuti, l'efficienza energetica e la gestione dei sottoprodotti. Questo approccio è fondamentale per preservare le risorse idriche, ridurre l'eutrofizzazione e valorizzare i nutrienti altrimenti persi, contribuendo a una gestione agricola più sostenibile.

• **4.** Conversione combinata di diverse molecole per la formazione di composti ad alto valore aggiunto (ad esempio, produzione di urea dalla reazione tra CO_2 e N_2). La sintesi di composti ad alto valore, come l'urea dalla reazione tra CO_2 e N_2, rappresenta una delle applicazioni più promettenti per combinare sostenibilità e innovazione chimica. Questa strategia permette di utilizzare risorse disponibili e abbondanti per creare prodotti essenziali per l'agricoltura e l'industria. L'innovazione si concentra su catalizzatori multifunzionali e processi integrati. Le sfide

principali riguardano il controllo della reattività e la riduzione dei costi energetici. L'importanza di questo settore risiede nella capacità di creare un'industria chimica più efficiente e rispettosa dell'ambiente.

• **5.** Conversione della CO_2 emessa da industrie fortemente impattanti (cementifici, acciaierie…) in carbonati lineari o ciclici (che rappresentano solventi utilizzabili per la produzione di batterie al litio, la cui industria su scala di gigafactory è in forte espansione su territorio europeo). La trasformazione della CO_2 emessa da cementifici e acciaierie in carbonati utilizzabili come solventi per batterie al litio è una soluzione innovativa per affrontare due sfide critiche: la decarbonizzazione industriale e il supporto alla transizione energetica. Questa tecnologia mira a integrare la cattura del carbonio con la crescente domanda di materiali per batterie, soprattutto in Europa. Le sfide includono l'integrazione dei processi industriali, la purificazione dei prodotti e la scalabilità. Questo settore è fondamentale per ridurre l'impatto ambientale dell'industria pesante e supportare lo sviluppo delle gigafactory europee.

Motivazione per lo sviluppo

La conversione della CO_2 e delle specie azotate in combustibili e prodotti chimici utilizzando l'elettricità rinnovabile è una strategia promettente per aumentare la penetrazione delle energie rinnovabili nel campo industriale, nonché per soddisfare i SDG 7, 9, 11, 12 e 13. La conversione della CO_2 e delle specie azotate può essere effettuata attraverso mezzi biologici, termochimici, fotochimici, ma la comunità scientifica è piuttosto coesa sul fatto che siano i processi elettrochimici a rappresentare la strategia più concretamente scalabile. La conversione elettrochimica, infatti, presenta numerosi vantaggi, tra cui il controllo accurato delle velocità/selettività di reazione attraverso la tensione applicata, un'ampia scalabilità grazie al design modulare dell'elettrolizzatore, e un eccellente accoppiamento con fonti di energia rinnovabile intermittenti grazie al rapido tempo di risposta dell'elettrolizzatore. Con questo processo, le fonti di energia a zero emissioni di ossidi di carbonio possono essere utilizzate per ridurre elettrochimicamente sostanze chimiche ad alto valore aggiunto, altresì raggiungendo bilanci di CO_2 negativi.

Secondo recenti studi di settore[11], un processo elettrochimico su larga scala potrebbe ridurre le emissioni di CO_2 fino al 50-70% rispetto ai processi tradizionali basati su fonti fossili, contribuendo a sequestrare fino a 1 gigatonnellata di CO_2 all'anno entro il 2050. Inoltre, l'uso di energia rinnovabile per alimentare questi sistemi può evitare l'immissione di ulteriori 3-4 tonnellate di CO_2 per ogni tonnellata di prodotto chimico ottenuto. Questo approccio, se implementato su scala globale, potrebbe risparmiare fino a 10 milioni di tonnellate di ossidi di azoto all'anno, migliorando significativamente la qualità dell'aria e l'impatto ambientale complessivo.
Modelli tecnico-economici preliminari sui processi sopra descritti forniscono già informazioni sulla fattibilità di diversi processi che porterebbero all'ottenimento di etilene, monossido di carbonio, metano ed ammoniaca su larga scala[12].

Tra i principali fattori quantitativi da considerare vi è la densità di corrente (per la quale è necessario il raggiungimento di una certa soglia, pari a 200–400 mA/cm²); parimenti vanno curati la selettività e il sovrapotenziale, fattori ancora critici e che necessitano di un intenso lavoro di R&S congiunta tra accademia e industria, soprattutto per i prodotti ad alto contenuto di elettroni.
Un ulteriore fattore da considerare nel valutare l'impatto di tale tecnologia è la selezione di quale prodotto ottenere dal processo elettrochimico. Ad esempio, prodotti semplici, come CO e acido formico, sono più redditizi nelle attuali condizioni economiche e prestazioni (basate su prototipi di elettrocatalizzatori su media scala); tuttavia, il piccolo potenziale di mercato per l'acido formico e la difficoltà associata allo stoccaggio/trasporto di prodotti gassosi motivano la produzione di liquidi, come etanolo, n-propanolo o ammoniaca disciolta in acqua, che potrebbero essere molto più redditizi e potrebbero avere un impatto molto significativo.

Nel complesso, la riduzione elettrochimica della CO_2 e delle specie azotate è una tecnologia promettente che potrebbe svolgere un ruolo significativo nelle future infrastrutture per le energie rinnovabili (di cui si riporta uno schema riassuntivo in Figura 9). La figura rappresenta un sistema integrato per la transizione verso

[11] *Chemical Engineering Research and Design, Volume 208, 2024, pp. 934-955.*

[12] *nergy Environ. Sci., 2024,17, 7983-7998; Nature Communications, volume 10, (2019) article number: 5193.*

un'economia sostenibile, centrata su catalisi verde e ingegneria. Fonti di energia rinnovabile (solare, eolica e idroelettrica) alimentano processi elettrochimici che utilizzano CO_2, H_2O e N_2 per generare combustibili e materiali chimici. I composti derivati ($C_AH_YO_Z$, NH_3, H_2) possono essere immagazzinati, utilizzati come carburanti per trasporti o trasformati in prodotti chimici ad alto valore. Biomasse non edibili e rifiuti contribuiscono alla produzione sostenibile di idrogeno e composti organici. Il sistema minimizza l'uso di risorse fossili (segnalato con una "X"), riducendo le emissioni di CO_2 e promuovendo la circolarità. La modularità e la scalabilità dell'approccio consentono una rapida implementazione in diversi settori industriali.

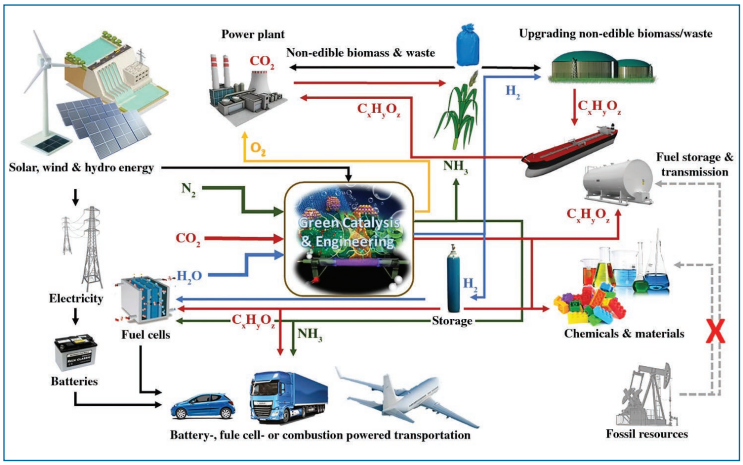


Figura 9: Figura 9: Scenario tecno economico avente come cuore pulsante i processi elettrochimici per la conversione di CO2 e specie azotate a prodotti con alto valore aggiunto. (Fonte: Kevin M. Van Geiem and Bert M. Weckhuysen, MRS Bulletin, vol. 46 (2021), pp. 1186-1197)

Stato dell'arte

Negli ultimi anni, la produzione elettrochimica di composti chimici a partire da CO_2, azoto e acqua è passata da una fase di ricerca accademica a una più avanzata, con la nascita di spin-off e aziende innovative che stanno portando queste tecnologie verso l'industrializzazione. A livello globale, questo settore è trainato

dalla crescente pressione per la decarbonizzazione industriale e dal bisogno di sviluppare soluzioni sostenibili per la chimica e l'energia.
La Commissione Europea ha creduto fin dalle prime evidenze sperimentale agli investimenti in processi elettrochimici per la decarbonizzazione dell'industria chimica. In particolare, SUNER-C è la più recente Coordination and Support Action (CSA)[13] finanziata dal programma UE Horizon Europe. Il progetto SUNER-C (acronimo di SUNERGY Community and eco-system for accelerating the development of Solar Fuels and Chemicals) mira a sviluppare ed espandere l'ecosistema dell'innovazione per i combustibili rinnovabili e le sostanze chimiche di base, unendo scienza, imprese, società e altre parti interessate rilevanti. Questa aggregazione mira a sviluppare una visione comune e una tabella di marcia tecnologica per accelerare l'incremento delle tecnologie, come elementi chiave verso l'obiettivo UE 2050 di emissioni nette pari a zero.
La produzione sostenibile di "combustibili solari" (solar fuels) e prodotti chimici su vasta scala utilizzando un approccio di economia circolare è in vista, ma non è ancora raggiungibile senza un'azione concertata tra il mondo accademico, l'industria, i governi e le parti interessate della società. SUNER-C mira a colmare questa lacuna ponendo la prima pietra per un'iniziativa di ricerca e innovazione su larga scala a livello europeo per una spinta decisiva verso l'economia circolare, la sovranità dell'UE e la mitigazione dei cambiamenti climatici.
Per quanto riguarda l'Italia, la transizione ecologica è uno dei pilastri del progetto Next Generation EU e costituisce una direttrice imprescindibile dello sviluppo futuro. La seconda Missione, denominata Rivoluzione Verde e Transizione Ecologica, si occupa dei grandi temi dell'agricoltura sostenibile, dell'economia circolare, della transizione energetica, della mobilità sostenibile, dell'efficienza energetica degli edifici, delle risorse idriche e dell'inquinamento, al fine di migliorare la sostenibilità del sistema economico e assicura una transizione equa e inclusiva verso una società a impatto ambientale pari a zero. Ciò ha portato al finanziamento di alcune borse di dottorato di ricerca, reclutamento di ricercatori a tempo determinato, formazione di piccoli consorzi universitari attivi sul temi; manca, tuttavia, un importante azione collante tra mondo di ricerca e di industria, quest'ultima spes-

[13] *I CSA sono progetti che promuovono, peraltro, azioni quali divulgazione, comunicazione, networking, servizi di supporto, dialoghi politici, studi, e pianificazioni strategiche, fondamentali per un'efficace presa di conoscenza da parte di tutti i soggetti degli aspetti centrali della transizione energetica ed economica.*

so interessata a migliorare efficienza e sostenibilità dei propri processi, ma ancora troppo distante (anche per mancanze di opportunità analoghe al SUNER-C europeo) da uno scenario in termini di sviluppo congiunto di nuovi materiali, reattori e linee pilota su scala pre-industriale.

In Italia, diverse realtà accademiche hanno dato origine a spin-off focalizzati sull'elettrochimica verde. Un esempio rilevante è Enapter, un'azienda innovativa che, pur concentrandosi principalmente sulla produzione di idrogeno verde tramite elettrolisi dell'acqua, sta espandendo le sue attività verso tecnologie integrate che utilizzano CO_2 come materia prima. Altri spin-off, come quelli nati da collaborazioni tra Politecnico di Milano, Università di Bologna e CNR, stanno sviluppando piattaforme elettrochimiche modulari per trasformare la CO_2 in prodotti ad alto valore aggiunto, come acido formico ed etanolo. Tuttavia, la maggior parte di queste realtà si trova ancora in una fase pre-commerciale, con impianti pilota destinati alla dimostrazione tecnologica. Il Politecnico di Torino ha inaugurato nella sede di Environment Park una linea pilota di prototipazione di componenti per celle elettrochimiche, ricevendo recentemente finanziamenti negli schemi ERC e FISA per lo sviluppo di processi di produzione di NH3 e batterie di nuova generazione.

All'estero, il panorama è più avanzato. Negli Stati Uniti, aziende come Twelve stanno già implementando sistemi elettrochimici scalabili per la conversione della CO_2 in metanolo, materiali plastici e combustibili sintetici. Questa azienda ha stretto collaborazioni con partner industriali di rilievo, accelerando il percorso verso l'applicazione su larga scala. In Europa, la Germania e i Paesi Bassi sono leader in questo settore. Aziende come Covestro e Avantium stanno investendo massicciamente nella produzione di materiali e intermedi chimici da CO_2, grazie a finanziamenti pubblici e privati. Carbon Clean, con sede nel Regno Unito, sta sviluppando soluzioni ibride che combinano cattura del carbonio e conversione elettrochimica per integrare queste tecnologie direttamente nelle industrie pesanti.

Un altro mercato emergente è rappresentato dall'Asia, con Giappone e Corea del Sud in prima linea. Aziende come Toshiba e SK Innovation stanno testando tecnologie per la produzione di ammoniaca verde, sfruttando l'azoto atmosferico e l'idrogeno derivato da elettrolisi. La Cina, invece, si sta affermando come hub per la scalabilità industriale, grazie a impianti dimostrativi per la conversione elettrochimica della CO_2 in etilene e altri composti di uso industriale.
Nonostante i progressi, restano sfide significative per il pieno sviluppo di queste tecnologie. La riduzione dei costi operativi, la stabilità dei catalizzatori e l'ottimizzazione dei flussi di processo sono ancora oggetto di ricerca e sviluppo. Tuttavia, il panorama globale evidenzia un forte interesse industriale, con un aumento di investimenti e collaborazioni pubblico-private, a dimostrazione del potenziale trasformativo di queste tecnologie per un futuro sostenibile.

1/14

Risorse economiche necessarie

L'enorme impatto che i processi elettrochimici possono avere nel campo della transizione dell'industria chimica verso uno scenario di vera sostenibilità richiede un investimento profondo su due livelli:

- **1.** Creazione di un'infrastruttura nazionale inclusiva di 3-5 università e 15-20 grandi aziende ad alta emissione di CO_2 al fine di condurre attività di R&S congiunta. In un progetto idealmente di durata pari a 6-7 anni, sarebbe opportuno a metà progetto individuare un sito in cui avere spazi adatti (10.000 m^2) per l'installazione di impianti pilota utili a vari scenari (cementificio, acciaieria, industria agricola…), al fine di condurre attività R&S su scala quasi-reale. Al termine ciò porterebbe ad avere chiare strategie, già pronte ad essere incorporate dall'industria, per la conduzione di processi elettrochimici per la chimica industriale. Stima del costo: 100 Milioni di euro.
- **2.** Redazione di una politica di incentivazione per aziende ad alta emissione di CO_2 per la sostituzione di impianti desueti ed energivori con nuovi impianti elettrochimici alimentati da energia rinnovabile. Stima del costo per l'incentivo iniziale: 50 Milioni di euro.

SINTESI DI NUOVI SOSTITUENTI RINNOVABILI DEL BISFENOLO A PER DIVERSI SETTORI APPLICATIVI

Il bisfenolo A (BPA) rappresenta un importante building block per l'industria chimica; l'isomero prevalente p-p' viene ottenuto dalla condensazione di due molecole di fenolo con una molecola di acetone (Figura 10), e trova vastissimi impieghi nella sintesi di materiali ad alte prestazioni quali resine policarbonato, benzoxaziniche, epossidiche, poliestere insature, polieteri, polisolfoni, ritardanti di fiamma. Attualmente, la produzione mondiale di BPA è stimata intorno a 10 milioni di tonnellate, con un CAGR dell'8,3 % dal 2023 al 2030.

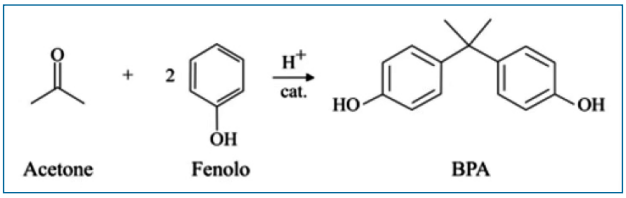


Figura 10: Sintesi del BPA da fenolo e acetone

Sebbene ne sia stata proposta la sostituzione con altri bisfenoli di origine fossile (come il BPF e il PBP), per le gravi problematiche di tossicità anche questi sono ritenuti dei "regrettable substituents" e l'industria si sta indirizzando verso innovativi sostituenti bio-based. I più accreditati sostituenti bio-based del BPA sono l'acido difenolico (DPA) e i suoi esteri (DPE), riportati in Figura 11:

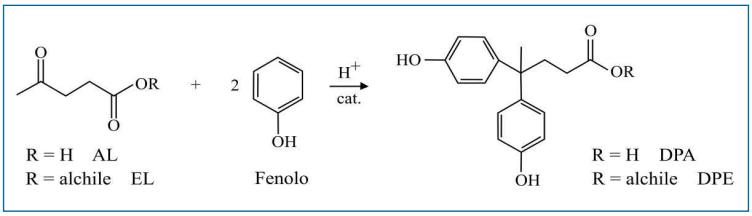


Figura 11: Sintesi dei bio-based DPA e DPE rispettivamente a partire da acido levulinico e da alchil levulinati

Motivazione per lo sviluppo

La sintesi del DPA ha forti analogie con quella del BPA, ma nella sintesi di questo bio-bisfenolo l'acetone viene sostituito dal bio-based acido levulinico, mentre nella sintesi dei DPE dagli esteri dell'acido levulinico. Sia l'acido levulinico che i suoi esteri possono essere ottenuti facilmente da biomasse, preferibilmente di scarto, ricche in cellulosa, attraverso processi one-pot di conversione (rispettivamente idrolisi e alcolisi) acido catalizzati, seguiti dalla purificazione del prodotto. La forte spinta verso la sostituzione delle materie prime fossili con quelle rinnovabili (tematica di base del Cluster Tecnologico Nazionale SPRING della Bioeconomia Circolare) ha fortemente indirizzato la ricerca accademica e industriale verso l'ottimizzazione della sintesi di queste nuove classi di bio-bisfenoli e la valutazione del loro impiego per materiali avanzati in sostituzione del BPA. Oltre a essere bio-based è stato osservato da studi sperimentali che queste molecole causino molto minori problematiche di interferenza con il sistema endocrino: ad esempio, il p,p'-DPA mostra un'attività estrogena 10 volte inferiore di quella del p,p'-BPA. Inoltre, l'impiego dei bisfenoli bio-based, grazie alla loro diversa struttura chimica, permette di ottenere prodotti con migliorate proprietà meccaniche, termiche e reologiche (quali policarbonati, poliesteri, resine epossidiche e benzoxaziniche) in diversi settori applicativi rispetto agli equivalenti ottenuti dal BPA.

Per quanto riguarda la sintesi industriale di questi bio-bisfenoli, la tecnologia è assai simile a quella adottata per la controparte fossile BPA. D'altro canto, l'industrializzazione della produzione dell'acido levulinico e dei suoi esteri sta procedendo speditamente con conseguente riduzione dei prezzi di produzione, sebbene ancora ben superiori a quello dell'acetone (per l'acido levulinico si individua il target di prezzo di 1 USD/Kg). Il crescente interesse verso questi bio-bisfenoli è dimostrato dal crescente numero di pubblicazioni e brevetti industriali sulla loro sintesi e i loro impieghi. In particolare, per la loro sintesi, oltre ai tradizionali acidi protici omogenei, sono state implementate molte tipologie di catalizzatori eterogenei, quali resine solfoniche, zeoliti ed eteropoliacidi, il cui impiego semplificherebbe significativamente lo stadio di purificazione dei prodotti.

Bisogna però evidenziare che lo studio della sintesi su larga scala di DPA e DPE non è ancora riportato, sebbene vi siano diversi produttori industriali di DPA, per cui per il prossimo triennio in Italia si può pensare a investimenti sullo scale-up di processo per la costruzione di impianti di piccola scala, dedicati alla produzione dei bio-bisfenoli per la sintesi di materiali speciali ad alto valore aggiunto. I prodotti sono infatti di particolare interesse per molti settori dei materiali avanzati, prevalentemente polimerici, ma non solo.

Nell'ambito dei materiali polimerici i bisfenoli bio-based sono strategici per la sintesi di moltissimi prodotti strategici, come policarbonati, poliesteri, resine epossidiche e benzoxaziniche. In molti casi i materiali ottenuti mostrano caratteristiche termiche, meccaniche ed elettroniche superiori rispetto ai corrispondenti ottenuti dal BPA. Inoltre. l'impiego dei DPE ottenuti da alcoli diversi permette un'interessante modulabilità delle proprietà dei materiali, permettendo di accedere a diversi interessanti materiali non ottenibili dal BPA. Per dimostrare l'impatto trasversale applicativo dei derivati di DPA e DPE a titolo di esempio, tra i molti studiati in letteratura, in Figura 12 viene riportata la DPA-benzoxazina, ottenuta dal DPA con una semplice via sintetica. Questo composto dimostra eccellenti proprietà come innovativo ritardante di fiamma bio-based.

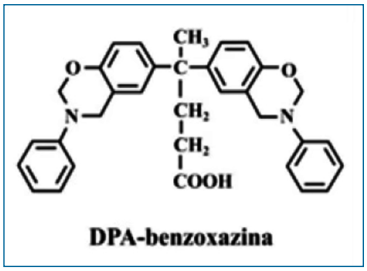


Figura 12: DPA-benzoxazina

D'altro canto, la polimerizzazione termica dello stesso monomero o dei suoi esteri porta all'ottenimento di resine poli-benzoxaziniche con caratteristiche ben superiori alle tradizionali resine fenoliche, dal punto di vista delle proprietà termiche, elettroniche e di stabilità, che ne fanno un componente strategico per materiali ad alto valore aggiunto in ambiti diversificati.

Da quanto detto appare quindi evidente come questa tecnologia innovativa risulti rilevante da molti punti di vista:

- della transizione ambientale, inserendosi nella filiera dei prodotti ottenibili da

biomasse cellulosiche anche di scarto;
• etico, aprendo la strada a molecole più sicure per la salute dell'uomo e per l'ambiente;
• economico, permettendo la sintesi di materiali avanzati ad alte prestazioni per diversi settori applicativi.

Stato dell'arte

Il corrispettivo fossile BPA vede i suoi principali produttori soprattutto nella regione Asia-Pacifico, quindi in Europa e Nord America; tra questi si annoverano Bayer, SABIC, Dow Chemicals, Shell, Mitsui, Ineos Phenol, LG Chem. Il BPA (come monomero di partenza rilasciato nel tempo dai materiali polimerici e dai compositi), oltre a essere totalmente di origine fossile, è soprattutto causa di gravissime problematiche di contaminazione ambientale e di tossicità verso l'uomo e gli animali. È infatti ritenuto cancerogeno, causa di problematiche riproduttive e di obesità, e si osservano sempre maggiori restrizioni al suo impego, soprattutto in applicazioni sensibili come il packaging per alimenti, la carta termosensibile, i prodotti per bambini.

Il precursore biobased di DPA e DPE, l'acido levulinico, è un prodotto bio-based ormai consolidato, con CAGR stimato del 13% nel periodo 2021-2026. I maggiori produttori sono nella regione Asia-Pacifico, quindi Nord America ed Europa. Tra i principali players per la produzione dell'acido levulinico vanno citate DSM e GFBiochemicals, che sta aprendo un importante impianto nel Sud della Francia e che aveva un impianto anche in Italia, a Caserta, poi abbandonato per problematiche legate al rilascio di autorizzazioni.
Per quanto riguarda invece gli impianti di produzione di DPA e DPE, non risultano al momento attivi impianti produttivi in Italia, dove la ricchezza di scarti agricoli e la strategicità e alto valore aggiunto dei prodotti ottenibili ne motiverebbe la produzione, almeno a livello di piccola scala. I principali produttori di DPA/DPE operano soprattutto nella regione Asia-Pacifico, quindi in Europa e Nord America. Non è nota l'entità della produzione annua delle aziende europee, tra cui DSM

Fine Chemicals, che è comunque su piccola scala (fine chemicals).
Ad oggi, in Italia non è riportata la produzione su scala industriale di questi sostituenti rinnovabili del BPA, mentre a livello di ricerca presso l'Università di Napoli Federico II e presso l'Università di Pisa viene studiata l'ottimizzazione e lo scale-up della sintesi di DPA e DPE adottando sistemi catalitici omogenei ed eterogenei.

Il forte interesse verso la tematica a livello globale è dimostrato da articoli in riviste, reviews e soprattutto brevetti (a nome Hitachi, General Electric, Mitsui, Resinate Materials Group, Mitsubishi, Sumitomo, Coca Cola Co., Sika Tech AG, Guangzhou Chemical Co Ltd e altri) in numero crescente negli ultimi 5 anni, in particolare sui materiali strategici ottenuti da DPA e DPE e sulle loro applicazioni in molteplici settori (non solo nell'ambito dei polimeri, sebbene questo settore applicativo sia prevalente). Di particolare rilievo è l'impiego del DPA per la sintesi di resine epossidiche bio-biobased, sostituendo i glicidileteri del BPA con quelli del DPA. Le resine epossidiche ottenute hanno mostrato, grazie alla presenza nella loro struttura del gruppo carbossilico del DPA a sua volta funzionalizzabile, proprietà meccaniche superiori a quelle delle resine sintetizzate da BPA e quindi si candidano per applicazioni avanzate nel settore aerospaziale e della microelettronica. Altre applicazioni del DPA di crescente interesse si trovano nel settore delle formulazioni di rivestimenti e adesivi che risultano avere ragguardevoli proprietà di adesione, resistenza alla corrosione, capacità adesiva, stabilità termica e proprietà superficiali ritardanti di fiamma. Un aspetto non trascurabile è anche il crescente interesse dedicato alle elevate attività antiossidanti, antibatteriche e antivirali mostrate dal DPA, che aprono prospettive applicative in ambiti molto diversificati, dalla stabilizzazione di vernici e gomme al trattamento superficiale antibatterico di tessuti di cotone, fino alla formulazione di cosmetici anti-aging. Sebbene non siano disponibili dati sull'entità ponderale ed economica della produzione mondiale di DPA e DPE si segnala un fortissimo interesse verso questa molecola da parte di ricercatori operanti in gruppi accademici e, soprattutto, industriali della regione Asia-Pacifico, come testimoniato dalla loro significativa produttività brevettuale negli ultimi anni.

Risorse economiche necessarie

L'introduzione di DPA/DPE sul mercato italiano introdurrebbe una radicale innovatività sia per la tipologia bio-based dei nuovi prodotti sia per l'ampio ventaglio di potenziali applicazioni. In particolare, si può ipotizzare un impatto elevato dal punto di vista industriale nel settore dei polimeri bio-based quali policarbonati, poliesteri, resine epossidiche e benzoxaziniche, ma anche per applicazioni in ambito cosmetico, nei processi conciari e come ritardanti di fiamma. La ricaduta economica può essere valutata medio/alta, in quanto si aprirebbe la strada alla sintesi di nuovi materiali bio-based ad alta prestazione e molto più sicuri per l'uomo e per l'ambiente, quindi a più alto valore aggiunto. Questa prospettiva per altro è perfettamente in linea con le tematiche del Cluster Tecnologico Nazionale SPRING (Bioeconomia Circolare).

La nuova tecnologia è volta a superare la problematica dell'impiego del BPA con un elevato impatto positivo sulla sostenibilità dei processi e dei prodotti, sulla salute dei lavoratori e dei consumatori e sulla qualità ambientale, tenendo conto che la Commissione Europea il 25/4/2022 ha tracciato, nell'ambito dell'EU Chemicals Strategy for Sustainability, la roadmap per la sostituzione del BPA. Il time to market nel medio periodo (1-3 anni) può essere proposto per impianti pilota o di piccola scala, con investimenti non inferiori a 5 Milioni di euro, focalizzando la produzione per applicazioni trasversali in materiali e prodotti ad alto valore aggiunto, eventualmente abbinando il processo di sintesi di DPA e DPE ad un impianto per la sintesi di acido levulinico e/o suoi esteri, o comunque operando in stretta connessione con un'azienda italiana o europea produttrice di questi direttamente da biomassa. L'inquadramento economico e dimensionale del nuovo processo è meramente indicativo proprio a causa della stretta connessione tra i prodotti innovativi proposti e i loro precursori bio-based da un lato e le aziende produttrici di materiali e intermedi avanzati dall'altro, per cui lo sviluppo della tecnologia necessita di una forte interazione tra i diversi settori interessati e nei prossimi tre anni può essere sviluppata solo su piccola scala.

CATALIZZATORI PER L'ABBATTIMENTO DI PROTOSSIDO D'AZOTO (N_2O)

I catalizzatori svolgono un ruolo fondamentale nella salvaguardia e nella protezione del pianeta: non solo le automobili con motore a combustione interna sono dotate di convertitori per l'abbattimento dei composti inquinanti ma l'industria chimica ha in corso da anni un ampio programma di riduzione delle emissioni in atmosfera con un forte impegno di sostenibilità per il mantenimento dell'equilibrio ambientale. I problemi relativi ai cambiamenti climatici sono uno degli argomenti di maggiore impatto e la loro soluzione riserva un enorme potenziale di sviluppo economico nel futuro.

In particolare, nuove importanti tecnologie sono state sviluppate nel settore della rimozione del protossido d'azoto (N_2O) attraverso la reazione di decomposizione diretta ad azoto (N_2) e ossigeno (O_2), i principali costituenti dell'aria atmosferica.

Nel corso dell'era industriale la concentrazione di N_2O in atmosfera è aumentata da circa 270 ppb (parti per miliardo) a 330 ppb e le stime più recenti indicano che tale quantitativo è destinato a crescere ulteriormente.

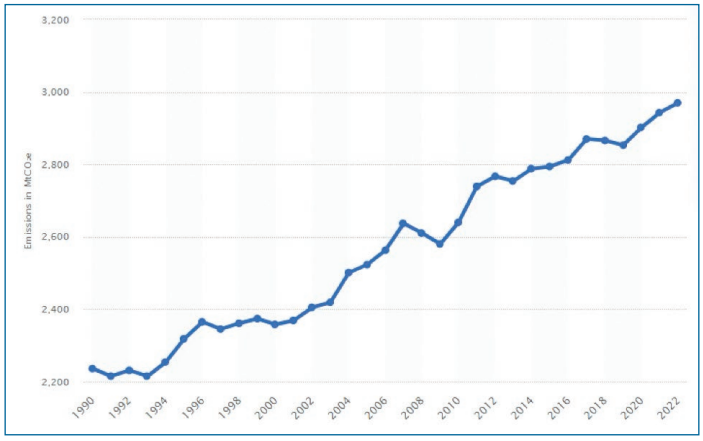


Figura 13: Emissioni globali annuali di N2O nel periodo 1990-2022 (Fonte: www.statista.com)

Il protossido d'azoto (N_2O) è una molecola stabile a temperatura ambiente e ha un tempo di vita in atmosfera pari a circa 150 anni. Ciò implica anzitutto che misure di riduzioni delle emissioni, sebbene urgenti, avranno un effetto sensibile solo a lun-

go termine ed è necessario abbattere direttamente all'origine l'inquinante prodotto. La reazione di interesse con le fasi successive di adsorbimento del reagente e desorbimento dei prodotti di reazione è la seguente:

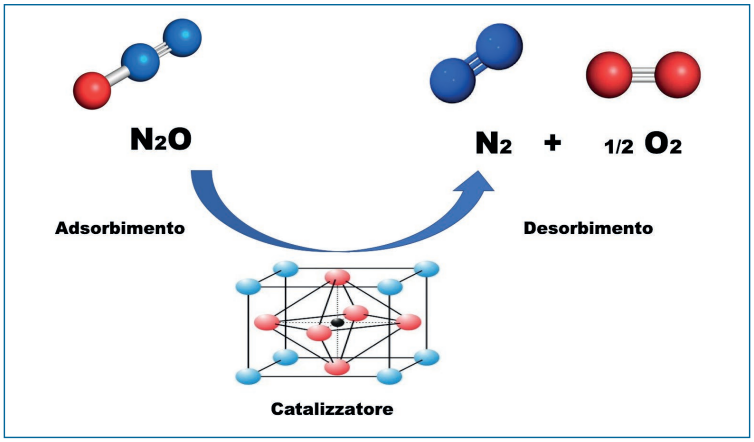


Figura 14: Schema della reazione di decomposizione catalitica del protossido d'azoto

Si tratta quindi della reazione di una singola molecola che non comporta la presenza di altri reagenti e ciò richiede uno studio particolare delle sue caratteristiche strutturali.

Durante la reazione viene generata inoltre una forte quantità di calore (con termine tecnico si dice che è una reazione "esotermica"), che può essere riutilizzato all'interno del ciclo industriale, ad esempio, per la produzione di vapore, rendendo il processo conveniente anche sotto il profilo del risparmio energetico.

Un passo imprescindibile nella costruzione del sistema catalitico è stato quindi quello di studiare una composizione chimica in grado di resistere alla notevole sollecitazione termica dell'ambiente di reazione, anche per la presenza di significative quantità di vapor d'acqua all'interno del flusso gassoso.

In sintesi, i fattori critici da superare per la messa a punto di un efficiente sistema catalitico specifico possono essere riassunti come segue:

- alta conversione per la riduzione della concentrazione di N_2O;
- stabilità strutturale ad alte temperature (anche superiori a 900 °C);
- stabilità ai composti gassosi presenti nel flusso di reazione.

Motivazioni per lo sviluppo

Durante gli ultimi anni l'attenzione nei confronti di N_2O è cresciuta poiché tale molecola contribuisce alla distruzione dello strato d'ozono nell'atmosfera ed è stata riconosciuta come un gas che provoca effetto serra. Infatti, mentre le attuali emissioni di N_2O sono molto più basse di quelle di biossido di carbonio (CO_2), N_2O è circa 300 volte più potente di quest'ultimo nell'azione di intrappolamento del calore all'interno dell'atmosfera terrestre.

I tentativi internazionali di mitigare le emissioni dei gas a effetto serra hanno generato il mercato dei crediti di carbonio, certificati che rappresentano il diritto per un'azienda di emettere una tonnellata di CO_2 o la quantità equivalente di un diverso gas serra (noti anche con l'acronimo GHG dal termine inglese Greenhouse Gases). I crediti di carbonio certificati rappresentano un titolo con il quale le aziende possono ridurre l'impatto ambientale delle loro attività, supportando progetti nazionali e internazionali di sviluppo sostenibile.

La produzione di N_2O deriva principalmente dalle attività di utilizzo del suolo e dalla produzione dei fertilizzanti per l'agricoltura, la combustione dei residui agricoli e dei carburanti fossili e dall'industria chimica.

Due dei processi industriali maggiormente responsabili della emissione di N_2O, come sottoprodotto di processo, sono quelli legati alla produzione di acido nitrico e acido adipico. Lo sviluppo di tecnologie per l'abbattimento catalitico di N_2O dagli impianti chimici che producono tali acidi può quindi avere un evidente impatto ambientale e industriale. Tali tecnologie sono attualmente sviluppate con successo in Italia, come descritto nel seguito.

Rilevanza

Tali acidi rappresentano due delle commodity più diffuse a livello mondiale per la produzione di numerose sostanze chimiche essenziali.

L'acido nitrico (AN) è infatti una delle più importanti materie prime chimiche al mondo, con una produzione annuale pari a 60,8 milioni di tonnellate metriche nel 2023.

AN è un liquido fortemente acido e corrosivo prodotto commercialmente dall'ammoniaca tramite ossidazione graduale e assorbimento in acqua (mediante ossidazione ad alta temperatura dell'ammoniaca a monossido di azoto su catalizzatori costituiti da reti di platino-rodio). N_2O si forma come sottoprodotto, attraversa gli stadi del processo e finisce nei gas emessi a camino.

AN viene utilizzato prevalentemente come intermedio per la produzione di fertilizzanti (principalmente nitrato di ammonio e di calcio ammonio) e per la produzione di intermedi organici. Ulteriori utilizzi includono il trattamento dei metalli e la lavorazione dell'uranio. Nel 2023, circa il 78% dell'acido nitrico è stato utilizzato per prodotti fertilizzanti, mentre il restante 22% è stato utilizzato in applicazioni industriali o attribuito a perdite durante lo stoccaggio e il trasporto. I maggiori utilizzi chimici finali dell'acido nitrico includono nitrobenzene, toluene diisocianato (TDI), acido adipico e nitroclorobenzeni, e insieme rappresentano il 15,4% del consumo globale di acido nitrico nel 2023. Altri importanti utilizzi finali includono il trattamento dei metalli, la lavorazione dell'uranio e la produzione di esplosivi. A causa della sua natura corrosiva, oltre il 90% dell'acido nitrico viene consumato in loco, principalmente per la produzione di fertilizzanti. Il mercato dell'acido nitrico è dominato da aziende produttrici di fertilizzanti ed a livello globale il mercato è abbastanza frammentato con i primi 10 produttori aventi una quota del 36% nella capacità produttiva globale. La capacità, la produzione e il consumo di acido nitrico nel mondo sono dominati dalla CSI e dagli Stati baltici, dalla Cina continentale, dall'Europa Occidentale e dal Nord America. Insieme, queste quattro regioni rappresentano oltre il 70% della domanda e dell'offerta globali. Dopo lo scoppio della pandemia globale di COVID-19, la maggior parte

dei paesi ha dichiarato il settore agricolo e alimentare come essenziale per l'economia e pertanto, l'industria dei fertilizzanti, inclusa la produzione di nitrati, ha assunto un ruolo ancora più strategico.
Allo stesso modo, l'acido adipico (AA) è il monomero intermedio utilizzato per la produzione di nylon 66 ed il suo consumo è guidato principalmente dai mercati dei polimeri e delle fibre di nylon 66. È anche un acido dicarbossilico ampiamente utilizzato in molte altre applicazioni, come i polioli per poliuretani, utilizzati in schiume, vernici e rivestimenti e adesivi; plastificanti per PVC; e additivi alimentari per aggiungere acidità e gelatina. Tra gli altri usi ci sono le resine (poliammide-epicloridrina [PAE] e resine poliestere insature), prodotti farmaceutici, solventi, protezione del vetro, agenti per la concia delle pelli, cosmetici e compresse detergenti. Circa il 38,9% della capacità produttiva di acido adipico nel mondo è basata sul cicloesano, che è un derivato del benzene. Il resto è costituito principalmente da cicloesene e cicloesanolo/cicloesanone non accoppiato (olio KA), con una piccola quantità basata sul fenolo.
Si prevede che la capacità globale di acido adipico raggiungerà 5,4 milioni di tonnellate metriche entro il 2027, rispetto all'attuale livello di 5,1 milioni di tonnellate metriche. Il suo consumo di acido adipico è guidato principalmente dalla Cina continentale e circa il 51% della domanda globale nel 2022 è stato utilizzato nella produzione di nylon 66; il resto è stato utilizzato in altre applicazioni.
Nell'industria dell'acido adipico per ogni molecola di acido viene prodotta una molecola di N_2O e rappresenta quindi una tra le fonti di maggiore impatto a livello globale.

Stato dell'arte in Italia e all'estero

La reazione di decomposizione catalitica degli ossidi d'azoto (NO, NO_2 e N_2O, noti al grande pubblico anche sotto la sigla NOx) costituisce un banco di prova per gli studiosi di catalisi, presentandosi come il processo ideale per il controllo di un gruppo di composti inquinanti che la legislazione attuale e futura sottoporrà a limiti sempre più stringenti. Il protossido d'azoto N_2O è un membro della famiglia

considerato per lungo tempo relativamente innocuo, se è vero che la sua regolamentazione specifica è stata introdotta solo recentemente dalla legislazione. Mentre in generale le soluzioni catalitiche presenti sul mercato riguardano sistemi catalitici in forma bulk, la ricerca Clariant si è concentrata sullo studio di ossidi supportati dei metalli di transizione aventi caratteristiche atte alla soluzione del problema. Tra le diverse formulazioni possibili, si citerà il caso delle perovskiti, che possono essere rappresentate con la formula generale ABO_3 (dove A e B rappresentano due elementi diversi) e che hanno straordinario interesse per la capacità di unire all'interno di un'unica struttura proprietà catalitiche specifiche e uniche, sostanzialmente diverse da quelle dei singoli elementi che ne costituiscono la struttura di base. Tali ossidi sono noti per la loro stabilità strutturale e termica: l'ampio controllo sulla varietà della loro struttura le rende una classe di composti adatta come modello per lo studio delle relazioni tra chimica dello stato solido e attività catalitica. Sulla base di informazioni di selezione preliminare ottenute dagli studi strutturali, sono stati dunque messi a punto sistemi a base di ossidi misti di metalli di transizione e di terre rare, unendo elementi in grado di offrire un'elevata attività specifica con altri elementi meno attivi, chiamati in linguaggio tecnico promotori. Nel caso specifico dei prodotti ENVICAT-N2O-S® lo studio di tali caratteristiche ha reso possibile non solo la rimozione di N_2O ma, grazie ad un complesso meccanismo di reazione, anche l'aumento della resa del prodotto primario per la sintesi di acido nitrico, incrementando ulteriormente l'economicità del processo globale.

Alla fase di ricerca, è seguito lo sviluppo dell'applicazione industriale. In particolare, sono state studiate forme geometriche fluodinamicamente compatibili con i reattori industriali in uso senza penalizzare le prestazioni catalitiche ottenute a livello pilota, raggiungendo in breve tempo i volumi richiesti per l'installazione presso gli impianti industriali. Lo sviluppo della sintesi e la fase di scale-up dal laboratorio alla realizzazione della produzione industriale hanno richiesto circa 5 anni.

È rilevante notare come lo sviluppo industriale e scientifico di questa tecnologia sia guidato e regolato da uno stringente quadro normativo di riferimento internazionale in merito alla sostenibilità ambientale. In particolare, l'Unione Europea ha emesso una serie di direttive con l'obiettivo di controllare le emissioni di gas serra, quali la direttiva 2003/87/CE e il regolamento UE n. 601/2013 concernente il monitoraggio e la comunicazione delle emissioni di gas a effetto serra.
Il risultato degli sforzi scientifici ed industriali ha avuto come conseguenza che nel 2020 le emissioni di gas a effetto serra dell'UE sono diminuite del 31 % rispetto ai livelli del 1990.

Risorse economiche necessarie

Le attività di perfezionamento e sviluppo di questi catalizzatori sono state completate nel corso di 5 anni ed il prodotto è stato lanciato con successo sui mercati internazionali evidenziando anche un miglioramento dell'efficienza di processo dell'ossidazione dell'ammoniaca. La società vanta diverse collaborazioni universitarie, in particolare con l'Università Tecnica di Monaco di Baviera (Germania) e con l'Università ETH di Zurigo (Svizzera), per supportare con un significativo contributo finanziario la ricerca in catalisi eterogenea. Lo scopo principale delle linee di ricerca è l'avanzamento dell'innovazione e della chimica sostenibile, migliorando la comprensione e l'efficienza delle proprietà dei catalizzatori da una scala nanometrica a quella macroscopica.

LA TECNOLOGIA PER L'ABBATTIMENTO DI N_2O SVILUPPATA IN ITALIA

Lo sviluppo di tecnologie per l'abbattimento catalitico di N_2O dagli impianti acido nitrico e di acido adipico è stato realizzato con successo presso il centro di ricerca di Novara di Clariant Prodotti Italia, parte di una multinazionale attiva nel settore delle specialty chemicals. La società è specializzata nell'innovazione, nello sviluppo e nella produzione di catalizzatori eterogenei per l'industria chimica con una particolare attenzione alle tematiche della sostenibilità, ad esempio con programmi interni dedicati quali il marchio EcoTain® che fornisce una guida per tutti gli attori della catena di valore ai fini della salvaguardia del pianeta. Secondo la filosofia aziendale che privilegia una visione centrata sulle esigenze della clientela, lo sviluppo della fase di scale-up commerciale è stato eseguito in collaborazione con aziende industriali leader nel settore.

L'approccio scientifico seguito nello sviluppare i catalizzatori per l'abbattimento di N_2O è stato coperto da domande di deposito brevettuale (PCT WO 2008/090450, PCT WO 2012/034902) e gli studi effettuati hanno meritato il premio "La Chimica e l'Industria - Rich-Mac" per l'innovazione. I prodotti sono stati presentati presso le fiere di settore, quali ad esempio quella che riunisce i produttori mondiali di nitrato di ammonio/acido nitrico (ANNA) e oggi la loro applicazione copre un mercato su scala mondiale in collaborazione con le maggiori società di ingegneria.



Figura 15: Catalizzatori per la decomposizione di N2O (Envicat-N2O-S®)

VALORIZZAZIONE DELLA CO_2 A CHEMICAL E FUELS

È ben noto che le enormi emissioni di CO_2 prodotte dai processi di combustione sono responsabili del cambiamento climatico antropogenico, così da diventare una delle principali preoccupazioni collettive e degli organi di governo. La riduzione delle emissioni di CO_2 è un target che necessariamente la società moderna dovrà quindi raggiungere nei prossimi anni. La EC intende rendere l'Unione climaticamente neutra entro il 2050 (net-zero emissions by 2050), raccomandando una riduzione delle emissioni di gas a effetto serra del 90% entro il 2040 rispetto ai livelli del 1990. In tale ambito, la EC ha proposto nuove misure per gestire le emissioni di carbonio dell'industria: oltre allo sviluppo di processi più efficienti dal punto di vista energetico, in grado di ridurre la quantità di combustibili necessari per produrre la stessa quantità di energia, sono previsti investimenti in tecnologie in grado di catturare e stoccare l'anidride carbonica, o di riutilizzarla (Figura 16).

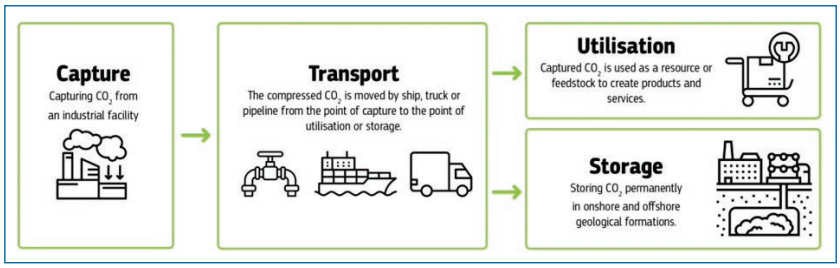


Figura 16: Industrial carbon management[14]

Per raggiungere gli obiettivi fissati non si intravede al momento un'unica soluzione vincente, ma verosimilmente più strade dovranno essere perseguite. Tra queste, la valorizzazione della CO_2 – mediante energia rinnovabili – e la sua trasformazione in chemicals e fuels è una strada promettente nell'ambito della transizione energetica in corso, soprattutto in quei settori dove non si intravvedono al momento soluzioni facilmente percorribili per affrancarsi dall'utilizzo dei combustibili fossili (i settori hard-to-abate).

La trasformazione della CO_2 in prodotti a elevato contenuto energetico – come, ad esempio, combustibili sintetici – costituisce anche una strada per immagazzinare l'energia elettrica (rinnovabile o nucleare) quando presente in eccesso nella

[14] https://climate.ec.europa.eu/eu-action/industrial-carbon-management_en?prefLang=it

rete. Si tratta dei cd. processi Power-to-X (PtX) in cui l'elettricità viene utilizzata per produrre H_2 tramite elettrolisi dell'acqua; l'H_2 così prodotto viene a sua volta utilizzato per idrogenare la CO_2 in prodotti a elevato valore economico ed energetico quali chemicals (e-chemicals) e/o combustibili (e-fuels) (Figura 17). In una variante di tali processi, non si idrogena la CO_2 ma l'azoto, ottenendo così carbon-free e-fuels quali e-NH3, che presenta oggi un grosso interesse come combustibile, soprattutto in ambito marittimo. Gli e-fuels possono costituire un vettore energetico preferibile rispetto all'impiego diretto dell'H_2 in tutte quelle applicazioni in cui non sia possibile stoccare l'idrogeno prodotto per elettrolisi e/o evitare l'utilizzo dei combustibili fossili tradizionali, come ad esempio nel settore avio.

Gli e-fuels, carburanti sintetici liquidi e gassosi di origine non biologica (Renewable Fuels of Non Biological Origin, RFNBO), rappresentano dunque un'importante soluzione al problema dello stoccaggio su lungo periodo dell'energia prodotta da fonti rinnovabili intermittenti. I RFNBO, regolati dalla RED II (Direttiva EU 2018/2001) e dal Regolamento (UE) 2023/802, devono rispettare criteri di addizionalità, ridurre le emissioni del 70% rispetto ai fossili e garantire tracciabilità. La RED III punta al 14,5% di energie rinnovabili nei trasporti entro il 2030. L'Italia li regola tramite il D.Lgs. 199/2021 e incentiva la loro produzione integrando così i tradizionali sistemi di immagazzinamento dell'energia e fornendo, per mezzo di uno stoccaggio di lunga durata, una soluzione di decarbonizzazione per i settori che risentono della produzione stagionale di energia.

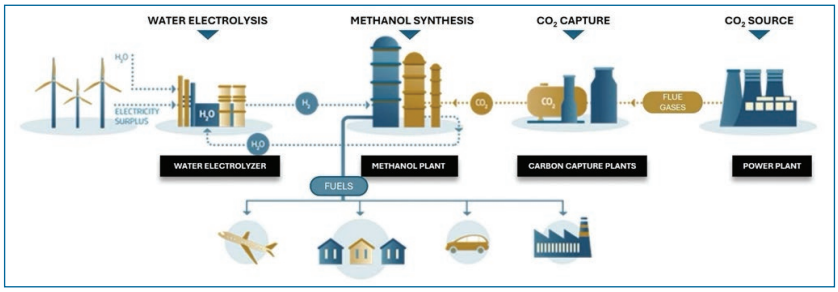


Figura 17: Schema di processo power-to -X per la conversione della CO 2 in chemicals e fuels, con metanolo come intermedio.

Motivazioni per lo sviluppo

Tra le vie per l'utilizzo della CO_2 che portano a prodotti di interesse commerciale e caratterizzati da grossi volumi di produzione, significativi rispetto ai volumi di CO_2 in gioco, sono oggi di estremo interesse la produzione di metanolo e di combustibili avio (jet fuel) di origine non-fossile, i cd. Sustainable Aviation Fuel (SAF).

e-methanol - Il metanolo è uno dei principali prodotti petrolchimici con una produzione di ca. 100 Mt/anno, con una crescita prevista di oltre il 3,5% sino al 2030. Con un valore di mercato di circa 30 B$/anno, è ampiamente utilizzato nell'industria chimica sia tal quale, sia come intermedio per sintetizzare un'ampia gamma di prodotti quali olefine leggere, benzina, materie plastiche, gomme sintetiche, solventi, additivi per i carburanti per autotrazione, farmaci, cosmetici, detergenti, ecc. Inoltre, il metanolo è impiegato come carburante in alcuni paesi del mondo: per questa applicazione, viene solitamente utilizzato all'interno di motori a combustione interna, ma può anche essere utilizzato come reagente all'interno di celle a combustibile con reforming (Reformed-Methanol Fuel Cell, RMFC) e celle a combustibile a metanolo diretto (Direct-Methanol Fuel Cell, DMFC). Il metanolo, inoltre, può essere utilizzato per la sintesi di altri combustibili sia direttamente attraverso i processi (disponibili si scala industriale) MTG (Methanol to Gasoline), sia indirettamente attraverso la sintesi di olefine leggere (processo MTO, Methanol to Olefins) seguita da olimerizzazione. Ad oggi, il metanolo è prodotto principalmente da gas di sintesi (syngas) ottenuto da fonti fossili; l'utilizzo in alternativa di miscele CO2/H2, ove l'idrogeno è prodotto da energia rinnovabile (green H2), è quindi particolarmente attraente. Il metanolo così prodotto (e-methanol o green methanol) rappresenta un esempio virtuoso di produzione chimica sostenibile e carbon neutral.

e-SAF – Anche la trasformazione di CO_2 in combustibili avio (jet fuels) è di estremo interesse. Secondo Boeing, la domanda di nuovi aeromobili – e quindi i consumi di jet fuel - continuerà a crescere nei prossimi decenni: alcune stime indicano che, entro il 2040, la flotta globale di aeroplani aumenterà dell'80%

rispetto al 2019. Contrariamente ad altri comparti, per il settore dell'aviazione non si intravedono a breve soluzioni tecnologiche alternative all'utilizzo dei motori a turbina alimentati a jet fuel. Tale settore non è infatti facilmente elettrificabile, né risulta adatto l'impiego di idrogeno come vettore energetico. Questo implica che gli idrocarburi liquidi, verosimilmente, continueranno ad essere per molti anni gli unici combustibili utilizzati sia negli aeromobili attualmente in circolazione, sia in quelli che verranno introdotti sul mercato nei prossimi anni. Non è infatti pensabile l'impiego di nuove tecnologie, non adeguatamente collaudate, in un settore dove gli standard di sicurezza sono elevatissimi. Ciò non significa che il settore dell'aviazione non dovrà confrontarsi con le esigenze di decarbonizzazione quali le «net-zero emissions by 2050» prima citate, ma che andranno trovate soluzioni differenti. Ad oggi, una possibilità è lo sviluppo di processi per la sintesi di jet fuel di origine non-fossile, il cd. SAF. La maggior parte dell'attuale fornitura di SAF è costituita dai HEFA (Hydrogenated Esters and Fatty Acids), che utilizzano olii e grassi vegetali e animali, ma le quantità di queste materie prime sono limitate. Pertanto, il raggiungimento degli obiettivi di basse emissioni di carbonio del settore richiederà un mix di percorsi diversi per produrre SAF, inclusa la crescita degli e-SAF. Questi ultimi, essendo carburanti sintetici derivati da CO_2 e idrogeno rinnovabile, garantiscono la neutralità carbonica in quanto il loro utilizzo porta all'emissione della stessa quantità di carbonio precedentemente catturata dalle emissioni esistenti di altri settori industriali. La legislazione consente attualmente di utilizzare l'e-SAF in miscela fino al 50% con il jet fuel fossile, ma tecnicamente può essere utilizzato anche puro. Può essere facilmente immagazzinato, trasportato e distribuito utilizzando l'infrastruttura esistente, avendo caratteristiche del tutto compatibili agli attuali jet fuel di origine fossile (carburante drop-in, utilizzabile cioè senza alcuna modifica delle infrastrutture esistenti).

La proposta dell'Unione Europea "Fit for 55" include obiettivi ambiziosi per l'impiego di e-SAF a partire dal 2030, con un tenore dello 0,7% nei carburanti per aerei, fino a raggiungere il 28% nel 2050 (Figura 18).

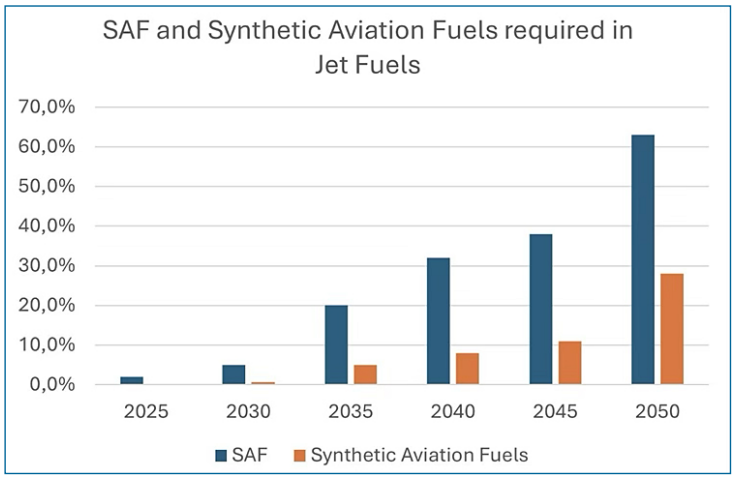


Figura 18: quantitativi di SAF nei jet fuels previsti dal Regolamento ReFuelEU entro il 2050. I carburanti sintetici (e-saf) sono mostrati in colore arancione

Rilevanza

La conversione diretta della CO_2 con idrogeno rinnovabile in e-chemicals ed e-fuels rappresenta un'opportunità di grande rilevanza per diversi settori industriali. Nel settore chimico, consente la produzione sostenibile di prodotti chimici (green chemicals), mentre in quello energetico permette di ottenere combustibili a zero emissioni nette di carbonio (carbon-neutral fuels), il cui impiego è sempre più incentivato dalle normative europee.

La disponibilità di tecnologie per la produzione di e-fuels può risultare determinante sia nei settori coinvolti nella transizione energetica in corso – permettendo l'uso delle infrastrutture esistenti senza emissioni di CO_2 – sia nei comparti Hard-to-Abate, dove la sostituzione con tecnologie elettriche non è attuabile nel medio-lungo termine.

L'importanza e l'interesse per queste tecnologie sono confermati dal loro riconoscimento come strategiche all'interno di numerose iniziative e progetti del PNRR, nonché da molteplici proposte presentate in ambito comunitario, come i programmi Horizon dell'Unione Europea.

Stato dell'arte

Le reazioni di idrogenazione della CO_2 a chemicals e combustibili sono studiate ormai da numerosi anni.

Nel caso della sintesi del metanolo da CO_2/H_2, analogamente a quanto avviene nel caso della sintesi del metanolo da syngas, si tratta di una reazione limitata all'equilibrio e pertanto un riciclo è essenziale per massimizzare la produzione di metanolo e rendere il processo industriale economicamente fattibile. Rispetto al syngas, l'utilizzo di CO_2 implica però la produzione di quantità stechiometriche di acqua, che ha un impatto negativo sulla termodinamica, sulla cinetica e sulla resistenza idrotermale dei catalizzatori. Tra questi, i classici catalizzatori Rame-Zinco-Allumina (CZA), utilizzati fin dagli anni '60 per la sintesi del metanolo da syngas, possono essere utilizzati anche per l'idrogenazione della CO_2 a metanolo, ma la loro effettiva attività e stabilità in applicazioni su scala reale deve ancora essere pienamente dimostrata. Le prime esperienze in tal senso sono della società Carbon Recycling International (CRI) che gestisce, dal 2012, il primo impianto dimostrativo di e-metanolo al mondo basato su un catalizzatore contenente Cu e Zn (Johnson Matthey KATALCO™) operante a 250 °C e 100 bar. L'impianto, progettato da Jacobs e situato nei pressi della Laguna Blu islandese (Svartsengi), converte 5,5 kt/anno di CO_2 di scarto dalla centrale geotermica di Svartsengi e 1200 Nm3/h di idrogeno rinnovabile (prodotto in un elettrolizzatore alcalino da 6 MWel alimentato con energia rinnovabile dalla rete islandese) in 4 kt/anno di metanolo rinnovabile, commercializzato da CRI con il marchio Vulcanol®. Inoltre, dal 2022, CRI sta gestendo: i) un impianto da 110 kt/anno (Shunli plany, città di Anyang, provincia di Henan, Cina), partendo da 160 kt/anno di CO_2 e 20 kt/anno di H2 prelevati dal gas di forno a coke e dal forno a calcare; ii) un impianto da 100 kt/anno (Sailboat plant, Lianyungang, provincia di Jiangsu, Cina). Entrambi questi impianti sono noti per funzionare con un catalizzatore a base di CuZn.

Anche la società Highly Innovative Fuels (HIF) è anche molto attiva nello sviluppo di nuove tecnologie per la sintesi di e-metanolo. A dicembre 2022 è stato commissionato l'impianto dimostrativo Haru Oni nella punta meridionale del Cile (Tehuel Aike Estate; Punta Arenas, Regione di Magallanes), sfruttando la CO_2

catturata dall'aria (DAC) e l'H_2 verde dall'elettrolisi dell'acqua (capacità di 1,2 MW). L'impianto, progettato da Siemens Energy, è alimentato da una turbina eolica da 3,4 MW e sfrutta un reattore di sintesi del metanolo, con una capacità di 600 t/anno, di MAN Energy Solutions. Il catalizzatore adottato è ancora KATALCO™ di Johnson Matthey.

Per quanto riguarda invece la sintesi di e-SAF, partendo da anidride carbonica e idrogeno verde sono disponibili diverse filiere che prevedono l'accoppiamento di diversi stadi, singolarmente dimostrati a elevato TRL; l'intera tecnologia deve però essere ancora dimostrata a livello commerciale. Una possibilità, dimostrata fino alla scala pilota, è quella di sfruttare la reazione di Reverse Water-Gas Shift (RWGS) per produrre gas di sintesi da CO_2/H_2, e quindi procedere con la tecnologia di sintesi Fischer-Tropsch (FT) (ad esempio su catalizzatori a base di Cobalto supportato) per ottenere una miscela di idrocarburi sintetici (syncrude), da cui può separarsi una frazione di e-SAF, eventualmente dopo un ulteriore stadio di upgrading per massimizzare la resa a jet fuel.

Un'altra possibilità prevede uno stadio iniziale di sintesi del metanolo (sintesi diretta da CO_2 o da syngas dopo uno stadio di RWGS), seguito da uno stadio di conversione del metanolo su zeoliti per ottenere una miscela di idrocarburi, in cui si cerca di massimizzare la resa a jet fuel. O ancora, il metanolo può essere convertito a olefine leggere, oligomerizzate a un taglio idrocarburico ricco (dopo upgrading) in jet fuel. Recentemente, sono stati anche proposti – a TRL bassi – processi one-pot (a singolo stadio) che, impiegando un catalizzatore multifunzionale (generalmente a base di ferro promosso con alcali e altri additivi), sono in grado di convertire H_2/CO_2 in una miscela idrocarburica ricca in jet fuel. Tale via a stadio singolo, eliminando l'energivoro stadio di reverse water gas shift, riduce in linea di principio CAPEX e OPEX e aumenta l'efficienza atomica ed energetica rispetto alle soluzioni multistadio.

Sono oggi documentati a livello mondiale svariati progetti su scala pilota di sintesi di SAF da CO_2 e H_2 secondo le diverse vie sopra delineate, aspetto che è sintomatico delle notevoli risorse che molte compagnie stanno attualmente investendo in questo ambito.

Considerato quanto detto finora, lo sviluppo dei processi CCU (o Power-to-X) sopra menzionati (e-methanol ed e-SAF) presenta notevole interesse e ampi spazi di miglioramento. Nello sviluppo di tali processi occorre coniugare conoscenze di base a esperienze industriali, e le ricerche in questi settori ben si prestano a essere inserite in un quadro di collaborazione strategica tra ricerca accademica e industriale. La tematica è stata infatti considerata strategica anche nell'ambito di numerosi progetti PNRR, nei quali si è cercato di favorire la nascita di cordate che comprendessero parti industriali ed accademiche. Numerosi sono anche i progetti che vengono presentati in ambito comunitario, ad esempi all'interno dei programmi Horizon della comunità europea.

Risorse economiche necessarie

La taglia dei progetti in tali contesti, volti a dimostrare l'efficacia delle tecnologie su scala pilota/dimostrativo in ambiente rilevante, si attesta tipicamente nel range 10-20 M€ con tempi di maturazione medi o lunghi a seconda dell'innovatività della soluzione.

EFFICIENTAMENTO E SOSTENIBILITÀ DI MATERIALI E PRODOTTI

MATERIALI INNOVATIVI PER I SISTEMI DI ACCUMULO DI ENERGIA

Negli anni Novanta, per rispondere alla crescente domanda di sistemi di accumulo e produzione di energia più leggeri, efficienti e durevoli, sono stati introdotti gli accumulatori agli ioni di litio (LIBs - Lithium Ion Batteries), sviluppati per la prima volta in Giappone dalla Asahi Kasei Co.

Il litio, grazie al suo basso numero atomico e all'alto potenziale elettrodico, offre un contenuto energetico significativamente superiore rispetto ai materiali utilizzati nelle batterie tradizionali, come piombo e zinco. Le batterie agli ioni di litio si distinguono per alte prestazioni elettrochimiche, elevata densità energetica, lunga durata nei cicli di carica-scarica e possibilità di recuperare alcuni materiali. Tuttavia, presentano anche limiti, tra cui il costo, la scarsità di alcune risorse primarie necessarie per la loro realizzazione e la loro tossicità. Nonostante ciò, il loro grande vantaggio è l'eliminazione di materiali inquinanti e pericolosi come piombo e cadmio.

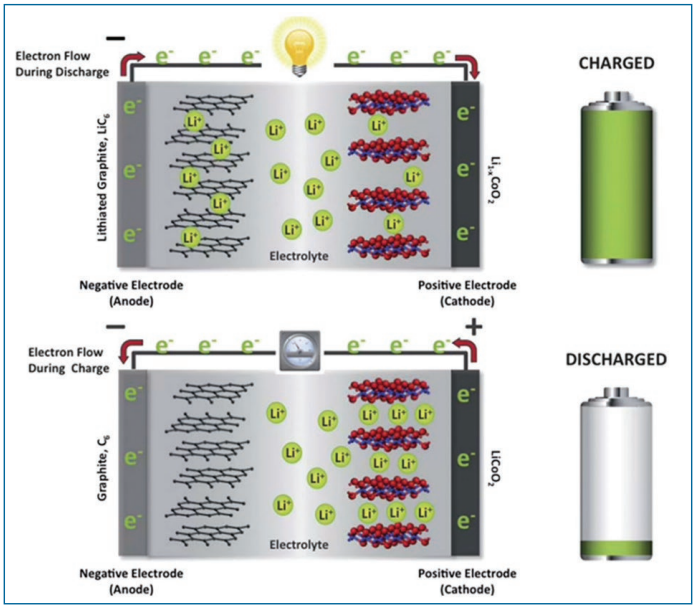


Figura 19: Principio di funzionamento della batteria agli ioni litio

Le batterie agli ioni di litio sono dispositivi elettrochimici caratterizzati dallo spostamento dello ione litio da un elettrodo all'altro, attraverso il separatore poroso. Durante la carica il litio migra dall'elettrodo positivo (catodo) verso quello negativo (anodo), mentre durante la scarica avviene lo spostamento nella direzione opposta (Figura 19).

Le più diffuse tipologie di batterie agli ioni litio utilizzano come catodo ossidi di metalli di transizione depositati su sottili lamine di alluminio e prendono il nome dai corrispondenti metalli presenti ($LiCoO_2$ = LCO; Litio-Ferro-Fosfato = LFP; $LiMn2O_4$ = LMO; ossidi di Litio, Nichel, Manganese e Cobalto = NMC; ossidi di Litio, Nichel, Cobalto e Alluminio = NCA). Nei prodotti commerciali, l'anodo è generalmente composto da grafite depositata su uno strato di rame, (per la sua capacità di intercalare gli ioni litio), mentre il litio forma con i vari ossidi l'elettrodo positivo; un elettrolita a base di sali di litio disciolti in solventi organici permette la conduzione ionica[15].
Le LIBs trovano applicazioni in diversi ambiti: elettronica di consumo, trasporti, energia di rete e industria. Sebbene i progressi delle batterie al litio siano stati significativi sin dalla loro introduzione, ci sono diverse sfide tecnologiche da affrontare per soddisfare le esigenze future, in particolare nel settore automobilistico. Rispetto all'elettronica di consumo, le applicazioni automobilistiche hanno requisiti tecnici più severi, come la densità energetica (che permette di ottenere batterie più piccole e leggere), la vita utile della batteria, il numero di cicli, l'intervallo di temperatura operativa e il costo.
Con l'aumento della domanda di metalli critici per la produzione di batterie, bisogna anche considerare il forte impatto ambientale e sociale derivante dall'estrazione di litio, nickel, cobalto e manganese. In particolare, due terzi del cobalto provengono dalla Repubblica Democratica del Congo, dove le condizioni lavorative nelle miniere sono spesso disumane. Inoltre, la dipendenza da queste risorse strategiche comporta nuove sfide geopolitiche per regioni come l'Unione Europea, che si trova a dover sostituire la dipendenza da fonti fossili con una dipendenza da materie prime estere. La normativa di riferimento europea è il re-

[15] *A. Zanoletti et al., Batteries 2024, 10, 38; https://doi.org/10.3390/batteries10010038*

golamento 2023/1542, entrato in vigore il 17 agosto 2023 sulle batterie sostenibili in sinergia con l'attuale normativa relativa ai critical raw materials.

Per soddisfare le esigenze del mercato in ambito di stoccaggio energetico, sarebbe auspicabile utilizzare nei sistemi di accumulo elettrochimico materiali abbondanti e poco costosi, nonché soluzioni sempre più innovative. Crescente interesse riveste l'applicazione di materiali sostenibili: un esempio è l'uso di materiali a base di carbonio ottenuti dalle biomasse, come il biochar, come anodi nelle batterie al litio oppure l'utilizzo del sodio come sostituto del litio.
Il biochar, anche chiamato bio-carbon, è un residuo solido prodotto dalla decomposizione termica della biomassa a temperature moderate (solitamente 350–700 °C) senza ossigeno o con un apporto di ossigeno limitato. Il biochar è oggetto di particolare interesse per le batterie al litio/sodio, in quanto può potenzialmente costituire un'alternativa agli anodi di grafite tradizionali.
In letteratura sono descritti nanofogli di carbonio altamente grafitici interconnessi (HGCNS), sintetizzati dalla biomassa del gambo di grano mediante processi combinati idrotermali e grafitizzazione. L'HGCNS così sintetizzato ha mostrato un'unica nanostruttura bidimensionale (2D) interconnessa con uno spessore di 1,0–2,0 nm, che corrisponde a circa 2–6 singoli strati di grafene. Tale nanostruttura 2D potrebbe non solo fornire più siti di stoccaggio del Li+, ma anche facilitare il rapido trasporto di elettroni e ioni Li+. Inoltre, l'HGCNS ha mostrato un grado di grafitizzazione molto elevato, che può determinare un plateau di tensione di carica-scarica basso e piatto, riducendo così notevolmente l'isteresi di tensione. Come materiale anodico nelle LIB, l'HGCNS così preparato ha fornito una capacità di 502 mA h g-1[16].

Tuttavia, la chimica di questi sistemi deve essere ulteriormente approfondita. È necessario uno studio sulla scienza delle superfici per portare le impurità o i residui a un livello trascurabile nel carbonio derivato dalla biomassa[17].

L'uso della biomassa come precursore del carbonio per produrre elettrodi è og-

[16] *SW.-J. Liu et al., Energy Environ. Sci., 2019, 12, 1751-1779*

[17] *N. S. Seroka et al., Batteries 2024, 10, 144*

getto di ricerca anche per altri dispositivi di stoccaggio energetico, ad esempio le batterie a flusso (Redox Flow Battery = RFB)[18]. In questa tipologia di batterie gli elettroliti liquidi sono contenuti in due serbatoi e da questi vengono flussati, tramite pompe, verso la cella elettrochimica dove sono posizionati gli elettrodi, separati da una membrana, sui quali avviene la reazione redox, che permette di convertire l'energia chimica in energia elettrica durante il processo di scarica e viceversa. Tipicamente, gli elettrodi utilizzati nelle RFB sono dei felt di carbonio.

La batteria a flusso più diffusa è al vanadio (Vanadium Redox Flow Battery = VRFB), in cui sia l'anolita che il catolita utilizzano ioni di vanadio con diversi stati di ossidazione (V^{2+}, V^{3+}, VO^{2+} e VO_2^{+}), riducendo al minimo l'effetto crossover, causa comune di malfunzionamenti e diminuzione delle prestazioni delle RFB. Gli elettrodi sono un componente nelle RFB: devono resistere al flusso continuo di elettrolita, devono possedere una struttura tridimensionale porosa, un'elevata area superficiale, siti attivi per le reazioni chimiche e consentire un efficiente trasporto degli elettroliti.
Recenti lavori riportati sul carbonio derivato dalla biomassa mostrano come gli elettrodi possano essere realizzati a partire da qualsiasi tipologia di biomassa (Figura 20).

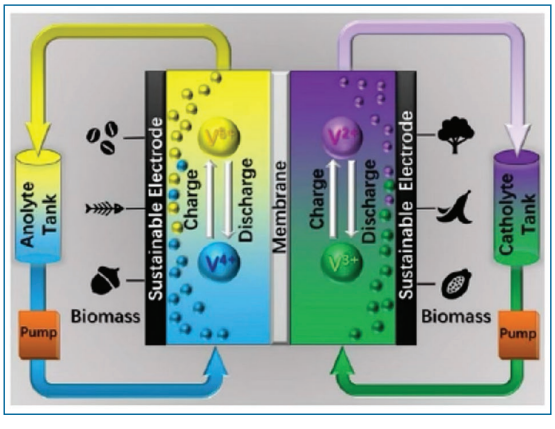


Figura 20: Principio di funzionamento di una VRFB con elettrodi di carbonio derivati da biomassa [18]

Tale approccio si è dimostrato semplice ed efficiente per aumentare la superficie elettrochimica attiva del feltro di carbonio. La scelta del biomateriale permette di modificare la composizione chimica dell'elettrodo e ottenere il drogaggio con elementi chimici o gruppi funzionali capaci di migliorare drasticamente le prestazioni elettrocatalitiche. L'uso di additivi durante la fase di carbonizzazione consente l'aumento dell'area superficiale e rappresenta una strategia per inserire eteroatomi attivanti come N, S o P.

Un'altra tipologia di batterie in flusso di più recente sviluppo è costituita dalle batterie in flusso organiche (ORFB) dove gli elettroliti sono costituiti da specie redox organiche. Anche per questa classe di RFB grande interesse viene posto sull'uso di materiali green nella componentistica.

Per quanto riguarda il settore della mobilità elettrica, le batterie a ioni sodio (SIB), sono le principali candidate ad affiancare le batterie al litio. Questi sistemi utilizzano fondamentalmente gli stessi principi operativi e architettura degli ioni litio e possono potenzialmente utilizzare gli stessi sistemi produttivi.

Nonostante Li e Na siano prossimi nella tavola periodica, l'elettrochimica che sottende i rispettivi ioni è spesso molto differente in conseguenza della dimensione di Na+ che risulta essere del 50% superiore a quella del Li+. Prendendo come esempio l'analogo del più comune materiale catodico usato nelle batterie a ioni litio, $NaCoO_2$, questo mostra prestazioni elettrochimiche di ciclo come voltaggi di carica/scarica decisamente inferiori rispetto a $LiCoO_2$. Per questo motivo lo studio è volto allo sviluppo di nuovi materiali principalmente a base ossidica (come $NaFeO_2$), a base polianionica (i.e. solfati, ossalati fosfati, etc.) e composti di tipo blu di Prussia. Tuttavia, il fattore limitante di questi sistemi è il comparto anodico a causa del massiccio aumento di volume durante i processi di carica/discarica che portano al rapido deterioramento strutturale del comparto. Tra i materiali in fase di studio, la grafite (molto utilizzata nei sistemi a base litio) mostra capacità molto basse (30-35 mA/g) mentre migliori performance si ottengono con composti carboniosi non grafitici (300 mA/g) come leghe di stagno, antimonio o fosforo[19] o composti grafenici.

[19] *Oxford Open Materials Science, 2023, 3(1)*

Discorso a parte meritano le batterie ZEBRA, generalmente indicate come batterie al sale. Queste usano polvere di nichel e sodio cloruro per gli elettrodi mentre l'elettrolita (che funge anche da separatore) è un materiale ceramico a base di sodio beta allumina (b"-Al_2O_3) isolante elettrico ma conduttivo agli ioni Na+ (Figura 21) a temperature superiori ai 250 °C.

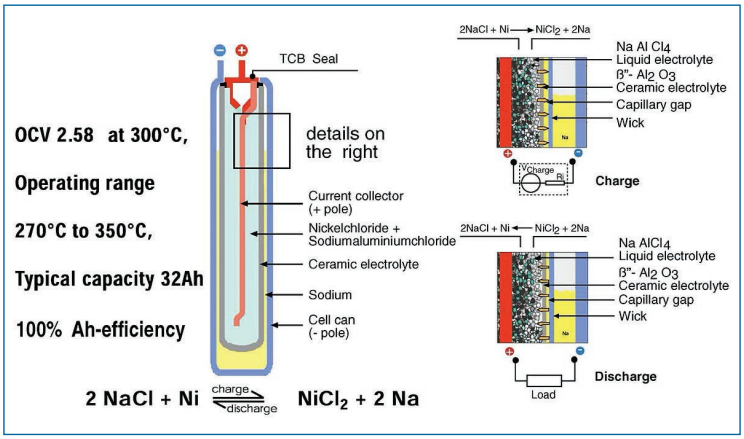


Figura 21: Principali reazioni coinvolte nei processi di carica e scarica di una batteria ZEBRA [Fonte: C.-H. Dustmann / Journal of Power Sources 127 (2004) 85–92)]

In queste batterie il processo di carica e scarica avviene tramite il passaggio dello ione sodio attraverso l'elettrolita solido di sodio beta allumina generalmente drogato con elementi a bassa valenza per aumentarne le performances. Perché la cella esibisca buone performance elettrochimiche e una bassa resistenza elettrica, come conseguenza dell'utilizzo di elettrolita ceramico solido, queste batterie lavorano a temperature tra i 300 °C e i 350 °C. In questo regime, il sodio all'anodo si trova allo stato fuso (la sua temperatura di fusione è infatti di 98 °C) mentre il comparto catodico è generalmente composto da una struttura porosa di Nichel e Sodio Cloruro impregnati con NaAlCl4 (da qui il nome di batterie al sale) che alla temperatura di esercizio è allo stato fuso (Tfusione=154 °C) e quindi conduttivo per gli ioni sodio. Questo elettrodo può anche essere sostituito da un feltro di grafite impregnato con S/Na2Sx ottenendo quelle che generalmente vengono

indicate come batterie sodio-zolfo.
Nonostante siano già presenti prodotti commerciali (si veda paragrafo seguente) come conseguenza di proprietà eccellenti in termini di densità di energia teorica, efficienza di carica e scarica e buon ciclo di vita, una penetrazione più ampia nel mercato delle batterie ZEBRA richiede sforzi maggiori per aumentarne le performance e il costo attraverso l'uso di nuovi materiali, nuove architetture di celle e di sistemi. La natura dei materiali coinvolti la rende inoltre particolarmente adatta allo sviluppo nel territorio italiano, considerata la natura essenzialmente ceramica del materiale elettrolitico che quindi ben si concilia con le eccellenze nazionali.
Tra le principali linee di sviluppo è quella volta alla riduzione della temperatura di esercizio che permetterebbe un miglioramento sensibile della vita operativa della cella, l'utilizzo di materiali per la cella e lo stack di minor costo, un più facile management termico del sistema con conseguente aumento dell'utilizzo della tecnologia. Per far questo sono allo studio materiali elettrolitici più efficienti come NASICON o materiali vetro-ceramici conduttori di ioni sodio. Allo stesso modo, la struttura tubolare a sezione quadrilobata dominante pone severe problematiche in termini di produzione, ma anche di ingombro e peso. Sono quindi notevoli gli sforzi per spostarsi verso una geometria planare che permetta un incremento delle densità di energia e di corrente e un più semplice processo di produzione. Tuttavia, un cambio così drastico di geometria richiede ancora grossi sforzi in termini di sviluppo di materiali, specialmente quelli relativi alla sigillatura che in questa configurazione risulta particolarmente critica. Importanti fattori che spingono per un loro ulteriore sviluppo è l'intrinseca sicurezza (non c'è pericolo di esplosione) è la possibilità di un riciclo pressoché totale.
Vale infine ricordare che, così come attualmente in atto per le batterie al litio, anche per le batterie al sodio c'è una notevole attività verso lo sviluppo di batterie completamente solide che, oltre a eliminare i notevoli problemi di leakage e quindi la necessità di opportuni sistemi di sigillatura, eviterebbero definitivamente le problematiche di sicurezza che hanno funestato le batterie di prima generazione.

Motivazioni per lo sviluppo

La crescente necessità di sistemi di accumulo e le limitazioni legate alla disponibilità di litio (elemento fondamentale per lo sviluppo di questi sistemi) e cobalto hanno portato alla ricerca di sistemi in grado di utilizzare materie prime non critiche che siano facilmente riciclabili e possibilmente non composte da materie prime critiche.

Per quanto riguarda l'uso di biochar, i principali vantaggi che lo rendono un candidato interessante per le applicazioni delle batterie sono:

- **Abbondante e rinnovabile:** Il biochar può essere prodotto da varie fonti di biomassa, come i rifiuti agricoli, i residui forestali e persino i rifiuti organici domestici.
- **Struttura porosa:** Il biochar possiede una struttura porosa con un elevato range di area superficiale, che può fornire ampi siti per l'adsorbimento e l'intercalazione di ioni di litio/sodio.
- **Stabilità chimica:** Il biochar mostra una buona stabilità chimica, che è cruciale per garantire la durata e la stabilità ciclica a lungo termine delle batterie.
- **Costo basso:** La produzione di biochar può essere economica, specialmente se derivata da materiali di biomassa residua.

Per quanto riguarda le batterie a base sodio, il loro sviluppo è principalmente legato alla necessità di limitare i rischi collegati all'utilizzo di litio sia in termini ambientali che di disponibilità. Il costo di questo elemento, e del corrispondente composto catodico LiCoO2, è infatti più che raddoppiato dal 2015 al 2019, nonostante nello stesso periodo ne sia aumentata la produzione e siano state identificate nuove riserve geologiche. Queste ultime non hanno fatto altro che confermare la distribuzione localizzata in praticamente solo 12 siti in Australia, Argentina, Cile, e Cina. L'estrazione del litio, inoltre, pone importanti preoccupazioni di carattere ambientale, sia per la possibilità di sversamenti tossici nell'ambiente dovuti al processo, sia per l'utilizzo di grandi quantità di acqua in ambienti già di per sé aridi. Sebbene l'industria stia sviluppando sistemi di riciclo sempre più efficienti, l'aumento di richiesta di batterie previste dalla transizione ecologica non potrà essere soddisfatta dal recupero di materiali da batterie esauste. Per quanto

riguarda gli altri aspetti legati ai materiali, sebbene la presenza di cobalto ponga preoccupazioni per la scarsità e geolocalizzazione dello stesso, questo è presente in quantità minime o assente utilizzando catodi a base di manganese alluminati. Più impattante risulta essere il collettore di corrente anodico, che nel caso del litio deve essere di rame per evitare la formazione di leghe mentre nel caso, di batterie al sodio può tranquillamente essere sostituito con fogli di alluminio con un notevole risparmio.

Stato dell'arte

Una delle maggiori sfide per il settore produttivo delle batterie è migliorare le prestazioni per garantire una maggiore autonomia ai veicoli elettrici e ad altri dispositivi. La ricerca si sta focalizzando molto sulla modifica degli elementi costitutivi che compongono le batterie, non solo sui materiali ma anche sui metodi produttivi. In particolare:

- **TELF AG** riporta per esempio l'uso di materiali bio-based. In collaborazione con il CNR, è stata trovata una metodologia per produrre elettrodi di derivazione biologica. Questi elettrodi sono formati da due componenti: 1) carbonio nanostrutturato, che rappresenta una delle fonti di carbonio in grado di condurre elettricità; 2) particolari biopolimeri, prodotti da alcuni batteri come riserva energetica, che terrebbero insieme le polveri costituenti gli elettrodi, rendendoli flessibili e resistenti dal punto di vista meccanico.
- **General Motors** (GM) ha recentemente concluso un importante contratto di fornitura di materiale per batterie del valore di 19 miliardi di dollari con la sudcoreana LG Chem. In base all'accordo, LG Chem fornirà materiali catodici attivi fino al 2035, sufficienti ad alimentare fino a 5 milioni di automobili prodotte da GM.
- **Toyota, Hyundai e BYD** stanno migliorando internamente le loro capacità per lo sviluppo di materiali per elettrodi e vari altri componenti cruciali per la tecnologia delle batterie.
- **Umicore** ha costituito nell'ottobre 2023 una joint venture con PowerCo, una divisione di Volkswagen, per fornire materiali per elettrodi catodici sostenibili in Europa.

• **Toshiba** ha stretto un accordo con EVAge per fornire materiali attivi per elettrodi per batterie agli ioni di litio, in grado di alimentare fino a 10.000 furgoni elettrici.
• **Mercedes Benz** ha dichiarato che svilupperà in collaborazione con la società CMBlu Energy un sistema di stoccaggio Organic Solid Flow. Il materiale utilizzato sarà la lignina posta in due serbatoi separati e combinata per una reazione biochimica in un'unità speciale. Secondo i produttori, il materiale è organico, non infiammabile, non esplosivo e può resistere a più di 10.000 cicli di ricarica.

Per le batterie a ioni sodio, oltre a un'intensa attività scientifica volta allo sviluppo di nuovi materiali in grado di superare gli attuali limiti, alcune aziende hanno già cominciato a produrre prototipi da inserire nel mercato. Tra queste (senza la pretesa di essere esaustivi):
• **Natron Energy Inc.** (California, USA) utilizza come materiali elettrodici il blu di Prussia. L'azienda ha aperto un sito produttivo di batterie a ioni sodio nel 2024 ad Holland (Michigan, USA) diventando il più grande sito produttivo di questo tipo di batterie negli USA.
• **Hina Battery Technology Co. Ltd.** (Cina) utilizza Na-Cu-Fe-Mn-O e carbone soft a base antracite come materiali rispettivamente catodico e anodico. Alla fine del 2022 HiNa Battery ha inaugurato la sua prima linea di produzione a scala di GWh a Fuyang (Cina). La linea di produzione è parte di un Progetto da 5GWh necessario a servire essenzialmente il mercato asiatico e del Pacifico.
• **Jiangsu Zoolnasm Energy Technology Co. Ltd** (Cina) ha aperto la prima linea di produzione di batterie ioni sodio che utilizzano materiali polianionici come il sodio ferro solfato in Guangde (Cina). L'impianto mira a raggiungere la produzione di 20GWh di celle a ioni sodio.
• **Faradion Ltd.** (Sheffield, UK), acquisita successivamente dall'Indiana Reliance New Energy Solar, è stata la prima azienda a sviluppare una batteria a ioni sodio in ambiente non acquoso.
• **Altris AB** (Uppsala, SWE) si caratterizza per la presenza di materiali catodici ampiamente disponibili e sostenibili.

• **Contemporary Amperex Technology Co. Ltd** (CATL) ha annunciato la prima linea di produzione di batterie a ioni sodio e mira a raggiungere 20 GWh di capacità produttiva al 2030.

• **TIAMAT SAS** (Amiens, FRA) sviluppa celle a base sodio per la mobilità sostenibile. A fine 2023 l'azienda ha iniziato la costruzione del nuovo sito produttivo da 6 GWh, che si aspetta di raddoppiare al 2030.

Oltre a queste aziende si segnalano le importanti attività della Sumitomo Chemical Co.Ltd., focalizzate sullo sviluppo di celle con anodi a base hard-carbon e catodi $NaFe_{0.4}Mn_{0.3}Ni_{0.3}O_2$ e dei laboratori Sharp dove la cella a ioni sodio è caratterizzata da un catodo a base $NaNi_{1/3}Fe_{1/6}Mn_{1/3}Mg_{1/12}Sn_{1/12}O_2$.
A livello italiano non si hanno al momento linee di produzione attive, sebbene si registri un'intensa attività a livello di ricerca e sviluppo. Interessi industriali sono invece noti per quanto riguarda le batterie ZEBRA (Zero Emission Battery Research Activity). Queste sono attualmente sviluppate dalla Horien Salt Batteries (SUI). Le batterie zebra vedono al momento una potenza installata di circa 0,45GW/h, mentre le analoghe batterie Na-S, portate nel mercato nel 2002, sono installate in circa 200 siti mondiali con una capacità di circa 4GW/h. Le applicazioni principali sono in ambito residenziale, commerciale e industriale, mentre la loro attuale bassa densità di energia le rende al momento non particolarmente adatte alla mobilità elettrica. La loro limitata espansione è fondamentalmente legata allo sviluppo esponenziale dei sistemi a base litio operanti a temperatura ambiente. Attualmente il costo medio per una cella a ioni sodium è di $87 per kilowatt-ora (kWh), solo di poco inferiore a quelle al litio $89/kWh, ma il suo mercato di riferimento è destinato a crescere mediamente del 40% nei prossimi 10 anni raggiungendo globalmente oltre 4 miliardi di dollari nel 2030.

Risorse economiche necessarie

La sviluppo di sistemi tecnologici di questa portata richiede investimenti consistenti per poter assicurare una piena realizzazione della tecnologia. La dipenden-

za dell'Europa dalla Cina è quasi totale, come da quasi tutti i report[20], nonostante l'Europa sia il maggior produttore mondiale di veicoli elettrici. Secondo il report, la sfida per l'Italia va affrontata sviluppando circa 30 nuove gigafactories, portando la capacità a 550 GWh dagli attuali 75, corrispondenti a circa 70 miliardi di euro di investimenti. Le ripercussioni occupazionali sulla produzione di batterie al litio riguarderebbero per l'Italia circa 8600 nuovi posti di lavoro di personale specializzato e 165.000 in Europa al 2030. Questi dati non contengono le ricadute occupazionali sulla produzione delle materie prime e il riciclo. In una batteria al litio, il 51% del costo riguarda il catodo, il 12% l'anodo, il 24% la manifattura (processo produttivo) della batteria.

Inoltre, la produzione di celle a ioni sodio può beneficiare delle tecnologie già utilizzate per l'analogo a litio, e lo sviluppo di sistemi ZEBRA o all-solid passa necessariamente attraverso processi produttivi più complessi ed energeticamente più impattanti che devono per cui essere attentamente e maggiormente ingegnerizzati per limitarne l'impatto. Inoltre, la possibilità di sviluppare tecnologie con materiali facilmente reperibili la rende appetibile per lo sviluppo nazionale/europeo e lo sviluppo di una corrispondente ecosistema di sviluppo della filiera comprendente anche la componentistica necessaria al balance of plant complessivo dei sistemi di accumulo.

[20] *N.M. Carnevali et al., Una filiera di batterie a litio per veicoli elettrici. Re-industrializzazione e occupazione per l'Italia; Orizzonti politici, Settembre 2023*

FUNZIONALIZZAZIONE CHIMICA DI SMART SENSORS PER IL RILEVAMENTO SELETTIVO

L'obiettivo di questa tecnologia è quello di sviluppare sensori funzionalizzati chimicamente per il monitoraggio dei contaminanti chimici e/o microbiologici in varie matrici.
Questi sensori, progettati per interagire con specifiche molecole o microrganismi attraverso rivestimenti chimici superficiali come anticorpi, enzimi o aptameri, possono identificare selettivamente un analita specifico e trovare così applicazione in ambienti reali complessi in cui l'analita si trova disperso a bassa concentrazione e in presenza di molteplici interferenti naturali. Le attuali tecniche analitiche di laboratorio permettono di soddisfare le ultime due esigenze, ma non sono in grado di dare delle risposte in tempo reale.
Le caratteristiche ideali che devono possedere questi sensori sono una elevata sensibilità e selettività nei confronti della molecola/microrganismo target, rapidità nella rilevazione, stabilità, semplicità nell'utilizzo e basso costo

Come gli smart sensors in generale, anche quelli funzionalizzati chimicamente possono incorporare microprocessori per elaborare i segnali in locale e connettività wireless per comunicare risultati in tempo reale o trasmettere dati grezzi per elaborazioni in remoto, facilitando monitoraggi continui e interventi tempestivi.
Sono numerosi i settori industriali, tecnologici e biomedicali che hanno l'esigenza di tenere sotto controllo il livello di contaminanti chimici e microbiologici delle acque utilizzate e degli ambienti di lavoro e pubblici. I principali ambiti di applicazione di questi sensori avanzati includono:

- **Monitoraggio ambientale:** Utilizzati per rilevare contaminanti come metalli pesanti e microrganismi patogeni in ambienti acquatici e terrestri, contribuendo significativamente alla protezione e alla conservazione dell'ambiente.
- **Sicurezza alimentare:** Impiegati per identificare la presenza di patogeni o tossine nei cibi e nelle bevande, migliorando la sicurezza dei prodotti alimentari e prevenendo rischi per la salute pubblica.
- **Salute pubblica e sicurezza nazionale:** Utilizzati in contesti biomedici per rilevare agenti patogeni in campioni biologici, e per il monitoraggio di minacce

biologiche potenziali, giocando un ruolo cruciale nella prevenzione e gestione delle emergenze sanitarie.

Inoltre, l'impiego di sensori che siano in grado di dare delle risposte immediate direttamente sul luogo di interesse, consentirà di ridurre la necessità di compiere campionamenti e analisi di laboratorio, richiedenti tempo e consumabili, riducendo di conseguenza i costi e l'impatto ambientale associato. Inoltre, potranno consentire delle diagnosi precoci in prossimità del paziente, e direttamente nel sito di interesse, diverso da quello ospedaliero (ambienti pubblici, es. aeroporti, situazioni di emergenza). Questo risulta cruciale per ostacolare la diffusione di malattie altamente trasmissibili come morbillo, influenza e ad es. COVID.

Il campo dei sensori intelligenti, funzionalizzati chimicamente, rappresenta un campo in rapida evoluzione, caratterizzato dall'adozione di materiali innovativi e tecnologie multidisciplinari come la microfluidica e la biosensoristica[21].
Questi sensori, caratterizzati dal fatto di operare su scala nanometrica, offrono selettività, velocità e sensibilità migliorate rispetto ai metodi tradizionali nell'identificare specifiche molecole e microrganismi anche in presenza di interferenti, con applicazioni cruciali in sicurezza alimentare, sanità e monitoraggio ambientale[22]. La possibilità di lavorare su piccoli volumi si traduce sia in un risparmio di reagenti, spesso molto costosi, sia nella possibilità di utilizzare basse quantità e concentrazioni di analita o campione biologico. I vantaggi derivanti dall'utilizzo di questi sensori consistono in un minor costo di reagenti, minori tempi di analisi e maggiore efficienza energetica e di reazione (alto rapporto tra la superficie sensibile e il volume del fluido); compattezza e portabilità del sistema, dovuta alla grande facilità di integrazione di diverse funzionalità e piccoli volumi; facilità di parallelizzazione dovuta alla compattezza, che rende possibili analisi multiple sullo stesso chip. Utilizzando nanomateriali come nanoparticelle metalliche, i nanosensori funzionalizzati possono rilevare molecole bersaglio

[21] *Mahmoud Z. H., Salman H. N. K. A., Hussein H. H., Adhab A. H., Al-Majdi K., Rasheed T., Abdulhussien H. A., Sasirekha N., Abd A. N., Kianfar E. (2024). Organic chemical Nano sensors: synthesis, properties, and applications, "Brazilian Journal of Biology", 84, e268893. https://doi.org/10.1590/1519-6984.268893*

[22] *Mahmoud Jarbas Caiado de Castro Neto, Francisco Eduardo Gontijo Guimarães (2023), Functionalization of nanostructured surfaces for optical sensor platforms. 12572:1257212-1257212. https://doi: 10.1117/12.2664866*

anche a basse concentrazioni[23],[24] portando ad applicazioni pratiche come la rilevazione di gas pericolosi[25].

Gli ultimi sviluppi nella ricerca in questo settore vedono l'impiego di materiali nanostrutturati come i nanotubi di carbonio, il grafene e nanoparticelle polimeriche che migliorano le prestazioni dei sensori grazie alle loro estese superfici e proprietà elettroniche uniche, facilitando interazioni molecolari mirate e potenziando i segnali di rilevamento.

Altre tecnologie di rilevazione impiegate, tra cui i sensori a onda acustica superficiale (SAW) e sensori elettrochimici, sono funzionalizzati in superficie in base alle specifiche applicazioni, come la rilevazione di patogeni o tossine. L'integrazione dei nanomateriali con molecole recettori aumenta il potenziale di rilevamento, in particolare nei biosensori elettrochimici per la diagnosi e la prognosi delle malattie[26].

Di seguito si riportano alcuni esempi presenti in letteratura di sensori funzionalizzati e delle loro applicazioni ad oggi più sviluppate:

- Sensore nanostrutturato a base polimerica utilizzato per rilevare inquinanti ambientali come metalli pesanti Pb, Cd, Cr, Zn[27].
- Sensore ad onda acustica superficiale, SAW, che funzionalizzato in maniera opportuna con anticorpi specifici, è in grado di rilevare la presenza di agenti patogeni in fluidi biologici come il Morbillo nella saliva, o nell'acqua della rete idrica come la Legionella[28],[29].
- Sensore funzionalizzato con aptameri (oligonucleotidi di sintesi) in grado di rilevare micotossine, come ad esempio la presenza di OTA in campioni di vino e birra[30].

[23] *E. N. Golovchenko (2023), Functional Nanomaterials for Chemical Sensors. 149-170. doi: 10.1201/9781003263852-8*

[24] *Rahma Dhokar (2023), Advanced functionalized nanomaterial–based electrochemical biosensors for disease diagnosis. 437-466. doi: 10.1016/b978-0-323-95253-8.00016-4*

[25] *Jing Li, Yijiang Lu, "Nanostructure-engineered chemical sensors for hazardous gas and vapor detection", Proc. SPIE 5593, Nanosensing: Materials and Devices, (29 December 2004). https://doi.org/10.1117/12.570528*

[26] *Navashree Nagarajan., Parthasarathy Panchatcharam (2023). A Review on Functionalized Biosensors and its Mechanism Behind the Clinical Diagnosis of Dopamine. 1-7. doi: 10.1109/ICECCT56650.2023.10179822*

[27] *A. Malara et al., "Electrospun Nanofibers and Electrochemical Techniques for the Detection of Heavy Metal Ions", Materials 2021, 14, 3000*

[28] *M. Gagliardi et al., "Surface acoustic wave-based lab-on-a-chip for the fast detection of Legionella pneumophila in water", Sensors and Actuators B: Chemical, Volume 379, 2023, 133299*

[29] *M. Agostini et al., "Surface-Acoustic-Wave (SAW) Induced Mixing Enhancesthe Detection of Viruses: Application to Measles Sensingin Whole Human Saliva with a SAW Lab-On-a-Chip", Adv. Funct. Mater. 2022, 32, 2201958*

[30] *Zhang Sai, Yahui Wang, Qinglin Sheng, Tianli Yue, 2023. "Electrochemical Aptasensor Based on ZnO-Au Nanocomposites for the Determination of Ochratoxin A in Wine and Beer" Processes 11, no. 3: 864*

Tale tecnologia può essere in sintonia con più di un cluster tecnologico nazionale, la funzionalizzazione chimica infatti rende tali sensori funzionali in diversi ambiti, ad esempio con lo sviluppo tecnologico nazionale del cluster **"Scienze della Vita"** che valorizza e promuove la ricerca e l'innovazione per favorire la crescita della filiera delle scienze della vita. In particolare, mostra coerenza con la **roadmap** "Diagnostica avanzata, medical device e mini invasività", tali sensori opportunamente funzionalizzati possono infatti contribuire allo sviluppo di soluzioni diagnostiche meno invasive e rapide. Un altro cluster tecnologico in cui può operare tale tecnologia è la **"Fabbrica Intelligente",** infatti i sensori chimicamente funzionalizzati possono rappresentare delle soluzioni innovative per monitorare i processi produttivi in tempo reale, per un'ottimizzazione del processo stesso e delle risorse offendo sostegno ad una produzione intelligente e sostenibile. Infine, può essere in sintonia anche con il cluster **"Agrifood Nazionale",** in particolare per quanto riguarda l'area strategica della sicurezza alimentare; infatti, se opportunamente funzionalizzati tali sensori possono rilevare la presenza di micotossine negli alimenti.

Nonostante i progressi significativi, persistono sfide come il miglioramento della stabilità a lungo termine, la riduzione dei costi, e la semplicità d'uso. Inoltre, la standardizzazione e la regolamentazione rappresentano ostacoli rilevanti per l'adozione diffusa di questi sensori avanzati. La ricerca futura continuerà a concentrarsi su queste aree, mirando a sviluppare dispositivi ancora più precisi, economici e facili da utilizzare per rispondere efficacemente alle esigenze di vari settori. Inoltre, l'uso di sensori in applicazioni come il monitoraggio della salute o la sicurezza nazionale solleva questioni etiche e preoccupazioni per la privacy. Sarà essenziale stabilire chiari protocolli per il trattamento dei dati raccolti e assicurare che siano protetti e utilizzati eticamente.
Affrontare queste criticità richiederà un approccio coordinato che coinvolga ricercatori, industrie, regolatori e consumatori per sviluppare soluzioni che siano economicamente accessibili, tecnicamente avanzate, eticamente accettabili e ampiamente adottate.

Motivazione per lo sviluppo

Lo sviluppo degli smart sensors è guidato da motivazioni che intrecciano sfide tecnologiche, esigenze di mercato e potenziali impatti su vasta scala in diverse aree della società e dell'ambiente. Questi sensori rappresentano una fusione di progressi in vari campi scientifici e tecnologici, inclusa la chimica, la bioingegneria, e l'informatica, in quanto devono essere progettati per rispondere rapidamente e in modo selettivo a stimoli specifici nel loro ambiente. Il campo degli smart sensors è infatti caratterizzato sia dall'impiego di materiali innovativi che dall'adozione di tecnologie multidisciplinari come la microfluidica e la biosensoristica. La miniaturizzazione e l'utilizzo di materiali a scala nanometrica sono necessari in quanto migliorano la selettività, la velocità, e la sensibilità di questi dispositivi rispetto ai metodi tradizionali ottimizzando interazioni molecolari mirate, e potenziando i segnali di rilevamento.

Nonostante il notevole avanzamento tecnologico degli ultimi anni, permangono ad oggi sfide significative come la necessità di migliorare la stabilità a lungo termine dei sensori, ridurre i costi, elaborare efficacemente i dati, e semplificarne l'uso. Inoltre, la standardizzazione e la regolamentazione, che oggi non li coinvolgono, rappresentano ostacoli significativi per l'adozione diffusa di questi dispositivi avanzati.

Il time to market per la commercializzazione di smart sensors funzionalizzati chimicamente ad oggi è incerto e variabile e può estendersi fino a 5 anni, influenzato da diverse fasi cruciali. La maggior parte degli smart sensors si trova infatti in uno stadio di sviluppo avanzato, tipicamente tra TRL 4 e 6, con previsioni di raggiungere una maturità industriale completa (TRL 9) entro 3-5 anni, a seconda del segmento e dell'applicazione.

Questa tempistica può accelerarsi o rallentare in base alla disponibilità di finanziamenti, collaborazioni industriali e accademiche, nonché dalla maturità delle tecnologie abilitanti esistenti. L'accelerazione del time to market richiede un approccio coordinato che coinvolga ricercatori, industrie, regolatori e consumatori per sviluppare soluzioni che siano economicamente accessibili e tecnicamente avanzate.

Rilevanza

Gli smart sensors possono avere un impatto significativo su diverse transizioni fondamentali:

- Digitale: in quanto forniscono dati in tempo reale per il monitoraggio e la gestione intelligente di processi in ambienti vari, dalla manifattura all'ecosistema urbano.
- Ambientale: in quanto contribuiscono alla sostenibilità tramite il monitoraggio di inquinanti e altre variabili ambientali critiche, supportando così l'azione per il clima e la conservazione delle risorse; inoltre, possono contribuire a sistemi di gestione ambientale più efficaci, aiutando così a mitigare l'impatto delle attività umane.
- Sociale: in quanto contribuiscono al miglioramento della qualità della vita e della sicurezza pubblica tramite il monitoraggio sanitario e la rilevazione precoce di patogeni.

In base a queste considerazioni è possibile sostenere che gli smart sensors funzionalizzati possano contribuire ai seguenti indicatori SGDs

- Salute e benessere (SDG 3): monitorando la presenza di agenti patogeni, inquinanti e altre minacce sanitarie nell'ambiente e negli ospedali contribuendo alla prevenzione di malattie respiratorie e infezioni nosocomiali.
- Acqua pulita e igiene (SDG 6): monitorando la qualità dell'acqua possono rilevare contaminanti chimici e biologici in tempo reale. Questo permette interventi rapidi per prevenire l'inquinamento delle risorse idriche, garantendo accesso ad acqua pulita e sicura per consumo e igiene.
- Azione per il clima (SDG 13): monitorando vari parametri ambientali, possono essere utilizzati per raccogliere dati essenziali per la ricerca climatica e per l'implementazione di strategie di mitigazione e adattamento ai cambiamenti climatici. Inoltre, contribuiscono al monitoraggio dell'impatto delle azioni umane sull'ambiente, supportando politiche e pratiche più sostenibili.

Indicatori di impatto

Impatto Politico ed Economico

Gli smart sensors possono aumentare la competitività delle industrie europee e nazionali migliorando l'efficienza dei processi e riducendo i costi operativi, portando a una maggiore profittabilità. Inoltre, stimolano la creazione di nuovi posti di lavoro in settori ad alta tecnologia e possono aumentare le esportazioni di tecnologie innovative.

Le aree tecnologiche con maggiore impatto sono:

Produttività: monitoraggio ed ottimizzazione dei processi, ottimizzazione delle risorse.

Occupazione: nuove opportunità di lavoro in campi come la data science, l'ingegneria dei sensori, il controllo di qualità, e la manutenzione predittiva.

Sicurezza nazionale: rilevazione e identificazione di minacce chimiche e biologiche, migliorando la capacità di risposta a incidenti o attacchi in aree critiche come aeroporti, stazioni ferroviarie e altri nodi di trasporto.

Inoltre, gli smart sensors funzionalizzati sono in linea con iniziative come i Cluster Tecnologici Nazionali e il Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR Missione 1, 2 e 6), che mirano a promuovere l'innovazione e lo sviluppo tecnologico in settori chiave per l'economia.

In particolare, la presente tecnologia può essere inclusa nei seguenti cluster tecnologici nazionali:

- **Scienze della vita:** per diagnosi precoci e prevenzione
- **Fabbrica intelligente:** per monitoraggio processi
- **Agrifood:** per sicurezza alimentare e per monitoraggio qualità

Può essere inclusa anche nelle seguenti missioni del PNRR:

- **Missione 1:** perché forniscono dati in tempo reale per il monitoraggio e la gestione intelligente di processi in ambienti vari, dalla manifattura all'ecosistema urbano

• **Missione 2:** perché contribuiscono alla sostenibilità tramite il monitoraggio di inquinanti e altre variabili ambientali critiche, supportando così l'azione per il clima e la conservazione delle risorse; inoltre, possono contribuire a sistemi di gestione ambientale più efficaci, aiutando così a mitigare l'impatto delle attività umane

• **Missione 6:** perché contribuiscono al miglioramento della qualità della vita e della sicurezza pubblica tramite il monitoraggio sanitario e la rilevazione precoce di patogeni.

Impatto Industriale

Si stima che il mercato mondiale dei nanosensori in generale, di cui gli smart sensors fanno parte, avrà una dimensione di 0,98 trilioni di dollari nel 2025 e si prevede che raggiungerà 1,68 trilioni di dollari entro il 2030, con un CAGR dell'11,35% nel periodo di previsione (2025-2030)[31].

In particolare, gli investimenti in smart sensors continueranno a crescere sia a livello nazionale che globale, riflettendo la loro importanza trasversale in numerosi settori; questi dispositivi trovano infatti applicazione in una vasta gamma di settori, dall'alimentare alla sanità, dalla sicurezza nazionale al monitoraggio ambientale, funzionando come catalizzatori per l'innovazione.

Le aree applicative e/o catene del valore maggiormente interessate sono:

Monitoraggio ambientale: rilevazione di inquinanti come metalli pesanti, composti organici volatili, e agenti patogeni nell'aria, nell'acqua e nel suolo. La catena del valore include la produzione di sensori, integrazione nei sistemi di monitoraggio, analisi dati e servizi di consultazione ambientale.

Salute e sicurezza pubblica: rilevazione di patogeni, virus, e biomarcatori per il monitoraggio della salute umana e la prevenzione delle malattie. La catena del valore comprende la ricerca e sviluppo, produzione di dispositivi medici, distribuzione attraverso ospedali e cliniche, e analisi dati per supporto decisionale in campo medico.

Sicurezza alimentare: identificazione di contaminanti, come tossine, batteri e residui di pesticidi, in vari prodotti alimentari. La catena del valore include la

[31] *https://www.mordorintelligence.it/industry-reports/global-nanosensors-market-industry*

produzione di sensori, integrazione in linee di produzione, monitoraggio qualità e certificazioni di sicurezza.
Industria chimica e farmaceutica: monitoraggio di reazioni chimiche in tempo reale. La catena del valore in queste industrie include la R&D, controllo di qualità durante la produzione, e la conformità con le normative di sicurezza.

Impatto Etico, Legale, Sociale e Ambientale

Gli smart sensors sono cruciali per il monitoraggio ambientale e la gestione delle risorse, contribuendo direttamente a obiettivi come l'azione per il clima (SDG 13) e la vita sott'acqua e sulla terra (SDGs 14 e 15). Possono contribuire infatti alla rilevazione della presenza di sostanze chimiche nocive e agenti inquinanti in ambienti vari, come l'acqua, l'aria e il suolo.
Migliorano la sicurezza e la salute pubblica attraverso il monitoraggio e la rilevazione precoce di pericoli ambientali e sanitari, contribuendo agli obiettivi di salute e benessere (SDG 3).
Possono inoltre contribuire all'efficientamento delle risorse ottimizzando l'uso di risorse primarie (energia, acqua) grazie al monitoraggio dei processi produttivi e riduzione di sprechi e rifiuti.
Un aspetto critico che resterà da valutare per ogni singola soluzione tecnologica messa a punto, potrà essere la valutazione dell'impatto ambientale e sociale relativo alla produzione e allo smaltimento a fine vite di tali sensori, in base alle sostanze e ai materiali che vengono utilizzati per la funzionalizzazione specifica dei sensori. Ad esempio, per la produzione di tali dispositivi potrà essere necessario utilizzare materiali rari e costosi, che potrebbero avere un impatto negativo sull'ambiente e/o sulle comunità locali, mentre a fine vita si potrebbero generare rifiuti elettronici (RAEE) difficili da smaltire/recuperare.

Sfide normative e legali

Ad oggi l'adeguamento normativo appare uno dei fattori di maggior sfida. Gli smart sensors devono conformarsi a regolamenti stringenti come la direttiva eco-design che richiedono un'attenta considerazione delle implicazioni legali

relative alla raccolta e all'uso dei dati, in linea con il Digital Service Act e il Digital Market Act. Altre normative a cui possono fare riferimento gli smart sensors sono:
General Data Protection Regulation (GDPR): questa normativa può influire su come i dati raccolti dai sensori, che possono includere informazioni personali, vengono gestiti, protetti e utilizzati.
RoHS (Restriction of Hazardous Substances in Electrical and Electronic Equipment – Normativa 2011/65/CE): sensori che fanno parte di dispositivi elettronici devono conformarsi a questa direttiva per limitare la presenza di sostanze come piombo, mercurio e cadmio, che potrebbero essere utilizzate nei processi di fabbricazione dei sensori.

Stato dell'arte in Italia e all'estero

I sensori funzionalizzati chimicamente rappresentano una parte significativa della ricerca attuale nel campo dei sensori in generale. Questi sono progettati in maniera tale da rilevare specifiche molecole/microrganismi bersaglio attraverso un'interazione chimica selettiva tra il rivestimento funzionalizzato o molecola sonda del sensore e l'analita o microrganismo target da rilevare.
Gli articoli scientifici pubblicati dal 2021 ad oggi, che trattano l'argomento dei sensori funzionalizzati chimicamente, sono 17.700, in particolare solo dal 2024 ad oggi sono circa 17.000.
I brevetti pubblicati che trattano l'argomento dal 2005 ad oggi sono invece 29.000, di seguito è riportato un grafico dell'andamento del numero di pubblicazione in funzione dell'anno. Dal grafico si può osservare come il dato mostra un andamento crescente negli anni, seppur con un certo rallentamento dal 2021 al 2024, che si attende anche per il 2025[32].

[32] *ARCHA. Ricerca brevettuale sull'andamento delle pubblicazioni relative ai "chemically functionalized sensor" (2006–2025). Dati estratti tramite la piattaforma PatSnap, 22 gennaio 2025. (Fonte: Elaborazione ARCHA su dati PatSnap, 22 gennaio 2025).*

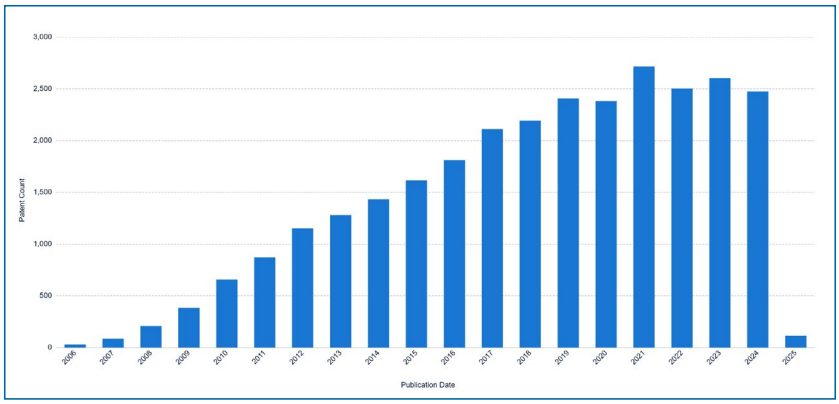


Figura 22: Andamento del numero di pubblicazioni dal 2006 al 2025 estratto dalla ricerca brevettuale effettuata sull'argomento "chemically functionalized sensor" effettuata da ARCHA tramite piattaforma PatSnap in data 22 gennaio 2025

Il paese con il maggior numero di brevetti pubblicati sull'argomento a livello mondiale nell'intervallo di tempo considerato, sono gli Stati Uniti, come è mostrato nel grafico seguente.

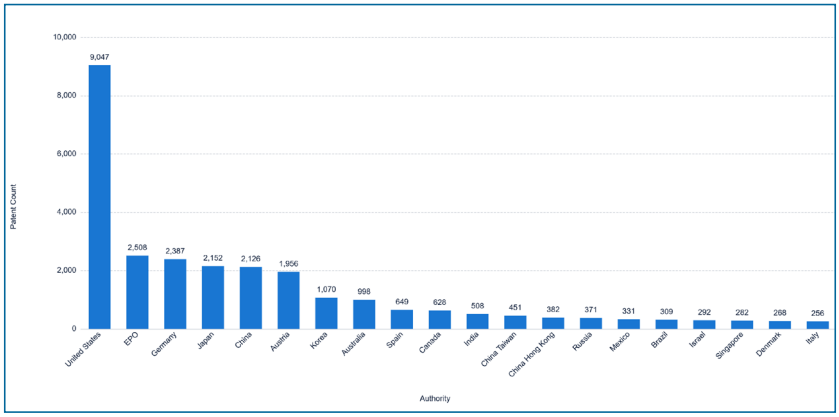


Figura 23: Andamento del numero di brevetti dal 2006 al 2025 per autorità di pubblicazione estratto dalla ricerca brevettuale effettuata sull'argomento "chemically functionalized sensor" effettuata da ARCHA tramite piattaforma PatSnap in data 22 gennaio 2025

Nonostante il vasto numero di articoli scientifici e brevetti pubblicati, è difficile trovare in commercio sensori chimicamente funzionalizzati. Esistono alcune aziende europee che vendono sensori compatti e portatili che possono essere personalizzati tramite funzionalizzazione chimica, e che supportano nella fase di utilizzo il cliente. Tuttavia, i costi, la stabilità e la facilità d'uso di questi sensori è ancora oggetto di studio e in fase di ottimizzazione.

In Italia, numerosi gruppi di ricerca si dedicano allo sviluppo di sensori funzionalizzati chimicamente, con applicazioni innovative in diversi settori. Un esempio significativo è il lavoro del CNR, che ha sviluppato un sensore SPR (SPR, Surface Plasmon Resonance) per il rilevamento, direttamente nei luoghi di produzione, di pesticidi, metalli pesanti e microbi in alimenti liquidi provenienti da filiere corte come miele, latte crudo e birra. Questo sensore è stato realizzato nell'ambito del progetto europeo **h-ALO** (Photonic System for Adaptable Multiple-Analyte Monitoring of Food Quality, 2020-2023).
Un altro esempio è rappresentato dal progetto **STEFY** - Sensor TEchnology for Food analYsis (2016-2018), condotto dall'Università di Milano, che ha portato alla creazione di un dispositivo portatile basato sulla tecnologia Reflective Phantom Interface (RPI). Questo sistema, economicamente conveniente, consente di rilevare residui di allergeni o micotossine nel vino, offrendo una soluzione pratica per il settore agroalimentare.
Il CNR – Istituto di Neuroscienze in collaborazione con ARCHA nell'ambito del progetto **SENSOR PAR FA**S (2018-2021), ha progettato un nanosensore SAW (Surface Acoustic Wave) chimicamente funzionalizzato, capace di identificare microrganismi come la Legionella nell'acqua o il virus del morbillo in matrici biologiche come la saliva. Dalla ricerca

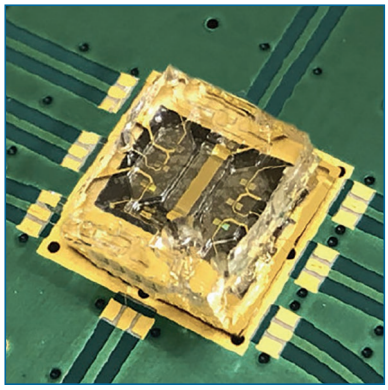


Figura 24: Sensore SAW funzionalizzato chimicamente per rilevare batteri o virus

in questo campo è nata la spinoff INTA, nata dalla collaborazione tra il CNR– Istituto di Neuroscienze con la Scuola Normale Superiore di Pisa. La spinoff si occupa dello sviluppo e della produzione di laboratori-on-chip portatili per analisi rapide di fluidi, con applicazioni che spaziano dalla diagnostica biomedica alla sicurezza, dall'Industria 4.0 all'analisi alimentare. I dispositivi prodotti da INTA sono in grado di rilevare in pochi minuti, una vasta gamma di analiti, tra cui proteine, anticorpi, acidi nucleici, virus e batteri.

Interessante è anche il progetto **POR FESR** "Good water" (2014-2020) in cui è stata sviluppata una piattaforma basata sull'uso parallelo e integrato di due sistemi di sensing che sfruttano tecnologie complementari: 1) array di nanosensori "label-free" su chip, e 2) sensori "fluorescence-enhanced" a quantum dot (QD) in substrato liquido. Essa è caratterizzata da elevate prestazioni in termini di sensibilità e selettività perché basata sull'uso di biosonde specifiche per i diversi composti e marcatori identificati, rappresentando un sistema di monitoraggio e allerta, di ampio spettro, di costo ridotto, di facile utilizzo e adatto ad analisi su campo da parte di operatori non specializzati. A questo progetto, oltre il CNR, ha partecipato l'azienda italiana BIOSENSOR, con sede a Roma, che offre soluzioni tecnologiche per le industrie nel campo dello sviluppo di biosensori e servizi per l'analisi delle acque e degli alimenti. Questa azienda è tuttora coinvolta al progetto **METBIOTEL** (BANDO A CASCATA SAP01-2023-000079), insieme all'Università di Cagliari, in cui si propone di realizzare una piattaforma BioSensoristica controllata da intelligenza artificiale per il monitoraggio di Glucosio, Lattato, Cortisolo e valore di pH contenuti all'interno di campioni di sudore.

Nel settore privato, un esempio è l'azienda Sensichips, con sede a Roma. L'azienda sviluppa microchip integrati con sensori chimici e fisici, progettati per il rilevamento di gas, composti organici volatili e altre sostanze chimiche. Le loro soluzioni sono utilizzate nel monitoraggio ambientale e nella sicurezza industriale, grazie alla possibilità di personalizzare i sensori in base a specifiche esigenze applicative.

Risorse economiche necessarie

Le risorse economiche stimate per lo sviluppo della tecnologia variano tra i 20 ed i 100Meuro.

MATERIALI "ECO-FRIENDLY" PER PALE EOLICHE: VITRIMERI E ALTRE RESINE TERMO-RESPONSIVE

Le resine termo-responsive sono una nuova generazione di materiali polimerici "intelligenti" che possono essere utilizzati come matrice organica nella produzione di materiali compositi progettati per essere facilmente riciclati ("recyclable-by-design"). I recenti progressi nella chimica dei polimeri offrono, pertanto, percorsi innovativi che possono aiutare a migliorare il ciclo di vita e, soprattutto, la gestione del fine vita di una vasta gamma di materiali compositi. In particolare, l'incorporazione di legami reticolanti dinamici e reversibili nella rete macromolecolare dei materiali termoindurenti rappresenta un potente strumento chimico per dotarli di nuove funzionalità, innescate termicamente, che ne consentano potenzialmente l'auto-riparazione, la saldatura, il ritrattamento, il riutilizzo e, in ultima analisi, la riciclabilità. Queste nuove classi di polimeri "intelligenti" sono denominate "Covalent Adaptable Networks" (CAN) e sono state dimostrate sulla base di diversi tipi di chimiche. In particolare, due famiglie CAN specifiche (Figura 25) hanno recentemente dimostrato di essere piattaforme di materiali potenzialmente sfruttabili per un reale uso industriale: si tratta di CAN dissociativi, o reti polimeriche reversibili come quelle basate sulla reazione Diels-Alder (DA) innescata termicamente tra dieni e dienofili, e CAN associativi o vitrimeri.

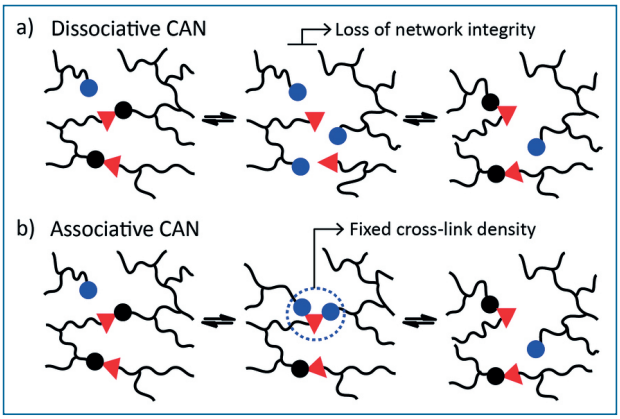


Figura 25: Covalent Adaptable Network (CAN) di tipo dissociativo ed associativo

Tali famiglie sono caratterizzate in base al tipo di reazione di scambio utilizzata per la reversibilità del legame. In particolare, il meccanismo a scambio di legami dissociativi prevede prima la scissione di un legame covalente e poi la sua nuova formazione in un'altra posizione. In tali sistemi, lo stato preferito (cioè legato vs. non legato) è il risultato netto di due forze opposte: un fattore entropico, che favorisce la de-reticolazione, contro una spinta entalpica verso la reticolazione. Pertanto, una temperatura sufficientemente elevata può spostare l'equilibrio verso lo stato guidato dall'entropia, favorendo il distacco rispetto al legame. Riscaldando questi materiali si osserva una dissociazione netta dei legami, ottenendo un riarrangiamento topologico molto veloce (rilassamento dello stress e flusso) a causa della perdita di connettività. Questa temporanea perdita di reticolazione si traduce tipicamente in un improvviso calo di viscosità, con un andamento simile ai materiali termoplastici. Dopo il raffreddamento, si formano nuovamente legami incrociati, solitamente nella stessa misura del materiale di partenza, preservando o ripristinando le proprietà termoindurenti desiderabili, come rigidezza e insolubilità.
Il meccanismo a scambio di legami associativi, invece, è caratterizzato da un percorso di riarrangiamento che prevede prima l'associazione di due catene polimeriche, risultando in un nuovo legame di rete covalente, e poi una fase di eliminazione che frammenta un altro legame di rete. Questo tipo di sistemi non è soggetto a de-reticolazione, ma è possibile avere uno stato intermedio in cui la densità di reticolazione viene temporaneamente aumentata. Tuttavia, la formazione di ulteriori reticolazioni può spesso essere soppressa, anche in condizioni di scambi di legami molto rapidi, portando a fluttuazioni solo trascurabili nella densità di reticolazione, pur avendo fluttuazioni molto rapide nella topologia della rete. La velocità di reazione complessiva dipende anche dalla vicinanza dei legami incrociati scambianti. Tra i materiali che meglio rappresentano i CAN associativi troviamo i vitrimeri.
I polimeri vitrimerici sono la terza e più recente categoria di materiali polimerici organici, introdotti per la prima volta da Leibler e colleghi nel 2011, e costituiscono a tutti gli effetti un ponte tra i polimeri termoplastici e i polimeri termoindurenti. Infatti, i vitrimeri sono polimeri reticolati come i termoindurenti, ma la loro

peculiarità è la possibilità di introdurre una finestra di plasticità grazie alla presenza di legami chimici scambiabili dovuti a una rete molecolare covalente che può cambiare la sua topologia attraverso riarrangiamenti molecolari ma preservando il numero totale di legami nella rete (cioè la connettività di rete). Quando un vitrimero viene riscaldato al di sopra della sua temperatura caratteristica, possono verificarsi riarrangiamenti molecolari e la topologia della rete fluttua. Pertanto, i segmenti della rete possono diffondersi coprendo il volume dell'intero campione, anche se la rete preserva la sua connettività. Quando riscaldati, i vitrimeri si comportano come un liquido viscoelastico ed è possibile ottenere un flusso macroscopico senza rischiare danni strutturali o perdita permanente delle proprietà del materiale. I vitrimeri si differenziano dai termoplastici in quanto ad alta temperatura (tipicamente T > 100-150 °C) mantengono la loro struttura reticolata, senza subire alcun tipo di processo di depolimerizzazione, e, una volta raggiunto lo scorrimento, presentano un graduale cambiamento di viscosità (secondo un comportamento tipo Arrhenius). In termini di proprietà del materiale, la natura permanente della rete migliora la resistenza ai processi di usura dei polimeri come la dissoluzione, lo scorrimento viscoso o lo stress cracking da solvente. La natura dinamica della rete facilita la lavorazione e il ritrattamento e aggiunge possibilità di riciclo nonostante la presenza di legami incrociati covalenti permanenti. Le applicazioni di matrici polimeriche basate su questi materiali (CAN dissociativi e associativi) sono molteplici, come ad esempio l'industria elettronica, automotive, nautica, aeronautica, delle attrezzature sportive ed eolica. Riguardo quest'ultimo campo di applicazione, va notato che diverse turbine eoliche di nuova generazione, con pale basate su resine intelligenti di nuova concezione, sono già state prodotte e installate da Siemens Gamesa, MingYang, GoldWind, etc. Si prevede che questa sarà una tendenza generale e che nei prossimi anni verranno installati sempre più aerogeneratori di nuova generazione. Lo sfruttamento di matrici polimeriche con network dinamico e reversibile non solo faciliterà il riciclo dei componenti della turbina a fine vita, ma innoverà anche tutte le tecnologie di riparazione e smontaggio delle pale.

Motivazione per lo sviluppo

Si stima che il mercato mondiale dei compositi raggiungerà i 122,3 miliardi di dollari entro il 2030 se non si verificheranno importanti battute d'arresto economiche tra il 2023 e il 2030, con un CAGR (Compounded Average Growth Rate) del 3,6%. Secondo il rapporto 2023 dell'osservatore del JEC Group (l'organizzazione no-profit interamente dedicata alla promozione dei materiali compositi e alle loro applicazioni a livello globale), la produzione globale di compositi è passata da 12,1 Mt (milioni di tonnellate) nel 2021 a 12,7 Mt nel 202233. I mercati europei rappresentano quasi il 21,8% della quota globale di compositi, pari a 2.781 Kt, prodotti nel 2022. A partire dal 2020 il mercato europeo ha subito una battuta d'arresto a causa di una serie di fattori, dalla pandemia di COVID, al cambiamento delle abitudini dei consumatori, al blocco del Canale di Suez e così via. La crisi è stata particolarmente sentita nel settore dei trasporti, che è un grande consumatore di questi materiali.

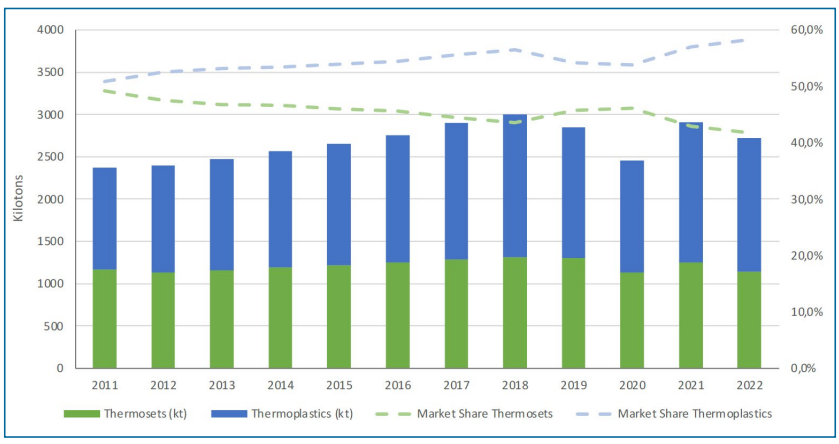


Figura 26: Mercato europeo dei materiali compositi (escluso CFRP) distinto per chimica della matrice[33]

In Figura 26 viene mostrato l'andamento del mercato europeo dei compositi (escluso CFRP) distinto per tipo di chimica della matrice. Nel 2022, i materiali con matrice termoindurente hanno rappresentato il 41% del mercato. Complessi-

[33] *The European Market for Fibre-Reinforced Plastics and Composites 2022 Market developments, trends, challenges and outlook, Dr. Elmar Witten and Volker Mathes, AVK – Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e.V., 2023*

vamente, i principali settori a fare uso di materiali compositi a matrice termoindurente sono il settore delle costruzioni, dei trasporti, dell'elettronica e delle attrezzature sportive. In Figura 20 sono riportate tali distribuzioni per il mercato europeo nell'anno 2022. Dal punto di vista della distribuzione regionale, il mercato italiano è pari al 14,2% del totale europeo nell'anno 2022 (Figura 27). L'uso di queste nuove resine intelligenti, invece, interviene proprio sul fine vita di questa

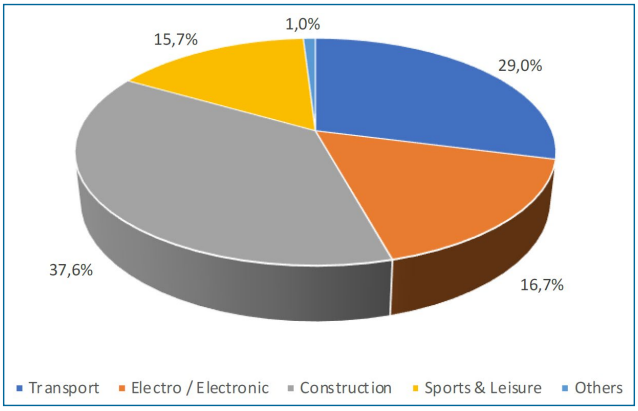


Figura 27: Principali settori d'impiego dei materiali compositi (escluso CFRP) con matrice termoindurente per l'anno 2022 (mercato europeo)

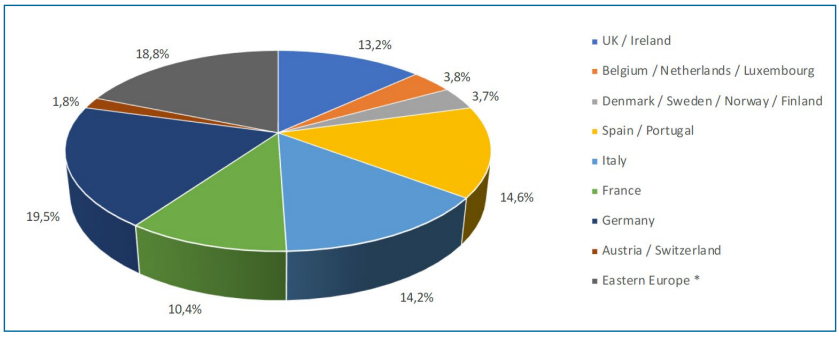


Figura 28: Mercato europeo dei materiali compositi con matrice termoindurente per l'anno 2022 distinto per regioni

grande fetta di materiali compositi con matrice termoindurente, che non ha molti modi per essere gestita se non la discarica o la termovalorizzazione. Infatti, anche le migliori tecnologie di "riciclo" (meccanico, termico o nel caso di co-processing nel cemento) disponibili allo stato dell'arte non sono completamente circolari. Per questi motivi l'impiego di questi nuovi materiali è un'innovazione radicale, che mediamente richiederà ancora un tempo relativamente lungo per affermarsi come tecnologia dominante. L'impatto industriale è sicuramente alto, avendo una molteplicità di settori di possibile interesse, dai trasporti, all'elettronica, passando per le energie rinnovabili. In particolare, la tecnologia impatterebbe sugli SDG (Sustainable Development Goals) 7 (Affordable and clean energy), 9 (Industry innovation and infrastructure), 12 (Responsible consumption and production) e 13 (Climate action) con un impatto importante per quanto riguarda la gestione del fine vita dei prodotti in materiale composito nelle applicazioni per le quali vengono comunemente usate matrici termoindurenti.

Stato dell'arte

Allo stato attuale ci sono pochi esempi di sfruttamento industriale dei network dissociativi basati su reazioni tipo Diels-Alder. Nel 2015, ad esempio, la tedesca Evonik ha annunciato[34] di aver sviluppato, in collaborazione con il Karlsruhe Institute of Technology, un polimero basato su ciclo-addizione Diels-Alder non catalizzata in grado di comportarsi come termoindurente per temperature sotto i 100 °C ma di esibire macroscopicamente le proprietà di lavorabilità di un termoplastico al di sopra dei 170 °C. In altri casi, materiali che sfruttano network di tipo dissociativo prevedono l'applicazione simultanea di uno stimolo termico e di uno chimico. Tra questi si possono annoverare Cleavamine® and Recycloset® della cinese Adesso Advanced Materials, Recyclamine® della statunitense Connora (tecnologia venduta all'indiana Aditya Birla Chemicals nel 2019), la resina EzCiclo® e il solvente CleaVER® della taiwanese Swancor.

Per quanto riguarda i materiali basati su CAN di tipo associativo, il prodotto più consolidato è la famiglia di vitrimeri della statunitense Mallinda. Le formulazioni proposte da Mallinda hanno temperature di transizione vetrosa che variano dai

[34] *https://www.plasticstoday.com/materials/hybrid-polymer-systems-from-evonik-shown-to-save-time-and-cost-in-composites-production*

20 °C ai 240 °C. La statunitense ATSP, invece, propone una linea di prodotti a base vitrimerica che comprendono una resina per applicazioni ad alta temperatura (Estherm™), un adesivo (Self-Bond™) e un materiale da usare come rivestimento protettivo (NOWE™). Altre realtà che stanno lavorando a questa categoria di materiali sono la britannica Graft Polymer e il centro di ricerca spagnolo Cidetec. Inoltre, esistono diversi progetti finanziati sul tema dei vitrimeri, tra cui si evidenziano il progetto europeo RECREATE[35] coordinato dal Politecnico di Milano, che coinvolge un consorzio di 21 partners provenienti da 9 paesi europei, e il progetto CANMATCHMORE - Covalent Adaptive Network materials for technological composites helpful for mobility renewable[36] dell'Università di Salerno e finanziato dal MUR.

Le resine termo-responsive offrono molteplici opportunità in campo industriale, soprattutto nel rendere "recyclable-by-design" delle componenti che, ad oggi, avrebbero ben poche alternative alla discarica o ai termovalorizzatori al termine del loro ciclo di vita. In campo eolico, ad esempio, alcuni players, tanto in Europa[37] quanto in Asia[38], si stanno già muovendo per adottare le soluzioni illustrate in precedenza in alcuni dei loro progetti. La spinta alla realizzazione di prodotti sempre più "sostenibili" potrebbe essere in futuro maggiormente accelerata (se non guidata) da un quadro regolatorio sempre più stringente sul tema della gestione del fine vita dei materiali, tale da premiare gli attori che per primi si saranno mossi verso questa tipologia di materiali "intelligenti". Infatti, le attuali resine termoindurenti hanno delle ottime caratteristiche meccaniche, di durabilità nel tempo, di resistenza ad ambienti aggressivi e di lavorabilità, e sono preparate a partire da materiali facilmente reperibili e a basso costo che le rendono difficilmente sostituibili come matrici di materiali compositi ad alte prestazioni.

Risorse economiche necessarie

Il potenziale delle resine termo-responsive come possibili sostituti delle resine termoindurenti è sicuramente elevato in tutti i campi d'applicazione. Infatti, questi tipi di materiali soddisfano i requisiti ambientali e prestazionali richiesti dalla

[35] https://www.recreatecomposites.eu/

[36] https://web.unisa.it/ricerca/progetti-finanziati?progetto=62684

[37] https://www.windsystemsmag.com/siemens-gamesas-recyclableblade-set-for-u-k-wind-project/

[38] https://recyclinginternational.com/business/recyclable-wind-turbines-on-the-horizon/52740/

società contemporanea e rappresentano un passo in avanti verso un'economia circolare. Tuttavia, sebbene questi tipi di materiali possano avere un impatto industriale ed economico alto su tutta una serie di settori, saranno necessari ancora investimenti importanti (ordine di grandezza 100 M€) e tempi di sviluppo lunghi per trovare le formulazioni che meglio si prestano a uno sfruttamento industriale di larga scala. Infatti, gli attuali materiali termoindurenti sono preparati a partire da materiali facilmente reperibili e a basso costo. Questa barriera economica rappresenta un ostacolo importante da superare insieme alla necessità di creare le opportune infrastrutture e catene logistiche in grado di favorirne il riciclo o la gestione ottimale del fine vita.

MATERIALI SECONDARI E NUOVI ADDITIVI PER CALCESTRUZZO

La Chimica svolge un ruolo fondamentale nella transizione dal calcestruzzo moderno al calcestruzzo sostenibile. I nuovi cementi a bassa impronta carbonica, con ridotto contenuto di clinker e ricchi in materiali cementizi supplementari (SCMs), necessitano di nuovi additivi chimici in grado di assicurare le medesime prestazioni del cemento Portland. I nuovi additivi LCCAs (Low Carbon Concrete Admixtures), basati su nanocompositi sintetici di silicati metallici idrati, aumentano la reattività di tutte le fasi dei nuovi cementi a bassa impronta carbonica e massimizzano la formazione dei composti idratati che sono alla base dello sviluppo delle proprietà meccaniche. Lo sviluppo di nuovi SCMs, derivanti dal recupero di sottoprodotti e rifiuti, richiede un approccio multidisciplinare che deve tenere conto anche degli aspetti ambientali dei nuovi cementi a bassa impronta carbonica.

Motivazioni per lo sviluppo

La produzione mondiale di calcestruzzo ha raggiunto i 14 miliardi di m3/anno con un impatto, in termini di emissioni di gas serra, di oltre 2.5 GTon/anno di CO_2. Questa quantità è principalmente ascrivibile al suo ingrediente fondamentale, il cemento Portland, la cui produzione ha superato i 4 miliardi di tonnellate ed è destinata a raggiungere i 5 miliardi di tonnellate entro il 2050[39].

Per questo motivo, le principali industrie produttrici di cemento e di calcestruzzo hanno assunto l'impegno di attuare, entro il 2050, strategie di decarbonizzazione per raggiungere la "carbon neutrality", ossia la capacità di produrre il calcestruzzo in modo sostenibile con un bilancio nullo delle emissioni di CO_2.

La Figura 29 mostra il contributo delle diverse azioni di mitigazione previste da oggi al 2050. Si può osservare che la voce "formulazione del cemento" (sezione arancio), relativa alla sostituzione del clinker con materiali cementizi supplementari (Supplementary Cementitious Materials, SCMs) caratterizzati da un minor impatto ambientale, contribuirà per il 9 % (350 Mt CO_2) all'obiettivo di ridurre le oltre 2.5 Gt di CO_2 attualmente prodotte.

[39] *Global Cement and Concrete Association, "Concrete Future – Roadmap to Net Zero", 2021, https://gccassociation.org/concretefuture/wp-content/uploads/2021/10/GCCA-Concrete-Future-Roadmap-Document-AW.pdf*

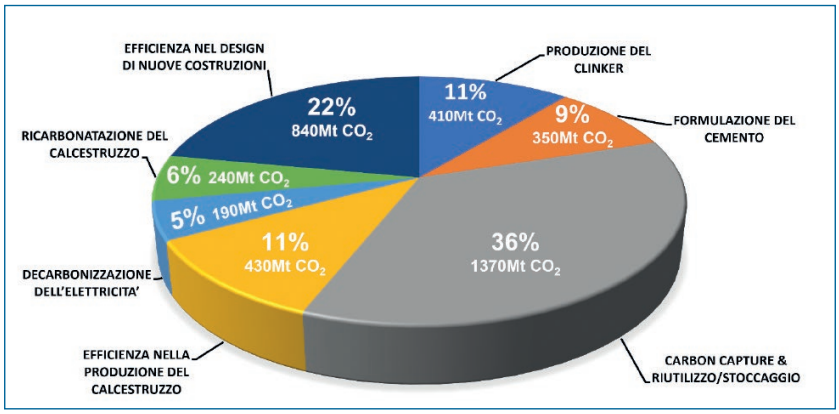


Figura 29: Azioni per la "carbon neutrality" dell'industria del cemento/calcestruzzo[40]

Stato dell'arte

Verso il calcestruzzo sostenibile

Gli SCMs comprendono sottoprodotti derivanti da processi industriali, quali le ceneri leggere dalle centrali termoelettriche a carbone (fly ash), la loppa d'altoforno macinata dalla produzione dell'acciaio (slag) e il fumo di silice (silica fume) dalla produzione del silicio e delle sue leghe. Altri SCMs sono la pozzolana naturale e la polvere di calcare (limestone). Questi materiali sono già utilizzati nella formulazione di nuovi leganti, in parziale sostituzione del clinker. Nei prossimi decenni questo processo sarà ulteriormente incrementato con il maggior utilizzo del calcare e l'introduzione di nuovi materiali supplementari, tra cui le argille calcinate (calcined clays) e le frazioni fini originate dalla frantumazione del calcestruzzo (C&DW), che compenseranno la ridotta disponibilità delle fly ash e della loppa. Queste azioni permetteranno di ridurre il rapporto clinker/legante dall'attuale valore di 0.63 al valore intermedio di 0.58 entro il 2030, fino al valore ultimo di 0.52 entro il 2050. L'utilizzo degli SCMs per la formulazione di nuovi cementi rappresenta quindi un'azione fondamentale per la produzione del nuovo calcestruzzo a bassa impronta di carbonio (Low Carbon Concrete, LCC).

[40] *Global Cement and Concrete Association, "Concrete Future – Roadmap to Net Zero", 2021, https://gccassociation.org/concretefuture/wp-content/uploads/2021/10/GCCA-Concrete-Fut*

[41] *R. Snellings, P. Suraneni, J. Skibsted, "Future and emerging supplementary cementitious materials", Cement and Concrete Research, 2023, 107199*

I nuovi materiali supplementari

Negli ultimi anni si è assistito ad un intenso sviluppo nella ricerca di nuovi SCMs da utilizzare per ridurre il contenuto di clinker nel cemento, con più di 25.000 pubblicazioni nel periodo 2018-2023[41]. Nella Tabella 1 vengono riportate le principali caratteristiche dei diversi SCMs suddivisi per maturità tecnologica (in uso, in via di sviluppo, futuri).

Tabella 1: Disponibilità e reattività dei più comuni SCMs in uso e futuri[42]

Maturità	SCM	Disponibilità (MT/anno)	Reattività Test R³ (J/gSCM)
In uso	Loppa d'altoforno	300 - 360	450 - 650
	Ceneri leggere da centrali a carbone	700 - 1100	150 - 350
	Pozzolana naturale	75	100 - 380
	Fumo di silice	1 - 2	450 - 650
	Calcare	> 5000	0 - 100
In via di sviluppo	Argilla calcinata	> 5000	200 - 1000
	Ceneri leggere da centrali a carbone da recuperare	> 5000	150 - 350
	Ceneri da biomassa	1000	80 - 150
	Frazioni fini da demolizione calcestruzzo	>1000	50 - 150
	Ceneri da termovalorizzatori RSU	1000	100 - 250
	Rifiuti ceramici	500	80 - 250
	Polvere di vetro riciclato	50 - 100	150 - 200
Futuri	Rifiuti minerari	> 5000	n.d.
	Rifiuti di cava	> 5000	n.d.
	Fanghi di dragaggio	> 1000	n.d.

La concreta possibilità di utilizzo di nuovi SCMs dipende anche dalle loro caratteristiche ambientali. Infatti, trattandosi nella maggior parte dei casi di sottoprodotti o rifiuti, i nuovi SCMs dovranno essere compatibili con l'utilizzo nel calcestruzzo anche dal punto di vista ambientale.

[42] *R. Snellings, "Assessing, understanding and unlocking Supplementary Cementitious Materials", Rilem Technical Letters, 2016, 1, pp. 50-55. D. Londono-Zuluaga et al., "Report of RILEM TC 267-TRM phase 3: validation of the R3 reactivity test across a wide range of materials", Materials and Structures, 2022, 55:142, https://doi.org/10.1617//s11527-022-01947-3*

Dal punto di vista della reattività, gli SCMs non sono dotati di proprietà idrauliche autonome e manifestano proprietà leganti solo se attivati. L'attivazione avviene grazie alla reazione pozzolanica con la calce idrata che si forma durante l'idratazione del cemento, con formazione di fasi idratate di composizione del tutto simile a quelle che caratterizzano le fasi silicatiche del clinker.
Anche le cinetiche di reazione sono profondamente diverse rispetto al clinker: mentre i silicati di calcio idrati (C-S-H) prodotti per idratazione del clinker si formano già dopo poche ore dal mescolamento con l'acqua, quelli prodotti dagli SCMs si sviluppano più lentamente. Inoltre, non tutti gli SCMs partecipano alla reazione pozzolanica. Infatti, la polvere di calcare (limestone), già ampiamente utilizzata e il cui utilizzo sarà ancor maggiore in futuro, non viene attivata dalla calce idrata e agisce prevalentemente come "filler".
La minore reattività degli SCMs può rappresentare un limite al rapporto di sostituzione del clinker per la produzione del calcestruzzo LCC, in quanto la loro aggiunta potrebbe non essere conciliabile con le classi di resistenza meccanica previste per il calcestruzzo moderno.

I nuovi additivi LCCAs

Per corrispondere alle esigenze di sostenibilità e di miglioramento delle prestazioni del calcestruzzo LCC a bassa impronta di carbonio, è stata sviluppata la nuova classe di additivi Low Carbon Concrete Admixtures LCCAs[43]. Rispetto ai tradizionali additivi, che servono principalmente per il controllo delle proprietà reologiche del calcestruzzo allo stato fresco (fluidificanti e superfluidificanti) e dei tempi di presa e di indurimento (ritardanti e acceleranti), gli LCCAs migliorano la reattività sia del cemento che degli SCMs, aumentando il grado di idratazione e migliorando le proprietà meccaniche finali della pasta cementizia. Questo risultato permette di ridurre il dosaggio di cemento nel calcestruzzo e/o di aumentare la frazione di SCMs senza sacrificare le resistenze meccaniche.
La tecnologia LCCAs è stata sviluppata seguendo le linee di azione indicate in Figura 30, nell'ipotesi che a una maggior dissoluzione iniziale di specie reattive delle diverse fasi del cemento e degli SCMs corrispondano maggiori volumi di

[43] *G. Ferrari, M. Squinzi, "A new class of admixtures for low carbon concrete", 2023, 16th Int. Congr. Chem. Cem., ICCC2023, Bangkok, Vol. IV, 278-281. Disponibile in https://www.ICCC-online.org/archive/*

prodotti di idratazione nella fase finale e, conseguentemente, resistenze meccaniche più elevate.

La formulazione degli LCCAs comprende diversi ingredienti, tra cui:

a. Nanocompositi di silicati idrati metallici (Ca/Cu) stabilizzati da "comb-copolymers" polieteri carbossilati (Me-S-H/PCE) ottenuti per sintesi "sol-gel" da silicati alcalini e sali metallici. Agiscono come siti di nucleazione secondaria, innescando la precoce formazione delle fasi idratate del cemento e degli SCMs e favorendo la dissoluzione delle specie attive dalla matrice solida;

b. Carboidrati e loro derivati. Ritardano la reazione delle fasi silicatiche idrate nelle prime ore di idratazione, ma ne aumentano la reattività nel lungo periodo; Sali inorganici e acceleranti organici. Entrambe queste classi di composti hanno la funzione di accelerare l'idratazione del cemento nelle prime ore di idratazione.

c. I sali inorganici (cloruri, nitrati, tiocianati, tiosolfati) agiscono prevalentemente sulle fasi silicatiche del clinker, mentre le alcanolammine vengono utilizzate per stimolare la reazione degli alluminati;

d. Attivatori alcalini. Sono ingredienti essenziali per la produzione di "geopolimeri", ma possono essere convenientemente utilizzati come promotori dell'idratazione di cementi ad elevato tenore di SCMs.

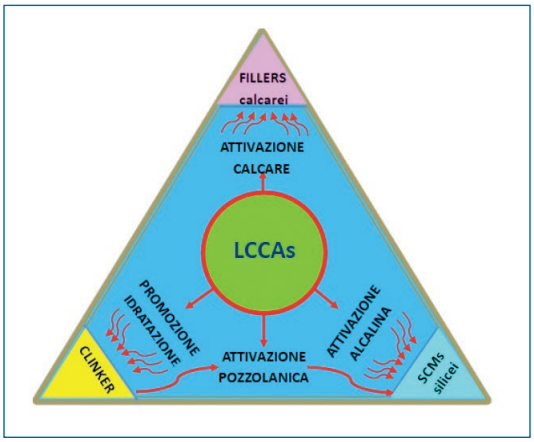


Figura 30: Linee di azione degli LCCAs in relazione ai diversi costituenti dei sistemi leganti a bassa impronta carbonica (clinker, SCMs silicei, filler calcarei)

Gli attuali LCCAs si sono rivelati efficaci con la maggior parte degli SCMs attualmente in uso, con un incremento medio del grado di idratazione di circa il 10 %. È quindi prevedibile che l'applicazione di questa tecnologia a scala globale contribuirà in modo decisivo al raggiungimento degli obiettivi previsti dal piano di decarbonizzazione del settore del cemento e del calcestruzzo nei prossimi decenni. Dal punto di vista economico, si prevede che gli LCCAs affiancheranno le altre classi di additivi per calcestruzzo e potranno raggiungere nei prossimi decenni volumi e valori di mercato equivalenti.
La tecnologia LCCAs resterà nell'ambito dei principali produttori di additivi per calcestruzzo, che oggi sono rappresentati da Sika AG, Master Builder Solutions, Mapei S.p.A., GPC Applied Technologies, Chryso, BASF.

I nuovi SCMs (Tabella 1) e la loro formulazione con nuovi cementi di miscela richiederanno lo sviluppo di nuovi LCCAs in grado di consentire la produzione di LCC con le caratteristiche meccaniche richieste dalla moderna tecnologia del calcestruzzo. Il campo di ricerca più promettente per lo sviluppo di nuovi additivi LCCAs riguarda la sintesi di nanocompositi a base di MOF (Metal Organic Frameworks) e LDH (Layered Double Hydroxides) modificati con molecole organiche, con funzioni di modificatori della cinetica di idratazione delle diverse fasi e della reologia degli impasti allo stato fresco.
A livello fondamentale, la ricerca scientifica dovrà ulteriormente sviluppare le conoscenze, oggi carenti, sulle ragioni che rallentano e infine terminano prematuramente le reazioni di idratazione delle diverse fasi del cemento e degli SCMs, limitando lo sviluppo delle proprietà meccaniche[44], e approfondire i meccanismi di interazione delle diverse fasi cementizie con gli additivi LCCAs.
Infine, dovrà essere studiato l'impatto ambientale dei nuovi SCMs provenienti da processi produttivi o da trattamento di rifiuti che, ancorché funzionali dal punto di vista tecnologico, potrebbero diventare una fonte di rilascio nell'ambiente di sostanze pericolose.

[44] *R.H. Mills, "Factors influencing cessation of hydration in water cured cement pastes", 1966, Highway Research Board Special Report, 90, pp. 406-424; K. Scrivener, A. Ouzia, P. Juilland, A.K. Mohamed, "Advances in understanding cement hydration mechanisms", 2019, Cem. Concr. Res., 124, 105823*

Risorse economiche necessarie

La ricerca ha un carattere interdisciplinare e richiede competenze di chimica organica e inorganica, scienza e tecnologia dei materiali, scienze ambientali. Inoltre, per la caratterizzazione a livello nano-microscopico e per studiare l'interazione tra gli additivi e la matrice cementizia è necessario il ricorso a tecniche di indagine basate su fasci di radiazioni ad alta energia, quali la luce di sincrotrone. Si prevede che il tempo necessario per un tale tipo di ricerca sia compreso tra tre e cinque anni, con un investimento complessivo dell'ordine di 1 milione di euro.

CIRCOLARITÀ E RICICLABILITÀ DI PROCESSI E PRODOTTI

RICICLO CHIMICO DELLE PLASTICHE

Ad oggi non esiste una tecnologia di trattamento preferenziale da utilizzarsi nel riciclo delle plastiche. I processi utilizzati sono il riciclo meccanico e il riciclo chimico. Il riciclo chimico, a sua volta, può essere suddiviso in quattro tipologie: dissoluzione, depolimerizzazione, pirolisi e gassificazione. Possiamo quindi affermare che abbiamo a disposizione un pacchetto di tecnologie, che possono agire in modo sinergico l'una con l'altra in modo da massimizzare il recupero delle plastiche. Ogni tipologia di riciclo si inserisce in un punto diverso della filiera produttiva dei polimeri; l'Associazione che riunisce le industrie produttrici di polimeri, Plastics Europe, ha ben rappresentato questo aspetto, con particolare riferimento al riciclo chimico, in Figura 31.

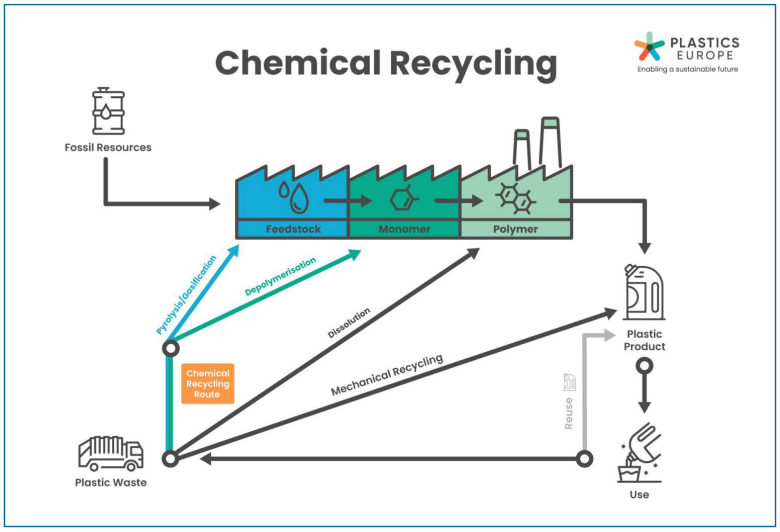


Figura 31: Riciclo chimico delle plastiche (Fonte: Plastics Europe)

Il riciclo meccanico è forse, al momento, la tecnologia più matura; esso si focalizza su alcune materie plastiche (PET, HDPE, etc.) e in particolare su alcuni manufatti facili da individuare e separare quali bottiglie e flaconi. Il numero di "ricicli", però, che si possono fare attraverso questa via è limitato per il calo delle caratteristiche

prestazionali, che ogni passaggio di riciclo determina sul materiale a causa del, seppur minimo, degrado che viene indotto durante la lavorazione (normalmente per ridurre il calo di prestazioni si integra con materiale vergine o additivi il riciclato oppure, come nel caso del PET, talvolta il materiale ottenuto dal riciclo viene destinato a un uso completamente diverso come ad es. tessuti sintetici; questo però limita ulteriormente la possibilità di riciclo). Non è possibile riciclare meccanicamente con esito positivo mescolando due polimeri tra loro incompatibili; ne consegue che il processo di selezione delle plastiche effettuato a monte deve essere piuttosto spinto e accurato. Anche in presenza di plastiche compatibili, o anche della stessa tipologia, ma di colore diverso, il riciclo meccanico presenta un limite, in quanto non è sempre possibile ottenere attraverso questa via una plastica riciclata con un colore uguale a quello della plastica vergine di riferimento. Esiste quindi una frazione di plastiche miste denominata "plasmix" che in mancanza di uno sbocco verso il riciclo viene inviata a termocombustione con recupero energetico (termovalorizzazione) oppure in discarica; proprio questa frazione può essere oggetto del riciclo chimico. Il riciclo chimico, infatti, è in grado di gestire flussi complessi di rifiuti di plastica, come ad es. pellicole, laminati e/o multistrato. La Direttiva 2008/98/CE stabilisce una gerarchia delle operazioni da adottare nella gestione dei rifiuti (Figura 32), in cui il ricorso alla termovalorizzazione ed alla discarica è all'ultimo posto. È indispensabile, pertanto, sottrarre la quota di rifiuti plastici che attualmente finisce in discarica ed a termovalorizzazione, per destinarla a trattamenti più "nobili".

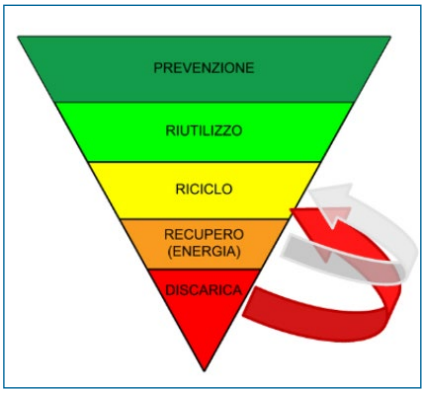


Figura 32: Gerarchia delle operazioni da adottare nella gestione dei rifiuti

Poiché è stato stimato in tutta Europa che, nel 2022, circa il 70 % dei rifiuti di plastica post-consumo era

destinato alle discariche e al recupero energetico[45], l'utilizzo della tecnologia di riciclo chimico può fornire un chiaro potenziale miglioramento.
Di seguito si descrivono brevemente le varie tipologie di riciclo chimico.

Dissoluzione: Questa tecnologia non appartiene pienamente al riciclo chimico in quanto non effettua nessuna azione chimica sulla plastica, anche se richiede l'utilizzo di sostanze chimiche. La plastica viene sciolta in un solvente, e in questo modo tutte le sostanze in essa presenti, come ad es. additivi inseriti nella realizzazione del manufatto o contaminazioni, passano in soluzione. Con l'aggiunta di un "non" solvente si provoca la precipitazione del polimero che poi viene recuperato attraverso filtrazione. Questo processo deve essere alimentato con una sola tipologia di plastica e non è quindi adatto al trattamento del plasmix. Inoltre, i solventi utilizzati devono poi essere separati per distillazione e purificati per eliminare le sostanze in essi presenti, dopo la dissoluzione della plastica, per poter essere riutilizzati.

Depolimerizzazione: Alcune plastiche, se sottoposte a riscaldamento oltre una certa temperatura, decompongono liberando il monomero di cui sono costituite; è il caso, ad esempio, di PET (polietilen terftalato), PMMA (polimetil metacrilato) e polistirene. Questo fenomeno, che può essere anche catalizzato, avviene al superamento della cosiddetta "Ceiling temperature", ovvero la temperatura alla quale la velocità di polimerizzazione è uguale a quella di depolimerizzazione. Per alcuni polimeri, come ad es. il poli-metil metacrilato o il polistirene, questa temperatura è relativamente bassa (rispettivamente 198 °C e 395 °C), mentre per altri quali le poliolefine è molto più alta: ad es., nel caso del polietilene la Ceiling Temperature è 610 °C. Simili temperature in un processo di depolimerizzazione industriale devono essere garantite in modo da avere omogeneità di riscaldamento del materiale ed evitare picchi termici in reazione, che aumenterebbero la formazione di carbone e/o sporcamenti in reazione. Le catene poliolefiniche, inoltre, tendono a decomporre attraverso scissioni casuali che portano alla formazione di catene più corte di vario peso molecolare. In questi casi la pirolisi può

[45] https://plasticseurope.org/knowledge-hub/executive-summary-the-circular-economy-for-plastics-a-european-analysis-2024/

dimostrarsi il processo più efficace.

Pirolisi: La pirolisi consiste in un trattamento termico delle plastiche in atmosfera inerte (assenza di ossigeno) e a temperature intorno ai 400-600 °C. Per effetto della temperatura le catene polimeriche subiscono una rottura portando a uno spettro di prodotti a diverso peso molecolare, che genera come prodotto principale un olio. Altri coprodotti che si possono formare sono un gas composto da idrocarburi leggeri e un solido (denominato Char) costituito da residuo carbonioso ed eventuali composti inorganici come ad es. carbonato di calcio, silice e altri inorganici, presenti nel rifiuto plastico originario. L'olio prodotto dalla pirolisi può essere sottoposto a trattamenti di purificazione e quindi inviato a un impianto di Craking per ottenere ad es. etilene, propilene e composti aromatici da riutilizzarsi per la produzione di nuova plastica. Il gas può anch'esso essere riutilizzato nella filiera petrolchimica, mentre il Char può trovare applicazione in altri settori quali ad es. cementifici. Il processo di pirolisi può essere condotto anche in presenza di un catalizzatore, per facilitare la reazione e/o modificare lo spettro dei prodotti, e può essere alimentato con miscele di plastiche anche tra loro non compatibili o contaminate.

Gassificazione: La gassificazione consiste in un trattamento termico ad alte temperature (tipicamente intorno ai 900°C od oltre) della plastica in presenza di un agente ossidante quale ad es. aria o acqua. Dalla gassificazione si ottiene un gas composto prevalentemente da CO e idrogeno che può essere riutilizzato come gas di sintesi per ottenere nuovamente prodotti chimici. Il processo può essere alimentato da qualunque fonte di carbonio e quindi da plastiche miste, ma anche cellulosa, carbone o biochar.

Si tratta in ogni caso di tecnologie con un buon grado di maturazione, le quali possono essere collocate in un range di TRL tra 7 e 11 a seconda della tipologia.

Motivazione per lo sviluppo

Il problema del fine vita delle plastiche è diventato in questi ultimi anni di primaria importanza. La plastica è un materiale ad elevato contenuto tecnologico e per le sue caratteristiche trova applicazione in numerosi campi; per tale motivo

la sua sostituzione con altri materiali più sostenibili, a parità di caratteristiche, risulta allo stato attuale molto difficile se non, in alcuni settori, impossibile. Uno dei settori applicativi importanti, che porta alla generazione di quantità non trascurabili di rifiuti plastici, è il packaging domestico. Secondo il report di sostenibilità di COREPLA, nel 2022 sono stati immessi al consumo in Italia (solamente per la parte di competenza di COREPLA) circa 1.871.000 tonnellate di plastica, di cui circa 1.050.000 tonnellate sono state avviate al riciclo. Per quanto riguarda il plasmix, sempre da fonte COREPLA, quasi 438.000 tonnellate sono state inviate a trattamento con recupero energetico mentre circa 115.000 tonnellate sono finite in discarica. Gli obiettivi che l'Europa si è data in merito alla sostenibilità e decarbonizzazione sono ben chiari[46].

Il conferimento di rifiuti in discarica rappresenta comunque un problema di natura ambientale da ridurre quanto più possibile. L'incenerimento di rifiuti plastici in impianti moderni a elevato recupero energetico consente il rispetto dei limiti di legge in termini di emissioni e la produzione di energia utilizzando un combustibile di scarto in sostituzione di una quota di fossile; questo approccio va però contestualizzato in uno scenario che mira in un prossimo futuro al raggiungimento della carbo neutralità. Alcune delle normative di riferimento relative alla plastica, riciclo e rifiuti sono: 2018/850/UE, relativa alle discariche, 2018/851/UE, relativa al trattamento dei rifiuti, 2018/852/UE relativa agli imballaggi, 2019/904/UE direttiva SUP (Single Use Plastic), 2022/1616/UE relativa agli imballaggi contenenti plastica riciclata a contatto con gli alimenti.

Il riciclo in questo contesto ha un ruolo fondamentale in quanto, oltre a dare nuova vita ad un materiale di scarto, allo stesso tempo riduce l'uso di materiale fossile, contribuendo quindi al percorso di sostenibilità e di decarbonizzazione nella direzione dell'Agenda 30 e della carbo neutralità al 2050. In Figura 33 è riassunta una valutazione (fonte BASF) relativa all'emissione di CO_2 per tonnellata di plastica riciclata chimicamente, rispetto alla stessa quantità inviata a termovalorizzazione. La pirolisi di una tonnellata di rifiuti plastici misti emette in totale 739 kg di CO_2e. L'incenerimento di 1 tonnellata di rifiuti plastici misti emette in totale 1777 kg di CO_2 e. Il risparmio in termini di emissioni è di circa una tonnellata di CO_2.

[46] https://environment.ec.europa.eu/topics/plastics_en

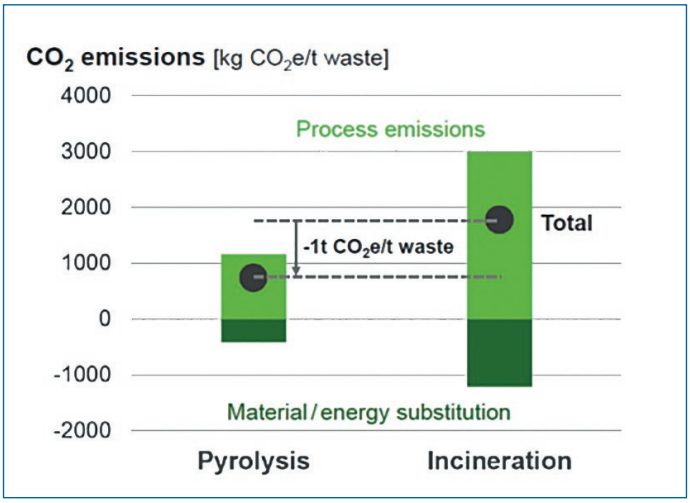


Figura 33: Schema semplificato di valutazione dell'emissione di CO_2 per tonnellata di plastica riciclata chimicamente, rispetto alla stessa quantità inviata a termovalorizzazione (fonte: BASF[47])

Diviene pertanto indispensabile adottare e attivare tecnologie che consentano di arrivare a un riciclo pressoché totale della quantità di plastica a fine vita. L'avvio di questi nuovi processi potrà avere inoltre ricadute positive sia sul settore occupazionale che di miglioramento tecnologico, oltre che nel settore della raccolta e selezione dei rifiuti plastici. Sarà infatti necessario sviluppare nuove filiere di alimentazione per gli impianti che si costruiranno. La pirolisi e la gassificazione rappresentano circa l'80% delle capacità pianificate. Con riferimento ai noti obiettivi SDGs (Sustainable Development Goals), la tecnologia del riciclo chimico può fornire un contributo diretto al 9 (Imprese, Innovazione, Infrastrutture), 12 (Consumo e produzione responsabili) e 13 (Lotta contro il cambiamento climatico) e indirettamente all'8 (Lavoro dignitoso e crescita economica) e 14-15 (Vita sott'acqua e vita sulla terra).

Si possono inoltre individuare alcuni fattori necessari allo sviluppo di queste tecnologie che esulano dagli aspetti strettamente tecnologici e scientifici. Questi

[47] *https://www.basf.com/dam/jcr:fd67fdbd-0020-3b9f-b9ac-4da1568c97a2/basf/www/global/documents/en/sustainability/we-drive-_sustainable-solutions/circular-economy/2020-09-21_LCA_ChemCycling_Slide_deck.pdf*

riguardano:

Educazione e sensibilizzazione: è fondamentale aumentare la comprensione da parte del pubblico dei concetti di bioeconomia ed economia circolare. Educare le parti interessate, compresi i consumatori, sui vantaggi e sui metodi di implementazione può favorire un'adozione diffusa. Evidenziando i vantaggi ambientali, economici e sociali di questi modelli, le parti interessate possono prendere decisioni informate a supporto della sostenibilità.

Sostegno economico e incentivi: fornire politiche e incentivi economici è essenziale per incoraggiare la transizione verso la bioeconomia e le pratiche dell'economia circolare. Il sostegno finanziario può aiutare le imprese a superare i costi di investimento iniziali e ad accelerare l'adozione di pratiche sostenibili.

Quadro normativo: stabilire un quadro normativo chiaro è fondamentale per creare un ambiente favorevole alle pratiche della bioeconomia e dell'economia circolare. La semplificazione delle normative e la creazione di politiche di sostegno possono ridurre gli ostacoli e fornire alle imprese certezza e fiducia nella transizione verso modelli più sostenibili.

Sfruttando queste opportunità nell'istruzione, nel sostegno economico, nei quadri normativi e nel comportamento dei consumatori, le parti interessate possono accelerare la transizione verso un'economia più sostenibile e circolare. La collaborazione tra governi, imprese, mondo accademico e società civile è essenziale per realizzare il pieno potenziale dei principi della bioeconomia e dell'economia circolare e ottenere benefici ambientali ed economici duraturi.

Stato dell'arte

Nota per il presente paragrafo: per motivi di spazio editoriale, si riportano solo alcune realtà tra le esistenti e le numerose in via di sviluppo, senza la volontà di escludere nessuna iniziativa in corso o già esistente[48].

In Italia il Riciclo Chimico delle plastiche è oggetto di studi accademici e industriali ormai da qualche anno. Attualmente, i processi di riciclo chimico sono presenti

[48] *Polimerica https://www.polimerica.it/ e annunci fatti dalle singole società.*

in una dimensione industriale ridotta e sono oggetto di operazioni di scale-up in modo da aumentarne la potenzialità per rispondere agli effettivi fabbisogni e consolidare i processi di riciclo. La LyondellBasell ha sviluppato un processo di pirolisi catalitica denominato MoReTec. Partendo da prove di laboratorio presso il Centro Ricerche di Ferrara, è stato costruito un impianto pilota e sviluppata la tecnologia per la costruzione di un impianto industriale di pirolisi della potenzialità di 50.000 t/a nel sito di Wesseling in Germania.

Versalis ha iniziato lo studio del riciclo chimico nel 2019. Da questi studi è nata la tecnologia Hoop® che sfrutta il processo di pirolisi. L'iniziativa è stata avviata grazie a un accordo di sviluppo congiunto con la società italiana di ingegneria, Servizi di Ricerche e Sviluppo (S.R.S), già proprietaria di una tecnologia di pirolisi, che è stata integrata al fine dell'ottenimento di un olio quanto più vicino, come caratteristiche, alla Virgin nafta per cracking. Si sta costruendo un impianto dimostrativo nel sito di Mantova della capacità di 6000 t/a di alimentazione di materia prima seconda, derivante dalla raccolta della plastica a fine vita con completamento previsto ad aprile 2025. Nel contempo Versalis e Technip Energies (T.EN), società leader nell'ingegneria e nella tecnologia per la transizione energetica, hanno sottoscritto un accordo finalizzato all'integrazione delle tecnologie Hoop® di Versalis con quelle di purificazione Pure.rOilTM e Pure.rGasTM di T.EN, costituendo una piattaforma tecnologica per il riciclo chimico avanzato[49].

Nel Regno Unito, Plastic Energy ha sviluppato e brevettato un processo denominato TAC™, che dalla plastica produce un olio (TACOIL™). Plastic Energy dispone di impianti a ciclo continuo in Spagna, a Siviglia (avviato nel 2014) e Almeria (2017). Un terzo impianto da 25.000 tonnellate annue è in fase di costruzione a Notre Dame de Gravenchon, in Francia, nei pressi del polo petrolchimico del gruppo ExxonMobil.
La spagnola Neoliquid possiede una tecnologia basata anch'essa sulla pirolisi in grado di trattare varie tipologie di rifiuti, tra i quali anche le plastiche; anche in

[49] *https://versalis.eni.com/it-IT/news/comunicati-stampa/2023/technip-energies-e-versalis-insieme-per-integrare-tecnologie-di-riciclo-_chimico-delle-plastiche.html*

questo caso si ottiene un olio che può essere utilizzato nel settore petrolchimico.
Eastman ha recentemente avviato nel sito di Kingsport, nello stato del Tennessee (USA) un impianto di depolimerizzazione di rifiuti post-consumo di bassa qualità a base poliestere, basato sul processo della metanolisi. Nel piano di Eastman è prevista la costruzione di altre due unità, una in Francia e l'altra sempre negli Stati Uniti.
La società Olandese Pryme ha avviato a gennaio 2024, nei pressi del porto di Rotterdam, un impianto di riciclo chimico delle plastiche basato sulla tecnologia della pirolisi; l'avvio sarà condotto in modo graduale attraverso tre step nel corso dell'anno, con l'obiettivo di arrivare ad una capacità di 30.000 t/a di produzione di olio.
Mura Technology possiede invece a Teesside, nel Nordest dell'Inghilterra, un impianto di riciclo inaugurato a fine 2023. Il processo è basato su HydroPRS (Hydrothermal Plastic Recycling Solution) e utilizza vapore in condizioni supercritiche per ottenere nafta, oli pesanti e distillati da alimentare in impianti di cracking. L'impianto sarà in grado di trattare a regime 20.000 tonnellate annue di plasmix.
La società danese Quantafuel ha avviato nel 2020 a Skive un impianto di pirolisi termica e catalitica a due stadi da 16.000 t/a. Quantafuel ha inoltre in progetto l'avvio di altre due unità una sempre in Danimarca, una a Esbjerg, inserita in un sito che riceverà 160.000 t/a di rifiuti da trattare, e una da 100.000 t/a nel Regno Unito, con avvio nel 2025.
La società tedesca Recenso ha un impianto a Ennigerloh, in funzione dal 2017 presso un sito di gestione dei rifiuti della capacità di 2500t/a; si tratta di un processo denominato CTC (Catalytic Tribochemical Conversion), caratterizzato dall'applicazione combinata di meccanismi termici, catalitici e meccanochimici (tribochimici), nonché dalla sua applicabilità a un'ampia gamma di materiali in ingresso. L'energia di processo viene introdotta nel sistema solo attraverso l'attrito.

Gli impianti di riciclo meccanico, in primis, e chimico necessitano che a monte via sia un sistema strutturato di raccolta e selezione delle plastiche. In Italia esistono molte realtà sorte in varie località; anche in questo caso per vincoli di spazio ci si

limita a elencarne soltanto alcune.
Nel mese di aprile 2024 a Borgaro Torinese (TO) è stato inaugurato Circular Plastic un impianto di selezione e stoccaggio di rifiuti plastici della capacità di 100.000 t/a; l'impianto è stato realizzato da Amiat e gestito da I.Blu, due società del Gruppo Iren, e ha adottato le più moderne tecnologie del settore. Circular Plastic comprende 130 nastri trasportatori dotati di 22 lettori ottici in grado di riconoscere e suddividere 17 tipi di polimeri e plastiche, svolgendo una selezione accurata delle plastiche che potranno rientrare in un ciclo di recupero successivo della materia prima. Il materiale in ingresso viene innanzitutto selezionato per dimensione: i rifiuti più fini subiscono una successiva separazione, che permette di recuperare ulteriori frazioni di imballaggi valorizzabili; i materiali di dimensione intermedia vengono differenziati tra rigidi e flessibili e, nel caso delle bottiglie in PET, anche per colore
A Montello (BG) opera l'omonima azienda la quale è in grado di trattare circa 350.000 t/a di rifiuti plastici, provenienti da imballaggi da post consumo, ottenendo varie materie prime seconde destinate ai processi di riciclo.

Risorse economiche necessarie

I processi di riciclo chimico, come precedentemente descritto, sono basati su differenti tipologie di tecnologie ma allo stato attuale quella che sembra avere più diffusione è la pirolisi sia essa termica o catalitica. Le risorse economiche da impiegare sono strettamente legate al tipo di tecnologia e alla dimensione dell'impianto di riciclo, e risulta quindi difficile effettuare una valutazione senza un progetto in essere. Si può tentare una stima indicativa prevendendo che per impianti di media capacità (da 10 ad 80.000 t/a di trattamento plastiche) l'impegno economico per la messa in opera dell'impianto si collochi nella fascia che va dai 20 ai 100 milioni di €, mentre per taglie superiori sia maggiore. Si sta inoltre assistendo, in Europa, a un aumento significativo degli investimenti pianificati nel riciclo chimico: dai 2,6 miliardi di euro previsti nel 2025 agli 8 miliardi di euro del 2030[50].
Il riciclo delle plastiche, sia chimico che meccanico, rientra tra i progetti oggetto

[50] https://plasticseurope.org/sustainability/circularity/recycling/chemical-recycling/

di interesse del PNRR. Il Fondo per l'Innovazione (Innovation Fund) è uno dei principali programmi di finanziamento a livello mondiale per la dimostrazione commerciale di tecnologie innovative a basse emissioni di carbonio. Attivato dalla Commissione europea, ha l'obiettivo di portare sul mercato soluzioni industriali per decarbonizzare l'economia europea e sostenere la transizione dell'Unione verso la neutralità climatica. Le nuove tecnologie di riciclo chimico, per la loro caratteristica come già detto, possono essere viste come strumenti che contribuiscono al raggiungimento dell'obiettivo nello spirito del fondo e come tali potrebbero concorrere per possibili sostegni finanziari.

Gli investimenti non riguardano però semplicemente la tecnologia di riciclo; occorre tenere presente che lo sviluppo di questi processi è strettamente legato alle filiere di selezione e separazione del plasmix. Anche in questo settore c'è pertanto da aspettarsi un avanzamento dello stato tecnologico accompagnato quindi da investimenti economici. Un ultimo aspetto da considerare riguarda la comunicazione. Come accennato, una comunicazione efficace verso gli stakeholder, accompagnata da un'adeguata formazione, è fondamentale al fine del raggiungimento degli obiettivi di sostenibilità e circolarità; anche in questo settore bisognerà pertanto investire.

TECNOLOGIE E MATERIALI PER LA CIRCOLARITÀ E IL RIUSO DI MANUFATTI MULTIMATERIALE, INCLUSI GLI PNEUMATICI

La circolarità si basa su tre principi fondamentali: riduzione dei rifiuti, riutilizzo dei materiali e riciclo delle risorse. La sua applicazione al riuso di manufatti multimateriale, tra cui gli pneumatici, rappresenta una sfida e un'opportunità per promuovere un'economia sostenibile grazie ad un approccio innovativo alla gestione dei rifiuti e delle risorse. Attraverso investimenti mirati, collaborazioni tra diversi attori e innovazioni tecnologiche, è possibile trasformare i rifiuti in risorse, contribuendo alla conservazione dell'ambiente e al raggiungimento degli obiettivi di sviluppo sostenibile.

Per gli pneumatici a fine vita (End-of-Life Tires, ELTs), questo significa recuperare materiali come gomma, acciaio e fibre tessili per la produzione di nuovi pneumatici o altri prodotti come ad esempio:

- **Produzione di nuovi pneumatici** - Il recupero della gomma dagli ELTs può essere utilizzato per produrre nuovi pneumatici, riducendo la necessità di materie prime vergini.
- **Infrastrutture stradali** - La gomma riciclata dagli ELTs può essere utilizzata per produrre asfalto modificato con gomma, migliorando la durabilità e la resistenza delle strade.
- **Prodotti sportivi** - I granuli di gomma derivati dagli ELTs sono impiegati nella realizzazione di superfici sportive, come campi da calcio e piste di atletica.
- **Componenti industriali** - La gomma riciclata può essere utilizzata per produrre componenti industriali, come guarnizioni e tappeti antivibranti.
- **Edilizia** - I materiali derivati dagli ELTs trovano applicazione nella produzione di materiali da costruzione, come pannelli isolanti e mattoni di gomma.

Motivazione per lo sviluppo

Il crescente accumulo di pneumatici a fine vita rappresenta una sfida ambientale significativa. Gli ELTs occupano spazio nelle discariche, rappresentano un rischio di incendio e possono rilasciare sostanze chimiche dannose nel suolo e nell'acqua. Inoltre, la produzione di pneumatici richiede una grande quantità di risorse naturali, come petrolio e gomma naturale, il cui sfruttamento ha un impatto

ambientale considerevole.
Le tecnologie di questo complesso sviluppo contribuiscono in maniera rilevante a svariate classi di innovazione:

- **Transizione digitale** - Le tecnologie digitali, come l'Internet of Things (IoT) e l'Intelligenza Artificiale (AI), possono ottimizzare la raccolta, il tracciamento e il trattamento degli ELTs, migliorando l'efficienza dei processi di riciclo.
- **Transizione ambientale** - Il riciclo degli ELTs riduce la domanda di materie prime vergini e l'impatto ambientale associato all'estrazione e alla lavorazione di queste risorse, contribuendo alla riduzione delle emissioni di gas serra.
- **Transizione energetica** - L'uso di materiali riciclati riduce il consumo energetico rispetto alla produzione di materiali vergini, supportando la transizione verso fonti di energia più sostenibili.
- **Transizione sociale** - La creazione di una filiera del riciclo degli ELTs può generare nuovi posti di lavoro e promuovere pratiche di consumo sostenibile nella società.

Infine, la crescente consapevolezza ambientale e l'evoluzione delle normative europee offrono opportunità per sviluppare applicazioni di alto valore per materiali riciclati.

Rilevanza

Il riciclo degli ELTs contribuisce agli obiettivi di sviluppo sostenibile, in particolare contribuisce ai seguenti SDG (Sustainable Development Goals) dell'ONU:

- **SDG 12:** Consumo e produzione responsabili
- **SDG 13:** Azione per il clima
- **SDG 15:** Vita sulla terra

Di conseguenza gli impatti sono altrettanto significativi:

- **Politico** - Implementazione di normative e incentivi per promuovere il riciclo degli ELTs.
- **Economico** - Riduzione dei costi di smaltimento e creazione di nuovi mercati per i materiali riciclati.

• **Industriale** - Sviluppo di nuovi processi e tecnologie per il riciclo degli ELTs.
Innovativo - Introduzione di materiali riciclati con proprietà migliorate rispetto alle materie prime vergini.

• **Etico** - Promozione di pratiche sostenibili e responsabilità ambientale.
Legale - Necessità di aggiornare le normative per supportare il riciclo e l'uso dei materiali riciclati.

• **Sociale** - Creazione di posti di lavoro e sensibilizzazione sulla sostenibilità.
Ambientale - Riduzione dell'inquinamento e conservazione delle risorse naturali.

Stato dell'arte in Italia e all'estero

Le principali sfide tecnologiche per il recupero degli ELTs riguardano la separazione efficiente dei vari componenti (gomma, acciaio, fibre tessili) e il miglioramento della qualità dei materiali riciclati per renderli competitivi con le materie prime vergini. La ricerca e sviluppo (R&D) in questo settore si concentra su nuove tecnologie di pirolisi, micronizzazione e devulcanizzazione per ottenere materiali di alta qualità.

Tecnologia della pirolisi

Una delle tecnologie emergenti più promettenti è la pirolisi, un processo termochimico che decompone i materiali organici in assenza di ossigeno a temperature elevate. Il recupero dei pneumatici a fine vita tramite pirolisi permette di ottenere diverse materie prime seconde di valore. Tra queste, il recovered carbon black (rCB), l'olio di pirolisi (tyre pyrolysis oil, TPO), il gas utilizzato per co-generare energia nel processo produttivo e i rinforzi metallici.

• **Valorizzazione dell'olio di pirolisi.** Il TPO è particolarmente interessante per i suoi molteplici utilizzi. Dopo il processo di pirolisi, il TPO può essere depolimerizzato in steam crackers, generando monomeri che sono fondamentali per la produzione di nuovi polimeri. Questi monomeri possono essere utilizzati per produrre elastomeri SBR, ampiamente utilizzati negli pneumatici, e poliammidi come il Nylon, impiegati in varie applicazioni industriali.

• **Recupero del nero di carbonio.** Un altro prodotto di valore ottenibile dalla pirolisi degli ELTs è il nero di carbonio. Dopo la pirolisi, il nero di carbonio deve

subire ulteriori trattamenti per migliorarne le proprietà rinforzanti. Questo può includere processi di attivazione termica o chimica per aumentare la superficie specifica e la reattività. Il nero di carbonio recuperato e trattato può essere utilizzato come filler rinforzante negli pneumatici nuovi, contribuendo a migliorare le loro prestazioni e durata.

- **Recupero della silice.** Il recupero della silice dai pneumatici a fine vita attraverso la pirolisi è un'innovazione significativa. Dopo la pirolisi, i residui solidi contenenti silice possono essere trattati ulteriormente per isolarla. La silice recuperata può essere purificata e utilizzata come rinforzante nella produzione di nuovi pneumatici, migliorando le proprietà meccaniche e la resistenza all'usura.
- **Recupero delle fibre di PET.** Le fibre tessili presenti nei pneumatici, come le fibre di PET (polietilene tereftalato), possono essere recuperate selettivamente prima della pirolisi e successivamente trattate per essere riutilizzate. Il trattamento delle fibre di PET recuperate può includere processi di pulizia e rigenerazione per ripristinarne le proprietà meccaniche e chimiche. Queste fibre possono essere reintrodotte nella produzione di nuovi pneumatici o utilizzate in altre applicazioni industriali, come la produzione di materiali compositi leggeri.

Oltre alla pirolisi, le tecnologie di micronizzazione e devulcanizzazione sono fondamentali per migliorare la qualità dei materiali riciclati.

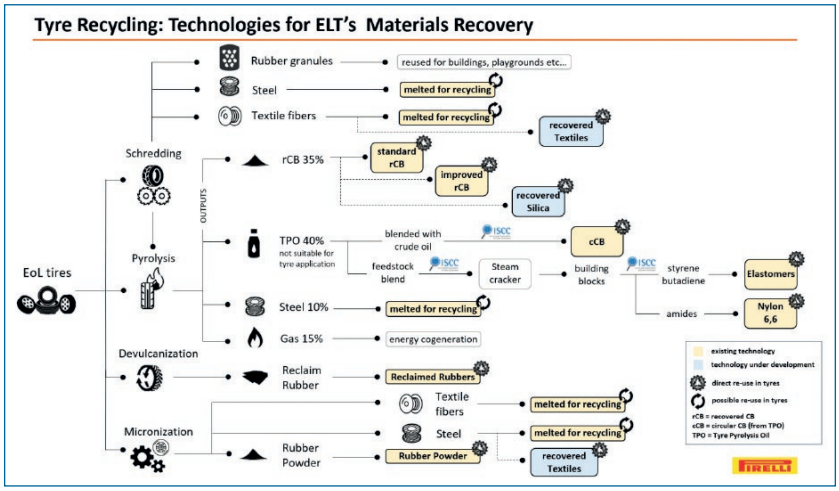
<u>Tecnologie di micronizzazione</u>

La micronizzazione permette di ridurre gli pneumatici a particelle molto fini (polverino di gomma) regolando la loro dimensione per migliorare la dispersione e compatibilità con le matrici polimeriche. In particolare, la tecnologia di micronizzazione tramite getto di acqua può essere opportunamente valorizzata per separare il polverino di gomma dai rinforzi metallici o addirittura anche tessili, aprendo ulteriore spazio di ricerca e sviluppo sulle opportunità di recupero di tali rinforzi. In Italia si utilizzano frantumatori ad alta efficienza per ridurre i pneumatici in granuli di gomma e polverino. In particolare, per la produzione di quest'ultimo, in Italia ha sede uno dei più virtuosi produttori di polverino da ELT con tecnologia

brevettata waterjet, che fa uso solo di acqua ad alta pressione, riciclata all'interno del ciclo produttivo.

Tecnologie di devulcanizzazione

La devulcanizzazione, invece, mira a rompere i legami di zolfo nella gomma vulcanizzata, ripristinando la flessibilità e la processabilità del materiale, consentendo di riutilizzarlo come gomma vergine che può essere nuovamente vulcanizzata.



ELT = End-of-Life Tyres; TPO = Tyre Pyrolysis Oil; rCB = recovered Carbon Black; cCB = circular Carbon Black; EoL = End of Life

La combinazione di queste tecnologie innovative consente di ottenere materiali riciclati di alta qualità, che possono competere con le materie prime vergini in termini di prestazioni e costi. La sfida principale rimane l'ottimizzazione di questi processi per massimizzare l'efficienza e la sostenibilità economica, nonché l'integrazione delle tecnologie in impianti industriali su larga scala. La collaborazione tra industrie, centri di ricerca e istituzioni governative è cruciale per superare queste sfide e promuovere una gestione sostenibile degli pneumatici a fine vita.

In Italia, il riciclo degli ELTs è regolamentato dal Consorzio Nazionale Recupero Pneumatici (CNRP), che coordina la raccolta e il trattamento degli pneumatici a fine vita. Le tecnologie utilizzate includono la frantumazione meccanica e la pirolisi In Europa, la direttiva sui rifiuti di apparecchiature elettriche ed elettroniche (WEEE) e la direttiva sui rifiuti di imballaggio promuovono il riciclo degli ELTs. In paesi come la Germania e la Svezia, avanzate tecnologie di pirolisi e devulcanizzazione sono in fase di sviluppo. Negli Stati Uniti, il programma Tire Recycling Management coordina il riciclo degli ELTs, con un focus su tecnologie innovative e sostenibili. Tuttavia, la regolamentazione, sebbene ben strutturata, può rappresentare un ostacolo per l'introduzione di tecnologie innovative a causa di iter autorizzativi complessi e requisiti stringenti.
Dal punto di vista delle attività di innovazione sul tema, il Ministero della Transizione Ecologica supporta progetti di ricerca e sviluppo nel settore dei rifiuti e dell'economia circolare, con particolare attenzione a soluzioni innovative per il riciclo degli ELTs. Fondi europei, come il programma Horizon Europe, finanziano consorzi di ricerca italiani per collaborare a tecnologie avanzate, tra cui la valorizzazione chimica dei materiali derivati dagli pneumatici.
Aziende italiane collaborano con università e centri di ricerca per lo sviluppo di tecnologie sostenibili. Alcuni esempi includono l'impiego di polverino di gomma per la produzione di biopolimeri e materiali compositi.

Risorse economiche necessarie

Il tempo necessario per portare nuove tecnologie di riciclo degli ELTs sul mercato può variare da 3 a 10 anni, a seconda della complessità tecnologica e delle normative in vigore. La collaborazione tra industrie, istituti di ricerca e governi è cruciale per accelerare questo processo. I filoni da perseguire sono di svariata natura:

Investimenti in ricerca e sviluppo. Sono necessari significativi investimenti in ricerca e sviluppo per migliorare le tecnologie di riciclo degli ELTs. Questo include finanziamenti per università, centri di ricerca e partnership pubblico-private.

- Tecnologie della pirolisi. Le sfide riguardano i costi elevati degli impianti e la

mancanza di economie di scala che rendano la pirolisi competitiva rispetto ad altre soluzioni di riciclo.

• Tecnologie di micronizzazione. Miglioramento della separazione dei materiali multimateriale (gomma, metallo, tessuti) per ridurre le perdite di materiale e incrementare la purezza del prodotto riciclato; miglioramento delle proprietà meccaniche tramite funzionalizzazione.

• Tecnologie di devulcanizzazione. Sviluppo di processi per migliorare le proprietà meccaniche del devulcanizzato tramite funzionalizzazione con trattamenti chimici o miglioramenti di processo.

Infrastrutture. L'implementazione di infrastrutture per la raccolta, il trattamento e il riciclo degli ELTs richiede investimenti in impianti di frantumazione, pirolisi e devulcanizzazione, nonché in sistemi di gestione e tracciamento dei rifiuti.

Incentivi e sussidi. Per promuovere il riciclo degli ELTs, sono necessari incentivi finanziari e sussidi da parte dei governi per supportare le aziende nella transizione verso pratiche di produzione sostenibili.

Educazione e formazione. Investire in programmi di educazione e formazione è essenziale per sensibilizzare la popolazione e formare una forza lavoro qualificata nel settore del riciclo degli ELTs.

Collaborazioni internazionali. La collaborazione internazionale può facilitare lo scambio di conoscenze e tecnologie, ottimizzando le risorse economiche e accelerando lo sviluppo di soluzioni innovative per il riciclo degli ELTs.

Le risorse economiche necessarie a sviluppare questo insieme di progetti multidisciplinari con importanti competenze specialistiche includono una fase dimostrativa con una stima di budget di circa 5-10 M€ e una fase di maturazione industriale con un budget stimato di circa 15-20 M€.

TECNOLOGIE PER INTRODURRE BIOPOLIMERI IN PNEUMATICI HIGH PERFORMANCE

I target di sostenibilità richiesti dalle case auto sono diventati ormai leva competitiva nel mondo della componentistica e in particolare dello pneumatico, a tal punto che di fatto oggi ogni nuovo prodotto di alta gamma che viene lanciato in Europa deve contenere un contenuto dichiarato e crescente di materiali bio-based coerentemente con i target di decarbonizzazione presentati nei piani industriali delle aziende produttrici.

In questo contesto, la catena di fornitura è protagonista nelle strategie dei produttori di pneumatici e i fornitori hanno negli ultimi anni messo a disposizione diverse strategie soprattutto a breve termine per arginare l'incombente richiesta di prodotti derivanti dalla natura. Un approccio sicuramente efficace è la certificazione ISCC+ che permette tramite l'approccio del bilancio di massa di fornire materie prime equivalenti con LCA migliorato. Questo approccio ha permesso ai fornitori consolidati di offrire ai tyre-makers una base solida su cui migliorare il contenuto di bio-based nei prodotti.

Al contempo, nuovi materiali si affacciano sul mercato, non senza difficoltà dovute principalmente all'adattamento ai sistemi di qualità ed ai volumi importanti richiesti dall'industria del pneumatico. Bio-oli, silici da lolla di riso e carbon black da pirolisi di pneumatico a fine vita sono rapidamente diventati delle nuove commodity.

I Biopolimeri sono una fonte interessantissima di materie prime performanti ma di utilizzo non ancora pronto nella tecnologia dello pneumatico. In particolare, l'approccio di bioraffineria, ovvero di frazionamento, trattamento e purificazione di derivati da biomasse per ottenere intermedi che vanno a sostituire i derivati del petrolio, viene sempre più applicato e nuovi impianti compaiono anche nel nostro Paese.

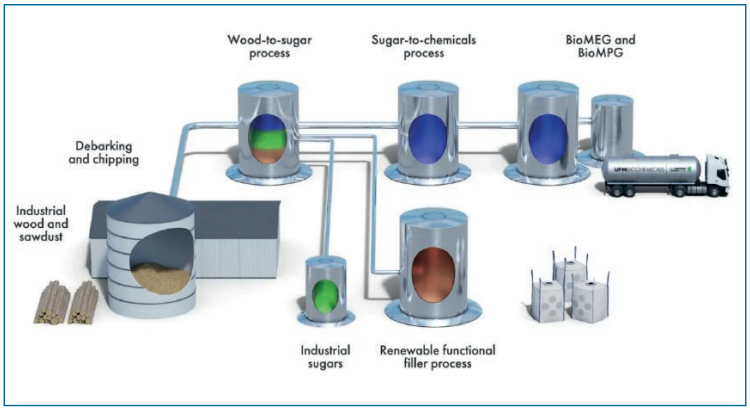


Figura 34: Schema della bioraffineria UPM a Leuna, UPM

Particolari biopolimeri che hanno dimostrato utilità nel tyre sono:

• La gomma naturale è la materia prima più utilizzata nell'industria dello pneumatico sin dagli albori della tecnologia. Le richieste sempre più stringenti del mercato hanno di fatto costretto i produttori a variegare il portfolio di gomme sintetiche, facili da modulare controllando le condizioni di sintesi. Ad oggi la gomma naturale è ancora l'ingrediente principale nello pneumatico ma i suoi ulteriori impieghi sono limitati.

• La cellulosa è utilizzata come materiale di rinforzo (fibra di rayon) principalmente per la componente strutturale nota come carcassa, e più recentemente anche come fibra fibillata per dare rinforzo meccanico elevato alle mescole una volta dispersa all'interno della formulazione. Quest'ultima tecnologia è stata esplorata ma non profondamente sfruttata per gli pneumatici high performance.

• La lignina è stata recentemente rivalutata come biopolimero in grado di impartire rigidità dinamica e protezione chimica in virtù della morfologia di aggregazione e del contenuto di gruppi fenolici. Anche in questo caso si può prevedere un ulteriore sviluppo nell'uso e introduzione in mescola

Motivazioni per lo sviluppo

Per migliorare l'appetibilità dei biopolimeri nei confronti dell'industria dei materiali compositi ed in particolare quelli del tyre si possono seguire 3 approcci:

1. Sviluppare tecnologie per migliorare la chimica di interazione del biopolimero con altri ingredienti 'classici' presenti nella formulazione e di conseguenza le proprietà del materiale composito.

2. Sviluppare tecnologie per migliorare le proprietà dimensionali/colloidali del biopolimero, qualora questo non risulti 'solubile' nella matrice principale ma venga disperso come fase rinforzante

3. Accoppiare la chimica offerta dal biopolimero con sistemi reattivi di nuova generazione che possano così rendere utilizzabile il biopolimero e al contempo ottenere proprietà simili o migliorate rispetto al materiale di partenza

Qualora il biopolimero sia un componente in grado da fungere da matrice elastomerica, e quindi da base formulativa delle mescole per pneumatici, è bene che la sua chimica venga ottimizzata per interagire efficientemente con gli altri ingredienti in mescola al fine di dare le proprietà mescola che ne sanciscono l'uso in pneumatico. Lo sviluppo recente degli SBR (gomma stirene butadiene) funzionalizzati degli ultimi 20 anni ha portato a guadagnare diverse classi di resistenza al rotolamento, mantenendo un buon comportamento sul bagnato e riducendo l'abradibilità del battistrada, grazie a strategie volte alla modifica chimica della gomma.

È possibile altresì utilizzare in mescola biopolimeri che non hanno le caratteristiche di un elastomero, ma che possono impartire rinforzo meccanico grazie alla loro peculiare struttura. È il caso di lignina e cellulosa, che forniscono al legno la componente adesiva e strutturale. Il controllo delle dimensioni delle particelle prima e durante l'inserimento nella mescola elastomerica è cruciale per l'incremento del carico a rottura e del modulo dinamico a compressione, che sono legati alla resistenza alla lacerazione e all'abrasione della mescola.

Si può inoltre considerare quanto detto nei due punti precedenti come base su cui poi innestare un terzo filone, con l'obiettivo di introdurre nuove classi di materiali all'interno della mescola grazie alla copresenza dei biopolimeri appositamente modificati. Ad esempio, nel caso in cui si voglia ottimizzare la dispersione di lignina e cellulosa in mescola si può pensare di cercare all'interno dell'ampia classe dei biosurfattanti scegliendo le migliori opzioni in termini di bilancio di idro/lipofilicità verificando il raggiungimento di migliori prestazioni della mescola, e nel contempo migliorando il contenuto di bio-based nel composito.

Stato dell'arte

La modifica della gomma naturale (poliisoprene sintetico) da caucciù è fino ad oggi un argomento di ricerca rimasto nelle mani dei paesi produttori, in particolare quelli del sudest asiatico. La modifica della gomma può essere effettuata in fase lattice, cioè nello stato nativo di emulsione acquosa, oppure a partire dalla gomma secca isolata, a seconda della modifica di interesse. Un esempio commerciale è l'epossidazione della gomma naturale che viene condotta in fase lattice utilizzando un acido organico ed acqua ossigenata, che producono in situ un perossido organico che fa da epossidante dei doppi legami della NR. La gomma epossidata viene seccata e venduta a diversi livelli di modifica sia nell'industria dei manufatti in gomma (in particolare per i nastri trasportatori) sia nell'industria dello pneumatico, ma l'utilizzo è ancora limitato a causa delle performance non pienamente soddisfacenti e non ancora competitive con gli SBR funzionalizzati.

La deproteinizzazione è una procedura di modifica chimica specifica del mondo dell'uso del lattice di gomma naturale, in particolare finalizzata a prevenire le dermatiti allergiche da contatto derivanti dall'utilizzo di guanti preservativi e altri manufatti a base di gomma naturale. Siccome le proteine della gomma naturale stabilizzano l'emulsione, durante il processo di denaturazione e deproteneizzazione è necessario utilizzare un surfattante che si possa sostituire ad esse, simultaneamente. Una tipica procedura di deproteinizzazione utilizza una miscela di urea (denaturante) e sodio dodecil solfato (surfattante) a cui segue la separazione

dell'estratto proteico. Procedure modificate sono in principio utilizzabili per inserire altre funzionalità alla gomma naturale, ed esistono brevetti dove si utilizzano anche combinazione di approccio di deproteinizzazione e modifica chimica.

La cellulosa è una materia prima di crescente interesse nel mondo dei materiali compositi e anche nello pneumatico. Oltre al classico utilizzo del rayon come fibra rinforzante strutturale dello pneumatico, ci sono diversi lavori sia pubblicati che brevettati che hanno utilizzato fibre fibrillate di cellulosa da varie origini vegetali o anche da intermedi industriali come filler rinforzante per le mescole. Il mezzo più comune per facilitare la dispersione in gomma è l'utilizzo del lattice di gomma naturale come veicolo, anche in presenza di surfattanti e/o modificanti atti a favorire l'interazione tra la fibra e la mescola finale. Un discorso simile si può affrontare per la lignina, che ha dimostrato ottime proprietà di rinforzo meccanico e anche di protezione chimica, in particolare nei confronti della gomma naturale che di tutti gli elastomeri è quello più sensibile all'ossidazione.

Risorse economiche necessarie

Le attività di sviluppo lungo le 3 direttrici identificate devono essere orientate verso lo studio chimico-strutturale dei materiali coinvolti, lo sviluppo delle tecniche di produzione più idonee, lo studio di fattibilità in pilota o semiscala e l'analisi dell'impatto delle tecnologie applicate. Progetti concentrati su "proof of concept" (TRL6) su aspetti specifici abilitanti e trasversali potrebbero richiedere 1-4 milioni per tecnologia.

Lo sviluppo richiede un approccio multidisciplinare e richiede competenze specialistiche ed importanti investimenti. Per portarlo avanti efficacemente è indispensabile definire una struttura che possa coinvolgere ed integrare in un'unica filiera gli Enti di Ricerca, i laboratori Universitari e le Industrie interessate. Tali progetti, che coinvolgessero una filiera e ambissero ad arrivare a TRL 7 sui diversi aspetti della tecnologia in modo coordinato potrebbero richiedere 10-20 milioni.

Potenziale ricaduta Occupazionale

Lo sviluppo di tecnologie capaci di migliorare l'impatto ambientale degli pneumatici ha potenziali ricadute occupazionali su tre livelli:

- Presso la filiera agroalimentare, che potrebbe partecipare all'instaurazione di una filiera di gestione dello scarto e sfalcio agricolo che prevede la valorizzazione delle biomasse

- Presso le aziende fornitrici di materie prime, che potrebbero installare così nuove linee ad alto valore aggiunto

- Presso i produttori di pneumatici stessi, per supportare il lancio di nuovi prodotti contenenti nuove tecnologie

ADDITIVI FUNZIONALI PER SOLUZIONI SOSTENIBILI

Gli additivi funzionali rappresentano una classe di materiali e sistemi sviluppati per l'ottenimento di determinate proprietà funzionali. Sono prodotti a comportamento, altamente differenziati tra loro, e identificabili più attraverso le proprietà funzionali in grado di caratterizzare le diverse formulazioni che attraverso la loro natura chimica o composizione. Il loro mercato sta espandendosi significativamente e di conseguenza anche il numero di domande di brevetto che rivendica nuovi additivi funzionali a causa della crescente necessità di prodotti industriali con prestazioni e durata migliorate e del ruolo fondamentale degli additivi nel migliorare le qualità di varie formulazioni, coating, adesivi e sigillanti.

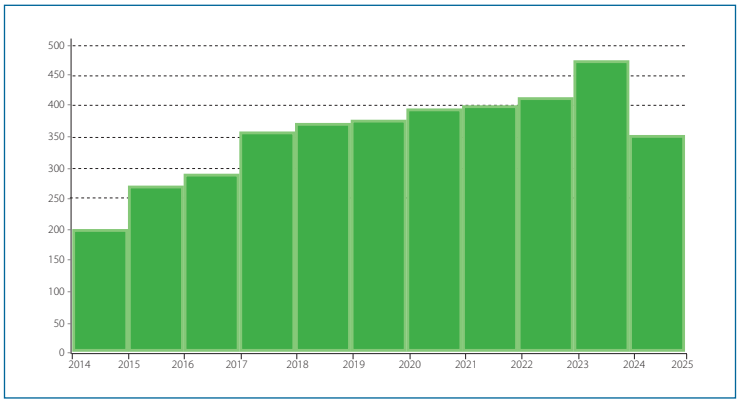


Figura 35: Andamento del numero delle domande di brevetto depositate negli ultimi 10 anni (2014 – 2024 parziale) e identificate utilizzando la query "functional additive" in titolo-abstract-rivendicazioni (Fonte: lens.org)

Motivazioni per lo sviluppo

L'impatto industriale degli additivi funzionali è rilevante in numerosi settori e ha effetti su diverse dimensioni della produzione industriale, sia dal punto di vista economico che ambientale e tecnologico tra cui:

- Imballaggio (additivi biodegradabili e compostabili);
- Elettronica (additivi per ridurre l'impatto ambientale in dispositivi elettronici);

- Alimentare (additivi per la conservazione degli alimenti e per il miglioramento della loro qualità);
- Cosmetici (additivi naturali per una crescente domanda di prodotti "green");
- Automotive (additivi per riduzione peso e riduzione);
- Agricoltura (additivi per fertilizzanti e pesticidi sostenibili contribuendo a pratiche agricole più ecologiche);

Gli additivi funzionali, progettati per migliorare le prestazioni dei prodotti finali in maniera specifica, stanno trasformando molti comparti produttivi, quali miglioramento delle prestazioni dei prodotti ed in particolare incremento della durabilità e della resistenza; riduzione dei costi produttivi grazie ad un incremento dell'efficienza produttiva e una riduzione degli scarti, riduzione dell'impronta ecologica dei processi industriali grazie all'utilizzo di additivi di origine biologica o rinnovabile che migliorano l'efficienza dei processi produttivi contribuiscono a ridurre il consumo di energia e le emissioni di CO_2; favorire dinamiche di economia circolare grazie all'utilizzo di additivi che migliorano la compatibilità tra plastiche diverse permettono un riciclo più efficiente, contribuendo alla creazione di materiali secondari di alta qualità e riducendo la dipendenza dalle materie prime vergini.

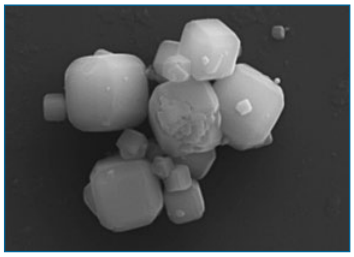


Figura 36: Immagine FESEM di una nuova classe di additivi funzionali a base zeoliti (ZeoSAES®, www.saesgetters.com)

Gli additivi permettono anche di garantire un ridotto impatto sull'ambiente, la salute e la società ma preservando le caratteristiche funzionali del prodotto. Sviluppare additivi funzionali sostenibili significa rispettare un insieme di criteri a ridotto impatto ambientale quali origine delle materie prime, efficienti processi di produzione, ridotto rischio per la salute e gli ecosistemi, incremento della durata ed efficacia funzionalità: Devono mantenere alte prestazioni tecniche e durabilità senza compromettere l'efficienza del prodotto finale. Gli additivi funzionali possono avere un significativo impatto sulla sostenibilità dei seguenti settori:

- Riduzione dei Rifiuti (additivi per migliorare la durabilità dei materiali);
- Biodegradabilità (additivi sostenibili biodegradabili o compostabili);
- Efficienza Energetica (additivi per miglioramento dell'efficienza dei processi produttivi con riduzione consumo di energia e emissioni CO_2);
- Miglioramento della Riciclabilità (additivi per materiali a migliore riciclabilità);
- Sostituzione di Materiali Tossici (additivi funzionali sostenibili per sostituire sostanze chimiche dannose);
- Promozione di Materiali Eco-Friendly (uso di additivi naturali o derivati da fonti rinnovabili per creazione di materiali più sostenibili);
- Innovazione nei Prodotti (additivi per lo sviluppo di prodotti innovativi con ridotto impatto ambientale)

Rilevanza

La creazione di nuovi additivi è strettamente correlata sia alla richiesta di materiali ad alte prestazioni, in particolare in settori quali packaging, edilizia e automotive, sia al crescente focus sulla sostenibilità, aspetti che alimentano continuamente la richiesta di innovazione in questo ambito. Si prevede che il mercato degli additivi funzionali crescerà in modo significativo. Ad esempio, per il 2023 sono stati stimati oltre 13.000 additivi adottati in diverse tipologie di formulazioni all'interno dell'Unione Europea (UE) [51] con un contenuto in massa dallo 0,01% al 70% in peso, a seconda della formulazione, dell'applicazione, della funzione dell'additivo, dell'industria e del produttore[52], [53].
Si stima che il fatturato totale per gli additivi utilizzati nei coating sia di oltre 6 miliardi di euro. I modificatori di reologia rappresentano il sub-segmento più grande, con oltre il 30% della domanda.

Lo sviluppo di additivi è regolato da numerose normative di riferimento sia nazionali, sia europee sia globali, che guidano lo sviluppo del settore. Si citano nel seguito quelle europee più significative:

- REACH (per registrazione di sostanze chimiche, comprese gli additivi, per garantire la loro sicurezza);

[51] *United Nations Environment Programme and Secretariat of the Basel, Rotterdam and Stockholm Conventions (2023). Chemicals in plastics: a technical report.*

[52] *Aurisano, Nicolò; Weber, Roland; Fantke, Peter (2021): Enabling a circular economy for chemicals in plastics. In: Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry 31, S. 100513. DOI: 10.1016/j.cogsc.2021.100513*

[53] *OECD 2019: Complementing document to the emission scenario document on plastic additives: plastic additives during the use of end products;*

- CLP (per la classificazione e l'etichettatura delle sostanze chimiche);
- Regolamento (CE) n. 1333/2008 (per uso di additivi alimentari nell'Unione Europea);
- Direttiva 2001/95/CE (Direttiva sulla sicurezza dei prodotti);
- Direttiva 2011/65/UE (RoHS) (per limitare l'uso di determinate sostanze pericolose in prodotti specifici);
- Regolamento (UE) n. 528/2012 (BPR) (per l'immissione sul mercato e l'uso di biocidi, che possono includere additivi funzionali);
- ISO 26262 e normative specifiche su materiali e additivi per automotive;
- CE n. 1223/2009 per regolare l'uso di additivi in prodotti cosmetici;
- Normative ISO per definire qualità e sicurezza degli additivi funzionali.

Una norma di particolare rilievo per l'impiego di additivi in formulazioni è rappresentato dalla nuova normativa europea sulle microplastiche introdotta nel 2023[54], che mira a ridurre l'impatto ambientale delle microplastiche rilasciate nell'ambiente. Tale modifica normativa sta spingendo la ricerca verso lo sviluppo di nuovi additivi alternativi che non contengano o rilascino microplastiche, con l'obiettivo di sostituire gradualmente quelli esistenti.
La regolamentazione fa parte del piano d'azione per l'economia circolare e la strategia europea per le materie plastiche, che mirano a ridurre l'impatto delle plastiche e promuovere il riciclo e la sostenibilità nell'uso delle risorse. Nello specifico la norma sancisce il divieto dell'uso di additivi che possano rientrare nella classificazione di microplastiche aggiunte intenzionalmente in prodotti come cosmetici, coating, pneumatici, tessuti, detergenti e fertilizzanti. In dettaglio, la nuova normativa dell'Unione Europea modifica il regolamento REACH (Regolamento CE n. 1907/2006) introducendo una definizione aggiornata di microplastiche. Secondo tale definizione, le microplastiche sono particelle solide, insolubili in acqua, composte principalmente, ma non solo, da polimeri sintetici e con una dimensione inferiore a 5 millimetri. Questa definizione include sia le microplastiche intenzionalmente aggiunte a prodotti che quelle generate come sottoprodotto dell'usura, come nel caso pneumatici o dei tessuti sintetici.

[54] *Commission Regulation (EU) 2023/2055 of 25 September 2023 amending Annex XVII to Regulation (EC) No 1907/2006 of the European Parliament and of the Council concerning the Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals (REACH) as regards synthetic polymer microparticles*

Per quanto riguarda la compostabilità, la normativa stabilisce che i prodotti devono essere progettati in modo che, se dichiarati compostabili, siano effettivamente biodegradabili entro un tempo stabilito negli impianti di compostaggio industriale. Non tutte le microplastiche biodegradabili possono essere considerate compostabili secondo gli standard attuali per cui anche additivi biodegradabili non compostabili rientrano nella nuova classificazione di microplastiche.

Stato dell'arte

Si descrivono di seguito tre aree applicative degli additivi funzionali particolarmente importanti.

Coating

Si tratta di additivi multifunzionali per semplificare il numero di ingredienti delle formule, per ridurre le emissioni di VOC, regolare la processabilità o modulare la compatibilità, introdurre nuove funzioni. Essi vengono utilizzati per controllare la reologia, la viscosità e ottimizzare le proprietà di scorrimento. I plastificanti vengono incorporati nelle formulazioni per migliorare la flessibilità del film e possono anche essere utilizzati per le loro proprietà coalescenti. I biocidi vengono aggiunti alle formulazioni per prevenire la crescita di batteri e altri microrganismi durante la conservazione del rivestimento, nonché come conservanti per film dry. Inoltre, i biocidi che includono componenti chimici speciali utilizzati per ridurre il fouling marino, rappresentano circa il 22% del totale degli additivi utilizzati nei coating. I tensioattivi rappresentano circa il 19% della domanda di additivi. Altri additivi includono: promotori di adesione per migliorare l'adesione del rivestimento alle superfici aumentandone la durabilità; agenti antischiuma per l'ottenimento di una finitura uniforme, agenti anti-skinning per prevenire la formazione di pellicola superficiale, inibitori di corrosione per aumentare la stabilità dei coating, essiccanti per accelerare il processo di asciugatura, migliorando l'efficienza della produzione, assorbitori UV per proteggere il rivestimento dai danni causati dai raggi ultravioletti, aumentando la stabilità del colore. Negli ultimi anni sono stati introdotti sul mercato additivi in grado di integrare in coating nuove proprietà funzionali, tra questi ricordiamo additivi per incrementare le proprietà barriera ai

gas (tipicamente ossigeno e vapor acqueo) di coating sottili, additivi per l'adsorbimento selettivo di gas (quali ad esempio etilene) per incrementare la shelf-life di prodotti alimentari freschi, additivi con proprietà antiossidanti per preservare la qualità di prodotti sensibili durante il periodo di stoccaggio/invecchiamento.

Microelettronica

Gli additivi funzionali contribuiscono a migliorare le prestazioni, la durabilità e l'affidabilità di diversi dispositivi elettronici. Grazie all'innovazione continua e all'evoluzione della tecnologia, gli additivi funzionali sono essenziali per lo sviluppo di dispositivi elettronici sempre più complessi e performanti. Tra gli additivi funzionali più impiegati troviamo additivi per migliorare le proprietà di adesione di resine e adesivi, incrementare la resistenza termica e migliorare la stabilità chimica. Additivi ad alta costante dielettrica possono aumentare le proprietà isolanti di materiali dielettrici, riducendo la perdita di segnale nei circuiti ad alta frequenza. Additivi antistatici possono ridurre l'accumulo di elettricità statica, prevenendo danni ai componenti elettronici durante la manipolazione e l'assemblaggio, mentre additivi con opportuna costante elastica possono aumentare la resistenza agli urti e alle sollecitazioni meccaniche di componenti in strutture complesse. Inoltre, la diffusione di dispositivi elettronici in ambito 5G richiede sempre più l'integrazione di prodotti di incapsulamento dotati di additivi funzionali in grado di assorbire gas rilasciati durante il funzionamento (ad esempio idrogeno) o di assorbire sostanze permeanti all'interno del package (principalmente ossigeno e umidità) in modo da preservare il funzionamento di dispositivi elettronici sensibili.

Cosmetica

L'uso di additivi funzionali nei prodotti cosmetici è fondamentale per ottimizzare le performance e migliorare l'esperienza dell'utente. Questi additivi, che comprendono una vasta gamma di sostanze chimiche, sia organiche che inorganiche, vengono incorporati nelle formulazioni per svolgere funzioni specifiche, come migliorare la texture, aumentare la stabilità, garantire una migliore adesio-

ne e incrementare la stabilità dei formulati. In un settore in continua evoluzione, dove l'innovazione è cruciale per soddisfare le richieste di prodotti sempre più performanti, gli additivi funzionali contribuiscono a creare cosmetici che sono più efficaci e, al tempo stesso, garantiscono una migliore esperienza al consumatore. Con una crescente attenzione verso ingredienti naturali e sostenibili, la ricerca di additivi che rispondano a queste esigenze è diventata una priorità, rendendo il campo degli additivi cosmetici un'area di grande interesse e sviluppo. Negli ultimi anni si stanno diffondendo sempre più formulati rientranti nella cosmeceutica, prodotti cosmetici in grado di fornire non solo proprietà e benefici estetici, ma anche terapeutici. Si tratta di prodotti formulati con ingredienti attivi che agiscono a livello biologico o cellulare per migliorare la salute e l'aspetto della pelle in modo più profondo rispetto ai cosmetici tradizionali influenzando processi biologici come la rigenerazione cellulare, la produzione di collagene e l'idratazione. Sostanze attive contenute in prodotti cosmeceutici e integrate in additivi funzionali includono sostanze attive, come antiossidanti, peptidi, retinoidi, vitamine.

Risorse economiche necessarie

Lo sviluppo radicale di nuovi additivi funzionali richiede la realizzazione di nuove piattaforme tecnologiche con investimenti nell'ordine di 5-20 M€ per piattaforma e una tempistica di 5-7 anni per passare da un TRL 3 (Prova di concetto sperimentale) ad un TRL 9 (sistema reale provato in ambiente operativo). Una quota rilevante degli investimenti è dedicata alla realizzazione di nuovi impianti pilota e nuove linee produttive disegnate per la realizzazione di materiali e processi sostenibili.

Le attività di sviluppo incrementale di additivi sono caratterizzate da investimenti molto più contenuti (0.5-1 M€) in un tempo medio (1-3 anni) con un impatto significativo dei costi di qualifica e/o certificazione per additivi basati su materiali già impiegati nel mercato in settori altamente regolamentati come quello alimentare o farmaceutico.

Additivi funzionali rientrano anche nelle attività dei cluster tecnologici previsti dal Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR):

- Transizione Ecologica (additivi sostenibili per processi produttivi più ecologici, riducendo l'impatto ambientale;
- Innovazione Industriale (additivi avanzati per lo sviluppo di nuovi materiali e tecnologie, favorendo la competitività delle industrie);
- Settore Chimico (additivi per chimica verde e produzione di materiali innovativi, contribuendo alla sostenibilità del settore);
- Automotive e Mobilità Sostenibile (additivi per la produzione di veicoli leggeri e sostenibili per la transizione verso una mobilità ecologica);
- Salute e Benessere (additivi per cosmetici e per la salute per favorire la creazione di soluzioni innovative e sostenibili).

SVILUPPO DI PACKAGING COMPOSTABILI/RICICLABILI FUNZIONALIZZATI CON PRINCIPI ATTIVI DERIVANTI DA BIOMASSE DI SCARTO

Il mercato globale dei coating per imballaggi sta cambiando e crescendo, motivato dal fatto che i requisiti relativi alle proprietà e alle prestazioni dei packaging finali, quali ad esempio la durabilità degli imballaggi, la resistenza all'usura dei macchinari, la conformità al contatto alimentare, il fine vita, etc., diventano sempre più esigenti.

Lo sviluppo di packaging compostabili funzionalizzati con principi attivi derivanti da biomasse di scarto è una frontiera innovativa nell'industria del packaging, con impatti significativi sia ambientali che tecnologici. Questa soluzione mira a ridurre l'impatto ambientale dei materiali di imballaggio tradizionali e a migliorare la sicurezza e la durata dei prodotti confezionati, specialmente nel settore alimentare. Le formulazioni innovative che impiegano molecole di natura biobased per il coating funzionalizzante possono conferire elevate proprietà tecniche al packaging stesso, unite ad una maggiore sostenibilità, consentendo di soddisfare i nuovi requisiti dei rivestimenti in diversi ambiti di applicazione:

- **Alimentare,** mediante l'utilizzo di packaging attivi[55] per il confezionamento di prodotti freschi, congelati, e trasformati. I principi attivi antimicrobici e antiossidanti possono prolungare la durata di conservazione degli alimenti, ridurre il rischio di deterioramento e mantenere la qualità nutrizionale;
- **Farmaceutico e nutraceutico**, con packaging innovativi per la protezione e il miglioramento della stabilità di farmaci e integratori, garantendo l'integrità dei prodotti attraverso barriere efficienti contro umidità, ossigeno, e contaminanti;
- **Cosmetico**, con l'impiego di imballaggi attivi per cosmetici che richiedono una protezione elevata contro ossidazione e contaminazione microbica, estendendo la durata e preservando le proprietà dei prodotti;
- In tutti gli **altri settori** in cui la conservazione sicura dei prodotti deve essere garantita.

[55] *Per packaging attivi si intende una serie di procedure per cui si applica una tecnologia (in combinazione a principi attivi), al prodotto "imballaggio" in modo che non sia un mero contenitore del prodotto, ma che svolga attivamente la sua funzione strategica per implementare la conservazione del prodotto. Si tratta, a tutti gli effetti, di una evoluzione del confezionamento "tradizionale": si parla di "stratagemmi" volti ad aumentare l'efficacia del packaging stesso e della sua funzione protettiva nei confronti del prodotto (es. alimento), non limitandosi ad isolarlo, contenerlo e proteggerlo ma attivamente contribuendo ad allungare la sua shelf-life. Questo può avvenire principalmente con l'applicazione di "accessori esterni" oppure di componenti interni ("additivi") all'imballaggio stesso e al materiale di cui è composto.*

La problematica riguarda in generale la messa a punto di processi di selezione, estrazione, funzionalizzazione di biomolecole da biomasse altamente disponibili, a basso prezzo e/o sottoutilizzate, come residui dei settori alimentare e agro-alimentare, per sviluppare nuove formulazioni di coating bio-based da applicare su diversi substrati per imballaggi (carte e plastiche, principalmente), conferendo prestazioni migliorate rispetto ai prodotti attualmente disponibili e allo stesso tempo con opzioni di fine vita più sostenibili, quali il compostaggio e/o il riciclo.

ESEMPI DI "PACKAGING ATTIVO"

Un primo metodo per rendere un packaging "attivo" è quello di inserire particolari accessori alle confezioni: si tratta di applicare specifiche valvole, "assorbitori" o "emanatori" di sostanze, a seconda delle esigenze del prodotto in questione. Questi dispositivi, nel caso degli assorbitori, sottraggono alla confezione sostanze che compromettono e riducono la conservazione del prodotto come gas o umidità, spesso prodotti dai prodotti stessi nel loro ciclo vitale o come conseguenza dei processi produttivi a cui sono stati sottoposti.
Nel caso degli emanatori, invece, vengono immesse altre sostanze, in genere gas come ossigeno, anidride carbonica o etanolo, che invece favoriscono la conservazione. In entrambi i casi, gli accessori interagiscono attivamente e continuamente con l'atmosfera interna della confezione o quindi con il prodotto stesso, prolungandone la conservabilità, che rimane l'obiettivo di questa pratica e del packaging attivo più in generale.
Va da sé che questo espediente sia utile, e nello specifico dedicato, ai prodotti confezionati sottovuoto o in atmosfera modificata, che rendono efficace l'emissione di sostanze utili alla conservazione dell'alimento e ne prevengono l'immediata dispersione. Questo metodo è molto diffuso e spesso applicato per esempio alle confezioni del caffè in grani[56].
Un altro particolare tipo di imballaggio definito "attivo" è quello che prevede l'utilizzo di particolari materiali o additivi, sempre con lo scopo di aumentare la *shelf*

[56] *Buste e sacchetti per caffè macinato o in grani | Celvil*

life del prodotto in esso contenuto. Questa tipologia di packaging attivo prevede l'aggiunta di sostanze attive (i.e. additivi) direttamente nel materiale di cui è fatto l'imballaggio, creando composti che incorporino queste sostanze nella loro struttura chimica, e con esse facciano propria la specifica funzione: da quelle assorbenti a quelle che contrastano le sostanze che si formano all'interno della confezione, fino ai composti che rilasciano sostanze che facilitano la conservazione.
Alcuni additivi aumentano la rigidità, la resistenza e la duttilità del materiale tradizionale, oppure, come ad esempio nanocariche lamellari, migliorano la barriera ai gas. Altri additivi aumentano la stabilità termica. Altri ancora migliorano il ruolo più attivo dell'imballaggio nella conservazione dell'alimento. Si parla quindi di funzione antimicrobica, quando l'imballaggio è in grado di limitare la proliferazione microbica causata dalla degradazione dell'alimento; di funzione di oxygen scavenging, quando l'imballaggio consente di catturare l'ossigeno che penetra dall'ambiente esterno; di ethylene scavenging, quando riesce a catturare l'etilene prodotto dalla degradazione della frutta. Esempi di packaging funzionalizzati con cariche inorganiche sono riportati qui di seguito (fonte: Consorzio per la promozione della cultura plastica Proplast, nell'ambito del Progetto Nanocoat gestito dal Consorzio Innova FVG9):

- Bottiglie in PET rivestite di silice: questa è una soluzione che ha permesso di ridurre la permeabilità ai gas del materiale tradizionale (PET), consentendo di prolungare la shelf life della bibita contenuta. L'ossido di silicio, infatti, è un elemento costitutivo del vetro, che funziona come ulteriore barriera alla fuoriuscita di anidride carbonica e permette così alla bottiglia di mantenere e trattenere più a lungo nel tempo la gassatura. Il rivestimento in silice è posto sulla superficie interna, ultrasottile, trasparente, impermeabile e inerte nei confronti dell'alimento.
- In Giappone è commercializzato un materiale per imballaggio, per la precisione EVOH caricato con nanoargille, con proprietà barriera anche ad alti livelli di umidità, senza compromettere la stabilità termomeccanica, la trasparenza e la resistenza adesiva. E' stato sviluppato un nanocomposto a matrice polietilene a bassa densità (LDPE) caricato con nanoargille, che ha consentito al nuovo materiale di migliorare la barriera all'ossigeno e all'anidride carbonica, scarse nel PE tra-

dizionale. Anche le prestazioni meccaniche risultano migliorate dall'introduzione della nanoargilla.

Per quanto riguarda lo sviluppo di packaging funzionalizzati con principi attivi da biomasse di scarto, essi sono tuttora oggetto di ricerca e sviluppo, sia sotto il profilo delle proprietà "attive", in rapporto alla sicurezza e alla processabilità dei materiali, sia in relazione agli aspetti economici e di applicazione industriale.

Vengono riportati a titolo di esempio:

Il progetto europeo **"BioBarr"** (2017-2021), che ha previsto lo sviluppo di nuovi materiali di imballaggio alimentare biobased e biodegradabili, migliorando la funzione di barriera dei biopolimeri PHA (poliidrossialcanoati). Il progetto si è dedicato al miglioramento delle proprietà di barriera al vapore e ai gas, ottenuto attraverso la funzionalizzazione dei materiali, per consentire l'aumento della conservabilità dell'alimento.

Un altro progetto europeo interessante è **"Green-Loop"** (2022-2025), che coinvolge 17 partner da 8 paesi, di cui fa parte un'azienda italiana MixCycling. Questo progetto mira a progettare e ottimizzare tre materiali e componenti innovativi a base biologica per i seguenti settori industriali: pannelli in gomma multifunzionali per la riduzione delle perdite di trasmissione vibro-acustica e per le proprietà ignifughe; chiusure per bottiglie in bioplastica per olio e alcolici, cuscinetti in legno composito per l'industria degli elettrodomestici e degli utensili.

Motivazione per lo sviluppo

La motivazione specifica per la scelta dello scenario prende le mosse dalla crescente problematica dei rifiuti di imballaggio e dalla sempre maggiore richiesta della filiera del packaging per la produzione di imballi più sostenibili.

Le nuove formulazioni bio-based provenienti da biomasse di scarto, come i residui agricoli o i sottoprodotti alimentari, sono una risorsa rinnovabile spesso ricca di composti bioattivi (es. antiossidanti, antimicrobici), e possono essere incorporate nei materiali di imballaggio per conferire proprietà funzionali aggiuntive.

In generale, questi rivestimenti ad oggi non sono ancora in grado di competere con i tradizionali packaging né per le performance né per il costo. Molte attività di ricerca sono ad oggi concentrate sul miglioramento delle caratteristiche di coating bio-based e si osserva un lieve aumento nella loro quota di mercato e nella richiesta per soddisfare la crescente domanda per sostituire i packaging tradizionali.

Le **sfide tecnologiche** previste in questo contesto riguardano:

- Estrazione e stabilizzazione dei principi attivi: Isolare i composti bioattivi in modo efficiente e cost-effective, mantenendo la loro efficacia durante il processo di fabbricazione del packaging e durante la loro vita utile.
- Compatibilità dei materiali: Sviluppare materiali compostabili che possano integrare efficacemente principi attivi migliorando le loro proprietà meccaniche, di barriera e in generale tutte le prestazioni del packaging stesso.
- Standardizzazione e regolamentazione: Assicurare che i packaging funzionalizzati rispettino le normative di sicurezza per il contatto alimentare (Regolamento MOCA [(CE) No 1935/2004] e il Regolamento (UE) No 10/2011) e di compostabilità e/o riciclabilità al fine di garantire un fine vita più sostenibile (EN 13432 e ASTM D6400).

Il successo commerciale di questi packaging innovativi dipende dalla rapidità con cui essi possono essere introdotti nel mercato:

- Innovazione continua e R&S: Rapido sviluppo di nuove tecnologie e materiali attraverso la ricerca e lo sviluppo per mantenere il passo con le esigenze del mercato e le aspettative del settore packaging e dei consumatori finali.

• Collaborazioni e partenariati: Stringere alleanze con università, centri di ricerca, e industrie per accelerare l'innovazione e la commercializzazione.

Rilevanza rispetto alle transizioni digitale, ambientale, energetica, sociale e SGDs

I packaging funzionalizzati con principi attivi da biomasse di scarto possono contribuire in modo significativo in diverse aree:

1. Transizione Ambientale: riducendo la dipendenza da materiali non rinnovabili e non degradabili e promuovendo l'uso di sottoprodotti industriali e agricoli, questi packaging aiutano a diminuire l'impatto ambientale e a promuovere un'economia circolare grazie al riciclo e al compostaggio come fine vita più sostenibile. Il recupero delle biomasse stesse riduce il quantitativo conferito a discarica degli scarti dei settori alimentare e agro-alimentare.

2. Transizione Sociale: il miglioramento della sicurezza e della qualità dei prodotti alimentari contribuisce alla salute e al benessere delle popolazioni, riducendo il rischio di malattie trasmesse da alimenti, garantendo una maggiore durabilità dei prodotti contenuti, con una diminuzione degli sprechi stessi.

3. SDGs: Questi packaging supportano direttamente diversi Obiettivi di Sviluppo Sostenibile, quali:

• SDG 12 - Responsible Consumption and Production: Promuovendo pratiche di produzione e consumo sostenibili attraverso l'uso di materiali riciclabili e compostabili.

• SDG 13 - Climate Action: Riducendo le emissioni di CO_2 grazie all'uso di materiali biobased e processi produttivi più sostenibili.

• SDG 14 e 15 - Life Below Water e Life on Land: Mitigando l'inquinamento da plastica che danneggia gli ecosistemi terrestri e marini.

• SDG 17 - Partnerships for the Goals: Favorendo collaborazioni tra industrie, università, centri di ricerca e organizzazioni governative per accelerare l'innovazione e l'adozione di tecnologie sostenibili.

Indicatori di impatto

Impatto Politico e Socio-Economico

I packaging funzionalizzati con principi attivi da biomasse di scarto possono aumentare la competitività delle industrie europee e nazionali migliorando l'efficienza dei processi e riducendo i costi operativi, portando a una maggiore profittabilità. Inoltre, stimolano la creazione di nuovi posti di lavoro in settori ad alta tecnologia e possono aumentare le esportazioni di tecnologie innovative. L'adozione di nuove tecnologie e materiali nel settore del packaging richiede infatti competenze specifiche, generando opportunità di impiego in ricerca e sviluppo, produzione, e gestione dei rifiuti. L'impiego di materiali biobased e tecnologie avanzate per il packaging può ridurre gli sprechi e ottimizzare i processi di produzione. L'integrazione di principi attivi che migliorano la conservazione dei prodotti può portare a una gestione più efficiente delle scorte e a una riduzione delle perdite lungo la filiera.

Inoltre, i potenziali benefici derivanti dallo sviluppo di questa tecnologia risultano in linea con gli obiettivi specifici di iniziative come i Cluster Tecnologici Nazionali di:

- "**Chimica verde"** per impiego di processi di estrazione e recupero di principi attivi per funzionalizzazione packaging;
- **"Agrifood"** per la diminuzione dei rifiuti, degli scarti e degli sprechi alimentari e per la sicurezza alimentare.

La tecnologia può essere inclusa anche nella seguente missione del PNRR:

- **Missione 2** - Rivoluzione verde e transizione ecologica - M2C1: Agricoltura sostenibile ed economia circolare: favoriscono l'innovazione e la sostenibilità ambientale, grazie al miglioramento di proprietà quali ad esempio la shelf-life degli alimenti, la sicurezza e la qualità dei prodotti, oltre a contribuire alla riduzione degli sprechi e dei rifiuti.

Inoltre, risponde pienamente ai requisiti delle tecnologie pulite individuate dal Green Deal Europeo e ai Piani strategici della PAC 2023-2027 (Politica Agricola Comune).

Lo sviluppo di questa tecnologia può favorire l'autonomia e la riduzione della **dipendenza dalle materie prime fossili.** L'uso di biomasse di scarto come risorsa per la produzione di packaging biobased contribuisce infatti, a diminuire la dipendenza da materiali plastici tradizionali derivati dal petrolio, aumentando l'autonomia delle aziende e delle nazioni in termini di risorse. La valorizzazione delle risorse locali mediante l'impiego di biomasse di scarto provenienti da residui agricoli e alimentari locali promuove l'economia circolare e la valorizzazione delle risorse disponibili a livello nazionale e regionale. I packaging funzionalizzati con principi attivi antimicrobici e antiossidanti possono migliorare la sicurezza alimentare, aumentando la conservazione degli alimenti, riducendo il rischio di contaminazioni e contribuendo a una maggiore sicurezza alimentare a livello nazionale.

Impatto Industriale

Le aree applicative per i packaging funzionalizzati con principi attivi da biomasse di scarto, e le catene del valore maggiormente interessate, riguardano le aziende agricole / agroalimentari, aziende packaging, aziende raccolta e trattamento rifiuti, aziende per l'estrazione e produzione di coating / additivi per i packaging (tutta la filiera del packaging). Questi dispositivi trovano infatti applicazione in una vasta gamma di settori, dall'alimentare alla sanità, dalla sicurezza nazionale al monitoraggio ambientale, funzionando come catalizzatori per l'innovazione.
Inoltre, l'uso di materiali biobased e tecnologie avanzate per il packaging può ridurre gli sprechi e ottimizzare i processi di produzione. L'integrazione di principi attivi che migliorano la conservazione dei prodotti può portare a una gestione più efficiente delle scorte e a una riduzione delle perdite lungo la filiera.
Ma soprattutto, l'uso di biomasse di scarto come risorsa per la produzione di packaging biobased contribuisce a diminuire la dipendenza da materiali plastici tradizionali derivati dal petrolio, aumentando l'autonomia delle aziende e delle nazioni in termini di risorse. La valorizzazione delle risorse locali mediante l'impiego di biomasse di scarto provenienti da residui agricoli e alimentari locali promuove l'economia circolare e la valorizzazione delle risorse disponibili a livello nazionale e regionale.

Impatto Etico, Legale, Sociale e Ambientale

I packaging funzionalizzati con principi attivi da biomasse di scarto supportano la sostenibilità e la riduzione degli impatti ambientali, contribuendo direttamente a obiettivi come la produzione e il consumo responsabile (SDG 12), l'azione per il clima (SDG 13), la vita sott'acqua e sulla terra (SDGs 14 e 15) e a favorire collaborazioni tra industrie, università, centri di ricerca e organizzazioni governative per accelerare l'innovazione e l'adozione di tecnologie sostenibili. L'uso di questa tecnologia promuove inoltre, un modello di economia circolare, dove i residui e i sottoprodotti diventano risorse per nuovi cicli produttivi, riducendo la necessità di materie prime vergini e diminuendo i rifiuti.

L'adozione di packaging compostabili e riciclabili contribuisce anche alla riduzione dei rifiuti plastici, mitigando i rischi ambientali associati all'inquinamento da plastica e migliorando la sostenibilità ambientale.

Sfide normative e legali

Ad oggi l'adeguamento normativo appare uno dei fattori di maggior sfida. I packaging funzionalizzati con principi attivi da biomasse di scarto devono conformarsi a regolamenti stringenti come Regolamento MOCA [(CE) No 1935/2004], che stabilisce i requisiti generali di sicurezza per tutti i materiali destinati a entrare in contatto con gli alimenti, e Regolamento (UE) No 10/2011 specifico per i materiali e gli oggetti in plastica destinati a venire a contatto con gli alimenti.

Ma anche alle norme EN 13432 e ASTM D6400 di Compostabilità e di Biodegradabilità, con i relativi schemi di certificazione di TÜV AUSTRIA (OK Compost) e DIN CERTCO (Gerpruft); al regolamento REACH per la produzione di sostanze chimiche, per garantire che non costituiscano un rischio per la salute umana o l'ambiente; alla Direttiva sui rifiuti (2008/98/CE), che regola la gestione dei rifiuti nell'UE, promuovendo la prevenzione, il riciclaggio e la conversione dei rifiuti in risorse; e la Direttiva sulla plastica monouso (UE 2019/904) sulla riduzione dell'impatto di determinati prodotti di plastica sull'ambiente.

Stato dell'arte

Nel 2022 la produzione mondiale di plastica ha raggiunto l'incredibile cifra di 400 MLN ton, il 90,6% di tale produzione è di origine fossile[57]. La plastica riciclata post-consumo e la plastica da fonti rinnovabili rappresentano solo l'8,9 e l'0,5%, rispettivamente. Il 44% della plastica prodotta è destinata al mercato degli imballaggi (flessibili e rigidi). Nonostante gli sforzi per riciclare le plastiche di origine petrolifera, i dati riportano che solo il 9% è recuperato, il rimanente è smaltito in discarica o incenerito o disperso nell'ecosistema con gravi problematiche ambientali[58]. Tutto ciò ha portato allo sviluppo e diffusione dei biopolimeri (biodegradabili e/o biobased) come materiale valido anche per gli imballaggi alimentari, con un mercato globale che passerà da 2,2 MLN ton del 2023 a 7,4 MLN ton nel 2027.

Gli articoli scientifici pubblicati dal 2019 ad oggi, che trattano l'argomento dei packaging funzionalizzati con principi attivi da biomasse di scarto (keywords: Packaging functionalized with active ingredients from waste biomass) sono 17.300, in particolare solo nell'ultimo anno sono circa 15.400.

I brevetti pubblicati (con la stessa keyword) che trattano l'argomento dal 2005 ad oggi sono 729[59].

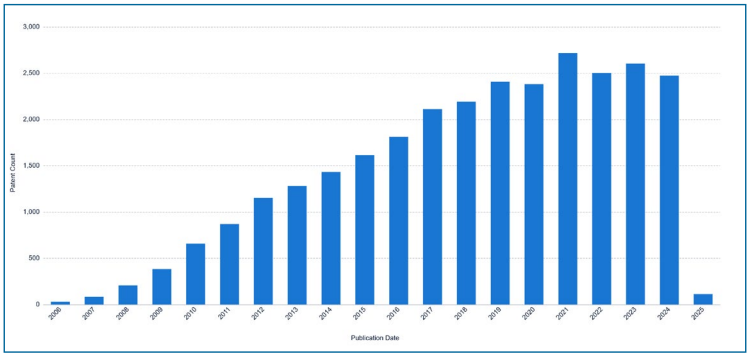


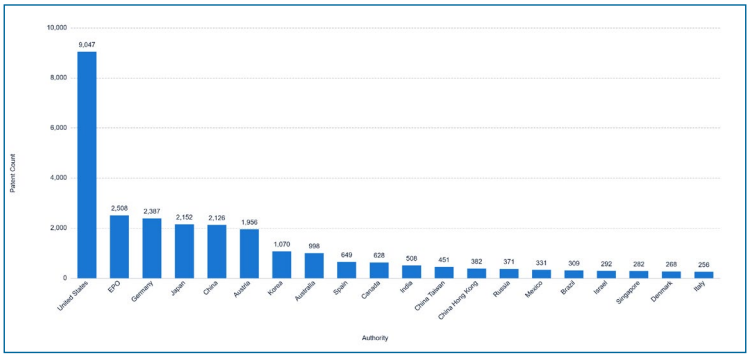
Figura 37: Andamento del numero di pubblicazioni dal 2006 al 2025, estratto dalla ricerca brevettuale effettuata sull'argomento "functionalized with active ingredients from waste biomass" effettuata da ARHCA tramite piattaforma PatSnap in data 22 gennaio 2025

[57] https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-fast-facts-2023/

[58] https://doi.org/10.1098/rstb.2009.0053

[59] *ARHCA. Ricerca brevettuale sull'andamento delle pubblicazioni relative ai "Packaging functionalized with active ingredients from waste biomass" (2006–2025). Dati estratti tramite la piattaforma PatSnap, 22 gennaio 2025) (Fonte: Elaborazione ARHCA su dati PatSnap, 22 gennaio 2025).*

Il paese con il maggior numero di brevetti pubblicati sull'argomento a livello mondiale nell'intervallo di tempo considerato, sono gli Stati Uniti, come è mostrato nel grafico seguente.



13/14

Figura 38: Andamento del numero di brevetti dal 2006 al 2025 per autorità di pubblicazione estratto dalla ricerca brevettuale effettuata sull'argomento "functionalized with active ingredients from waste biomass" effettuata da ARHCA tramite piattaforma PatSnap in data 22 gennaio 2025

Nonostante le bioplastiche biodegradabili rappresentino l'alternativa più sostenibile rispetto alle plastiche tradizionali, presentano comunque alcuni limiti quali resistenza meccanica e proprietà barriera inferiori rispetto alle plastiche tradizionali, maggiori costi, sicurezza alimentare da valutare caso per caso e riciclabilità limitata per mancanza di infrastrutture specifiche[60]. Ad esempio, per aumentare i tempi di conservazione degli alimenti in tali imballaggi, vengono impiegati additivi naturali quali oli essenziali ed estratti naturali da diverse piante ricchi di composti fenolici e terpenoidi con funzione antimicrobiale: questo rende gli imballaggi compostabili più funzionali e adattabili alle esigenze dell'industria alimentare ma sono necessarie valutazioni sulla sicurezza alimentare e ambientale dei nuovi imballaggi[61].

Gli studi più recenti riportano lo sviluppo di film bilayer biodegradabili usando nanostrutture lignocellulosiche e composti attivi come l'umbelliferone, con forti proprietà antiossidanti e completa disintegrazione in tempi brevi[62].

I polimeri biobased sono stati rivestiti con antimicrobici naturali e antiossidanti,

[60] https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e24122

[61] https://doi.org/10.1016/j.crfs.2021.07.005 e https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2012.07.052

[62] https://typeset.io/papers/migration-and-degradation-in-composting-environment-of-msd2bswlfa)

estendendo la shelf life dell'alimento pur mantenendo sicurezza e sostenibilità[63]. Sostanze plastificanti biobased derivate da oli naturali migliorano le prestazioni dei polimeri compostabili nelle applicazioni di packaging, rendendoli alternative valide alle opzioni sintetiche[64].

Risorse economiche necessarie

Si prevede che gli investimenti in packaging funzionalizzati con principi attivi da biomasse di scarto continueranno a crescere sia a livello nazionale che globale, riflettendo la loro importanza trasversale in numerosi settori. Si possono stimare a tal proposito attività e investimenti per diverse centinaia di milioni di euro, solo in Italia.

Ne è un esempio il progetto "Future@Packaging" che il Ministero delle Imprese e del Made in Italy nel 2022 ha autorizzato con un investimento di 9,2 milioni di euro nel settore del packaging su proposta di Aetna Group, azienda specializzata con 9 impianti produttivi in tutto il mondo (bando "accordi per l'innovazione").

Anche l''Unione Europea sta finanziando diversi progetti focalizzati sullo sviluppo di soluzioni di packaging attivo e biobased, ne è un esempio il progetto "TERRIFIC" (2024-2028), coordinato da Novamont, azienda italiana. Questo progetto mira a dimostrare e sviluppare otto soluzioni innovative per il settore dell'imballaggio, utilizzando materie prime rinnovabili in un'ottica circolare. Uno degli obiettivi principali è valorizzare i sottoprodotti delle filiere agroindustriali per produrre biopoliesteri e biomateriali compostabili e riciclabili con oltre il 95% di contenuto rinnovabili.

[63] https://typeset.io/papers/biomaterials-for-food-packaging-innovations-from-natural-42ysxx9knp

[64] https://typeset.io/papers/developments-of-biobased-plasticizers-for-compostable-4rrrfn42td

UPCYCLING DEL SILVERSKIN, IL RESIDUO DELLA TORREFAZIONE DEL CAFFÈ

L'agroindustria produce diversi tipi di scarti: i residui in campo, i residui di produzione, gli scarti della distribuzione e i rifiuti post consumo. Ognuno di essi può essere valorizzato, poiché l'identificazione di principi attivi e degli altri componenti della biomassa residua consente il design di percorsi di valorizzazione e di simbiosi industriale.
La raccolta di uno di questi residui di produzione, il silverskin sottoprodotto della tostatura del caffè, l'estrazione degli attivi e/o dei componenti utilizzabili e la loro valorizzazione anche attraverso funzionalizzazione costituiscono oggetto della presente tecnologia.

Il silverskin è il residuo della torrefazione del caffè, una pellicina che si stacca dal chicco durante la tostatura e dev'essere allontanata dalla camera di torrefazione perché si incendia facilmente. La raccolta del materiale è quindi semplificata dal fatto che esso viene prodotto in siti ben localizzati ed è già secco, quindi non soggetto alla formazione di muffe. La produzione di silverskin in Italia (secondo paese al mondo per la torrefazione del caffè) è di circa 7500 tonn/anno, smaltite per lo più come rifiuto solido urbano. Solo dall'ottobre 2022 è possibile utilizzarlo nella produzione di energia. Questo approccio non consente però la valorizzazione di alcuni elementi preziosi presenti nella biomassa. La presente tecnologia invece ha come obiettivo proprio la valorizzazione di **tre prodotti chimic**i presenti nel silverskin: un grasso, un antiossidante e la cellulosa. Gli ambiti di applicazione dei diversi componenti individuati saranno quello della cosmetica e della carta.
In particolare, il processo prevede l'estrazione di un **burro**. Il grasso o burro presente nella pellicina argentea ha una composizione molto particolare che ne suggerisce l'utilizzo in cosmetica. Essa è però diversa da quella dei comuni burri usati in cosmetica come il burro di karitè, il burro di cacao o quello di mango. Il suo utilizzo in prodotti da make-up conferisce, in virtù di questa composizione, particolare aderenza alla pelle e finishing molto luminoso.
Successivamente si procede all'estrazione di un composto bioattivo. **L'acido clorogenico** è un potente antiossidante presente nel silverskin le cui proprietà

antinvecchiamento e antibatteriche sono già conosciute. Tuttavia, la sua struttura chimica lo rende molto idrofilo e quindi difficilmente formulabile in matrici lipidiche come quelle utilizzate in prodotti cosmetici o nutraceutici. La sua funzionalizzazione attraverso esterificazione con un processo catalizzato da acido solido lo rende più lipofilo e quindi formulabile, inoltre ne potenzia significativamente l'attività antiossidante e quella antibatterica nei confronti di *Escherichia Coli* e *Staphylococcus Aureus*[65].

Il residuo delle estrazioni, costituito prevalentemente da cellulosa, può essere utilizzato nella produzione di carta sostituendo fino al 15% di cellulosa vergine. Va ricordato che in Italia la polpa di cellulosa viene quasi totalmente importata da Scandinavia, Slovacchia e Brasile (rispettivamente softwood, hardwood ed eucalipto). Inoltre, la sostituzione della cellulosa vergine con quella da silverskin comporta una riduzione del 13% delle emissioni di CO_2 e un impatto ambientale complessivo del processo di produzione di carta grafica ridotto del 10%[66].

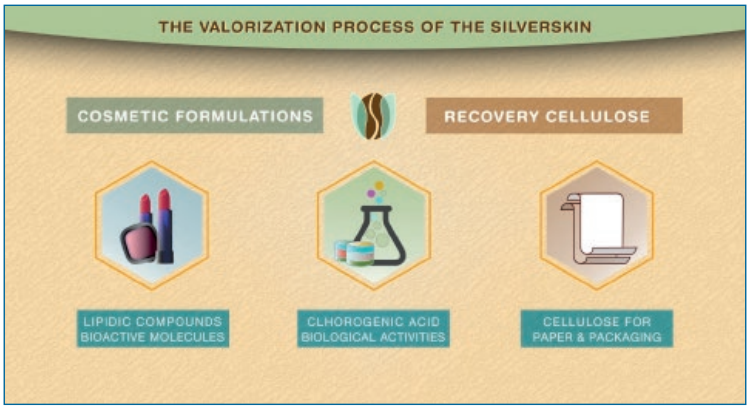


Figura 39: L'upcycling del silverskin secondo la tecnologia qui presentata

[65] *Antioxidants 2023, 12, 218. https://doi.org/10.3390/antiox12020218*

[66] *Sustainability 2021, 13, 9069. https://doi.org/10.3390/su13169069*

Motivazione per lo sviluppo

L'utilizzo di materie prime rinnovabili per la produzione di chemicals è uno dei pilastri del Green Deal europeo, come ribadisce anche la recente comunicazione della commissione *Building the future with nature. Boosting Biotechnology* and *Biomanufacturing* in the EU. Il meta-settore della Bioeconomia incide per l'11% sul valore della produzione dell'economia nazionale, com'è stato evidenziato dal rapporto annuale condotto da Intesa Sanpaolo, e le imprese bio-based registrano migliori performance rispetto alle fossil-based sia in termini di fatturato sia in termini di resilienza. Infatti, nel 2022 il 50,5% delle stesse ha registrato un aumento del fatturato contro il 42,8% delle non bio, mentre il 34,8% delle prime ha superato i livelli produttivi pre-Covid contro il 25,1% delle seconde.

In questo scenario ben si inseriscono i principi di economia circolare, e in particolare di upcycling di residui e sottoprodotti. Infatti, l'utilizzo di materie prime seconde e la riduzione o totale eliminazione degli scarti riduce la pressione sulle risorse naturali e contribuisce in modo significativo al Sustainable Development Goal 12 (Ensure sustainable consumption and production patterns). Questo approccio inoltre riduce le emissioni di CO_2 e contribuisce quindi anche al SDG 13 (Climate action). Se si considera in particolare per la produzione di carta il recupero di cellulosa da questo residuo consente un risparmio sull'importazione di cellulosa vergine dal Nord Europa, una riduzione delle emissioni e un risparmio energetico significativi.

A questo proposito è opportuno ricordare il Decreto Legislativo 152/2006 (in particolare L'art. 184-bis) e il Decreto Ministeriale 264/2016 a cura del Ministero dell'Ambiente, che individuano e definiscono i sottoprodotti come sostanze ed oggetti che non rientrano nel campo di applicazione dei rifiuti, e la Circolare interpretativa prot.n. 7619/2017.

Un'ulteriore motivazione per lo sviluppo della tecnologia è la creazione di nuovi posti di lavoro. In particolare, l 'industria cosmetica in Italia vale 13.3 miliardi € (dato 2022) con 35.000 addetti, dei quali il 54% donne contro la media del 28% nel manifatturiero, quindi la creazione di posti di lavoro in questo settore con-

[67] Upcycled Cosmetic Ingredients Market Size, Share & Analysis

tribuisce a mitigare il gap tra occupazione maschile e femminile e ha quindi un impatto anche sul SDG 5 (Gender equality).
Per quanto riguarda l'aspetto economico, secondo Allied Market Research[67] il mercato degli ingredienti cosmetici upcycled, quindi provenienti da materie prime seconde, che nel 2021 valeva 231,5 milioni di dollari, raggiungerà i 433,5 milioni di dollari entro il 2031 con un CAGR del 6,6%.

Stato dell'arte

Numerosi progetti di ricerca sono stati sviluppati sul tema del recupero degli scarti agroindustriali sia a livello europeo che italiano. Tra questi ultimi possiamo citare il progetto RiceRes sulla valorizzazione dei residui della filiera del riso e il progetto CirCo sulla valorizzazione del silverskin.
La produzione di silverskin in Italia (secondo paese al mondo per la torrefazione del caffè) è di cirtca 7500 tonn/anno, smaltite per lo più come rifiuto solido urbano. Solo dall'ottobre 2022 è possibile utilizzarlo nella produzione di energia, strada seguita da caffè Vergnano che lo conferisce all'azienda agricola Valbona per la produzione di biometano. Altre iniziative per la valorizzazione sono state intraprese: per esempio, Caffè Trucillo fornisce il proprio silverskin ad Agriges che lo addiziona ad alcuni suoi prodotti per la concimazione di fondo.



Figura 40: Alcuni dati sulla produzione globale del caffè

Per quanto riguarda l'upcycling del silverskin la multinazionale cosmetica Intercos e Amarey, startup innovativa fondata dalla famiglia Illy specializzata in prodotti funzionali ricavati dal caffè, hanno annunciato una partnership strategica per la ricerca, l'innovazione e lo sviluppo di materie prime cosmetiche ottenute rispettando l'ambiente e adottando i principi dell'economia circolare, avvalendosi anche della collaborazione di Illy caffè.
In occasione del Beauty Event 2024, evento che apre le porte al Cosmoprof 2024, principale fiera internazionale dedicata all'intera filiera del settore beauty, Intercos e Amarey hanno presentato il primo prodotto di questa collaborazione, il burro di caffè ottenuto dalla silverskin. Un ingrediente cosmetico con straordinarie proprietà tonificanti ed emollienti, disponibile sul mercato a partire da marzo 2024. Il silverskin viene già utilizzato dalla cartiera FAVINI per la produzione di carta grafica e potrebbe utilizzare facilmente col suo processo CRUSH anche il silverskin degrassato.
La tecnologia pertanto è in perfetta sintonia con gli sviluppi tecnologici indicato dai Cluster nazionale della Bioeconomia Circolare SPRING, è fortemente inserita nelle Strategia nazionale per la Bioeconomia proposta dal Comitato Nazionale per la Biosicurezza, le Biotecnologie e le Scienze della Vita (CNBBSV) della Presidenza del Consiglio dei Ministri, e nella Missione 2 del PNRR "Rivoluzione verde e transizione ecologica", in particolare nella M2C1.1 (Migliorare la capacità di gestione efficiente e sostenibile dei rifiuti e il paradigma della economia circolare).

Risorse economiche necessarie

Si può proporre Il time to market nel breve medio periodo (1-3) per un impianto di media scala, con investimenti intorno ai 5 milioni di euro. L'impianto consisterà in un modulo di estrazione e un modulo di esterificazione separati che potranno essere utilizzati anche per l'estrazione di altri residui agroindustriali e per l'esterificazione di altri polifenoli.



Figura 41: La tecnologia consente di utilizzare tutto il residuo della tostatura



Figura 42: Il silverskin, ovvero il residuo della tostatura del caffè



Figura 43: Il prodotto per labbra ottenuto col grasso di silverskin e la carta grafica ottenuta con il residuo cellulosico

SOCI AIRI >

SOCI SOSTENITORI

BRACCO
CNR - CONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE
MAPEI
PIRELLI

ORGANIZZAZIONI DI IMPRESE

FARMINDUSTRIA
FEDERCHIMICA
UNIONCAMERE

ISTITUTI FINANZIARI

INTESA SANPAOLO

ENTI PUBBLICI DI RICERCA E UNIVERSITÀ

AREA SCIENCE PARK
CENTRO NAST
CSGI
ENEA
INAIL
POLITECNICO DI TORINO - CHILAB
SCUOLA NORMALE SUPERIORE DI PISA
UNIVERSITÀ DI PISA

INDUSTRIE E CENTRI DI RICERCA

BAIC AGRO ITALIA
BIOTECNOMED
BYRON'S HOLDING
BRACCO IMAGING
BREMBO
CAMOZZI AUTOMATION
CENTRO RICERCHE FIAT
CEREAL DOCKS
CERTIMAC
CONSORZIO ITALBIOTEC
CRSLAGHI
CETMA
CIRA
COLOROBBIA CONSULTING
COMSOL
DIASORIN
DOMPÉ
ECOR INTERNATIONAL
ELETTRA SINCROTRONE TRIESTE
E.M.A
ERICSSON TELECOMUNICAZIONI
FINCANTIERI
FONDAZIONE CAVALIERI OTTOLENGHI
FONDAZIONE BRUNO KESSLER
FONDAZIONE PIEMONTE INNOVA
GEWISS
GIUSTO FARAVELLI
INNOVHUB STAZIONI SPERIMENTALI PER L'INDUSTRIA
IVECO
LFOUNDRY
MECCANO
MEMC ELECTRONIC MATERIALS - GLOBALWAFERS COMPANY

**Situazione soci aggiornata a dicembre 2024*

MENARINI SILICON BIOSYSTEMS
METTLER TOLEDO
PIRELLI TYRE
PROGEST
SAES GETTERS
SAIPEM
SMILAB
SPEA
STMICROELECTRONICS
TECNOALIMENTI SOCIETA CONSORTILE PER AZIONI
THALES ALENIA SPACE ITALIA
TODARO INDUSTRY
TXT E-TECH

START UP INNOVATIVE

AIENG
ARCHA SRL
ASSING
COSBERG
ECOR INTERNATIONAL
ENERTECH SOLUTION
EPSILON
IUVO
JONIX
KLASTER
MARITIME TECHNOLOGY CLUSTER FVG
NATIVE TO WEAR
NEXT TECHNOLOGY TECNOTESSILE SRL
NICHE SRL
NVNOVA
PLASTICA ALFA
SULTAN
TECHNETIC ITALIA

SOCIETÀ DI CONSULENZA

AYMING ITALIA
BUGNION
FI GROUP ITALIA
FINSERVICE
LUNATI & MAZZONI
SERVICE GROUP R&D
STUDIO PROMOZIONI
STUDIO TRIBUTARIO E SOCIETARIO DELOITTE
TINEXTA INNOVATION HUB

Airi promuove la ricerca industriale e l'innovazione tecnologica in Italia e in Europa.
Previsioni tecnologiche, policy, networking e tecnologie emergenti.

Scopri di più su www.airi.it

Airi
ASSOCIAZIONE ITALIANA PER LA RICERCA INDUSTRIALE
50
1974 2024





















Isbn 978-88-98935-73-4
9 788898 935734