AIRI - ASSOCIAZIONE ITALIANA PER LA RICERCA INDUSTRIALE

LE INNOVAZIONI DEL PROSSIMO FUTURO

XI EDIZIONE 2025

AMBIENTE ED ECONOMIA CIRCOLARE





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

AMBIENTE ED ECONOMIA CIRCOLARE

PARTE 1: PROFILO DI SETTORE
PARTE 2: SCENARI TECNOLOGICI

AIRI - ASSOCIAZIONE ITALIANA PER LA RICERCA INDUSTRIALE

LE INNOVAZIONI DEL PROSSIMO FUTURO
XI edizione Settore: Ambiente ed Economia Crcolare

ISBN 978-88-98935-70-3
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 marzo 2025
Realizzazione editoriale
Airi
progetto grafico
Goodlab srl, Roma (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 10

MEMBRI DEL GRUPPO DI LAVORO PROFILO DI SETTORE 15

L'AMBIENTE E L'EMERGENZA CLIMATICA 21

LA QUESTIONE DELLE RISORSE E L'USO DEI MINERALI 25

POLITICHE E NORME A SUPPORTO DELL'ECONOMIA CIRCOLARE 31

L'ECONOMIA CIRCOLARE 43

GLI SCENARI TECNOLOGICI 61

BIBLIOGRAFIA 62

indice - scenari tecnologici

1 - LA SIMBIOSI INDUSTRIALE E LA DIAGNOSI DELLE RISORSE PER LA CHIUSURA DEI CICLI E LA COMPETITIVITÀ DEL SISTEMA INDUSTRIALE 71

2 - PROCESSO DI PIROLISI CATALITICA, CON CATALIZZATORI A BASSO COSTO PER IL RICICLO CHIMICO DELLE PLASTICHE MISTE 87

3 - SVILUPPO DI UN PROCESSO DI RICICLO MECCANICO INNOVATIVO PER SCHIUME POLIURETANICHE FLESSIBILI POST-INDUSTRIALI E POST CONSUMO 95

4 - TECNOLOGIE PER LA VALORIZZAZIONE DELLE BATTERIE AL LITIO A FINE VITA 103

5 - NUOVE TECNOLOGIE DI EVOLUZIONE ASSISTITA (TEA) PER L'AGRICOLTURA 115

6 - TECNOLOGIE FERMENTATIVE PER I PRODOTTI BIO-BASED 125

7 - TECNOLOGIE E SOLUZIONI PER L'AGRICOLTURA CONSERVATIVA INTEGRANDO MECCANICA, ELETTRONICA E BIOTECNOLOGIE 137

8 - TECNOLOGIE PER LA VALORIZZAZIONE DELLE ACQUE REFLUE 149

9 - APPROCCIO INTEGRATO ALLA GESTIONE SOSTENIBILE DEI FANGHI DI DEPURAZIONE 165

Prefazione

Da oltre 25 anni, Airi coinvolge manager e ricercatori provenienti da alcune delle principali imprese, centri di ricerca e università Italiane per discutere su quali siano le tecnologie ad alto impatto socioeconomico destinate a trasformare il sistema paese.

Giunto alla XI edizione, il lavoro Airi "Le Innovazioni del Prossimo Futuro" è uno studio di *technology assessment* e *foresight* unico a livello nazionale: un quadro aggiornato degli scenari tecnologici che contribuiranno, nel breve-medio periodo e in maniera trasversale e abilitante, all'innovazione nei principali settori produttivi nazionali.
Dieci settori e 130 scenari tecnologici che fotografano la ricerca industriale italiana, che da sempre ha una significativa vocazione all'esportazione della propria tecnologia nel mondo.
Il presente volume mono grafico è dedicato al settore ambiente ed economia circolare, a metà del 2025 sarà pubblicato il volume complessivo.

La tecnologia è oggi un fattore determinante per la competitività del sistema paese. L'impegno continuo in Ricerca e Innovazione aiuta le imprese ad adattarsi alle rapide dinamiche del contesto socioeconomico.
Lo studio si propone come una guida per i *decision-maker* di istituzioni, industrie, investitori per anticipare e comprendere quale sarà il nostro futuro tecnologico e gli impatti più significativi attesi su tutta la nostra società.
Molte le tecnologie ad alto impatto identificate nel tempo dalla analisi Airi. 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 CO_2, già presenti a partire dal 2012 e che si ritrovano anche in questa edizione, in forma più avanzata e diversificata.

Le scelte di oggi determineranno la posizione del sistema paese nelle diverse catene del valore globali per i prossimi anni (leader o follower). L'obiettivo 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 significativo è necessario lavorare insieme - istituzioni, imprese e ricerca pubblica – per comprendere e condividere gli asset e le risorse su cui investire.

In conclusione, vorrei fare un sentito ringraziamento ai coordinatori di settore, ai numerosi esperti, ai soci e non soci, ed allo staff Airi, che hanno messo a disposizione il loro tempo e le loro competenze. Senza di loro, la loro apertura e le loro intuizioni non sarebbe stato possibile realizzare questo studio.

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 ed economia 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, nei limiti della rappresentatività del gruppo di lavoro, 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, nella visione di AIRI, il sistema della ricerca industriale italiana si sta concentrando 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 monografica relativa al settore Ambiente ed economia circolare.

AMBIENTE ED ECONOMIA CIRCOLARE

PROFILO DI SETTORE

MEMBRI DEL GRUPPO DI LAVORO

COORDINATORI

ENEA	**Claudia Brunori**

ESPERTI

ENEA	**Daniela Claps, Rovena Preka**

AMBIENTE ED ECONOMIA CIRCOLARE

SCENARI TECNOLOGICI

MEMBRI DEL GRUPPO DI LAVORO

COORDINATORI

ENEA	**Claudia Brunori**

ESPERTI

ACQUA E SOLE- NEORISORSE SRL	**Federica Barone, Andrea Giordano**
BAIC AGRO ITALIA	**Henrique Oliveira, Veronica Menendez**
CEREAL DOCKS	**Enrico Costanzo**
CERTIMAC	**Luca Laghi, Simone Bandini**
CETMA	**Alessandro Marseglia, Antonella Tarzia, Doriana Cristofaro**
CLAN- CLUSTER AGRIFOOD NAZIONALE	**Cristina Di Domizio**
ENEA	**Roberto Balducchi, Tiziana Beltrani, Daniela Claps, Nicola Colonna, Silvia Di Fabio, Alessia Fiore, Gabriella Fiorentino, Danilo Fontana, Marco La Monica, Michela Langone, Gian Paolo Leone, Luigi Petta, Rovena Preka, Riccardo Tuffi**
GRUPPO ACEA SPA	**Giancarlo Cecchini, Alessandro Frugis, Giulia Sagnotti**
GRUPPO CAP	**Roberto Di Cosmo, Davide Scaglione**
NATURALIA INGREDIENTS	**Veronica Vallini**
NVNOVA SRL	**Sabino Sinesi**
PIRELLI	**Luca Giannini**
SMILAB	**Fabio Chiesa**
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA E INSTM	**Elza Bontempi**



SETTORE

AMBIENTE ED ECONOMIA CIRCOLARE

PROFILO DI SETTORE

L'AMBIENTE E L'EMERGENZA CLIMATICA

Il 2025 inizia con un nuovo record negativo: gennaio è stato il mese più caldo mai registrato (+2,51°C sopra la media), come rivelato dal Servizio Copernicus[1], il programma di osservazione della Terra di Agenzia Spaziale Europea (ESA) e Commissione Europea. La temperatura globale ha segnato +1,75°C rispetto ai livelli preindustriali (e +0,79°C rispetto alla media 1991-2020), proseguendo l'andamento del 2024, l'anno più caldo di sempre.
Infatti, il 2024 ha comportato un superamento della soglia di 1,5°C in più della temperatura media globale rispetto al periodo preindustriale, il limite più importante deciso dall'Accordo di Parigi sul clima.
Secondo un'analisi di sei set di dati internazionali utilizzati dall'OMM[2], la temperatura media globale dell'aria della superficie, da gennaio a settembre 2024, è stata di 1,54°C al di sopra della media preindustriale. Il rapporto è stato pubblicato il primo giorno della Conferenza delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici, la COP29 di Baku, in Azerbaigian,
Secondo i dati di Copernicus, il 2024 è stato di 0,12°C più caldo rispetto al 2023 ed è stato di 0,72°C più caldo rispetto alla media del periodo 1991-2020. Tutti i mesi da gennaio a giugno del 2024 sono stati più caldi degli stessi mesi negli anni precedenti, da quando si raccolgono questi dati. Agosto è stato pressoché caldo come agosto 2023 e i restanti mesi del 2024 sono stati i secondi più caldi rispetto ai corrispondenti del 2023. Nel complesso, gli ultimi dieci anni sono stati i più caldi mai registrati.

Il 2024 ha visto temperature globali senza precedenti, in seguito al notevole calore del 2023. È anche diventato il primo anno con una temperatura media nettamente superiore di 1,5 °C rispetto al livello preindustriale, una soglia stabilita dall'accordo di Parigi per ridurre significativamente i rischi e gli impatti del cambiamento climatico. Sono stati battuti molteplici record globali, per i livelli di gas serra e per la temperatura dell'aria e della superficie del mare, contribuendo a eventi estremi, tra cui inondazioni, ondate di calore e incendi boschivi. Questi dati evidenziano gli impatti accelerati del cambiamento climatico causato dall'uomo,

[1] https://climate.copernicus.eu/global-climate-highlights-2024

[2] https://library.wmo.int/idurl/4/69075

con altissimi costi in termini di perdite di vite umane, ma anche economiche e finanziarie.

La Figura evidenzia le anomalie climatiche significative del 2024 rispetto al periodo 1991-2020[3]. Nel 2024, 11 mesi su 12 e circa il 75% dei giorni hanno mostrato temperature medie globali dell'aria in superficie superiori di oltre 1,5 °C rispetto ai livelli preindustriali.

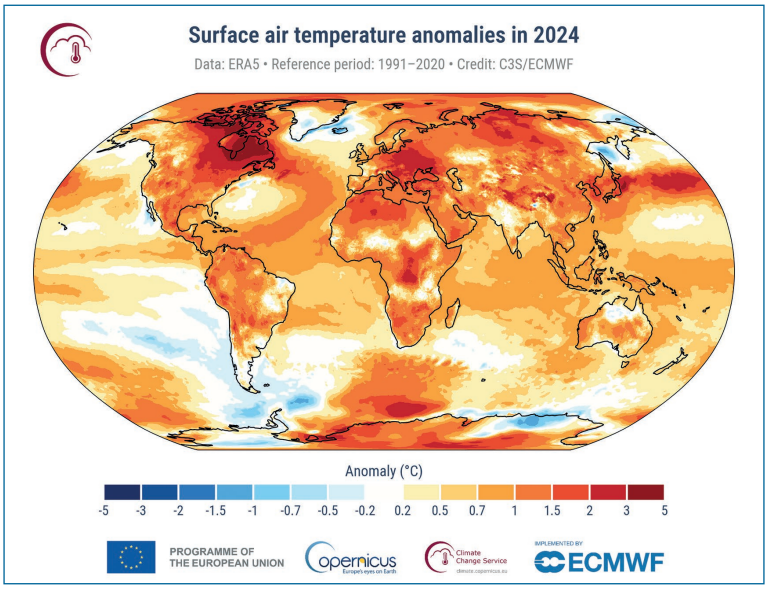


Figura 1: Anomalie nella temperatura, 2024
(Fonte: C3S/ECMWF, The 2024 Annual Climate SummaryGlobal Climate Highlights 2024[4])

La comunità scientifica è fermamente risoluta nell'affermare che il surriscaldamento globale a cui assistiamo sia di origine antropica e che le conseguenze di questo fenomeno abbiano un impatto devastante sull'economia, la società e l'ambiente. A questa crisi climatica si aggiunge anche l'emergenza della perdita di biodiversità; fenomeni strettamente connessi tra loro, che minacciano il benes-

[3] *Copernicus climate change (C3s): https://climate.copernicus.eu/global-climate-highlights-2023*

[4] *https://climate.copernicus.eu/copernicus-2024-first-year-exceed-15degc-above-pre-industrial-level*

sere e la sopravvivenza stessa delle generazioni attuali e future.
Secondo il Living Planet Report (WWF, 2022), che esplora proprio la natura di queste connessioni, l'uso e il consumo eccessivo del suolo resta ancora la più grande minaccia attuale, costituendo la causa della distruzione e frammentazione degli habitat naturali di molte specie vegetali e animali sulla terraferma, nelle acque dolci e nel mare. Tuttavia, se l'aumento medio delle temperature supererà 1,5°C, è probabile che il cambiamento climatico diventi la causa principale della perdita di biodiversità nei prossimi decenni. L'aumento delle temperature sta già determinando eventi di mortalità di massa, nonché le prime estinzioni di specie.
L'indice di integrità della biodiversità[5] stima quanta biodiversità originariamente presente nelle comunità ecologiche terrestri rimanga in media; relativamente all'anno 2020 l'indice riporta una media globale del 77%, con enormi differenze all'interno della superficie terrestre. Il Living Planet Index (LPI) globale 2022 (uno dei principali indicatori dello stato della biodiversità biologica a livello globale[6]) mostra un calo medio del 69% nell'abbondanza delle popolazioni monitorate tra il 1970 e il 2018.
Il LPI globale, tuttavia, non fornisce un quadro completo della situazione: ci sono differenze nei trend di abbondanza tra le regioni, con i maggiori declini nelle aree tropicali, confermando quindi che alcune aree saranno maggiormente interessate dalla perdita di biodiversità rispetto ad altre.
Nonostante 30 anni di impegni politici per fermare la perdita di biodiversità, si continuano a osservare cali simili a quelli mostrati negli anni precedenti. L'aumento delle temperature medie di 1,5°C comporterà una perdita del 70-90% dei coralli, mentre si prevede che un riscaldamento di 2°C causerà una perdita di oltre il 99%.

Ad oggi, gli sforzi per fermare la perdita di biodiversità non hanno avuto il risultato atteso: nessuno dei 20 obiettivi di Aichi[7] per la biodiversità per il 2020 è stato

[5] L'indice di integrità della biodiversità (Biodiversity Intactness Index) è un indicatore che misura la quantità di biodiversità originale presente in una regione. Si tratta di un indicatore a lungo termine che valuta la salute della biodiversità in percentuale. Si basa sul confronto tra lo stato attuale di un ecosistema e la sua condizione originaria. Serve a monitorare la biodiversità e l'impatto delle attività umane sugli habitat. Serve a tracciare l'evoluzione della biodiversità nel tempo.

[6] https://www.livingplanetindex.org/ Global Climate Highlights 2024 | Copernicus The 2024 Annual Climate Summary Global Climate Highlights 2024

[7] Convention on Biological Diversity, Strategic Plan 2011-2020, Aichi targets (https://www.cbd.int/sp/targets), ripresi dalla European Union Biodiversity Strategy (https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=legissum:ev0029)

pienamente raggiunto, e in alcuni casi la situazione nel 2020 è risultata peggiore rispetto al 2010. Le foreste sono molto importanti per la regolazione del clima terrestre e dell'anidride carbonica, tant'è che si stima che tra il 2001 ed il 2019 ne abbiano assorbito dall'atmosfera circa 7,6 gigatonnellate all'anno, ovvero circa il 18 % delle emissioni di carbonio causate dall'uomo. Nonostante ciò, ogni anno vengono persi circa 10 milioni di ettari di foreste, un'area grande quanto il Portogallo (WWF, 2022).

D'altra parte, anche il raggiungimento degli obiettivi di Parigi (COP25, 2015), in particolare quello di mantenere l'aumento della temperatura sotto i 2°C, sembra essere a rischio. Le misure prese finora saranno in grado di "fermare" l'aumento a 2-3°C, e forse più, ed è probabile che l'obiettivo di 1,5°C verrà superato prima del 2030.

Il surriscaldamento globale è in grado di cambiare anche il modo in cui funzionano gli ecosistemi, tramite un processo chiamato "feedback climatico positivo", che consiste nell'attivare processi ecologici che nel tempo causano un maggiore riscaldamento. Questi processi ecologici, se dovessero raggiungere un punto critico, potrebbero diventare irreversibili, con un conseguente surriscaldamento a ritmi molto più elevati degli attuali. Queste dinamiche sono ben descritte nella sintesi aggiornata degli impatti del cambiamento climatico sulle specie selvatiche e sugli ecosistemi in cui vivono pubblicata dall' Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 6th assessment report, 2023).

LA QUESTIONE DELLE RISORSE E DELL'USO DEI MAERIALI

L'uso di combustibili fossili, l'abbattimento delle foreste e l'allevamento del bestiame, i trasporti, l'edilizia ed il patrimonio costruito sono tra le attività con emissioni climalteranti di maggior rilievo ed hanno un impatto sempre più forte sul clima e sulla temperatura del pianeta. Tuttavia, anche l'estrazione e l'uso dei materiali impatta fortemente sul cambiamento climatico.
Il nostro **attuale sistema economico può essere considerato una "economia lineare"**, costruita su un modello di estrazione di materie prime dalla natura, trasformazione in prodotti, utilizzo e successivo scarto come rifiuti. Questo modello economico ha un impatto significativo sull'ambiente e contribuisce alle crisi del clima, della biodiversità e dell'inquinamento: l'economia lineare basata sulla logica "prendere-usare-gettare" è dispendiosa, estrattiva, antieconomica e responsabile in larga misura del cambiamento climatico e dell'esaurimento delle risorse. Non preserviamo in maniera adeguata, né usiamo in maniera efficiente le risorse naturali sulle quali si fonda la nostra qualità di vita: acqua, suolo, aria, bio-risorse, risorse minerarie.

Dagli anni '70 del Novecento la popolazione mondiale è più che raddoppiata e il PIL globale è quadruplicato, richiedendo quindi grandi quantità di risorse naturali per alimentare lo sviluppo economico e il benessere umano.

I dati globali mostrano che negli ultimi cinquant'anni l'**utilizzo di materiali** è sempre cresciuto, non c'è stato un periodo prolungato di stabilizzazione o di declino della domanda globale di materiali. Infatti, nel periodo 1970-2017, l'estrazione globale annuale di materiali è cresciuta da 27,1 a 92,1 miliardi di tonnellate, con una crescita media annua del 2,6%. Il nuovo millennio ha inaugurato un forte aumento del fabbisogno materiale globale, che è cresciuto del 2,3% annuo nel periodo 1970-2000, e poi ha accelerato al 3,2% annuo tra 2000 e 2017 (IRP, 2019). La crescita della domanda materiale globale è stata in gran parte guidata da importanti investimenti in infrastrutture e dall'aumento del tenore di vita nei paesi in via di sviluppo e in transizione, soprattutto in Asia (Schandl & West, 2010). Seb-

bene si sia verificato un breve rallentamento nel tasso di crescita della domanda di materiali tra il 2008 e il 2010 a causa della crisi finanziaria globale, ciò ha chiaramente avuto un impatto molto limitato sulla traiettoria complessiva.
Secondo il report del 2022 di Circle Economy (Circularity Gap Report 2022), nei sei anni tra la Conferenza del clima tenuta a Parigi COP25 (2015) e la COP26 di Glasgow (2021), sono state estratte altre 70% di materie prima dall'economia globale. Oltretutto, questo persistente uso intensivo del materiale e la continua ricerca di crescita economica non hanno portato ad una riduzione della disoccupazione e delle disuguaglianze (CGR, 2022).
Gran parte delle emissioni di gas serra (GHG) è direttamente o indirettamente collegata alla gestione dei materiali. Questi provengono dalla combustione di combustibili fossili per produrre energia, dall'agricoltura, dal settore manifatturiero e dall'edilizia. L'aumento dell'estrazione e dell'uso dei materiali contribuisce ad un aumento globale delle emissioni di gas serra; si stima che le emissioni totali raggiungeranno le 75 Gt di CO_2-eq. entro il 2060, di cui la gestione dei materiali costituirebbe circa 50 Gt CO_2-eq (OECD,2018).

Anche gli impatti ambientali dei **metalli** a livello globale sono gravi e diversificati. L'analisi del ciclo di vita dell'estrazione e della produzione globale di sette metalli (ferro, alluminio, rame, zinco, piombo, nichel e manganese) e di due **materiali da costruzione** (cemento, sabbia e ghiaia) mostra un'ampia gamma di conseguenze ambientali: impatti significativi sull'acidificazione, il cambiamento climatico, la domanda cumulativa di energia, l'eutrofizzazione, la tossicità per l'uomo, l'uso del suolo, la riduzione dello strato di ozono, l'ossidazione fotochimica e l'ecotossicità acquatica e terrestre (OECD, 2018).
Si stima che entro il 2060 gli impatti ambientali globali derivanti dall'uso di questi metalli saranno più che raddoppiati, e in alcuni casi addirittura quadruplicati, nonostante i continui miglioramenti in termini di efficienza, che riducono gli impatti ambientali per unità di produzione.
Rispetto ai metalli, il cemento, la sabbia e la ghiaia hanno un impatto per chilo

molto inferiore, ma il loro volume di utilizzo è enorme. Questi materiali sono particolarmente associati agli impatti dei cambiamenti climatici e all'ossidazione fotochimica, che ha gravi effetti sulla salute.
I sette metalli e i due materiali da costruzione insieme rappresentano quasi un quarto di tutte le emissioni di gas serra e un sesto della domanda cumulativa di energia (OECD 2018).
Il report quinquennale del "Global resources outlook" 2024[8], segnala come, dall'edizione del 2019, le tendenze crescenti nell'utilizzo delle risorse globali siano continuate o accelerate. Infatti, si riporta che il consumo globale delle risorse potrebbe aumentare del 60% nei prossimi 35 anni in seguito all'industrializzazione, all'urbanizzazione e all'andamento della crescita della popolazione registrato negli ultimi 50 anni.
Questi ritmi, diventati ormai insostenibili per il pianeta, non possono più essere sostenuti dal solo cambiamento delle modalità in cui produciamo: è invece necessario e i**ndispensabile ridurre la domanda delle materie prime**.
D'altra parte, considerando la diversa concentrazione geografica delle risorse primarie nel pianeta, le filiere di approvvigionamento e quindi i mercati di molti materiali, strategicamente importanti per i sistemi di produzione e la fornitura di servizi essenziali, si sono inevitabilmente globalizzati. Di conseguenza, i prezzi per queste risorse a livello locale sono in gran parte determinati dagli eventi mondiali, e riflettono quindi i prezzi e la volatilità del mercato globale. La pandemia del COVID19 e le recenti crisi in Ucraina ed Israele hanno reso evidente la fragilità delle economie globalizzate, soprattutto quelle dipendenti dalle importazioni delle materie prime.

IL PROBLEMA DELLE MATERIE PRIME CRITICHE

L'attenzione dell'Europa sul tema delle materie prime nasce circa 15 anni fa con l'Iniziativa Europea sulle Materie Prime del 2008. Da allora, sono stati messi in funzione diversi strumenti operativi per affrontare il tema dell'approvvigionamento sicuro e sostenibile delle materie prime, secondo un approccio basato

[8] *https://www.resourcepanel.org/reports/global-resources-outlook-2024*

su 3 pilastri principali:

- Estrazione primaria sostenibile
- Riciclo
- Sostituzione

In particolare, sono state inoltre individuate le materie prime cosiddette critiche, ovvero quelle materie prime necessarie per il sistema produttivo dei Paesi Europei il cui approvvigionamento è dipendente da Paesi extra europei a rischio di instabilità geo politica. Tale lista è stata elaborata la prima volta nel 2011 con individuazione di 14 Materie Prime Critiche e successivamente aggiornata ogni tre anni, fino ad arrivare a 34 Materie Prime Critiche identificate nel 2023.
Il contesto geopolitico attuale ha acuito la **criticità delle catene di approvvigionamento di numerose materie** prime indispensabili non solo per la transizione energetica e digitale, ma anche per la sicurezza nazionale.
Per materie prime critiche si intendono quelle non alimentari e non energetiche i cui problemi di approvvigionamento, di carattere politico, commerciale e ambientale, rendono prioritario un cambio di strategia economica e un forte aggiornamento tecnologico.

La maggior parte delle materie prime critiche è importata quasi al 100% da territori extra europei e prodotte in pochi Paesi, spesso instabili dal punto di vista geopolitico, che ne determinano il mercato a livello globale. Si tratta di materie prime fondamentali per la transizione energetica, per la mobilità elettrica, per la transizione digitale, la difesa e l'aerospazio, e la loro domanda è in costante aumento.
L'UE ha quindi la necessità di diversificare e ridurre la propria dipendenza dal petrolio e dal gas importati ed accelerare i propri obiettivi per la transizione energetica. Questo processo sta richiedendo un massiccio aumento dell'energia eolica e del fotovoltaico (PV), delle batterie e dell'idrogeno per immagazzinare l'elettricità e alimentare i veicoli, e delle pompe di calore per il riscaldamento e il raffrescamento ad alta efficienza energetica. Tutto ciò porta con sé una nuova domanda di materie prime critiche e strategiche, molte delle quali sono anche richieste per

le tecnologie necessarie per soddisfare le strategie dell'UE per la digitalizzazione, la difesa e l'aerospazio.

Nei prossimi decenni il più elevato aumento relativo alla domanda di materie prime critiche è previsto nel settore della mobilità elettrica.
Le tecnologie rilevanti che contribuiscono a questo settore sono le batterie, le celle a combustibile e i motori di trazione[9]. I materiali strategici più importanti per le batterie sono litio, grafite, cobalto, nichel e manganese; gli elementi delle terre rare, ovvero disprosio, neodimio, praseodimio e terbio, sono utilizzati nei magneti permanenti dei motori di trazione; e il platino è utilizzato nelle celle a combustibile. Le terre rare sono anche materiali fondamentali per i magneti utilizzati nelle turbine eoliche e nelle tecnologie ICT; il platino compare anche negli elettrolizzatori e nelle tecnologie ICT. Rispetto al 2020, si prevede che la domanda di litio per batterie nell'UE aumenterà di 12 volte nel 2030 e di 21 volte nel 2050. A livello globale, l'aumento rispetto al 2020 è di 18 volte nel 2030 e di 90 volte nel 2050. Un andamento simile si riscontra per la grafite (naturale e sintetica). Per il platino, la tendenza è analoga a livello globale, mentre nell'UE la crescita per quest'ultimo dovrebbe essere più elevata: 30 volte nel 2030 e 200 volte nel 2050 rispetto al 2020. Entro il 2050, la domanda globale di litio e grafite per batterie raggiungerà il 19,5%: 9 volte l'attuale offerta globale, rispettivamente. Per il platino l'impatto è più moderato, con una domanda globale nel 2050 per tutte le tecnologie pari a 0,6 volte l'attuale offerta globale (JRC, 2023).

[9] *Gli scenari tecnologici legati a questi aspetti sono trattati principalmente nei volumi Le Innovazioni del prossimo futuro dedicati ad Energia e decarbonizzazione e Trasporti e mobilità*

POLITICHE E NORME A SUPPORTO DELL'ECONOMIA CIRCOLARE

LE POLITICHE DELL'UNIONE EUROPEA PER L'AMBIENTE E I CAMBIAMENTI CLIMATICI

Nel novembre 2019 il Parlamento europeo ha dichiarato l'emergenza climatica chiedendo alla Commissione europea di assicurare che tutte le proposte fossero in linea con l'obiettivo di limitare il riscaldamento globale al di sotto di 1,5°C e ridurre in modo significativo le emissioni di gas a effetto serra.

La Commissione Europea ha presentato il **Green Deal europeo (2019)**, una nuova strategia di crescita mirata a trasformare l'UE in una società giusta e prospera, dotata di un'economia moderna, efficiente sotto il profilo delle risorse e competitiva, che nel 2050 non genererà emissioni nette di gas a effetto serra, e in cui la crescita economica sarà dissociata dall'uso delle risorse.

Il Green Deal europeo, parte integrante della strategia europea per attuare l'Agenda 2030 e gli obiettivi di sviluppo sostenibile delle Nazioni Unite, mette in evidenza la necessità di un approccio olistico e intersettoriale e, attraverso una tabella di marcia per raggiungere la neutralità climatica in Europa entro il 2050, individua azioni chiave riguardanti: clima, ambiente, energia, trasporti, industria, agricoltura e finanza sostenibile, tutti settori fortemente interconnessi.

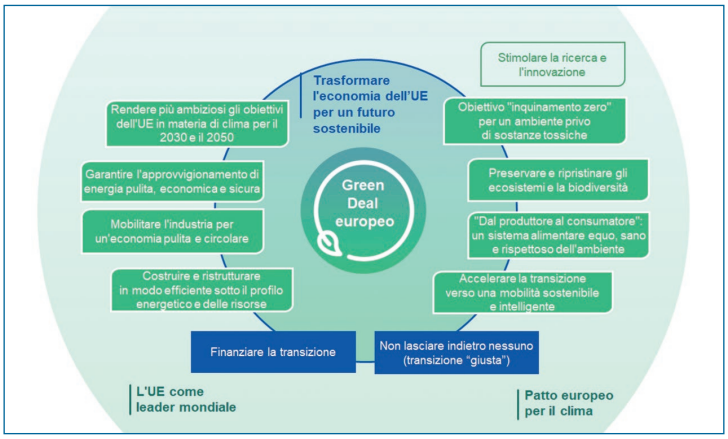


Figura 2: Il Green Deal europeo (Fonte: COM(2019) 640 final)

Il Green Deal europeo indica la strada verso una profonda trasformazione, anche con strategie di riferimento, come quelle in materia di biodiversità (Strategia sulla biodiversità per il 2030), di sistemi di approvvigionamento alimentare equi e sani (Strategia *from farm to fork*) e di sostanze chimiche sostenibili (Strategia in materia di sostanze chimiche sostenibili).

Nel quadro del Green Deal, con l'obiettivo di sostenere la duplice transizione verso una economia verde e digitale, l'UE ha adottato una nuova **Strategia industriale per l'Europa (2020)**, aggiornata nel 2021, e un nuovo **Piano d'azione per l'economia circolare (2020)** che prevede una serie di iniziative, strettamente collegate, destinate a istituire un quadro strategico in cui i prodotti, i servizi e i modelli di business e consumo sostenibili, costituiscono la norma. Nel 2021, la Commissione Europea ha poi presentato la nuova **Strategia dell'UE di adattamento ai cambiamenti climatici** con la quale delinea una visione a lungo termine affinché l'UE diventi, entro il 2050, una società resiliente ai cambiamenti climatici e del tutto adeguata ai loro inevitabili impatti. Alla Strategia ha fatto seguito l'emanazione della prima **legge europea** sul clima, con cui gli Stati membri si sono impegnati a ridurre le emissioni nette di gas a effetto serra nell'UE di almeno il 55% entro il 2030 rispetto ai livelli del 1990, e il pacchetto di proposte **"Pronti per il 55 %" (Fit for 55)** che mira a tradurre in normativa le ambizioni del Green Deal attraverso la revisione di alcuni provvedimenti legislativi e il lancio di nuove iniziative in settori strategici (clima, energia e combustibili, trasporti, edilizia, uso del suolo e silvicoltura). Le nuove proposte del Fit for 55 includono: la Strategia forestale dell'UE. il meccanismo di regolazione del carbonio alle frontiere **(CBAM)** conosciuto anche come 'carbon tax', il **Fondo sociale per il clima**, la proposta ReFuelEU Aviation sui carburanti per l'aviazione sostenibile e la proposta FuelEU Maritime per rendere più green lo spazio marittimo europeo. Gli aggiornamenti proposti dalla Fit for 55 hanno invece interessato: la direttiva sul Sistema di scambio di quote di emissioni dei gas a effetto serra nell'**UE (EU ETS)**, il Regolamento sull'uso del suolo, il cambiamento di uso del suolo e la silvicoltura **(LULUCF)**, il Regolamento sulla condivisione degli sforzi (ESR), la Direttiva

sulle energie rinnovabili **(RED)**, la Direttiva sull'efficienza energetica **(EED)** e la Direttiva sulle infrastrutture per i combustibili alternativi **(AFID)**.

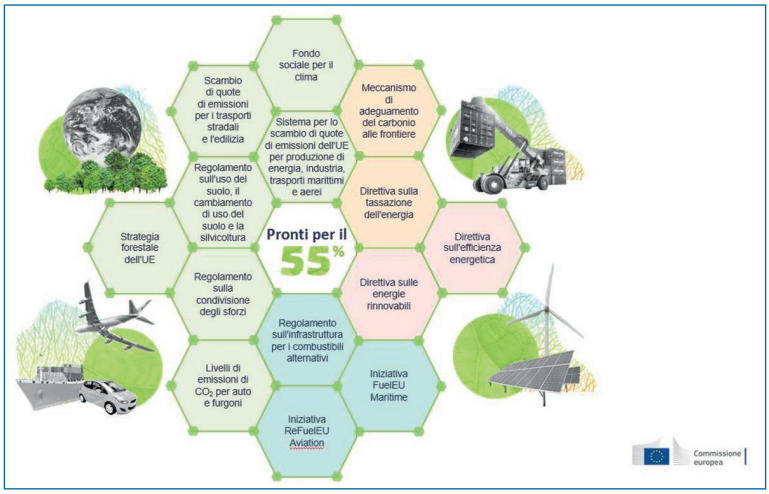


Figura 3: Pacchetto di proposte "Pronti per il 55%" (Fonte: COM(2021) 550 final)

La revisione del regolamento LULUCF, in particolare, si presenta come strettamente interconnessa al più recente Regolamento UE sulla deforestazione e sul degrado forestale, alla nuova Strategia dell'UE per le foreste per il 2030, alla Strategia dell'UE per il suolo per il 2030 e al Regolamento UE sul ripristino della natura che, attraverso specifiche misure, mira a ripristinare almeno il 20% delle zone terrestri e marine dell'UE entro il 2030 e tutti gli ecosistemi che necessitano di ripristino entro il 2050.

Per dirigere l'UE verso l'inquinamento zero, in stretta sinergia con il nuovo Piano d'azione per l'economia circolare, la Commissione europea ha adottato nel 2021 un **Piano d'azione per l'inquinamento zero** con una visione integrata per il 2050 che include un elenco di 33 azioni volte a ridurre l'inquinamento alla

fonte e a stabilire una serie di obiettivi da raggiungere in prima battuta entro il 2030, seguita dal **Piano industriale del Green Deal per l'era a zero emissioni nette** (2023) che mira ad accelerare la trasformazione a zero emissioni nette dell'industria e dal **Net-Zero Industry Act** che istituisce un quadro di misure per rafforzare l'ecosistema europeo di produzione di prodotti delle tecnologie a zero emissioni nette, fissando per l'Europa l'obiettivo di produrre il 40% del suo fabbisogno annuo di tecnologie a zero emissioni nette entro il 2030, sulla base di piani nazionali per l'energia e il clima (PNEC), e di raggiungere il 15% del valore del mercato globale per tali tecnologie entro il 2040.

Con la Corporate **Sustainability Reporting Directive – CSRD,** che amplia e sostituisce la precedente direttiva sulla rendicontazione non-finanziaria (NFRD), l'UE stabilisce invece requisiti più stringenti per la comunicazione delle informazioni di sostenibilità, promuovendo una maggiore trasparenza e responsabilità da parte delle aziende mentre con la Corporate **Sustainability Due Diligence Directive (CSDDD)** impegna le imprese a identificare e affrontare gli effetti negativi delle loro attività sui diritti umani e sull'ambiente nel pieno rispetto dei fattori ESG.

Sul piano degli investimenti, per garantire il conseguimento degli obiettivi previsti dal Green Deal europeo, la Commissione si è impegnata a mobilitare almeno mille miliardi di euro di investimenti pubblici e privati per i successivi dieci anni[10].



Figura 4: I quattro pilastri del Piano industriale del Green Deal per l'era a zero emissioni nette (Fonte: Commissione europea)

Il 30% del bilancio pluriennale dell'UE (2021-2028) e dello strumento unico dell'UE **NextGenerationEU** (NGEU)[11] per la ripresa è stato destinato agli investimenti green. I Paesi dell'UE, inoltre, dovranno destinare almeno il

[10] https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/fs_20_48

[11] https://next-generation-eu.europa.eu/index_it

37% dei finanziamenti ricevuti nell'ambito del ***Recovery and Resilience Facility*** da 672,5 miliardi di euro a investimenti e riforme che supportano gli obiettivi climatici. La Commissione europea intende inoltre raccogliere il 30% dei fondi in ambito NGEU con l'emissione di obbligazioni verdi. Altre risorse provengono dalla politica di coesione dell'UE (**FESR e Fondo di coesione**)[12] e dal Piano di investimenti per un'Europa sostenibile (SEIP), che include il meccanismo per una transizione giusta (**Just Transition Mechanism**)[13]. Quest'ultimo, per alleviare l'impatto socioeconomico della transizione, fornisce un supporto mirato per mobilitare circa 55 miliardi, nel periodo 2021-2027, attraverso un nuovo Fondo per una transizione giusta (**Just transition fund**), il programma InvestEU per una "transizione giusta" e una nuova linea di credito per il settore pubblico. Infine, il piano **REPowerEU**[14] (2023), un'iniziativa della Commissione europea che revisiona il Regolamento RRF (dispositivo per la ripresa e la resilienza) con l'obiettivo di ridurre la dipendenza europea dai combustibili fossili russi e accelerare la transizione verde attraverso il risparmio di energia, gli investimenti nelle energie rinnovabili e la diversificazione dell'approvvigionamento energetico. Le modifiche al RRF hanno consentito agli Stati membri di aggiungere capitoli dedicati al REPowerEU nei rispettivi piani per la ripresa e la resilienza e finanziare specifiche misure di investimento e di riforma. Tra gli strumenti che mirano a stimolare gli investimenti del settore privato verso i progetti green si citano infine le misure di finanza sostenibile, incluso il **Regolamento sulla Tassonomia**[15] che ha introdotto una classificazione delle attività che possono essere considerate sostenibili in base all'allineamento agli obiettivi ambientali dell'Unione Europea e al rispetto di alcune clausole di carattere sociale.

[12] https://www.europarl.europa.eu/factsheets/it/sheet/93/coesione-economica-sociale-e-territoriale
Si veda anche il Regolamento (UE) 2021/1060 recante le disposizioni comuni applicabili al Fondo europeo di sviluppo regionale, al Fondo sociale europeo Plus, al Fondo di coesione, al Fondo per una transizione giusta, al Fondo europeo per gli affari marittimi, la pesca e l'acquacoltura, e le regole finanziarie applicabili a tali fondi e al Fondo Asilo, migrazione e integrazione, al Fondo sicurezza interna e allo Strumento di sostegno finanziario per la gestione delle frontiere e la politica dei visti. Con particolare attenzione agli obiettivi climatici, il Regolamento (UE) 2021/1060 rende esplicito come i fondi dovrebbero contribuire all'integrazione delle misure per il clima e al conseguimento dell'obiettivo generale del 30 % della spesa di bilancio dell'Unione a favore degli obiettivi climatici.

[13] https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/finance-and-green-deal/just-transition-mechanism_en

[14] https://www.consilium.europa.eu/it/policies/repowereu/



Figura 5: e azioni a sostegno del Green Deal europeo – Le azioni (Fonte: Commissione europea)

LA NORMATIVA EUROPEA SULLE MATERIE PRIME CRITICHE

Con l'adozione nel 2024 del Regolamento sulle materie prime critiche (Critical Raw Materials Act – CRMA), l'Unione Europea mira a migliorare il funzionamento del mercato interno, istituendo un quadro atto a garantire l'accesso dell'Unione ad un approvvigionamento sicuro, resiliente e sostenibile di materie prime critiche (CRM), anche favorendo l'efficienza e la circolarità lungo tutta la catena del valore. Per raggiungere questo obiettivo generale il CRMA stabilisce misure volte a diversificare le importazioni dell'UE per ridurre le dipendenze strategiche, migliorare la capacità dell'UE di monitorare e attenuare i rischi di perturbazioni dell'approvvigionamento di materie prime critiche, rafforzare la circolarità e la sostenibilità.

Il Regolamento presenta un elenco di 34 materie prime critiche (lista V) di cui 17 considerate strategiche (SRM) in quanto essenziali per la transizione verde e digitale, nonché per la difesa e lo spazio. Entro il 24 maggio 2027, e successivamente almeno ogni tre anni, la Commissione riesaminerà e, se necessario, aggiornerà, l'elenco delle materie prime critiche.

[15] *https://finance.ec.europa.eu/sustainable-finance/tools-and-standards/eu-taxonomy-sustainable-activities_en?etrans=it&prefLang=it*

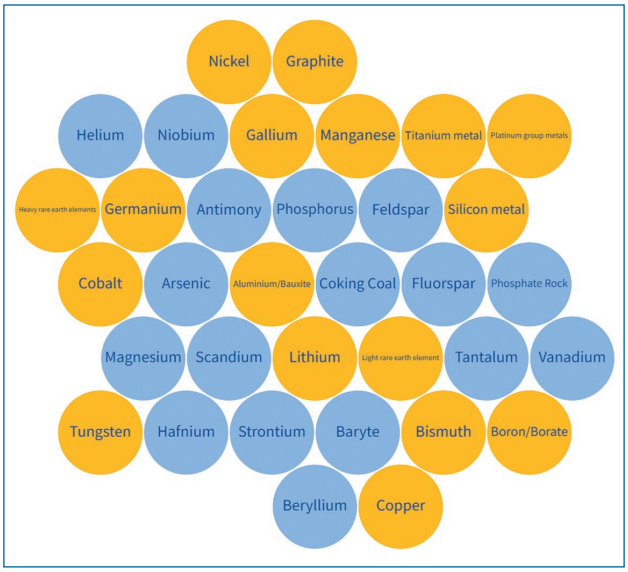


Figura 6: Materie prime critiche e strategiche (in arancione) (Fonte: European Council (2024)

Il CRMA fissa per l'Unione Europea i seguenti obiettivi al 2030:

- almeno il 10% del consumo annuo di SRM deve provenire da estrazioni all'interno dell'UE
- almeno il 40% del consumo annuo di SRM deve provenire da trasformazione all'interno dell'UE
- almeno il 25% del consumo annuo di SRM deve provenire da riciclaggio interno.

Le importazioni di materie prime dovranno essere diversificate e non più del 65% del consumo annuo dell'Unione di ciascuna materia prima strategica, in qualsiasi fase della lavorazione, potrà provenire da un unico Paese terzo. Entro il 1°gennaio 2027, la Commissione Europea dovrà invece adottare un atto delegato per stabilire parametri di riferimento per la capacità di riciclaggio dell'Unione espressi in termini di quota delle materie prime strategiche disponibili nei pertinenti flussi di rifiuti.

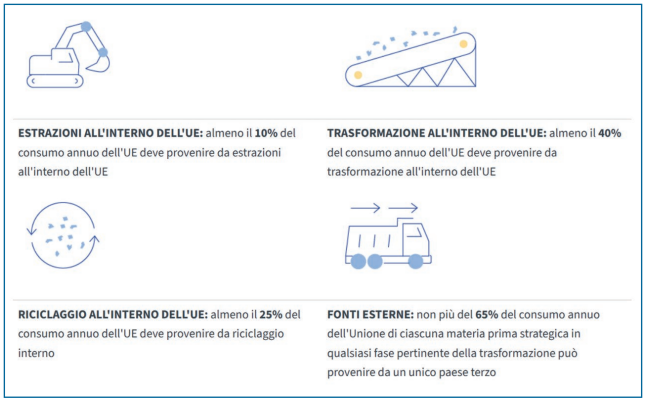


Figura 7: Obiettivi per il 2030 del CRM Act(Fonte: European Council (2024)

Il CRMA prevede inoltre sostegno nell'accesso ai finanziamenti per i cosiddetti progetti "strategici", in grado di contribuire alla sicurezza dell'approvvigionamento di materie prime strategiche nell'Unione, e stabilisce punti di contatto unico a livello nazionale, procedure più snelle e termini da non superare per il rilascio delle relative autorizzazioni (27 mesi per i progetti strategici che prevedono l'estrazione, 15 mesi per i progetti strategici che prevedono esclusivamente la trasformazione o il riciclaggio). Le domande per il riconoscimento di un progetto come "strategico" dovranno essere presentate nell'ambito di un invito aperto, pubblicato dalla Commissione Europea, con date di scadenza regolari.

Altre misure previste dal CRMA sono destinate invece a contribuire al rafforzamento delle diverse fasi della catena del valore: i Programmi nazionali di esplorazione generale per le CRM e i minerali vettori di CRM; il Monitoraggio e la preparazione delle imprese ai rischi; il Sistema di aggregazione della domanda di SRM delle imprese interessate stabilite nell'Unione; i Programmi nazionali contenenti misure sulla circolarità; il recupero di materie prime critiche dai rifiuti di estrazione.

Sul piano della governance, il CRMA istituisce il **Comitato europeo per le materie prime critiche**, composto da rappresentanti degli Stati membri e della Com-

missione europea, incaricato di fornire consulenza alla Commissione in merito alla selezione dei progetti strategici e ad altri aspetti del regolamento.

IL PIANO D'AZIONE EUROPEO PER L'ECONOMIA CIRCOLARE

Nel marzo 2020, la Commissione Europea ha presentato un nuovo Piano d'azione per l'economia circolare (CEAP) che stabilisce un programma orientato al futuro per costruire un'Europa più pulita e competitiva.
Il CEAP, in linea con il Green Deal europeo, evidenzia che la circolarità è un elemento essenziale di una trasformazione più ampia dell'industria verso la neutralità climatica e la competitività a lungo termine e, ai fini della sua promozione, annuncia misure legislative e non legislative (35 azioni) che mirano a:

- assicurare lo sviluppo di prodotti sostenibili e la circolarità dei processi produttivi
- responsabilizzare i consumatori
- adottare politiche mirate per settori specifici che fanno ingente uso di risorse e presentano un elevato potenziale di circolarità (elettronica e TIC, batterie e veicoli, imballaggi, plastica, prodotti tessili, edilizia, prodotti alimentari, acqua e sostanze nutritive).
- ridurre i rifiuti, anche agevolando la simbiosi industriale con l'istituzione di un sistema di comunicazione e certificazione promosso dall'industria.

Nel marzo 2022 è stato pubblicato dalla Commissione Europea il primo pacchetto di proposte di misure nell'ambito del CEAP che mira al potenziamento dei prodotti sostenibili, la responsabilizzazione dei consumatori per la transizione verde, la revisione del regolamento sui prodotti da costruzione e una strategia sui tessili sostenibili.

Un secondo pacchetto (novembre 2022) ha incluso misure relative agli imballaggi e rifiuti da imballaggio, un nuovo quadro politico per fare chiarezza per consumatori e industrie sulle plastiche biodegradabili, compostabili e biobased,

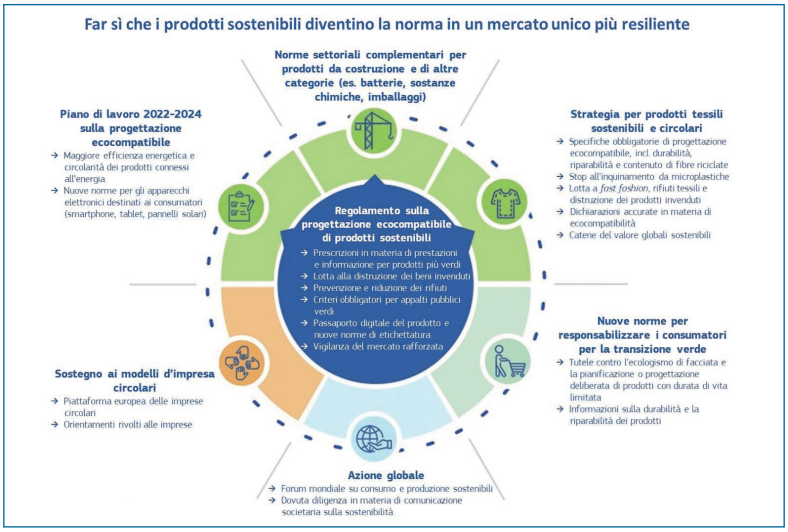


Figura 8: «Prodotti sostenibili: dall'eccezione alla regola» (Fonte: COM (2022) 140 final)

e una proposta di regolamento per un quadro normativo per i certificati di assorbimento del carbonio.
Un terzo pacchetto di misure (marzo 2023) ha proposto misure per regolamentare le dichiarazioni ecologiche delle aziende e garantire il diritto alla riparazione dei prodotti. Nell'ambito del CEAP, la Commissione ha proposto, inoltre, la revisione della Direttiva quadro sui rifiuti, per promuovere la gestione sostenibile dei rifiuti tessili e alimentari, nonché la revisione delle norme sugli inquinanti organici persistenti (POP) per ridurre la quantità di sostanze chimiche pericolose nei rifiuti e nei processi di produzione, e l'istituzione di un sistema di certificazione a livello europeo per l'eliminazione del carbonio.

Nell'ambito del CEAP sono state adottate dall'UE politiche chiave per settori specifici: il nuovo Regolamento sugli imballaggi e i rifiuti di imballaggio; il nuovo Regolamento sulle batterie e rifiuti di batterie; il Quadro strategico dell'UE in materia di plastica biologica, compostabile e biodegradabile; il nuovo Regolamento sui

prodotti da costruzione, la revisione del Regolamento relativo alla classificazione, all'etichettatura e all'imballaggio delle sostanze e delle miscele (CLP), la nuova Direttiva sul trattamento delle acque reflue urbane, il nuovo Regolamento relativo alla spedizione dei rifiuti, il Regolamento sulle materie prime critiche. A queste politiche, si aggiunge il riesame della direttiva sulle emissioni industriali, che mira a sostenere le industrie nel loro impegno a conseguire l'obiettivo inquinamento zero entro il 2050 e la Direttiva sulla responsabilizzazione dei consumatori per la transizione verde affinché i consumatori possano prendere decisioni di acquisto più consapevoli e contribuire in tal modo a modelli di consumo più sostenibili.

Delle misure annunciate nell'ambito del nuovo Piano d'azione europeo per l'economia circolare, l'iniziativa sui prodotti sostenibili o "*Sustainable Product Iniziative*" è sicuramente tra le più significative e il Regolamento sulla progettazione ecocompatibile di prodotti sostenibili (ESPR, Ecodesign for Sustainable Products Regulation) ne costituisce la colonna portante.
Considerato che il modo in cui un prodotto è progettato determina fino all'80% del suo impatto ambientale nel ciclo di vita[16], con l'ESPR l'UE mira a definire un quadro volto a fissare specifiche di progettazione ecocompatibile e obblighi di informazione per quasi tutte le categorie di beni fisici immessi sul mercato dell'Unione, così da ottenere un miglioramento della loro circolarità, prestazione energetica e degli altri aspetti legati alla sostenibilità ambientale. Le specifiche dei prodotti saranno introdotte attraverso atti delegati della Commissione europea seguendo piani di lavoro pluriennali (il primo sarà pubblicato ad aprile 2025), per consentire alla Commissione di effettuare un'attenta valutazione dei settori in cui c'è maggiore necessità di un'azione normativa.
In aggiunta alle specifiche di progettazione, l'ESPR prevede che tutti i prodotti disciplinati dall'ESPR siano muniti di un passaporto digitale del prodotto che consente di contraddistinguerli e identificarli e rimanda alle informazioni pertinenti sulla circolarità e la sostenibilità. L'ESPR consentirà inoltre all'UE di stabilire prescrizioni in materia di etichettatura, ad esempio in relazione alla riparabilità dei

[16] *EcoDesign your future: https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/4d42d597-4f92-4498-8e1d-857cc157e6db*

prodotti, obiettivo per il quale l'UE ha recentemente adottato una Direttiva sul diritto alla riparazione che mira ad estendere la durata di vita dei prodotti, ridurre i rifiuti e promuovere un'economia più sostenibile e circolare.

A seguito della adozione da parte del Consiglio europeo (giugno 2024) dell'agenda strategica 2024-2029 che stabilisce le priorità e gli orientamenti strategici dell'UE per il ciclo istituzionale 2024-2029, orientando quindi i lavori delle istituzioni dell'UE, anche la Commissione europea ha stabilito le 7 priorità[17] del suo nuovo mandato annunciando tra gli obiettivi una normativa per accelerare la decarbonizzazione industriale, sostenendo le industrie e le imprese nella transizione, e l'emanazione di nuova normativa sull'economia circolare (EU Circular Economy Act) per contribuire a generare la domanda di materiali secondari sul mercato e creare un mercato unico dei rifiuti, in particolare per le materie prime critiche.



Figura 9: Le priorità della Commissione Europea 2024-2029 (Fonte: Commissione Europea)

[17] *Priorità 2024-2029 della Commissione Europea: https://commission.europa.eu/priorities-2024-2029_it*

ECONOMIA CIRCOLARE

Sappiamo quindi che serve un cambiamento trasformazionale, ovvero un cambiamento che modifichi radicalmente il modo in cui si produce e si consuma, la tecnologia e i sistemi economici e finanziari.
È necessario un approccio basato sul pensiero sistemico che possa affrontare la complessità, gestire l'incertezza, bilanciare i compromessi e limitare gli effetti di rimbalzo. L'Economia Circolare si contrappone all'attuale modello economico basato su un uso lineare delle risorse che è alla base delle grandi crisi ambientali ed economiche degli ultimi anni e si pone proprio l'obiettivo di cambiare il paradigma di sviluppo e passare da un modello "end of pipe" a quello della chiusura dei cicli.

L'Economia Circolare si può definire come un **modello economico innovativo basato su un approccio rigenerativo e collaborativo, incentrato sull'uso e gestione più efficiente delle risorse** (Figura10)**; è un sistema di utilizzo delle risorse a più livelli che prevede la chiusura completa di tutti i cicli delle risorse.**
Il riciclo e altri mezzi che ottimizzano la portata e la direzione dei flussi di risorse contribuiscono all'economia circolare sostenendo pratiche e attività. Nella sua forma concettuale perfetta, tutti i cicli delle risorse saranno completamente chiusi. Nella sua forma realistica e imperfetta, un certo utilizzo delle risorse vergini è inevitabile (Figge et al., 2023).
Questo nuovo modello implica necessariamente anche profondi cambiamenti a livello di politiche e modelli di produzione e consumo, basati sulla valorizzazione del capitale economico, naturale e sociale, e che quindi debbono vedere coinvolti il sistema industriale e il tessuto sociale.
L'Economia Circolare crea un contesto favorevole allo sviluppo di innovazioni e dà alle imprese la possibilità di realizzare nel contesto della transizione ecologica e del piano di azione europeo per l'economia circolare considerevoli vantaggi economici e di competitività, oltre a promuovere la resilienza alle attuali crisi geopolitiche accorciando le catene di approvvigionamento e consentendo di ideare soluzioni nuove e creative lungo tutta la catena del valore, di risparmiare

risorse ed energia e di creare occupazione, apportando benefici per l'ambiente e l'integrazione sociale.

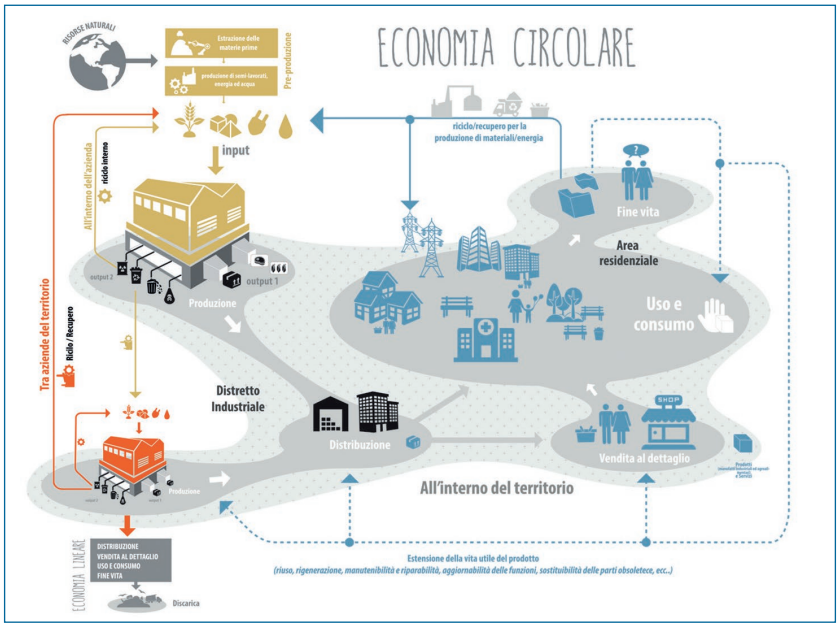


Figura 10: Modello dell'Economia Circolare (Fonte: elaborazione ENEA)

Questo nuovo modello implica necessariamente anche profondi cambiamenti a livello di politiche e modelli di produzione e consumo, basati sulla valorizzazione del capitale economico, naturale e sociale, e che quindi debbono vedere coinvolti il sistema industriale e il tessuto sociale.

L'Economia Circolare crea un contesto favorevole allo sviluppo di innovazioni e dà alle imprese la possibilità di realizzare nel contesto della transizione ecologica e del piano di azione europeo per l'economia circolare considerevoli vantaggi economici e di competitività, oltre a promuovere la resilienza alle attuali crisi geopolitiche accorciando le catene di approvvigionamento e consentendo di ideare soluzioni nuove e creative lungo tutta la catena del valore, di risparmiare

risorse ed energia e di creare occupazione, apportando benefici per l'ambiente e l'integrazione sociale.

La transizione verso un modello economico circolare è già avviata, anche se spesso si scontra purtroppo con l'attuale sistema organizzativo, che è ancora basato su un approccio lineare. **Una transizione di successo necessità di cambi radicali nei modelli gestionali e negli stili di vita e di strumenti adeguati** di accompagnamento tra cui: politiche, strumenti normativi e finanziari, formazione/informazione, innovazione tecnologica, di sistema e sociale. La grande sfida dei prossimi anni coinvolge tutti i settori (imprese, istituzioni, innovatori, società civile), ciascuno con il proprio ruolo.

La chiave per la transizione è l'innovazione. Occorre implementare tutte quelle tecnologie, strumenti e metodologie sviluppate per integrare i disciplinari di produzione con le migliori pratiche di gestione ambientale al fine di **ottimizzare le filiere in termini di riduzione dei consumi idrici e di materie prime, miglioramento dell'efficienza energetica e riduzione dei rifiuti prodotti, delle emissioni climalteranti e della perdita di biodiversità.**

A livello di sistema produttivo, eco-innovazione di prodotto, di processo e di sistema sono strumenti necessari per un modello produttivo circolare e rigenerativo e per un sistema di uso/consumo caratterizzato dall'estensione della vita dei prodotti, dal riuso di componenti e da sistemi di riciclo in grado di garantire elevati standard di qualità dei materiali e prodotti riciclati. Fondamentale la progettazione dei prodotti finalizzata alla durabilità, riparabilità e riciclabilità e alla sostituzione di sostanze pericolose e materie prime critiche.
Progetti innovativi per l'economia circolare riguardano anche lo sviluppo di nuovi modelli di eco-business, approcci collaborativi tra aziende dissimili e nuovi modelli di lavoro (es. smart working) e di consumo (sharing economy, pay for service, etc.) come da Figura 11 .

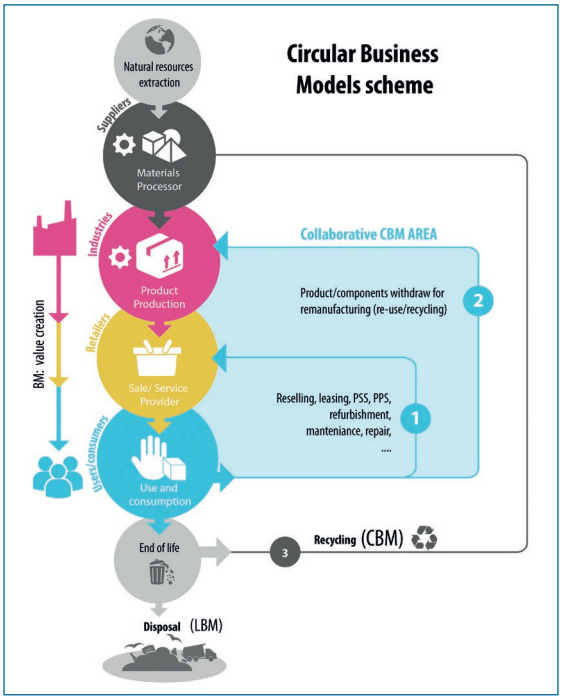


Figura 11: Modelli di Business Circolari (CBM) (Fonte: Elaborazione ENEA)

Lahti et al. (2018) ritengono che: "*Un modello di business circolare è progettato per creare e acquisire valore contribuendo al contempo a raggiungere uno stato ideale di utilizzo delle risorse (ad esempio, trovare un modello che assomigli il più possibile alla natura e si avvicini al raggiungimento del ciclo completo dei materiali). Di conseguenza, l'obiettivo dei business model circolari si sposta dal realizzare profitti attraverso la vendita di prodotti o manufatti al realizzare profitti attraverso il flusso di risorse, materiali e prodotti nel tempo, compreso il riutilizzo di beni e il riciclaggio delle risorse. Questo ragionamento implica che le aziende possono ridurre gli impatti negativi sull'ambiente fornendo e catturando valore attraverso questa proposta di valore alternativa*".

I modelli di business circolari cercano fondamentalmente di riconfigurare l'uso delle risorse materiali da parte di un'azienda al fine di apportare miglioramenti ambientali, in un contesto in cui il valore di tale miglioramento è solitamente non riconosciuto nei ritorni privati dell'azienda.

Come già sottolineato, si tratta di cambi radicali che necessitano di adeguati strumenti di supporto alle imprese, tra cui strumenti normativi e finanziari, agevolazioni, formazione.

La **simbiosi industriale** è uno degli strumenti più potenti che possa essere utilizzato. Questa può essere definita come un sistema integrato per condividere risorse (materiali, energia, acqua, sottoprodotti, scarti, servizi, competenze, strumenti, database, ecc.) secondo un approccio di tipo collaborativo in cui l'output di un'azienda può essere utilizzato come input da un'altra azienda nell'ambito del suo processo di produzione (Figura 12).

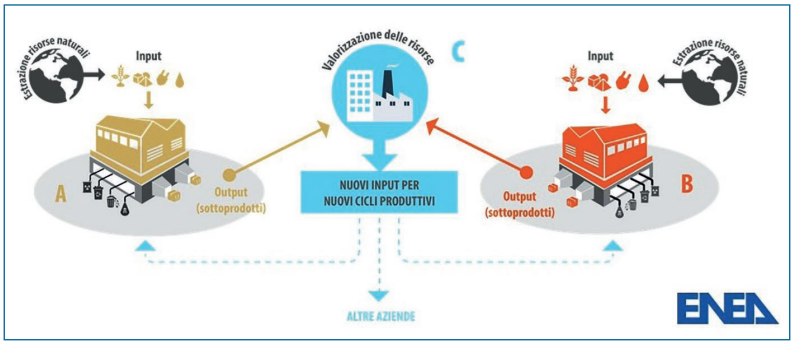


Figura 12: La simbiosi industriale (Fonte: Elaborazione ENEA)

La simbiosi industriale rappresenta dunque una strategia di ottimizzazione dell'uso delle risorse, che coinvolge le industrie di un territorio, al fine di generare vantaggi competitivi per le imprese: l'applicazione dei principi della simbiosi industriale consente alle aziende di utilizzare in modo più efficace flussi di materiali,

energia, acqua e altre attività, conseguendo una maggiore produttività complessiva e generando opportunità per le imprese, per le aree e i distretti industriali, per lo sviluppo locale e per la valorizzazione delle risorse in maniera aggregativa (favorendo quindi economie di scala).
Secondo un rapporto della Commissione Europa del 2018, questa tecnica ha un potenziale di mercato annuo tra i 7 e 13 miliardi di euro, ai quali aggiungere oltre 70 miliardi di costi di discarica evitati (Brunori, 2022).

RICADUTE ECONOMICHE E DI MERCATO

Il modello economico circolare è basato su un uso più efficiente e rigenerativo delle risorse rispetto all'attuale modello economico lineare e consente una significativa riduzione del consumo delle risorse primarie e delle relative emissioni climalteranti.
I materiali secondari (derivanti da attività di riuso/riciclo) reimmessi nell'economia globale, altrimenti noti come input circolari, rappresentano il 7,2% di tutti gli input materiali nell'economia globale. Negli ultimi cinque anni, la circolarità mondiale si è ridotta dal 9,1% al 7,2% degli input materiali totali (CGR,2023).
Nell'UE nel 2023, il tasso di utilizzo di materia proveniente dal riciclo è stato pari all'11,8% (Eurostat, 2024) Rispetto all'anno precedente c'è stato un lievissimo incremento (dello 0,3 %), ma rimane comunque la più alta percentuale mai raggiunta. Nella classifica dei paesi UE, l'Italia si classifica seconda (20%) raddoppiando quindi la percentuale europea ed è seconda solo all'Olanda (30,8%). Il Rapporto sull'Economia Circolare 2024 elaborato dal CEN con la collaborazione dell'ENEA sottolinea come l'Italia primeggia in tassi di riciclo nella classifica dei principali paesi UE (Francia, Germania, Spagna ecc), un primato raggiunto principalmente grazie agli alti tassi di riciclo del settore degli imballaggi (Rapporto Economia Circolare, 2024)

La Circular Economy Initiative Germany stima che, rispetto al percorso di business-as-usual, le strategie dedicate all'economia circolare possono ridurre il

consumo di risorse in Germania di circa due terzi entro il 2050 (Kadner et al. 2021), come mostrato in Figura 13 .

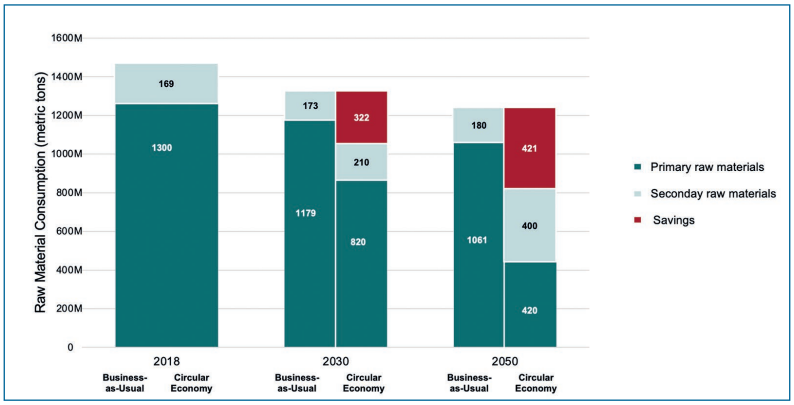


Figura 13: Confronto del consumo di risorse tra scenario "business as usual" ed "economia circolare" in Germania (Fonte: Wuppertal institute, 2022)

Nel caso specifico delle materie prime critiche, i Rifiuti da Apparecchiature Elettriche ed Elettroniche (RAEE) sono una potenziale miniera urbana di materie prime secondarie che potrebbe contribuire al rafforzamento dell'indipendenza dall'importazione di materie prime critiche creando opportunità di business e nuove professioni, con benefici economici, sociali e ambientali. A livello globale, la quantità di rifiuti elettronici sta aumentando ad un ritmo pari a quasi 2 milioni di tonnellate all'anno e nel 2030 si stima una produzione complessiva di quasi 75 milioni di tonnellate.

In Italia i rifiuti elettronici riciclati correttamente sono pari al 39,4% ed occorre uno sforzo sistemico per raggiungere l'obiettivo europeo del 65%. Secondo uno studio di The European House – Ambrosetti a fronte del raggiungimento dell'obiettivo Europeo sul tasso di raccolta si potrebbero recuperare circa 7,6 mila tonnellate di materie prime critiche, riducendo le spese per importazione con un vantaggio economico pari a quasi 14 milioni di euro ed una riduzione delle emissioni di oltre 1 milione di tonnellate di CO_2. Gli scenari evolutivi delle materie

prime critiche e il riciclo dei prodotti tecnologici come leva strategica per ridurre i rischi di approvvigionamento per l'Italia 2022 – TEHA.[18]

Al fine di poter cogliere le grandi opportunità connesse con il settore del riciclo delle Materie Prime Critiche da RAEE occorre implementare nel Paese una strategia integrata per l'economia circolare basata sulla promozione di raccolta, realizzazione di impianti innovativi e selettivi capaci di recuperare in maniera sostenibile le materie prime e adozione di schemi incentivanti per l'utilizzo di materiali riciclati. L'Italia ha elaborato la sua roadmap per le materie prime critiche attualmente aggiornata al 2024.[19]

La transizione verso la circolarità richiede un commercio internazionale agile ma regolamentato, per consentire ai modelli di business circolari di espandersi sufficientemente e diventare competitivi evitando risultati indesiderati, come ad esempio lo scarico di rifiuti. Le iniziative di economia circolare si svolgono in gran parte a livello nazionale, entro i confini nazionali. Tuttavia, l'economia circolare può avere importanti interconnessioni con il commercio internazionale in diverse modalità.
In relazione ai beni, due distinti flussi commerciali possono influenzare la circolarità di un'economia: il commercio all'interno delle catene di approvvigionamento e il commercio di prodotti a fine vita. Ad esempio, gli sforzi a monte sulla progettazione ecocompatibile o sulla gestione del contenuto dei materiali dovrebbero tenere conto delle catene di approvvigionamento che si estendono oltre i confini, poiché le importazioni possono avvenire attraverso il commercio di materie prime e beni intermedi che alimentano i processi di produzione nonché i prodotti finali per consumo dell'utente finale. Per quanto riguarda le catene del valore a fine vita, i prodotti che giungono a fine vita possono essere raccolti (lavorati) ed esportati come commercio di rifiuti e rottami, commercio di materie prime seconde, commercio di beni destinati alla ristrutturazione e rigenerazione e commercio di beni di seconda mano.

[18] *https://erion.it/it/studi-e-proposte/materie-prime-critiche-raee/*

[19] *https://www.ambrosetti.eu/news/la-roadmap-italiana-per-le-materie-prime-critiche/*

Oltre allo scambio di beni, l'economia circolare può avere implicazioni anche sullo scambio di servizi. Una transizione verso l'economia circolare prevede generalmente un grado più elevato di coinvolgimento del settore dei servizi, come la manutenzione, la riparazione e i sistemi di servizio del prodotto, e può comportare nuove opportunità per il commercio di servizi.

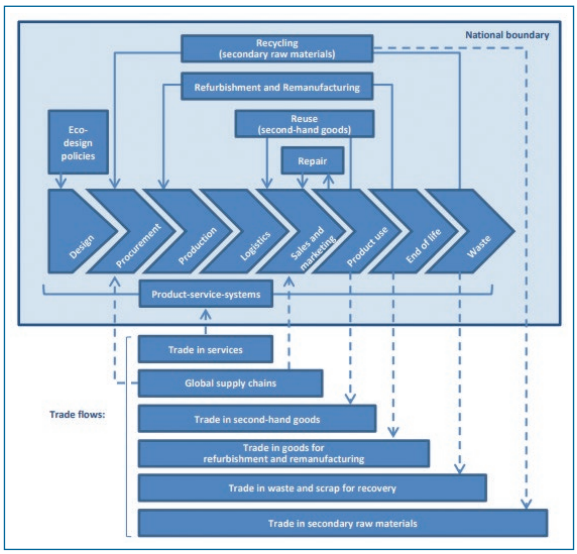


Figura 14: Interconnessioni tra commercio internazionale ed economia circolare (Fonte: OECD, 2021)

Per quanto riguarda la catena di fine vita, il volume di commercio globale è stato considerevole.

Secondo gli indicatori commerciali e ambientali dell'OCSE sviluppati da Garsous (2019) e aggiornati sulla base dei dati UN COMTRADE, il commercio globale di rifiuti e rottami ha raggiunto 182 milioni di tonnellate in peso e 95 miliardi di dollari in valore nel 2018. In questo anno i rifiuti e i rottami di metalli, carta e plastica rappresentavano complessivamente il 97% del valore totale e il 95% del peso totale. In particolare, rifiuti e rottami metallici rappresentano l'82% del valore totale e il

54% del peso totale nel 2018, diventando così la categoria di rifiuti e rottami più commercializzata. Seguono la carta (12% in valore totale e 37% in peso totale nel 2018) e la plastica (3% in valore totale e 5% in peso totale nel 2018).
Nel periodo dal 2003 al 2018, la quantità di rifiuti e rottami scambiati ha raggiunto il picco nel 2012, ed è generalmente aumentata nel tempo del 204% in valore, e del 23% in peso, il che implica che il valore unitario di rifiuti e rottami è aumentato significativamente durante lo scorso decennio. Nello stesso periodo, il valore unitario dei metalli è aumentato del 210%, della carta del 73% e della plastica del 58% (OECD, 2022). Ciò riflette il fatto che rifiuti e rottami continuano a essere risorse con un intrinseco valore economico e commerciale.
Per quanto riguarda invece il commercio delle materie prime seconde, i dati livello globale presentano numerosi gap, mentre a livello UE sono molto più robusti. In sintesi, l'UE sta trasformando più materie prime seconde e sta migliorando la propria bilancia commerciale di questi materiali. Dal 2004 al 2016, il tasso di utilizzo dei materiali circolari nell'UE è aumentato di 3,4 punti percentuali, passando dall'8,3% all'11,7%. Spinte dall'aumento dell'uso interno di materiali circolari, le esportazioni di materie prime secondarie sono aumentate del 70%, da 21,7 milioni di tonnellate nel 2004 a 36,9 milioni di tonnellate nel 2018. Di conseguenza, le importazioni sono diminuite del 35%, da 9 milioni di tonnellate nel 2004 a 5,9 milioni di tonnellate nel 2018 (OECD, 2022).
Garantire la qualità e il contenuto, nonché creare mercati per questi materiali, è essenziale per la loro diffusione. Pertanto, si prevede che il ruolo degli standard di qualità dei materiali, degli standard di contenuto dei materiali, dei sistemi di certificazione, nonché della progettazione ecocompatibile, dell'etichettatura ecologica e degli appalti pubblici sarà fondamentale per sviluppare un'economia circolare ed efficiente sotto il profilo delle risorse.

RICADUTE OCCUPAZIONALI

L'economia circolare è considerata da molti paesi come un'opportunità per la creazione di posti di lavoro. Lo sviluppo di un'economia basata sul riutilizzo, sulla-

rigenerazione, e soprattutto sulla riparazione richiede una maggiore intensità di manodopera rispetto a un'economia lineare (UE, 2017). Allo stesso modo, promuovere il riciclaggio e la produzione secondaria di metalli non ferrosi richiede più manodopera rispetto alla produzione primaria (The Club of Rome, 2015). L'utilizzo della politica per stimolare direttamente la produzione di riciclo e di materie prime seconde può quindi ottenere effetti occupazionali più forti di quelli ottenuti con un pacchetto politico meno mirato. Ciò è particolarmente vero per i paesi che importano gran parte del loro fabbisogno di materie prime, che possono così sostituire le importazioni con l'attività economica interna. Nei paesi che importano gran parte del loro fabbisogno di materie prime, ad esempio, la sostituzione delle importazioni con l'attività economica interna può portare alla creazione di posti di lavoro a livello nazionale.

In previsione di un pacchetto di politiche che combini tasse sui materiali con sussidi al riciclo e ai mercati secondari, l'economia circolare può aumentare considerevolmente l'occupazione in questi settori (Bibas et al., 2021). Questo scenario rileva che l'occupazione globale nei settori della produzione e del riciclaggio dei metalli secondari sarà rispettivamente superiore del 27% e del 46% rispetto allo scenario business-as-usual nel 2040. Anche i settori correlati, come quelli che producono sostituti dei prodotti basati su materie prime, potrebbero raggiungere un livello di occupazione più elevato. Tuttavia, poiché alcuni settori subiranno la distruzione di posti di lavoro a causa delle tasse sulle materie prime, l'effetto complessivo sull'occupazione risulta essere solo leggermente positivo (0,03%) su scala globale (Chateau e Mavroeidi, 2020). Inoltre, si potranno avere anche effetti asimmetrici su diverse regioni. Inoltre, nei paesi con un settore estrattivo significativo, l'effetto netto sull'occupazione potrebbe essere negativo e i guadagni di posti di lavoro nel settore secondario potrebbero in alcuni paesi essere superati da maggiori perdite di posti di lavoro nel settore estrattivo (Chateau e Mavroeidi, 2020). In ogni caso, dalla analisi (figura 15) emerge che nella quasi totalità dei casi la creazione di lavoro è nettamente maggiore della sua perdita.

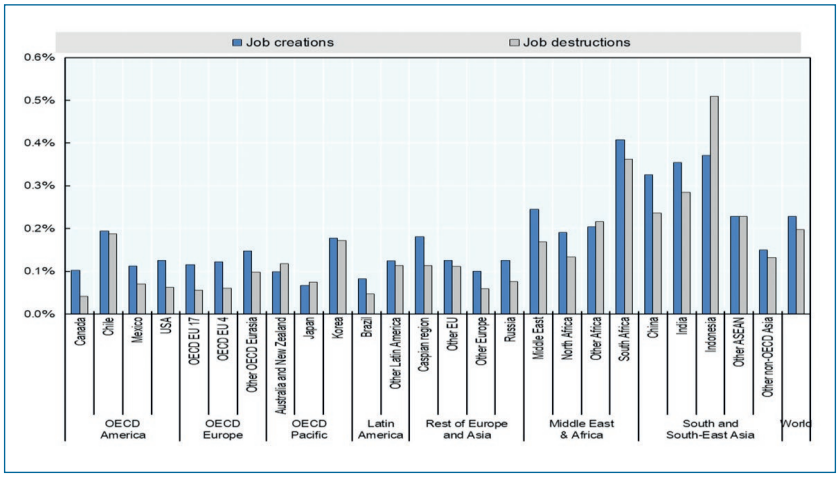


Figura 15: Creazione e perdita di posti di lavoro all'aumento dell'economia circolare (Fonte: OECD, 2020)

SFIDE SOCIALI E IMPATTO SUGLI SDGS

La transizione circolare contribuirà a raggiungere una serie di obiettivi che possono essere divisi in tre ambiti, economici, sociali e ambientali, sebbene alcuni possono appartenere a più d'uno:

Ambito economico

Un obiettivo economico essenziale della transizione è raggiungere il disaccoppiamento tra crescita economica e utilizzo dei materiali. Il concetto del disaccoppiamento nell'economia circolare è associato non solo all'uso efficiente delle risorse, ma anche agli impatti ambientali derivanti, come mostrato in Figura 16 . Ciò realizzabile attraverso tre canali principali:

- cambiamento tecnologico (miglioramento dell'efficienza);
- innovazione, compresa l'introduzione di beni più durevoli;
- sostituzione dei materiali orientandosi verso opzioni più rispettose dell'ambiente.

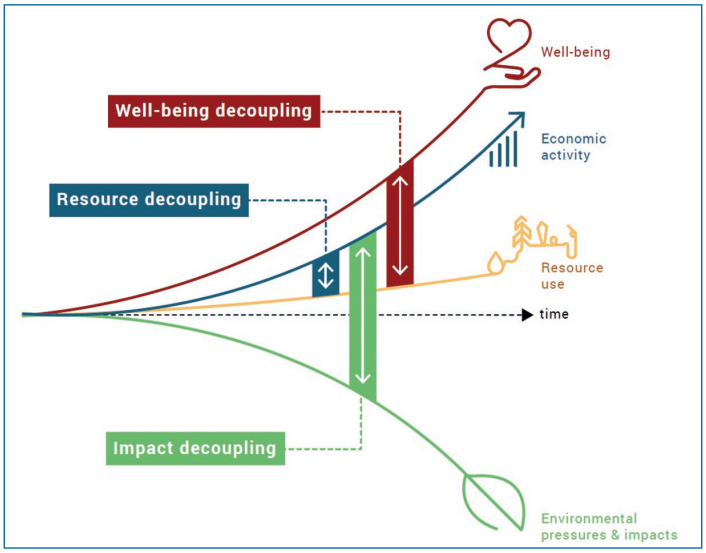


Figura 16: Disaccoppiamento dell'uso delle risorse naturali e degli impatti ambientali dalla crescita economica (Fonte: IRP 2017/a)

Inoltre, per i paesi importatori come quelli dell'area UE, la transizione è un modo per rafforzare la resilienza economica riducendo quindi la dipendenza dalle importazioni. Allo stesso tempo, affrontando l'efficienza delle risorse e la quantità di rifiuti, i modelli di business circolari mirano ad aumentare la competitività delle imprese nazionali. Un altro aspetto economico importante della transizione è creare opportunità di business e promuovere l'economia della condivisione (sharing economy), che può derivare da cambiamenti nelle modalità di produzione (Livingstone et al., 2022).

Ambito ambientale

Gli obiettivi ambientali della transizione sono principalmente orientati a ridurre l'impronta ambientale della produzione e del consumo di materiali, obiettivo che può essere raggiunto in molteplici modalità. L'economia circolare punta a ridurre

la pressione sull'estrazione delle materie prime vergini e contribuisce a gestire in modo efficiente le risorse naturali. Un altro importante obiettivo che va di pari passo con tale ambizione è quello di aumentare la quota delle materie prime seconde nell'economia, poiché si stima che il loro impatto ambientale sia, in media, inferiore di un ordine di grandezza rispetto a quello delle materie prime a parità di peso (OECD, 2018).

Ambito sociale

Gli obiettivi sociali della transizione circolare includono (Livingstone et al., 2022):

- l'aumento delle opportunità di lavoro (ad esempio attraverso lo sviluppo di modelli di business circolari);
- l'aumento del benessere generale (ad esempio garantendo un reddito disponibile più elevato derivante da una maggiore crescita economica);
- il miglioramento della salute pubblica attraverso la riduzione dell'esposizione a sostanze pericolose e l'uso di materiali meno dannosi per la salute umana.

L'espansione della sharing economy ed i nuovi modelli di business circolari che promuovono la condivisione, piuttosto che la proprietà, hanno il potenziale per ridurre l'uso delle risorse e consentire agli individui l'accesso ai servizi a un costo potenzialmente inferiore (OECD, 2019).

Inoltre, la transizione all'economia circolare può contribuire a raggiungere molti dei 17 obiettivi di sviluppo sostenibile (SDG) sviluppati dalle Nazioni Unite (Figura 17).

TRANSIZIONE DIGITALE

La digitalizzazione e l'economia circolare sono strettamente connesse, in quanto i dati e la loro gestione sono fondamentali per una corretta ed efficace transizione circolare. La digitalizzazione sta sconvolgendo i parametri dell'attuale sistema economico tramite la trasformazione delle catene del valore, cambiando la strut-

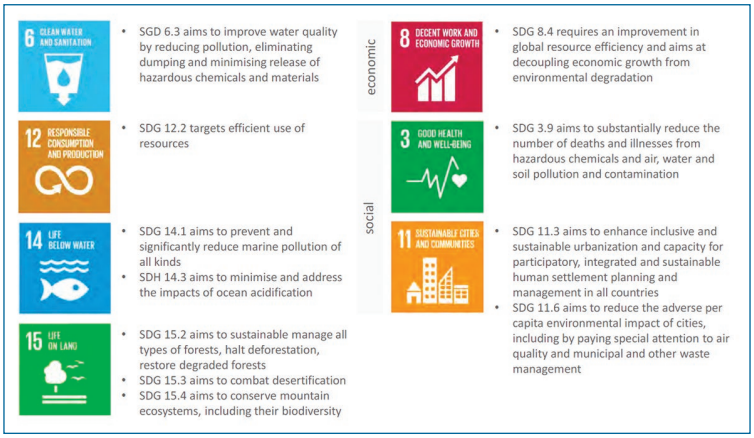


Figura 17: Allineamento degli obiettivi SDG con gli obiettivi della transizione circolare (Fonte: OECD, 2022)

tura e il funzionamento dei mercati, consentendo la realizzazione di piattaforme ed ecosistemi, influenzando il comportamento dei consumatori e il modo in cui le relazioni vengono sviluppate, mantenute e avanzate, aumentando la conservazione del valore e mitigando alcune delle esternalità ambientali.

I flussi di informazioni generati dagli asset intelligenti possono essere considerati uno dei principali motori della transizione digitale, creando significative opportunità economiche. Le tecnologie digitali facilitano il processo decisionale basato sui dati e consentono di ottimizzare le prestazioni di sistemi e processi. Aiutano, creando e catturando valore in nuovi modi durante il ciclo di vita delle risorse e facilitano la loro condivisione o locazione in più settori, aziende e individui (Ellen MacArthur Foundation, 2016).
L'economia circolare, d'altra parte, richiede un approccio sistematico che vada oltre le azioni delle singole aziende. Un prerequisito necessario, ad esempio, per agire nell'economia circolare è l'accesso alle informazioni sulle fasi a monte e la comprensione reciproca dell'impatto delle proprie azioni imprenditoriali sulle fasi

a valle della catena del valore. Queste informazioni, combinate con la motivazione sociale e gli incentivi politici, possono promuovere la volontà e la capacità di agire, in un'ottica di economia circolare. Pertanto, collegare i flussi di materiali fisici con i flussi di dati digitali è una parte fondamentale di molte misure e strategie utilizzate per perseguire un'economia circolare (Wuppertal institute, 2022).
Pertanto, non esiste economia circolare senza dati. Solo la digitalizzazione può gettare le basi per una trasformazione ecologica globale della nostra economia.
Con l'aiuto dell'Industria 4.0 e dell'Internet delle Cose (IoT), la trasformazione digitale dell'economia ha già iniziato ad accelerare e offre molteplici punti di partenza per una trasformazione ecologica e circolare. La base è data dall'interazione di soluzioni digitali in quattro aree funzionali centrali:

- Raccolta e connessione dei dati
- Unione e condivisione dei dati
- Autenticazione e sicurezza dei dati
- Analisi dei dati

Le soluzioni digitali combinano un'ampia varietà di tecnologie digitali chiave come sensori connessi, IoT, edge e cloud computing, nonché piattaforme digitali, tecnologie di contabilità distribuita (DLT) come blockchain e metodi analitici come big data e intelligenza artificiale (IA)[20].
Inoltre, la digitalizzazione sta modificando sempre più i processi produttivi, le catene del valore, le posizioni competitive, nonché i rapporti con clienti e partner. Le aziende stanno costruendo ecosistemi di dati e la competitività industriale e la leadership tecnologica sono sempre più definite dalla capacità di coordinare e modellare le relazioni tra i dati. Da qui possono e devono partire le strategie per lo sviluppo dell'economia circolare. Digitalizzazione e sostenibilità devono essere pensate e agite insieme come parte della "Twin Transition" (Wuppertal Institute, 2022).

Come nel caso di qualsiasi innovazione, anche per la transizione digitale occorre tenere in considerazione i possibili rischi ed effetti collaterali legati ad esempio ad

[20] Tali scenari tecnologici sono trattati nel volume de Le Innovazioni del Prossimo futuro dedicato alle Tecnologie digitali

un maggiore consumo di energia e di materie prime critiche per la realizzazione delle infrastrutture digitali.

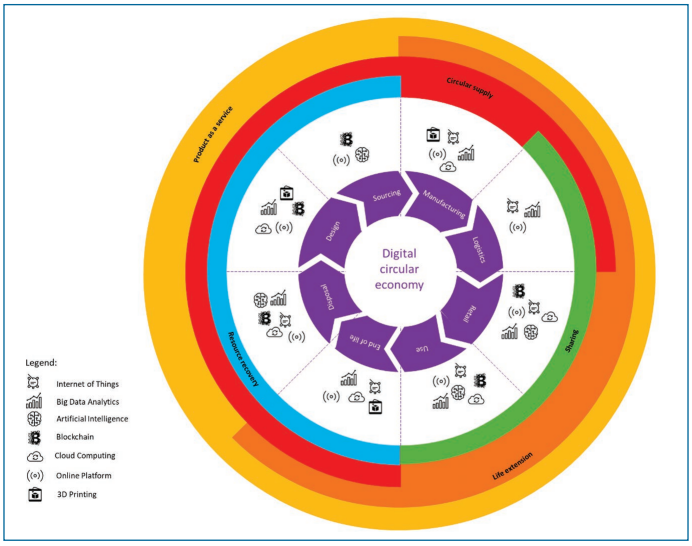


Figura 17: Tecnologie digitali che facilitano lo scale-up dei circular business models (Fonte: OECD, 2022)

Nella maggior parte dei casi, è il potere combinatorio delle singole tecnologie a facilitare l'espansione dei modelli di business circolari; non è quindi possibile individuare o quantificare l'entità del loro contributo individuale.

SINTONIA CON LE TECNOLOGIE ABILITANTI

Una ricerca di Ortega Gras et al. (2021) definisce tre tecnologie maggiormente utilizzate come abilitatori delle pratiche dell'economia circolare: Big Data, Intelligenza Artificiale e Internet delle Cose, utilizzate principalmente per monitorare il consumo energetico e analisi dinamica a supporto della gestione energetica dell'economia circolare. Inoltre, si segnalano due ulteriori tecnologie implementate con scopi sostenibili: la robotica, utilizzata principalmente per facilitare i pro-

cessi di raccolta differenziata e di assemblaggio, e la produzione additiva, come facilitatore chiave di pratiche di eco-design.
Per quanto riguarda i settori industriali, la gestione dei rifiuti è stata rapidamente trasformata attraverso l'applicazione delle tecnologie menzionate al fine di migliorare l'efficienza dei diversi processi. Altri settori industriali in cui sono state rilevate pratiche di implementazione delle tecnologie 4.0 nell'ambito dell'economia circolare sono quello automobilistico, edile, elettrico ed elettronico, mobilità e settori dell'industria manifatturiera, come quello del mobile o del tessile.

SCENARI TECNOLOGICI

Data l'ampiezza del settore e delle sfide delineate precedentemente è stato necessario fare una scelta specifica degli scenari tecnologici da trattare nello studio. Si è deciso di proporre una metodologia innovativa volta ad implementare modelli di business sostenibili (la simbiosi industriale), e una serie di tecnologie per l'uso efficiente delle risorse e il recupero e riciclo di materie prime e seconde.
Gli scenari propongono un approccio metodologico per la diagnosi delle risorse e la chiusura dei cicli (simbiosi industriale) ed una selezione di metodi e tecnologie esemplificative per l'implementazione di approcci di economia circolare in tre diversi contesti:
Tali tecnologie per la loro strategicità richiedono investimenti in tecnologia, processi, aggiornamento di organizzazione e competenze nei prossimi tre – cinque anni.

Approccio metodologico

- La simbiosi industriale e la diagnosi delle risorse per la chiusura dei cicli e la competitività del sistema industriale

Il riciclo e la valorizzazione del fine vita

- Processo di pirolisi catalitica, con catalizzatori a basso costo, per il riciclo chimico delle plastiche miste
- Sviluppo di un processo di riciclo meccanico innovativo per schiume poliuretaniche flessibili post-industriali e post-consumo
- Tecnologie per la valorizzazione delle batterie al litio a fine vita

Il settore agroalimentare

- Nuove tecnologie di Evoluzione Assistita (TEA) per l'agricoltura
- Tecnologie Fermentative per i prodotti Bio-Based
- Agricoltura Conservativa

L'ingegneria ambientale

- Tecnologie per la valorizzazione delle acque reflue
- Approccio integrato alla gestione sostenibile dei fanghi di depurazione
- one

BIBLIOGRAFIA

Articoli tecnici

• IPCC, 2023: *Climate Change 2023*: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 35-115, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647

• IRP (2022). Making Climate Targets Achievable: Improving Wellbeing through Reduced Absolute Resource Use. Potočnik, J., Teixeira, I. A think piece of the International Resource Panel Co-Chairs

• NOAA National Centers for Environmental Information, Monthly Global Climate Report for Annual 2023, published online January 2024, retrieved on February 19, 2024 from https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/monthly-report/global/202313

• C3S/ECMWF (2024) "The 2023 Annual Climate Summary" Global Climate Highlights 2023, retrieved on February 19, 2024 from https://climate.copernicus.eu/global-climate-highlights-2023

• OECD HIGHLIGHTS (2018) Global Material Resources Outlook to 2060 – Economic Drivers and Environmental Consequences

• IRP (2019). Global Resources Outlook 2019: Natural Resources for the Future We Want. Oberle, B.,

• Bringezu, S., Hatfield-Dodds, S., Hellweg, S., Schandl, H., Clement, J., and Cabernard, L., Che, N., Chen, D., Droz-Georget , H., Ekins, P., Fischer-Kowalski, M., Flörke, M., Frank, S., Froemelt , A., Geschke, A., Haupt , M., Havlik, P., Hüfner, R., Lenzen, M., Lieber, M., Liu, B., Lu, Y., Lutter, S., Mehr , J., Miatto, A., Newth, D., Oberschelp , C., Obersteiner, M., Pfister, S., Piccoli, E., Schaldach, R., Schüngel, J., Sonderegger, T., Sudheshwar, A., Tanikawa, H., van der Voet, E., Walker, C., West, J., Wang, Z., Zhu, B. A Report of the International Resource Panel. United Nations Environment Programme. Nairobi, Kenya

• Brunori, 2022 "Urban mining e materie prime critiche" Energia, ambiente e innovazione, ENEA magazine. DOI 10.12910/EAI2022-057

• Livingstone, L., et al. (2022), "Synergies and trade-offs in the transition to a resource-efficient and circular economy", *OECD Environment Policy Papers,* No. 34, OECD Publishing, Paris, https://doi.org/10.1787/e8bb5c6e-en

• Chateau, J. and E. Mavroeidi (2020), "The jobs potential of a transition towards a resource

efficient and circular economy", OECD Environment Working Papers, No. 167, OECD Publishing, Paris, https://doi.org/10.1787/28e768df-en

• Barteková, E. and P. Börkey (2022), "Digitalisation for the transition to a resource efficient and circular economy", *OECD Environment Working Papers*, No. 192, OECD Publishing, Paris, https://doi.org/10.1787/6f6d18e7-en

• The Club of Rome (2015), *The circular economy and benefits for society: jobs and climate clear winners in an economy based on renewable energy and resource efficiency.*

• Chateau, J. and E. Mavroeidi (2020), "The jobs potential of a transition towards a resource efficient and circular economy", *OECD Environment Working Papers*, No. 167, OECD Publishing, Paris, https://doi.org/10.1787/28e768df-en

• Yamaguchi, S. (2021), "International trade and circular economy - Policy alignment", *OECD Trade and Environment Working Papers*, No. 2021/02, OECD Publishing, Paris, https://doi.org/10.1787/ae4a2176-en

• Figge, Frank and Thorpe, Andrea Stevenson and Gutberlet, Melissa, Definitions of the Circular Economy - Circularity Matters (March 14, 2023). Ecological Economics, Vol. 208, 2023, Available at SSRN: https://ssrn.com/abstract=4398717

• Ekins, P., Domenech, T., Drummond, P., Bleischwitz, R., Hughes, N. and Lotti, L. (2019), "The Circular Economy: What, Why, How and Where", Background paper for an OECD/EC Workshop on 5 July 2019 within the workshop series "Managing environmental and energy transitions for regions and cities", Paris

• Carrara, S., Bobba, S., Blagoeva, D., Alves Dias, P., Cavalli, A., Georgitzikis, K., Grohol, M., Itul, A., Kuzov, T., Latunussa, C., Lyons, L., Malano, G., Maury, T., Prior Arce, Á., Somers, J., Telsnig, T., Veeh, C., Wittmer, D., Black, C., Pennington, D., Christou, M., Supply chain analysis and material demand forecast in strategic technologies and sectors in the EU – A foresight study, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2023, doi:10.2760/386650, JRC132889.

• Barteková, E. and P. Börkey (2022), "Digitalisation for the transition to a resource efficient and circular economy", OECD Environment Working Papers, No. 192, OECD Publishing, Paris, https://doi.org/10.1787/6f6d18e7-en.

• Ramesohl, Berg, Wirtz, (2022), The circular economy and digitalisation - strategies for a di-

gital-ecological industry transformation: a study commmissioned by Huawei Technologies Germany GmbH, Wuppertal Institute.

Riferimenti a politiche e normative europee

• Il Green Deal europeo, Bruxelles, 11.12.2019, COM(2019) 640 final.

• Strategia dell'UE sulla biodiversità per il 2030 - Riportare la natura nella nostra vita, Bruxelles, 20.5.2020.

• Una strategia "Dal produttore al consumatore" per un sistema alimentare equo, sano e rispettoso dell'ambiente,Bruxelles, 20.5.2020.

• Strategia in materia di sostanze chimiche sostenibili Verso un ambiente privo di sostanze tossiche, Bruxelles, 14.10.2020, COM(2020) 667 final.

• Una nuova strategia industriale per l'Europa, Bruxelles, 10.3.2020, COM(2020) 102 final.

• Aggiornamento della nuova strategia industriale 2020: costruire un mercato unico più forte per la ripresa dell'Europa, Bruxelles, 5.5.2021, COM(2021) 350 final.

• Un nuovo piano d'azione per l'economia circolare - Per un'Europa più pulita e più competitiva, Bruxelles, 11.3.2020, COM(2020) 98 final.

• Plasmare un'Europa resiliente ai cambiamenti climatici – La nuova strategia dell'UE di adattamento ai cambiamenti climatici, Bruxelles, 24.2.2021, COM(2021) 82 final.

• Regolamento (UE) 2021/1119 del 30 giugno 2021 che istituisce il quadro per il conseguimento della neutralità climatica e che modifica il regolamento (CE) n. 401/2009 e il regolamento (UE) 2018/1999 («Normativa europea sul clima»).

• "Pronti per il 55 %": realizzare l'obiettivo climatico dell'UE per il 2030 lungo il cammino verso la neutralità climatica, Bruxelles, 14.7.2021, COM(2021) 550 final.

• Nuova strategia dell'UE per le foreste per il 2030, Bruxelles, 16.7.2021, COM(2021) 572 final.

• Regolamento (UE) 2023/956 del 10 maggio 2023 che istituisce un meccanismo di adeguamento del carbonio alle frontiere.

• Regolamento (UE) 2023/955 che istituisce un Fondo sociale per il clima e che modifica il regolamento (UE)2021/1060.

• Direttiva (UE) 2023/959 del 10 maggio 2023 recante modifica della direttiva 2003/87/CE, che istituisce un sistema per lo scambio di quote di emissioni dei gas a effetto serra nell'Unione, e della decisione (UE) 2015/1814, relativa all'istituzione e al funzionamento di una riserva stabilizzatrice del mercato nel sistema dell'Unione per lo scambio di quote di

emissione dei gas a effetto serra.

• Regolamento (UE) 2023/839 del 19 aprile 2023 che modifica il regolamento (UE) 2018/841 per quanto riguarda l'ambito di applicazione, semplificando le norme di comunicazione e conformità e stabilendo gli obiettivi degli Stati membri per il 2030, e il regolamento (UE) 2018/1999 per quanto riguarda il miglioramento del monitoraggio, della comunicazione, della rilevazione dei progressi e della revisione.

• Direttiva (UE) 2023/2413 del 18 ottobre 2023 che modifica la direttiva (UE) 2018/2001, il regolamento (UE) 2018/1999 e la direttiva n. 98/70/CE per quanto riguarda la promozione dell'energia da fonti rinnovabili e che abroga la direttiva (UE) 2015/652 del Consiglio.

• Direttiva (UE) 2023/1791 del 13 settembre 2023 sull'efficienza energetica e che modifica il regolamento (UE) 2023/955 (rifusione).

• Regolamento (UE) 2023/1115 del 31 maggio 2023 relativo alla messa a disposizione sul mercato dell'Unione e all'esportazione dall'Unione di determinate materie prime e determinati prodotti associati alla deforestazione e al degrado forestale e che abroga il regolamento (UE) n. 995/2010

• Nuova strategia dell'UE per le foreste per il 2030, COM/2021/572 final

• Strategia dell'UE per il suolo per il 2030 Suoli sani a vantaggio delle persone, degli alimenti, della natura e del clima COM/2021/699 final

• Regolamento (UE) 2024/1991 del Parlamento europeo e del Consiglio, del 24 giugno 2024, sul ripristino della natura e che modifica il regolamento (UE) 2022/869.

• Un percorso verso un pianeta più sano per tutti Piano d'azione dell''UE: "Verso l'inquinamento zero per l'aria, l'acqua e il suolo". COM(2021) 400 final, Bruxelles, 12.5.2021.

• Un piano industriale del Green Deal per l'era a zero emissioni nette, Bruxelles, 1.2.2023, COM(2023) 62 final.

• Regolamento (UE) 2024/1735 del 13 giugno 2024 che istituisce un quadro di misure per rafforzare l'ecosistema europeo di produzione delle tecnologie a zero emissioni nette e che modifica il regolamento (UE) 2018/1724.

• Direttiva (UE) 2022/2464 del 14 dicembre 2022 che modifica il regolamento (UE) n. 537/2014, la direttiva 2004/109/CE, la direttiva 2006/43/CE e la direttiva 2013/34/UE per quanto riguarda la rendicontazione societaria di sostenibilità.

• Direttiva (UE) 2024/1760 del 13 giugno 2024 relativa al dovere di diligenza delle imprese ai fini della sostenibilità e che modifica la direttiva (UE) 2019/1937 e il regolamento (UE) 2023/285.

• Regolamento (UE) 2024/1252 dell'11 aprile 2024 che istituisce un quadro atto a garantire un approvvigionamento sicuro e sostenibile di materie prime critiche e che modifica i regolamenti (UE) n. 168/2013, (UE) 2018/858, (UE) 2018/1724 e (UE) 2019/1020.

• Un nuovo piano d'azione per l'economia circolare Per un'Europa più pulita e più competitiva, Bruxelles, 11.3.2020, COM (2020) 98 final.

• Prodotti sostenibili: dall'eccezione alla regola, Bruxelles, 30.3.2022. COM(2022) 140 final.

• Regolamento sugli imballaggi e i rifiuti di imballaggio, che modifica il regolamento (UE) 2019/1020 e la direttiva (UE) 2019/904 e che abroga la direttiva 94/62/CE, in fase di pubblicazione sulla GUUE.

• Regolamento (UE) 2023/1542 del Parlamento europeo e del Consiglio, del 12 luglio 2023, relativo alle batterie e ai rifiuti di batterie, che modifica la direttiva 2008/98/CE e il regolamento (UE) 2019/1020 e abroga la direttiva 2006/66/CE.

• EU policy framework on biobased, biodegradable and compostable plastics.

• Regolamento (UE) 2024/3110 del Parlamento europeo e del Consiglio, del 27 novembre 2024, che fissa norme armonizzate per la commercializzazione dei prodotti da costruzione e abroga il regolamento (UE) n. 305/2011.

• Regolamento (UE) 2024/2865 del 23 ottobre 2024 che modifica il regolamento (CE) n. 1272/2008, relativo alla classificazione, all'etichettatura e all'imballaggio delle sostanze e delle miscele.

• Direttiva (UE) 2024/3019 del Parlamento europeo e del Consiglio, del 27 novembre 2024, concernente il trattamento delle acque reflue urbane, (rifusione).

• Regolamento (UE) 2024/1157 del Parlamento europeo e del Consiglio, dell'11 aprile 2024, relativo alle spedizioni di rifiuti, che modifica i regolamenti (UE) n. 1257/2013 e (UE) 2020/1056 e abroga il Regolamento (CE) n. 1013/2006

• Regolamento (UE) 2024/1252 dell'11 aprile 2024 che istituisce un quadro atto a garantire un approvvigionamento sicuro e sostenibile di materie prime critiche e che modifica i regolamenti (UE) n. 168/2013, (UE) 2018/858, (UE) 2018/1724 e (UE) 2019/1020.

• Direttiva (UE) 2024/1785 del Parlamento europeo e del Consiglio, del 24 aprile 2024, che modifica la direttiva 2010/75/UE del Parlamento europeo e del Consiglio, relativa alle emissioni industriali (prevenzione e riduzione integrate dell'inquinamento), e la direttiva 1999/31/CE del Consiglio, relativa alle discariche di rifiuti.

• Direttiva (UE) 2024/825 del Parlamento europeo e del Consiglio, del 28 febbraio 2024, che modifica le direttive 2005/29/CE e 2011/83/UE per quanto riguarda la responsabilizzazione

dei consumatori per la transizione verde mediante il miglioramento della tutela dalle pratiche sleali e dell'informazione.

- Regolamento (UE) 2024/1781 del Parlamento europeo e del Consiglio, del 13 giugno 2024, che stabilisce il quadro per la definizione dei requisiti di progettazione ecocompatibile per prodotti sostenibili, modifica la direttiva (UE) 2020/1828 e il regolamento (UE) 2023/1542 e abroga la direttiva 2009/125/CE.

- Direttiva (UE) 2024/1799 del Parlamento europeo e del Consiglio, del 13 giugno 2024, recante norme comuni che promuovono la riparazione dei beni e che modifica il regolamento (UE) 2017/2394 e le direttive (UE) 2019/771 e (UE) 2020/1828.



SETTORE

AMBIENTE ED ECONOMIA CIRCOLARE

SCENARI TECNOLOGICI

indice - scenari tecnologici

1 - LA SIMBIOSI INDUSTRIALE E LA DIAGNOSI DELLE RISORSE PER LA CHIUSURA DEI CICLI E LA COMPETITIVITÀ DEL SISTEMA INDUSTRIALE 71

2 - PROCESSO DI PIROLISI CATALITICA, CON CATALIZZATORI A BASSO COSTO PER IL RICICLO CHIMICO DELLE PLASTICHE MISTE 87

3 - SVILUPPO DI UN PROCESSO DI RICICLO MECCANICO INNOVATIVO PER SCHIUME POLIURETANICHE FLESSIBILI POST-INDUSTRIALI E POST CONSUMO 95

4 - TECNOLOGIE PER LA VALORIZZAZIONE DELLE BATTERIE AL LITIO A FINE VITA 103

5 - NUOVE TECNOLOGIE DI EVOLUZIONE ASSISTITA (TEA) PER L'AGRICOLTURA 115

6 - TECNOLOGIE FERMENTATIVE PER I PRODOTTI BIO-BASED 125

7 - TECNOLOGIE E SOLUZIONI PER L'AGRICOLTURA CONSERVATIVA INTEGRANDO MECCANICA, ELETTRONICA E BIOTECNOLOGIE 137

8 - TECNOLOGIE PER LA VALORIZZAZIONE DELLE ACQUE REFLUE 149

9 - APPROCCIO INTEGRATO ALLA GESTIONE SOSTENIBILE DEI FANGHI DI DEPURAZIONE 165

LA SIMBIOSI INDUSTRIALE E LA DIAGNOSI DELLE RISORSE PER LA CHIUSURA DEI CICLI E LA COMPETITIVITÀ DEL SISTEMA INDUSTRIALE

Il modello lineare di produzione e consumo si basa sull'ipotesi che le risorse siano abbondanti, disponibili, facili da reperire ed economiche da smaltire. L'economia lineare, attraverso la ripetizione continua del modello estrai-produci-consuma-getta, alimenta un sistema in cui il ciclo di vita di un prodotto si conclude simultaneamente al suo consumo, generando rifiuti.

La simbiosi industriale (SI) è uno degli strumenti più potenti per favorire la transizione verso un'economia circolare (EC), poiché mira a favorire, attraverso innovazioni sistemiche, la collaborazione tra organizzazioni diverse.
Attraverso la SI è possibile conseguire vantaggi competitivi derivanti dal trasferimento e dalla condivisione di risorse (materie prime, energia, acqua, sottoprodotti, capacità, servizi, competenze, impianti, ecc.), attivando sinergie in un appropriato contesto geografico ed economico.

Come la SI, anche la diagnosi delle risorse (DR) ha l'obiettivo di aumentare l'efficienza delle risorse a livello micro, effettuando un'analisi integrata del sistema di gestione degli input e degli output di risorse a livello aziendale, al fine di un efficientamento interno (ottimizzazione e valorizzazione a livello aziendale) ed esterno (valutazione di approcci cooperativi e di trasferimento di risorse secondo meccanismi di SI sul territorio).

Motivazione per lo sviluppo

La SI come la DR permette a un gruppo di imprese o a una singola azienda di raggiungere la massimizzazione del profitto attraverso la valorizzazione economica degli scarti (internalizzazione delle esternalità economiche) e attraverso una ottimizzazione e riduzione del consumo di risorse (date le ottimizzazioni all'interno dei processi ed esternamente sul territorio tramite relazioni simbiotiche), creando così importanti vantaggi economici, ambientali e sociali per il sistema delle imprese e per la collettività.

Tuttavia, l'ottimizzazione dell'uso delle risorse e l'implementazione di percorsi della simbiosi industriale a livello territoriale deve basarsi, per essere pienamente efficaci, su una pianificazione sistemica per cui anche la governance assume un ruolo centrale per l'applicazione di queste strategie.

La SI e la DR garantiscono:

- a livello ambientale: la riduzione degli impatti ambientali derivanti dallo sfruttamento delle risorse materiali e conservazione delle risorse materiali;
- a livello sociale: la coesione sociale, benessere, nuovi posti di lavoro;
- a livello economico: il risparmio economico, maggiori ricavi, riduzione dei costi esterni, positive implicazioni macroeconomiche (crescita economica e dell'occupazione).

Nonostante la riduzione del consumo di risorse e di materiali, non esiste un obbligo normativo, né uno strumento standardizzato di tipo volontario per le aziende, finalizzato alla SI, alla DR, alla loro contabilizzazione e a un loro efficientamento.

A tal fine l'ENEA ha sviluppato metodologie per l'implementazione della SI (per cluster, aree e/o reti) e per la DR a livello aziendale.

Le metodologie e gli strumenti sviluppati come la Piattaforma di Symbiosis® e il tool per la DR, proprio per le loro caratteristiche, sono applicabili in qualsiasi tipologia di contesto produttivo, e sono particolarmente efficaci per supportare le piccole e medie imprese, le quali difficilmente hanno la conoscenza e l'esperienza tali per poter intraprendere in modo autonomo percorsi di eco-innovazione e di transizione verso modelli di EC.

Si riportano qui di seguito gli strumenti e protocolli sviluppati con le potenziali ricadute per:

Simbiosi Industriale (SI):
- Piattaforme digitali per la SI, anche con interfaccia web, per accelerare la transizione delle attività produttive verso l'EC. Questi strumenti informatici sono al servizio delle organizzazioni potenzialmente appartenenti a tutte le catene del valore.

Il loro scopo principale consiste nel facilitare l'incontro tra domanda e offerta di risorse, con l'obiettivo di promuovere l'effettivo trasferimento di tali risorse nell'ambito della SI.

È fondamentale sottolineare l'importanza delle soluzioni digitali per gestire i flussi e le risorse nell'ambito della simbiosi industriale. In tale direzione le tecnologie emergenti legate all'Industria 4.0, come la blockchain, l'intelligenza artificiale e l'Internet of Things, rappresentano un'opportunità senza precedenti per affrontare le sfide ambientali contemporanee. Queste tecnologie sostengono le aziende e gli utenti finali nel passaggio all'economia circolare, garantendo una forte interconnessione tra le entità coinvolte.

Tra le potenziali tecnologie abilitanti dell'Industria 4.0, la blockchain, ad esempio, emerge come una soluzione praticabile per gestire complessi sistemi informativi decentralizzati, caratterizzati da molteplici fonti e destinazioni dei dati. L'implementazione della tecnologia blockchain porta a una riduzione degli errori umani, alla diminuzione delle asimmetrie informative e alla prevenzione delle attività fraudolente. Inoltre, assicura maggiore affidabilità e coordinamento lungo tutta la catena del valore, facilitando un monitoraggio efficiente dei prodotti e delle informazioni associate. Di conseguenza, favorisce una maggiore fiducia tra consumatori e fornitori: offre miglioramenti significativi in termini di tracciabilità e trasparenza dei dati, risolve problemi critici sia per la gestione della simbiosi industriale che per la catena di approvvigionamento.

- Metodologie e protocolli per la SI sviluppati per assistere le organizzazioni nella ricerca e nell'implementazione di sinergie potenziali. A tale scopo, la SI può essere promossa a livello territoriale attraverso tre tipologie di approcci: "bottom-up", "top-down" e "a rete". Per realizzare sinergie di Simbiosi Industriale, è fondamentale valutare preliminarmente le potenzialità delle diverse connessioni e, successivamente verificare attraverso studi di fattibilità l'implementazione degli scenari simbiotici individuati.

- Reti dedicate alla SI promuovono l'eco-innovazione di sistema e la transizione verso l'EC mediante l'adozione della SI, agevolando così la creazione di conoscenza e la collaborazione tra diversi attori, sia pubblici che privati. Queste reti si configurano come punti di riferimento a livello internazionale, nazionale e regionale per gli operatori che desiderano applicare in modo sistematico la simbiosi di ricerca e territoriale in ambito industriale.

Diagnosi delle risorse (DR):
- Metodologia e protocolli per la DR, nell'ottica di accompagnare le aziende in un percorso di transizione verso l'uso efficiente delle risorse, permettono di effettuare una fotografia dello stato attuale del sistema di gestione delle risorse delle aziende e, attraverso il calcolo di opportuni indicatori, consentono di fornire informazioni sulle prestazioni ambientali ed economiche e sulla loro evoluzione nel tempo.
La metodologia permette di effettuare un'analisi delle risorse in ingresso (materie prime, materiali, semilavorati, acqua, consumi energetici) e in uscita (emissioni, effluenti, scarti, ecc.), con l'obiettivo di elaborare una diagnosi interna delle risorse, rivolta al processo produttivo o a una parte di esso, per permettere alle aziende di implementare nuovi sistemi di gestione aziendale delle risorse e ridurre gli impatti ambientali.

Attualmente, sia a livello italiano che europeo sono nate diverse start-up e attività

di servizio alle imprese dedicate, più o meno specificatamente, alla realizzazione di attività di SI e nell'ottica dell'efficientamento delle risorse, in risposta ad un crescente interesse del tessuto imprenditoriale verso questo tipo di strategia.

Le imprese, quindi, per valorizzare le loro risorse di scarto stanno ricorrendo alla SI, ma in una misura che non è nota, dal momento che gli attuali strumenti di monitoraggio non tracciano i flussi di sottoprodotti. Pertanto, non è possibile comprendere quanto sia rilevante questo fenomeno e quanto il sistema delle imprese riesca a chiudere il ciclo delle risorse sul territorio.

A partire dal 2011, sono stati svolti numerosi progetti, da parte di ENEA,localizzati su specifici territori italiani per facilitare e promuovere l'implementazione della SI

	AZIENDE PARTECIPANTI	TAVOLI DI SIMBIOSI	RISORSE CONDIVISE	SINERGIE POTENZIALI	MANUALI OPERATIVI
ECOINNOVAZIONE SICILIA	100	3	585	690	4
GREEN- SIMBIOSI INDUSTRIALE	13	1	104	96	3
PARCO ECO-INDUSTRIALE RIETI-CITTADUCALE	27	2	146	110	1
SIMBIOSI INDUSTRIALE IN UMBRIA	50	2	200	259	2
CREIAMO	22	1	96	102	2
STORM	63	2	96	102	2
MARLIC	30	1	317	86	1
BRIDGECONOMIES	28	1	300	225	1

Figura 1: Progetti ENEA si simbiosi industriale (Fonte: ENEA)

come riportato nella tabella seguente:
A titolo esemplificativo viene di seguito illustrato il progetto "Simbiosi Industriale in Umbria", svolto da ENEA in collaborazione con Sviluppumbria (Agenzia Regionale per lo Sviluppo Economico dell'Umbria) e finanziato attraverso il Programma Innetwork 2016/2017.
Nel 2017, sono stati realizzati due tavoli di lavoro in Umbria a cui hanno preso parte oltre 50 aziende locali appartenenti a diversi settori produttivi (agroindustriale, metalmeccanico, calcestruzzo, imballaggi, gestori ambientali, siderurgico, chimico tradizionale e di nuova generazione)[1]. Le risorse condivise e le sinergie individuate sono state successivamente analizzate per scrivere due manuali operativi che hanno approfondito le opportunità e le potenzialità derivanti dalla valorizzazione degli scarti generati dalla filiera agroindustriale della produzione di olio di oliva: uno per la produzione di sostanze nutraceutiche dalle acque di vegetazione dei frantoi, e un secondo relativo alla produzione di energia degli scarti della filiera olivicola.

Uno dei flussi di risorse approfonditi, e oggetto di un manuale operativo specifico, è stato quello degli scarti provenienti dall'agro-industria per la produzione di sostanze nutraceutiche. Le aziende coinvolte sono quattro e localizzate in Umbria: una impresa input (U015) interessata a ricevere le risorse e tre imprese output (U024, U033, U055) interessate a fornirle.
La Figura 2 mostra le relazioni della sinergia relativa ai flussi di acque reflue dalla valorizzazione dell'olio d'oliva per l'estrazione di polifenoli. Con la linea continua sono indicate le risorse individuate durante i tavoli di lavoro, con quella tratteggiata le risorse individuate da ENEA. Il punto di forza di questa sinergia è l'altissimo valore aggiunto del prodotto finale (la gelatina polifenolica concentrata) che ha diverse potenzialità applicative.
Il processo adottato rappresenta un'opportunità strategica perché potrebbe essere applicato alle acque di vegetazione provenienti da diversi frantoi situati

[1] *Cutaia L., Boncio E., Beltrani T., Barberio G., Mancuso E., Massoli A., Paoni S., Sbaffoni S., La Monica M. (2018), "Implementing circular economy in Umbria through an industrial symbiosis network model" Extended Abstract; Session: 5g. Industrial symbiosis, networking and cooperation as part of industrial ecology; 24th International Sustainable Development Research Society Conference. 13th - 15th June 2018, Messina, Italy.*

nell'area e ha un elevato grado di replicabilità anche in altre realtà territoriali presenti in Italia.

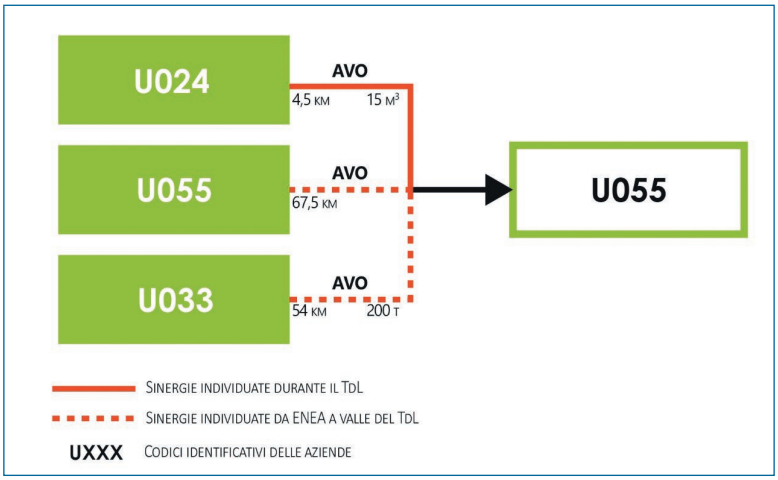


Figura 2: Sinergia per l'acqua di vegetazione olearia (AVO)[2]

In termini economici, la sinergia tra le imprese output e l'impresa input è potenzialmente realizzabile in quanto, ad esempio:

- l'impresa output U024 cedere gratuitamente le sue 15 tonnellate di AVO all'impresa input U015, avendo costi nulli;
- l'impresa output U033 cede gratuitamente e senza nessun costo 60 tonnellate di AVO all'impresa input, ottenendo una riduzione dei costi di smaltimento pari a 180 euro annui
- l'impresa input U015 acquisisce gratuitamente 75 tonnellate di AVO (pari alla capienza massima annua del suo impianto), sostenendo costi complessivi per circa 1.140 euro annui, dovuti esclusivamente ai costi di trasporto e di gestione della risorsa.

[2] http://programme.exordo.com/isdrs2018/delegates/presentation/644/ ISBN: 978-88-943228-6-6

La metodologia ENEA per la diagnosi delle risorse è stata sviluppata e testata in un'azienda della Regione Umbria del settore meccanico, nell'ambito del progetto PROPER, in collaborazione con Sviluppumbria[3].

Nell'ambito del progetto sono stati proposti sette scenari di efficientamento (interno ed esterno) per la valorizzazione di due flussi di risorse: polveri e fanghi di processo.

A titolo esemplificativo, si riportano gli scenari di efficientamento per la valorizzazione delle polveri di scarto prodotte per la produzione di anelli in carbone. Sono state presentate tre diverse soluzioni potenzialmente adottabili di recupero materico ed energetico (Figura 3):

- Scenario 1: valorizzazione di materia tramite re-immissione delle polveri recuperate nello stesso processo (destinazione per uso interno) e un eventuale riutilizzo in altri cicli produttivi (destinazione per uso esterno);
- Scenario 2: valorizzazione energetica (calore per cementifici o energia nei termovalorizzatori);
- Scenario 3: valorizzazione di materia (aggregati riciclati per conglomerati cementizi).

In termini economici, nello scenario 1 il riutilizzo separato delle polveri di carbone e grafite all'interno della stessa azienda umbra, rispetto alla consueta prassi di smaltimento di polveri miste affidato a un gestore ambientale, consentirebbe all'impresa di ridurre i costi sia per l'acquisto delle due materie prime sia per lo smaltimento delle polveri miste come rifiuti. È stato stimato che, ai prezzi del 2018, la riduzione dei costi sarebbe di circa 4.000 euro per ogni tonnellata di carbone recuperata e riutilizzata all'interno dell'azienda, e di circa 5.000 euro per ogni tonnellata di grafite naturale recuperata e riutilizzata internamente. A questi

[3] *Cutaia L., Beltrani T., Mancuso E., Sbaffoni S. (2018), Report tecnico "Metodologia per la Diagnosi delle Risorse" Roma Settembre 2018.*

risparmi si aggiungerebbero i minori costi di trasporto derivanti dal mancato approvvigionamento da fornitori esterni delle polveri di carbone e grafite, come avviene solitamente.

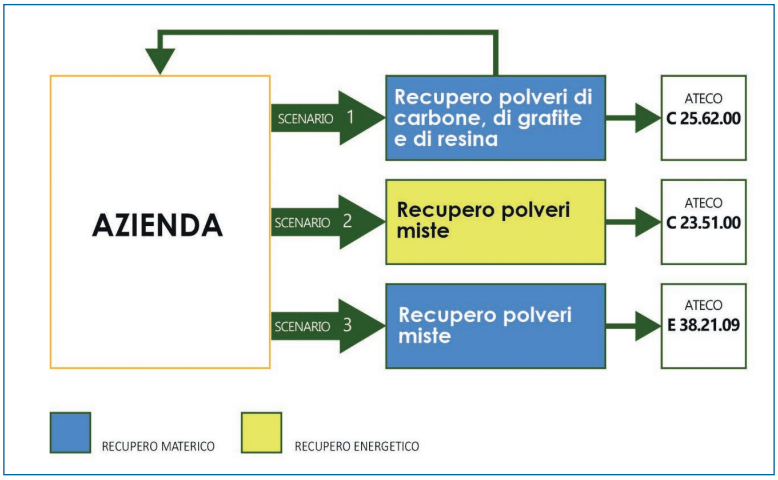


Figura 3: Scenari di valorizzazione per polveri di carbonio e grafite (Fonte: ENEA)

Rilevanza

A livello industriale la SI e la DR rappresentano una potente leva per la sostenibilità delle singole organizzazioni e del sistema industriale nel suo complesso.

Tramite questo approccio, si possono conseguire vantaggi di tipo ambientale, economico e sociale e conseguire gli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile (in particolare l'SGD n. 12) promossi dall'Agenda 2030, in linea con il Piano d'azione per L'EC. In particolare, attraverso un minore consumo di materie prime, una minore produzione di rifiuti, una riduzione delle relative emissioni inquinanti e di gas serra derivanti anche da una riduzione dei trasporti, i vantaggi ambientali sarebbero: risparmi economici derivanti da una riduzione degli oneri per la gestione rifiuti;

maggiori ricavi derivanti dal trasferimento/condivisione di risorse; attivazione di professionalità/attività aggiuntive, sia a scala di singola organizzazione che a scala territoriale. In particolare, per la SI la capacità di mantenere fisicamente le risorse sul territorio, e quindi anche il loro valore, senza disperderle o delegarle a terzi e senza doverle trasferire a grandi distanze per la loro gestione, non comporta un aggravio di costi e degli impatti ambientali.

L'adozione di queste strategie richiede un cambiamento culturale verso un'economia della condivisione e della collaborazione, rispetto a un'economia puramente competitiva. L'implementazione della DR si propone come un modello volontario utile per comprendere, monitorare e ottimizzare la gestione delle risorse a livello di organizzazione; si può affiancare al già esistente strumento della diagnosi energetica, e può efficacemente ampliare i margini operativi delle aziende andando a ottimizzare e ridurre il consumo di risorse complessivo.

La norma tecnica UNI TS 11820 sulla misurazione della circolarità propone indicatori sui sottoprodotti sia in input che in output, per cui a livello di organizzazione o gruppi di organizzazione, man mano che la norma verrà adottata, sarà possibile avere un'idea di flussi di sottoprodotti circolanti. Così come potrà avvenire in applicazione della ISO 59020 sulla misurazione della circolarità pubblicata nel corso del 2024[4]. Sarebbe tuttavia utile avere un quadro dei flussi di sottoprodotto complessivi, analogamente a quanto avviene nel caso dei rifiuti che sono annualmente monitorati su scala nazionale.

Dal punto di vista normativo, negli ultimi anni sono state avviate delle iniziative per una maggiore certezza nell'applicazione della fattispecie del sottoprodotto (ex art. 184 bis del Codice dell'ambiente, D.lgs. 3 aprile 2006, n. 152) che costituisce uno dei punti critici nell'applicazione della SI. Infatti, scarti materici possono essere trasferiti da un'organizzazione a un'altra ricorrendo alla fattispecie del sottoprodotto. Tuttavia, tale riconoscimento, soggetto a incertezze interpretative

[4] *ISO 59020:2024 https://www.iso.org/standard/80650.html*

che rendono altrettanto incerta l'applicazione della SI, ha indotto il Ministero prima (DM 264/2016 e circolari applicative) e alcune regioni poi a dotarsi di sistemi dedicati al riconoscimento dei sottoprodotti, affinché la loro condivisione tramite meccanismi di SI possa essere certa e non suscettibile di contestazioni. L'applicazione di tali discipline non è né uniforme né presente su tutto il territorio nazionale, per cui si ravvisa ancora la necessità di garantire una uniforme e certa applicazione delle norme sui sottoprodotti a livello nazionale.

Stato dell'arte

In Italia, secondo una recente indagine condotta dall'ISTAT[5] nel 2022, nel settore manifatturiero il 5,5% delle imprese impegnate in azioni di sostenibilità adotta la SI, con una prevalenza nelle grandi imprese (12,8%) rispetto alle piccole (3,4%) e alle medie (6,9%). Questa percentuale cresce nel settore dei servizi di mercato, dove l'8,2% delle imprese svolge azioni di SI, con una maggiore presenza delle grandi imprese (20,7%) rispetto alle piccole e medie (7,1%).

A livello internazionale emergono due modalità principali di attività per implementare la SI:

1 **Attività auto-organizzate:** queste esperienze nascono dall'interazione diretta tra attori industriali senza alcun coordinamento gerarchico. Il caso più noto è Kalundborg in Danimarca, seguito da esperienze simili nella penisola scandinava, come Harjavalta (Finlandia), Landskrona (Svezia), Kemi-Tornio (Finlandia) e Handelo (Svezia), oltre che in altri paesi come Austria, Germania e Spagna.

2 **Reti gestite:** in quest'esperienza un intermediario terzo coordina le attività. Queste reti si suddividono ulteriormente in:

- **Reti agevolate:** collaborano con aziende esistenti per ridurre asimmetrie informative, aumentare la consapevolezza sulla SI e promuovere attività sinergiche. Queste reti sono prevalenti nei paesi dell'Europa orientale (Polonia, Ungheria, Romania, Slovacchia, Slovenia), nell'Europa settentrionale e centrale (Belgio, Francia, Danimarca,

[4] *ISTAT. Pratiche sostenibili nelle imprese nel 2022 e nel 2023-2025. 27 Aprile 2023.*

Finlandia) e nell'Europa meridionale (Italia, Spagna).

Dal 2010, l'ENEA ha sviluppato un ecosistema di strumenti integrati per supportare le aziende nella facilitazione della creazione di reti attraverso la SI e la DR. Questi strumenti includono metodologie, la piattaforma digitale "Symbiosis®", l'implementazione di vari progetti a livello regionale (Sicilia, Emilia-Romagna, Lazio, Umbria, Lombardia, Marche, Campania e Puglia) e la nascita della rete italiana di SI denominata Symbiosis Users Network - SUN, volta a condividere e promuovere conoscenze ed esperienze tra diversi stakeholder (imprese, pubblica amministrazione, enti di ricerca, ecc.).

- **Reti pianificate:** seguono un piano o una visione centrale mirati ad attrarre nuove imprese in insediamenti appositamente progettati, fornendo infrastrutture e servizi condivisi. Queste iniziative si concentrano sulla massimizzazione delle opportunità di SI in specifiche aree geografiche o zone industriali, comunemente note come Parchi Eco-industriali. Esempi di reti pianificate si riscontrano nel Regno Unito, negli Stati Uniti, in Portogallo, in Corea del Sud e in Cina.

L'esperienza italiana delle aree industriali ecologicamente attrezzate (APEA), introdotte nell'ordinamento nazionale dalla legge Bassanini (D.Lgs. 112/1998), costituisce un modello che si avvicina molto all'esperienza dei Parchi Eco-industriali.

Le politiche europee promuovono la SI come parte integrante della politica industriale e ambientale del Vecchio Continente. Già nel piano d'azione dell'Unione Europea del 2015, la Commissione riconobbe l'importanza di promuovere processi industriali innovativi, tra cui la SI. Al fine di perseguire questo obiettivo, la Commissione si impegnò a rivedere la legislazione sui rifiuti, in particolare a

chiarire le norme relative ai sottoprodotti e a creare condizioni di concorrenza paritarie nell'Unione. Questa direzione è stata ribadita a marzo 2020 nel nuovo piano d'azione: nel documento si afferma l'intenzione di favorire l'incremento della circolarità dei processi produttivi agevolando la SI attraverso un sistema di comunicazione, reporting aziendale e certificazione.

Nel 2021, il "Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza" (PNRR) italiano riforma l'attuale strategia EC del 2017, comprendendo anche misure concrete per sostenere i progetti di SI attraverso specifici strumenti normativi, finanziari e progetti pilota. In tale direzione, nel 2022, la nuova "Strategia Nazionale per l'Economia Circolare" (SNEC), inclusa tra le 63 riforme fondamentali per l'attuazione del PNRR, riconosce la SI come una politica chiave per facilitare la transizione dell'Italia verso un'EC. Con questo obiettivo, è stato successivamente pubblicato il cronoprogramma di attuazione del SNEC, che incorpora tre misure nel Tema 8 "Sostegno a progetti di simbiosi industriale attraverso strumenti normativi e finanziari" da realizzare entro il 2024:

- Approvazione dei "Progetti Faro di Economia Circolare" (Inv. 1.2 del M2C1), collegati al PNRR;
- Sviluppo di sistemi di incentivi per promuovere reti di imprese con finalità circolari e la rigenerazione delle aree marroni in distretti circolari nell'ottica della SI, in collaborazione con diversi stakeholder;
- Implementazione di una metapiattaforma nazionale per facilitare l'incontro tra domanda e offerta di materie prime seconde nel contesto della SI.

Al riguardo, secondo le tempistiche delineate nelle Accordi Operative tra la Commissione Europea e l'Italia relative al PNRR, e dettagliate nel Tema 8 all'interno del cronoprogramma della SNEC, il Ministero dell'Ambiente ed ENEA hanno stretto un accordo di collaborazione triennale. Tale accordo si propone di implementare, a partire dal 2023, le attività previste nel medesimo cronoprogramma nel

Tema 8. Successivamente, prevede una serie di iniziative orientate allo sviluppo di un sistema integrato di strumenti e funzionalità per implementare la SI a livello nazionale, finalizzato alla definizione di un programma nazionale di SI.

Indicatori di impatto

Lo sviluppo e l'implementazione di metodologie e tecnologie per la SI e la DR generano impatti positivi a tutti i livelli. Gli indicatori possono essere utilizzati per il monitoraggio, la valutazione e per supportare la definizione di strategie per l'implementazione della SI e/o la DR, sia da parte dei decisori politici delle autorità governative regionali o nazionali sia dai manager aziendali. A livello aziendale, gli indicatori possono supportare i manager ad affrontare questioni operative, come individuare le opportunità per la SI attualmente non (pienamente) sfruttate e aumentare l'efficienza della gestione di tutte le risorse di un'organizzazione (DR), attraverso un efficientamento esterno e interno.

In particolare, occorre considerare appositi indicatori per quantificare i benefici derivanti dall'impatto economico, ambientale e sociale legato all'uso efficiente delle risorse (SI e DR) in termini di:

- Vantaggi economici;
- Ottimizzazione e minore consumo di risorse;
- Minore pressione sull'ambiente e minore rilascio di emissioni;
- Mancato smaltimento e gestione dei rifiuti (attività di prevenzione);
- Minore consumo di risorse primarie;
- Cambiamento culturale per l'approccio collaborativo e cooperativo;
- Creazione di nuove attività professionali e di servizio.

Risorse economiche necessarie

Le risorse economiche necessarie per lo sviluppo e l'implementazione delle piattaforme, metodologie, protocolli e reti per SI e la DR variano in modo significativo in base a diversi fattori. In alcuni casi, gli interventi possono comportare

costi praticamente nulli o molto contenuti, soprattutto quando si sfruttano tecnologie già esistenti o quando le amministrazioni pubbliche offrono incentivi, finanziamenti o supporto per la sperimentazione. Ad esempio, iniziative pilota o progetti di piccola scala, realizzati con tecnologie open-source o utilizzando reti e risorse già esistenti, potrebbero richiedere solo risorse per la formazione o l'adattamento delle strutture aziendali, riducendo drasticamente i costi diretti. Inoltre, in contesti territoriali con politiche di incentivo all'innovazione o in aziende con risorse interne elevate, l'implementazione di queste metodologie può avvenire a costi minimi. D'altra parte, in situazioni più complesse, dove sono necessarie soluzioni altamente personalizzate, tecnologie avanzate, o il coinvolgimento di più attori (aziende, università, pubbliche amministrazioni), i costi possono aumentare considerevolmente. In questi casi, è necessario affrontare investimenti in ricerca e sviluppo, in infrastrutture tecnologiche, in consulenze specializzate, oltre a spese per la gestione delle reti e delle piattaforme. Le aziende più grandi o quelle che operano in settori altamente regolamentati potrebbero necessitare di una progettazione dettagliata, adattamenti a specifici processi produttivi, e la creazione di sistemi complessi, il che può comportare un impegno economico di centinaia di migliaia di euro all'anno. La disparità economica tra questi due scenari dipende principalmente dalla scala del progetto, dalla complessità tecnologica e dalle risorse già disponibili sul territorio e nelle aziende.

PROCESSO DI PIROLISI CATALITICA, CON CATALIZZATORI A BASSO COSTO, PER IL RICICLO CHIMICO DELLE PLASTICHE MISTE

I rifiuti in plastica si presentano spesso come un miscuglio di plastiche eterogenee, che devono essere sottoposte a un fondamentale step preventivo di selezione, separazione e lavaggio prima di essere inviate a riciclo meccanico. Negli impianti di selezione si generano però quantitativi significativi di plastiche non riciclabili meccanicamente, che sono smaltite in discarica o, nella migliore delle ipotesi, inviate a recupero energetico.

Le tecnologie di riciclo chimico sono potenzialmente idonee al trattamento di rifiuti complessi in plastica.

Tra le varie tecnologie di riciclo chimico esistenti, la pirolisi consiste nella degradazione termica in atmosfera inerte di molecole organiche (ad esempio, i polimeri che costituiscono le materie plastiche) e mira a ottenere una miscela di composti liquidi e gassosi, simili a quelli derivati dal petrolio che sono alla base della chimica organica industriale.

La pirolisi ha le caratteristiche per essere considerata una tecnologia complementare al riciclo meccanico, in quanto è in grado di colmare il vuoto lasciato da quest'ultimo sul trattamento di rifiuti in plastica complessi, quali miscugli di plastiche eterogenee derivati dalle diverse categorie merceologiche di plastiche presenti sul mercato: laminate e composite, di bassa qualità, le cui proprietà fisiche sono state compromesse dall'esposizione ad agenti chimici o atmosferici, contaminate da materiali estranei, termoindurenti. Ovviamente, anche per la pirolisi, più i flussi in ingresso all'impianto saranno puliti, maggiore sarà la qualità dei prodotti finali.
La pirolisi condotta mediante l'utilizzo di opportuni catalizzatori è in grado di migliorare sia le condizioni di processo sia la qualità dei prodotti in uscita. Riguardo alle varie tipologie di catalizzatori utilizzati nella pirolisi, molti studi si sono concentrati sull'uso di materiali alluminosilicati come gli amorfi SiO_2–Al_2O_3, i mesoporosi SiO_2–Al_2O_3 e le zeoliti. In particolare, le zeoliti sono in grado di rendere più

performante il cracking delle catene polimeriche delle plastiche. Sostituire questi catalizzatori con materiali di scarto o, meglio ancora, produrre zeoliti da scarti industriali ad alto contenuto di alluminosilicati permette di rendere il processo più sostenibile economicamente e di recuperare un ulteriore rifiuto mediante la sintesi di un prodotto a elevato valore aggiunto.

Motivazione per lo sviluppo

Negli ultimi decenni, il consumo di materie plastiche ha registrato una crescita esponenziale, guidata dalle loro proprietà uniche e dalla loro versatilità. Le materie plastiche offrono vantaggi come la leggerezza, la resistenza alla corrosione, la flessibilità e i bassi costi di produzione, rendendole una scelta attraente per una vasta gamma di applicazioni provenienti ad esempio dall'industria del packaging, dal settore edile a quello automobilistico, da quello sanitario a quello dei dispositivi elettrici ed elettronici[6].

Secondo l'Organizzazione per la Cooperazione e lo Sviluppo Economico (OCSE), la produzione globale di materie plastiche è raddoppiata dal 2000 al 2019, raggiungendo 460Mt (milioni di tonnellate)[7]. Parallelamente, è aumentata la produzione di rifiuti in plastica, soprattutto quelli derivati dal settore del packaging che hanno un tempo di vita molto breve. In Italia, nel 2020 si sono prodotte 3545kt (migliaia di tonnellate) di rifiuti in plastica, di cui solo il 34% è stato avviato a riciclo[8]. A questi flussi vanno aggiunti quelli dispersi nell'ambiente in modo improprio, che soprattutto nei paesi in via di sviluppo raggiungono volumi estremamente elevati. Si stima che circa 8-10Mt di plastica affluiscano ogni anno negli oceani, rappresentando una minaccia significativa per la vita marina e gli ecosistemi[9].

Le materie plastiche comunemente usate, derivate principalmente dagli idrocarburi del petrolio, non sono biodegradabili e possono rimanere nell'ambiente per secoli. L'accumulo continuo nelle discariche e nell'ambiente naturale è una

[6] *Parker L., The world's plastic pollution crisis explained, National Geographic Society (2019).*

[7] *OECD, Global Plastics Outlook: Economic Drivers, Environmental Impacts and Policy Options, OECD Publishing, Paris (2022). https://doi.org/10.1787/de747aef-en.*

[8] *Association of Plastics Manufacturers, Plastics - the facts 2022, Plastic Europe (2022).*

[9] *Tiseo I., Plastic Waste Worldwide - Statistics & Facts, Energy & Environment (2020).*

preoccupazione crescente a livello globale e rappresenta un grave problema per le generazioni future, se non affrontato in modo efficace.

Oggi, il 94% della plastica "circolare" utilizzata per realizzare nuovi prodotti è stata riciclata meccanicamente[10]. Il riciclo meccanico richiede però un elevato grado di efficienza delle tecnologie di separazione dei rifiuti in plastica per poter generare dei flussi di materie plastiche omogenei, ognuno dei quali costituito da un unico polimero. Sfortunatamente, questo non sempre corrisponde alla situazione reale, sia a causa della natura stessa dei rifiuti e delle tecnologie di separazione attualmente disponibili, sia a causa di considerazioni sull'opportunità economica di una separazione così spinta.

L'esempio più rappresentativo riguarda la plastica da imballaggio: negli impianti di selezione, oltre ai flussi di plastica omogenea inviati a riciclo meccanico, si genera un residuo (denominato plasmix) del 40-50%, costituito da una miscela di plastiche diverse che oggi è principalmente inviato in discarica o a recupero energetico. Per raggiungere i tassi di riciclo degli imballaggi di altri materiali, quali vetro, carta, acciaio e alluminio, che si attestano tra il 70-80% in peso dell'immesso al consumo, per la plastica risulta necessaria una combinazione di opzioni complementari per garantire così il pieno sviluppo di un'economia circolare.

Presso il mondo dell'industria e della ricerca, quindi, ma anche presso tutti i portatori di interesse, comincia ad affermarsi l'idea che il riciclo chimico possa colmare un vuoto nella gestione del fine vita della plastica, integrando le altre opzioni esistenti al fine di preservare risorse preziose e contribuire alla creazione di un'economia circolare a basse emissioni di carbonio. Recentemente, il riciclo chimico è stato riconosciuto come tecnologia complementare al riciclo meccanico, in grado di supportare la sfida per il raggiungimento degli ambiziosi target europei di riciclo della plastica e, per la prima volta nel 2022, è stata conteggiata come

[10] *Association of Plastics Manufacturers, Plastics - the fast facts 2023, Plastic Europe (2023).*

plastica circolare anche quella ottenuta da riciclo chimico, corrispondente all'1% di tutta la plastica circolare prodotta in Europa.

La tecnologia di riciclo chimico della pirolisi non mira alla produzione di un monomero (o almeno non esclusivamente), ma a un'ampia gamma di intermedi chimici da utilizzare in sintesi successive; proprio il destino finale dei prodotti ottenuti è una delle maggiori sfide da affrontare. Infatti, possono essere necessari ulteriori trattamenti: ad esempio, l'olio di pirolisi raramente può essere usato così come ottenuto, ma spesso è necessario prevedere processi di upgrading (come la pirolisi catalitica o successivi trattamenti come alchilazione, idrogenazione, isomerizzazione) o di separazione dei composti di interesse (ad esempio tramite distillazione), che ne permettano l'effettiva valorizzazione.

La pirolisi catalitica facilita il cracking delle catene polimeriche, aumentando le rese dei prodotti leggeri di maggior valore e di più facile successivo re-impiego rispetto alle molecole più pesanti. Restringe, inoltre, lo spettro dei prodotti ottenuti e abbassa le temperature di processo, con significativi risparmi energetici. Tuttavia, nel processo i catalizzatori commerciali, che sono soggetti a sporcamento o de-attivazione durante la reazione di pirolisi, rappresentano un fattore economico importante.

Risulta pertanto di grande interesse un processo di sviluppo e sintesi di catalizzatori prodotti da materiali di scarto e la loro successiva applicazione su reattori a scala pilota per la pirolisi di rifiuti in plastica provenienti da diversi settori merceologici, sebbene il time to market di tale processo sia stimato lungo (superiore a tre anni). L'utilizzo di catalizzatori a basso costo ottenuti da materiali di scarto nel processo di pirolisi comporta un duplice vantaggio: da una parte, il recupero di materia da un altro prodotto di scarto, ottenendo un prodotto ad elevato valore tecnologico, e dall'altra la sostituzione dei catalizzatori commerciali che costituiscono uno dei costi maggiori in un impianto di pirolisi.

Rilevanza

La rilevanza della tecnologia proposta è da considerarsi notevole nel raggiungimento degli obiettivi comuni, se si considera che le tecnologie di riciclo chimico sono recentemente entrate tra il novero delle misure da intraprendere per la gestione dei rifiuti in plastica. Il position paper dell'*European Chemical Industry Council*[11] descrive le potenzialità del riciclo chimico e suggerisce una serie di azioni per favorire lo sviluppo e la diffusione di queste tecnologie. Il Programma Nazionale per la Gestione dei Rifiuti (2022) dell'allora Ministero della Transizione Ecologica[12] indica la possibilità di utilizzare le tecnologie di riciclo chimico per il trattamento e la trasformazione del plasmix in nuovi materiali, utilizzabili come base per la sintesi di numerosi composti oppure come vettori ad alto contenuto energetico.

Il PNRR, nel bando relativo ai progetti faro di economia circolare, prevede per la linea dei rifiuti in plastica finanziamenti specifici (265 milioni di euro) dedicati anche alla realizzazione di impianti per il riciclo chimico come tecnologia abilitante, per rendere più efficiente la filiera del riciclo, con misure volte a potenziare il recupero dei rifiuti in plastica. Se applicato ai rifiuti plastici non riciclabili meccanicamente, attualmente smaltiti in discarica o termovalorizzati, il riciclo chimico, e dunque anche la pirolisi, contribuiscono a migliorare gli impatti ambientali rispetto agli approcci più tradizionali di gestione dei rifiuti non riciclabili, riducendo il consumo di energia e le emissioni di gas serra.

Inoltre, il recupero di materie prime seconde e di prodotti a bassa impronta carbonica, attraverso l'upcycling dei materiali plastici post-consumo, consente di contribuire in misura sostanziale alla circolarità del settore della plastica, con conseguenze positive sulla crisi globale legata al cambiamento climatico.

Stato dell'arte

Negli ultimi anni, di fronte alla sempre più pressante necessità di attingere a nuove tecnologie di riciclo per la gestione dei rifiuti in plastica, si cominciano a

[11] *Cefic (European Chemical Industry Council), Chemical recycling: Enabling plastic waste to become a valuable resource (2022).*

[12] *https://www.mase.gov.it/sites/default/files/archivio/allegati/PNRR/PNGR_Finale.pdf*

realizzare in Europa i primi impianti pilota/industriali basati su tecnologie di riciclo chimico, finalizzate al *plastic-to-plastic* e al *plastic-to-chemicals*.

I processi sono molto diversi tra loro, passando dalla dissoluzione/purificazione (non un vero e proprio riciclo chimico, in quanto la plastica viene purificata dalle altre componenti ma non modificata chimicamente), alla de-polimerizzazione, possibile per flussi monomateriali di polimeri come il polietilene tereftalato (PET) e il polistirene (PS), fino ai processi di pirolisi e gassificazione per i miscugli eterogenei. I produttori europei di materie plastiche prevedono di investire 2,6 miliardi di euro entro il 2025 e 7,2 miliardi di euro entro il 2030 nello sviluppo di processi e nella realizzazione di impianti dedicati al riciclo chimico[13].

Ad oggi la maggior parte degli impianti in esercizio sono indirizzati al trattamento di flussi plastici monomateriali o di plastiche miste da imballaggi. La pirolisi, in particolare, viene applicata alle plastiche miste da imballaggi e si tratta di processi termici o catalitici che utilizzano catalizzatori commerciali. Sono molte le compagnie che, di recente, hanno annunciato di voler costruire impianti di pirolisi per le plastiche, con l'obiettivo di convertire gli olii pirolitici in monomeri e nuovi prodotti chimici, come olefine e prodotti aromatici.

Quantafuel, per esempio, possiede già un impianto in Danimarca, dalla capacità di 20 kt/anno, il cui olio di pirolisi viene usato da BASF per produrre plastiche vergini e altri feedstock, e sta costruendo un nuovo impianto in Sunderland (Regno Unito) per processare più di 100 kt/anno. Anche Plastic Energy, al momento, possiede due piccoli impianti in Spagna e ha annunciato una joint venture con Sabic e Total Energies per costruire impianti di riciclo, rispettivamente in Francia (15 kt/anno) e nei Paesi Bassi (20 kt/anno). In Francia è prevista anche la costruzione di un altro impianto dalla capacità di 25 kt/anno, il cui prodotto principale (olio di sintesi) sarà utilizzato dal vicino complesso petrolchimico di ExxonMobil per produrre polimeri circolari di qualità vergine certificata e altri prodotti di alto valore.

[13] *Fondazione per lo sviluppo sostenibile, Il Riciclo in Italia (2023).*

In Italia, Versalis sta costruendo un impianto dimostrativo basato su una tecnologia brevettata per la pirolisi di rifiuti in plastiche miste, non riciclabili meccanicamente. L'impianto avrà una capacità di 6 kt/anno e si attende la sua inaugurazione entro l'estate 2025[14]. L'olio di pirolisi sarà purificato ed utilizzato nell'industria petrolchimica tradizionale per la produzione di intermedi e polimeri vergini. Un altro progetto, a capo della società italiana Recupero Etico Sostenibile (RES), in accordo con il provider olandese BlueAlp, prevede la realizzazione di un innovativo impianto industriale per la pirolisi di rifiuti plastici misti. Il nuovo impianto sarà in grado di gestire fino a 20 mila tonnellate all'anno di materiale in ingresso, con una capacità produttiva prevista di 15 mila tonnellate all'anno di materiale in uscita. L'impianto sarà operativo entro il primo semestre 2026, in linea con gli obiettivi del Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR), e si prevede un investimento complessivo di circa 35 milioni di euro, di cui 9,6 milioni finanziati dal PNRR.

Indicatori di impatto

Le tecnologie di riciclo chimico sono, al momento, presenti sul mercato in una fase pilota e se ne prevede uno sviluppo su scala industriale nel quinquennio 2025-2030. È pertanto ancora prematuro valutare indicatori di impatto di una filiera così giovane, per la quale le informazioni disponibili sono ancora poche. È pur vero che, secondo uno studio basato sulle stime di ISPRA sulle quantità di rifiuti plastici al 2030[15], l'innovazione tecnologica può incrementare la circolarità della plastica non solo riducendo i rifiuti plastici (fino al 22,7% in meno al 2030), ma anche facendo crescere il recupero di materia plastica. In particolare, è stato stimato che abbinando il riciclo chimico a quello meccanico in Italia si può arrivare a riciclare il 61,6% dei rifiuti plastici entro il 2030, contro l'attuale 40%, abbassando così lo smaltimento in discarica sotto il 10% con 5 anni di anticipo rispetto agli obiettivi europei.

Gli investimenti necessari per gli impianti di trattamento sono stimati essere compresi tra i 477 e i 794 milioni di euro, a seconda della maggiore o minore

[14] *Riciclo chimico delle plastiche: lo stato dell'arte in Italia, "Il Sole 24 ORE", "24+", 01-03-2025*

[15] *The European House Ambrosetti, Rapporto Strategico – La circolarità della plastica: opportunità industriali, innovazione e ricadute economico-occupazionali per l'Italia (2022).*

diffusione del riciclo chimico, generando benefici economici stimabili tra 1,5 e 2,5 miliardi di euro. Oltre alle ricadute economiche, sono stati stimati anche benefici occupazionali con la potenziale creazione di un numero di nuovi posti di lavoro compreso tra 1000 e 1400. Inoltre, va considerata la forte interconnessione tra la filiera della plastica e altre filiere strategiche per il tessuto economico del Paese; si stima che per ogni 100 unità di lavoro attivate nella filiera della plastica se ne creino ulteriori 177 in filiere collegate e che, a ogni 100 euro investiti, corrispondano 218 euro nelle filiere collegate, con un moltiplicatore economico pari a 3,18, in aumento del 33% rispetto a un decennio fa.

Risorse economiche necessarie

Si stima che siano necessari 3-5 milioni di euro per la realizzazione di un sistema integrato sperimentale, costituito da un impianto pilota per la produzione dei catalizzatori da materiali di scarto e da un impianto pilota di pirolisi catalitica.

SVILUPPO DI UN PROCESSO DI RICICLO MECCANICO INNOVATIVO PER SCHIUME POLIURETANICHE FLESSIBILI POST-INDUSTRIALI E POST-CONSUMO

I poliuretani flessibili, principalmente impiegati nelle imbottiture di mobili e del bedding, sono quasi totalmente inviati alla termovalorizzazione o in discarica, previa riduzione dimensionale, con conseguenze negative per l'ambiente dovute a emissioni di tossine, GHG e consumo di risorse di suolo. La tecnologia proposta riguarda lo sviluppo su scala industriale di un processo di up-cycling di schiume flessibili poliuretaniche per produrre pannelli fonoassorbenti e termoisolanti per il settore civile e dell'arredo (Figura 4).



Figura 4: Prototipo di pannello realizzato con la tecnologia proposta (cortesia Cormatex srl)

Tale processo potrà fornire un esempio significativo di processi di riciclo ed economia circolare per prodotti di largo consumo contenenti schiume poliuretaniche, con ricadute in molteplici settori applicativi, dalle costruzioni a quello del mobile imbottito e del bedding.

I materassi post-consumo, identificati con codice CER 200037, sono considerati rifiuti ingombranti al pari di sedie, divani, ecc. e vanno conferiti nell'indifferenziato delle raccolte comunali non esistendo, di fatto, una filiera per il loro recupero. Inoltre, il d.lgs. n. 116 del 2020, dal titolo "Attuazione della direttiva (UE) 2018/851 che modifica la direttiva 2008/98/CE relativa ai rifiuti e attuazione della direttiva

(UE) 2018/852 che modifica la direttiva 1994/62/CE sugli imballaggi e i rifiuti di imballaggio", ha introdotto le modifiche richieste dalle direttive "economia circolare" europee approvate due anni fa[16].

Il decreto dispone numerose modifiche alla disciplina dei rifiuti e di quelli di imballaggio: per quanto riguarda gli obiettivi di riciclo, la preparazione per il riutilizzo, e i criteri per i sistemi di responsabilità estesa (cioè quelle regolamentazioni per cui sul prodotto immesso al consumo grava un contributo ambientale che serve a finanziarne i costi di raccolta e recupero).

Per quest'ultimo caso, che potrebbe in futuro essere applicato anche ai materassi, la nuova formulazione degli articoli 178-bis e 178-ter del d.lgs. 152/06 (testo unico ambientale) disegna il quadro di responsabilità e i requisiti che i nuovi schemi di responsabilità estesa dovranno rispettare. Dentro questo quadro sarà possibile per il Ministero dell'Ambiente redigere decreti che comporteranno l'assunzione di responsabilità organizzativa e finanziaria da parte dei produttori di determinate categorie di prodotti rispetto ai costi di raccolta e trattamenti dei prodotti a fine vita, come già avviene per gli imballaggi, gli elettrodomestici e altre categorie di prodotto.

Per questi motivi sia i produttori sia i gestori delle raccolte municipali dei rifiuti sono alla ricerca di soluzioni tecnologiche che possano consentire il recupero dei materassi a fine vita.

D'altro canto, i numeri in gioco sono enormi: secondo l'European Bedding Industry Association, solo nell'Unione Europea, ogni anno quasi 30 milioni di materassi raggiungono la fine della loro vita utile e si stima che il 60% finisca in discarica e il 40% venga incenerito. Inoltre, è ancora molto diffuso il fenomeno dello smaltimento non controllato che rappresenta anche un problema di ordine sanitario, in quanto il materasso abbandonato, accumulando la polvere e l'umidità, può

[16] *Si vedano le azioni seguite alla pubblicazione del Circular Economy Action Plan della Commissione Europea nel marzo 2020.*

diventare un centro di proliferazione di vari infestanti, come, ad esempio, gli acari e la cosiddetta cimice del letto.

In ogni caso si tratta di un grave spreco di risorse, visto che la maggior parte dei materiali di cui sono fatti i materassi potrebbero essere riciclati e utilizzati nella fabbricazione di altri nuovi prodotti utili. In particolare, il 90% dei materassi moderni contengono da 2 a 15 kg di schiuma poliuretanica, potenzialmente riciclabile.

La tecnologia proposta ha come obiettivo lo sviluppo di un processo di riciclo meccanico innovativo per schiume poliuretaniche flessibili post-industriale e post-consumo per il settore dell'arredo e delle costruzioni, con target finale di densità variabile tra 25 e 60 Kg/m3. In particolare, gli scarti di schiuma flessibile potranno essere impiegati per la produzione di imbottiture di arredi, quali divani e sedie. Le tematiche di ricerca e sviluppo riguardano due macro-temi:

1. Material design: sviluppo di una formulazione a base di scarti poliuretanici;
2. Process design: sviluppo di un processo meccanico per la trasformazione degli scarti.

Entrambi i macro-temi hanno come denominatore comune lo sviluppo di un prodotto con caratteristiche prestazionali idonee all'applicazione selezionata, e costi concorrenziali rispetto all'attuale alternativa vergine. Inoltre, sia il material che il process design devono considerare l'ottimizzazione dell'impatto ambientale associato all'uso di ulteriori materiali presenti nella formulazione, quali poliuretani da risorse fossili e additivi, attraverso la massimizzazione della quantità di materiale da riciclo nel prodotto finale e il riuso/riciclo del prodotto a fine vita. La tecnologia è attualmente a Technology Readiness Level 5, e si stima uno tempo di due anni per raggiungere TRL 7 e di ulteriori due anni per la immissione sul mercato.

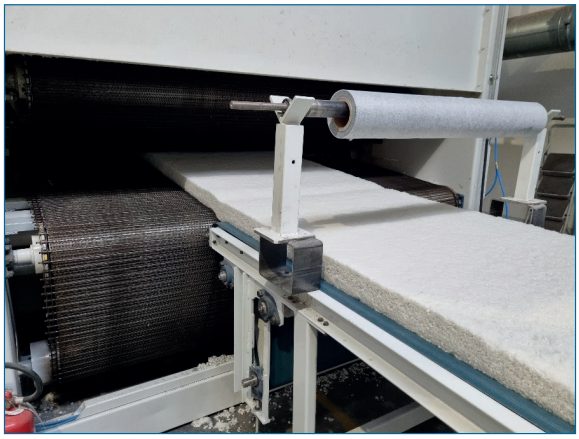


Figura 5: Trial di processo in ambiente industrialmente rilevante (cortesia Cormatex srl)

La tecnologia proposta fornisce un sostanziale contributo verso un'economia circolare attraverso:

- Uso di materiali da riciclo in sostituzione di quelli vergini; L'impiego di materiali da risorse rinnovabili;
- Riciclabilità del prodotto proposto;
- Riduzione dell'impiego di sostanze pericolose per la salute dell'uomo (isocianati del tipo MDI e TDI impiegati durante la produzione del poliuretano vergine), poiché parte del formulato sarà rappresentato da PU da riciclo, in quanto tale già polimerizzato;
- Riduzione della quantità di rifiuti (schiume poliuretaniche post-produzione e post-consumo) inviate in discarica o incenerite.

Inoltre, tale tecnologia contribuisce alla prevenzione e alla riduzione dell'inquinamento, promuovendo la riduzione delle emissioni inquinanti nell'aria, nell'acqua o nel suolo (diverse dai gas a effetto serra).

Infatti, gli scarti di schiume poliuretaniche flessibili post-consumo e post-produzione saranno impiegati come materia prima e seconda per lo sviluppo di nuovi prodotti. Gli scarti non saranno smaltiti in inceneritori o discariche, evitando con-

seguenze indesiderate per l'ambiente, a cause delle emissioni di tossine e GHG sprigionate.

Stato dell'arte

Lo stato dell'arte relativo al riciclo termo-meccanico delle schiume poliuretaniche flessibili si basa sul processo di rebonding. Si tratta di un processo, che può essere di tipo continuo oppure in batch, per il quale la schiuma post-consumo è preliminarmente macinata e rivestita con un binder adesivo e successivamente compressa, per generare continuità fisica tra i flakes di PU e consentire in tal modo l'azione dell'adesivo. È inoltre necessario introdurre del vapore per favorire la polimerizzazione e quindi l'azione adesiva del binder.

I binder tipicamente impiegati sono degli isocianati del tipo pre-polimero e le proprietà della schiuma rebonded possono essere opportunamente modulate attraverso un'attenta selezione e quantità del binder, dimensione dei flakes e rapporto di compressione. Il materiale così ottenuto ha una densità superiore a quello di partenza e può essere realizzato con la geometria desiderata. Tale processo di riciclo è attualmente impiegato per la produzione di elementi fonoassorbenti o smorzanti.

I limiti del processo di rebonding, considerati i materiali e l'applicazione proposta, riguardano le densità finali raggiungibili (variabili tra 200 e 300 Kg/m3), superiori di un ordine di grandezza ai target di densità previsti per i core di materassi. Inoltre, la maggior parte degli isocianati impiegati, seppur nella forma di pre-polimeri, sono elementi cancerogeni e la loro gestione richiede particolari attenzioni in relazione a tematiche di sicurezza.

L'innovazione proposta, oltre che nel processo sopra descritto, risiede anche nel binder proposto: una schiuma poliuretanica flessibile, che rispetto a quanto disponibile commercialmente dovrà avere le seguenti caratteristiche:

- Compatibilità e affinità chimica con i flakes di PU da riciclo massima possibile, per consentire continuità fisica e prestazionale ottimale all'interfaccia binder/PU flakes e quindi nel materiale.
- Prestazioni paragonabili o superiori a quelle dei PU flakes, in grado di soddisfare tutti i requisiti prestazionali richiesti all'elemento core del materasso.
- La scelta di materiale espandente consentirà di solidarizzare i flakes di PU mantenendo al contempo il target di densità previsto senza necessità di comprimere i flakes di PU come nel tradizionale processo di rebonding.

Si stima che quanto sopra riportato possa ridurre la quantità di binder a valori prossimi o inferiori al 10%w, contro l'attuale 30%w /40%w.

Indicatori di impatto

Il primo settore di destinazione della tecnologia sarà quello dell'arredo e delle costruzioni, ma altri possibili settori applicativi vanno dall'imballaggio all'automotive fino al wellness.

Nel 2021, il mercato globale delle schiume flessibili ha raggiunto un valore di circa 42 miliardi di dollari; si prevede che il mercato crescerà ulteriormente nel periodo 2024-2028 a un CAGR (Compounded Average Growth Rate) del 5,6%, per raggiungere quasi 58,2 miliardi di dollari entro il 2026. I numeri riportati ricomprendono schiume a base di Poliuretano (PU), polietilene (PE), polipropilene (PP) ed etilenvinilacetato. Il materiale maggiormente impiegato sono le schiume poliuretaniche che coprono circa il 50% del mercato globale delle schiume flessibili. Con riferimento ai principali vincoli del mercato, è necessario considerare che la produzione di schiume flessibili genera emissioni pericolose in termini di danno all'ambiente. Regolamenti governativi sempre più stringenti regolano l'uso di CFCs e HCFCs come agenti espandenti e l'uso di materiali come MDI (difenilme-

tano isocianato) e TDI (disocianato di toluene). A ciò si aggiunge la fluttuazione dei prezzi delle materie prime impiegate per la loro produzione.

Inoltre, la tecnologia si propone di sviluppare e immettere sul mercato, per la prima volta, una schiuma flessibile da riciclo, con caratteristiche prestazionali e di lavorabilità simili a quella vergine, rispondendo al crescente orientamento del settore verso una transizione green attraverso una riduzione dei materiali conferiti in discarica e utilizzo di materie prime di riciclo/da risorse rinnovabili all'interno dei processi produttivi.

Risorse economiche necessarie

Per la realizzazione e validazione di un prototipo di processo, con realizzazione di un impianto, si stima un investimento pilota di circa 3 milioni di euro.

TECNOLOGIE PER LA VALORIZZAZIONE DELLE BATTERIE AL LITIO A FINE VITA

Negli anni Novanta del secolo scorso, per rispondere alla crescente domanda di sistemi di accumulo e di 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 dall'Asahi Kasei Co.
Il litio, grazie al suo basso numero atomico e all'alto potenziale elettrodico, origina una capacità energetica significativamente superiore rispetto ai materiali utilizzati nelle batterie tradizionali, come quelle al 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.

Le LIBs[17] sono generalmente composte dai seguenti componenti principali: un elettrodo positivo (catodo) e un elettrodo negativo (anodo) mantenuti separati da una membrana polimerica, e un elettrolita (generalmente un sale di litio quale ad esempio $LiPF_6$ disciolto in un solvente organico come il dimetilcarbonato) che permette il movimento degli ioni di litio tra i due elettrodi; durante la fase di carica, gli ioni di litio si spostano dal catodo all'anodo attraverso l'elettrolita. Questo processo immagazzina energia nella batteria. Quando la batteria viene utilizzata, gli ioni di litio si muovono dall'anodo al catodo, generando una corrente elettrica che alimenta il dispositivo collegato (Figura 6).

Nei prodotti commerciali, l'anodo è generalmente composto da un sottile strato di grafite depositata su un foglio di rame, mentre formano il catodo i composti di litio eventualmente in miscela con altri ossidi depositati su un foglio di alluminio.

[17] *Mancini, M., Improved anodic materials for lithium-ion batteries: Surface modification by metal deposition and electrochemical characterization of oxidized graphite and titanium dioxide electrodes [Doctoral dissertation], Camerino University, 2008.*

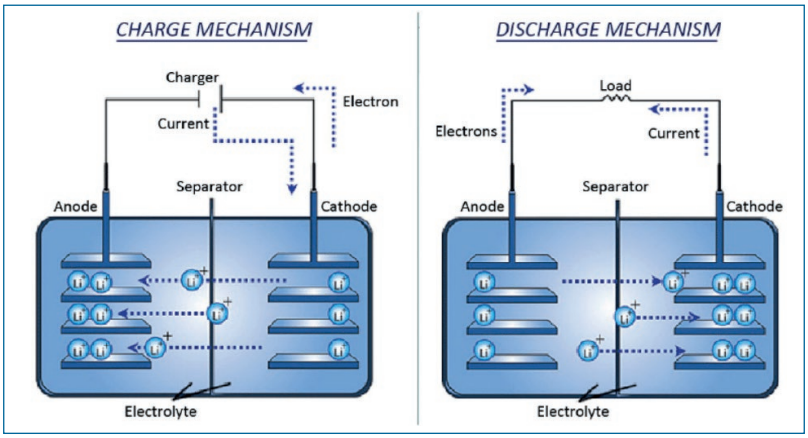


Figura 6: Meccanismo di carica e scarica di una LIB[18]

Le più diffuse tipologie di batterie agli ioni litio prendono il nome dai corrispondenti metalli presenti (LiCoO2 = LCO; Litio-Ferro-Fosfato = LFP; LiMn2O4 = LMO; ossidi di Litio, Nichel, Manganese e Cobalto = NMC; ossidi di Litio, Nichel, Cobalto e Alluminio = NCA).

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.

Per quanto riguarda il settore dei trasporti, nel 2022, le vendite globali di auto elettriche hanno raggiunto i 10,5 milioni di unità, con 2,6 milioni vendute in Europa. La Figura mostra come è cresciuta la produzione di litio, negli ultimi anni.

[18] *Critical Reviews in Environmental Science and Technology; Volume 51, 2021 - Issue 19; DOI: https://doi.org/10.1080/10643389.2020.1776053*

L'elettrificazione sta accelerando su larga scala: solo nel 2022, le vendite sono cresciute del 55%. Secondo le previsioni, entro la fine del decennio, in Europa si venderanno ogni anno dieci milioni di auto elettriche. Un traguardo importante per il clima, ma che porta con sé nuove sfide ecologiche e industriali: come gestiremo lo smaltimento delle batterie a fine vita e la necessità di materie prime critiche per la loro realizzazione?

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. La dipendenza da queste risorse strategiche comporta nuove sfide geopolitiche per l'Unione Europea, legate ad una molteplicità di fattori, tra i quali instabilità politica, competizione internazionale e rispetto dei diretti umani.

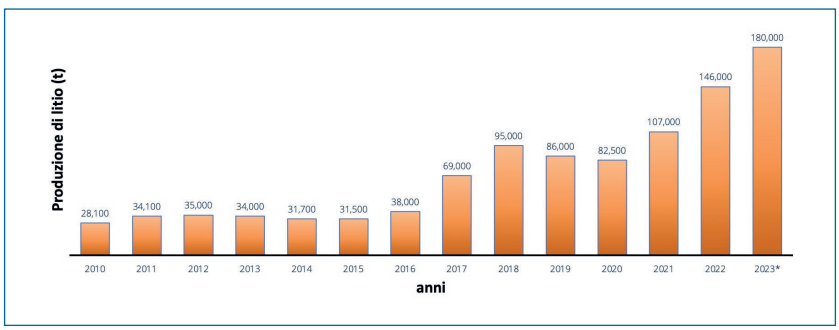


Figura 7: Produzione mondiale di litio da miniere dal 2010 al 2023[19]

Ad oggi solo una piccola parte delle LIBs esauste viene correttamente trattata per valorizzare i materiali di cui sono costituite, a causa di vincoli tecnici, barriere economiche, problemi logistici e lacune normative. Le sfide all'implementazione di processi di riciclo su scala industriale sono legate all'estrema complessità della

[19] *US Geological Survey, https://www.usgs.gov/*

matrice in ingresso e alla sua variabilità in termini di composizione e assemblaggio. Le tecnologie da sviluppare devono superare i limiti dei processi termici-chimici tradizionali, che comportano la perdita irreversibile nella fase iniziale di parte dei materiali presenti, per ottenere un prodotto finale ad alto valore aggiunto, come il carbonato di litio, che può essere riutilizzato nella produzione di nuove batterie.
La realizzazione di un impianto per il trattamento di batterie al litio a fine vita richiede diverse fasi di ricerca, sviluppo e innovazione, che possono variare a seconda delle tecnologie e dei processi che si vogliono applicare. È certamente una progettazione complessa e lunga, che richiede competenze specifiche, investimenti elevati e rispetto delle normative vigenti. Il tempo necessario a coprire tutte le fasi di intervento difficilmente potrà essere inferiore a due anni.

Motivazioni per lo sviluppo

Il riciclo delle batterie in Italia si inserisce in un contesto di crescente interesse e attenzione per la sostenibilità e la circolarità delle risorse energetiche; a tal proposito l'Unione Europea ha adottato un nuovo Regolamento[20] per la progettazione, la produzione e la gestione del fine vita delle batterie immesse sul mercato UE, che prevede obiettivi ambiziosi per la raccolta e il riciclo delle batterie, fissando dei target sul contenuto minimo di riciclato negli accumulatori dei veicoli elettrici[21].

Secondo le previsioni del Fraunhofer Institute[22], entro il 2030 l'Europa dovrà affrontare il riciclo di circa 420.000 tonnellate di batterie, ma la capacità totale degli impianti per il riciclo delle LIBs in Europa dovrebbe aumentare fino a 333.000 tonnellate all'anno entro la fine del 2026. Queste batterie contengono materiali strategici e critici, come nichel, cobalto, rame e litio, che possono essere recuperati e riutilizzati nelle nuove batterie, riducendo l'impatto ambientale e la dipendenza

[20] Con il Regolamento (UE) 2023/1542 del Parlamento europeo e del Consiglio del 12 luglio 2023 (https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/?uri=uriserv%3AOJ.L_.2023.191.01.0001.01.ITA&toc=OJ%3AL%3A2023%3A191%3ATOC), l'Europa aggiorna la disciplina sulle batterie e rifiuti da batterie in modifica alla direttiva 2008/98/CE (sui rifiuti), al regolamento (UE) 2019/1020 (vigilanza sui prodotti immessi in mercato), e abrogando di fatto la Direttiva Batterie (Dir 2006/66/CE) che aveva determinato un miglioramento nell'efficienza ambientale delle batterie e istituito norme e obblighi comuni per gli operatori economici.

[21] Il contenuto minimo di materiali riciclati nel nuovo regolamento europeo batterie varia a seconda del tipo di batteria e della data di applicazione. Per le batterie per veicoli elettrici, il livello minimo di contenuto riciclato è al 16% per il cobalto, al 6% per il litio e al 6% per il nichel. Questi valori dovranno aumentare a partire dal 1° gennaio 2030, per raggiungere il 20% per il cobalto, il 10% per il litio e il 12% per il nichel entro il 1° gennaio 2035.

[22] https://www.isi.fraunhofer.de/en/blog/themen/batterie-update/lithium-ionen-batterie-recycling-europa-kapazitaeten-update-2024.html

dalle importazioni. L'Italia ha la possibilità di diventare uno dei leader europei nel settore del riciclo delle batterie, grazie alla sua esperienza e competenza nel campo del riciclaggio[23], tenendo conto del fatto che la richiesta di materiale riciclato non potrà che crescere, anche per effetto dei target sopra citati.

Stato dell'arte

In Europa, la capacità totale degli impianti per il riciclo delle LIBs dovrebbe aumentare fino a 333.000 tonnellate all'anno entro la fine del 2026. Nella scelta delle sedi degli impianti di riciclo fattore determinante è la vicinanza ai produttori di materiali per batterie o ai costruttori di automobili, come ad esempio in Germania centrale e orientale, Ungheria, Francia settentrionale o sulla costa scandinava. Molti impianti sono previsti come progetti pilota o come piccole strutture con piani di espansione. I primi, come Cylib o Tozero, sono per lo più start-up nate in ambito universitario. Tra i secondi, ci sono aziende consolidate come Northvolt, SungEel HighTech ed EcoBat, che prevedono di espandere la capacità di riciclo dei loro impianti di oltre 100 kton all'anno entro il 2030.

Anche i produttori di automobili, come Mercedes-Benz con il suo progetto Licular, stanno ampliando le loro capacità di riciclo interne vicino alle loro reti produttive, come dimostrato dall'impianto di Kuppenheim, nel sud-ovest della Germania, che ha ottenuto la licenza operativa.

Altri impianti di trattamento LIBS in Europa sono[24]:

- EcoBat - Con impianti in Francia, Germania, Austria, Belgio e nel Regno Unito, è uno dei principali riciclatori di batterie in Europa.
- Umicore - Con impianti in Belgio e in Germania, è specializzato nel trattamento delle batterie al litio-ione.
- Accurec - Situato in Germania, impianto di trattamento e riciclaggio delle batterie.
- Retronor - Con sede in Norvegia, è specializzato nel riciclaggio delle batterie agli ioni di litio.

[23] Il rapporto sull'Economia Circolare in Italia del Circular Economy Network, Edizione 2023, (https://circulareconomynetwork.it/rapporto-2023), ha confermato l'Italia come leader in Europa per economia circolare, con un punteggio di 45 punti. Seguono la Germania (38 punti), la Francia (30 punti), la Polonia (26 punti) e la Spagna (26 punti). Il risultato è stato raggiunto confrontando le performance di circolarità delle cinque principali economie dell'Unione Europea utilizzando gli indicatori della Commissione Europea che includono la produzione e il consumo, la gestione dei rifiuti, le materie prime seconde, la competitività e l'innovazione, la sostenibilità ecologica e la resilienza.

- Befesa - Con impianti in Spagna, Germania e Francia, è uno dei principali operatori nel campo del trattamento di batterie esauste e del riciclaggio dei metalli.

Il processo di recupero materiali dalle LIBs comporta una serie di operazioni illustrate schematicamente in Figura 8: dopo la raccolta, le batterie vengono scaricate e smantellate e alcune parti vengono separate e avviate alle relative filiere di recupero. Successivamente, vengono recuperati con le tecnologie disponibili (pirometallurgia e/o idrometallurgia) i materiali come il litio, il cobalto, il nichel, il rame e l'alluminio, che possono essere riutilizzati per produrre nuove batterie.

Negli ultimi anni dai ricercatori di tutto il mondo sono stati proposti molteplici processi in scala laboratorio, che prevedono il recupero del litio e degli altri metalli (Co, Mn e Ni) dal materiale catodico delle LIBs esauste, il recupero del cobalto generalmente è un obiettivo primario poiché rappresenta il metallo a maggior valore aggiunto[25].

Il metodo di trattamento più diffuso per il riciclo delle LIBs è attualmente il processo pirometallurgico, che implica l'inserimento delle batterie in forni in cui vengono raggiunte temperature molto elevate per separare gli elementi chimici attraverso la fusione dei metalli. Questa tecnologia consuma molta energia e genera gas tossici che devono essere opportunamente trattati.
Negli ultimi anni, per diminuire gli impatti del riciclaggio industriale delle LIBs, sono stati studiati nuovi processi basati sull'idrometallurgia, una diversa tecnologia, che si serve di solventi per estrarre dalle batterie i materiali di valore, e non del raggiungimento di alte temperature di lavoro. Questo metodo risulta essere quindi più efficiente dal punto di vista energetico, ma anche ambientale, producendo meno emissioni pericolose.

È in studio anche la possibilità di un utilizzo alternativo delle LIBs quando esse,

[24] Questo elenco non è esaustivo ed è passibile di variazioni in base all'evoluzione del settore; è sempre consigliabile verificare le informazioni più aggiornate direttamente dai siti web delle società.

[25] ACS Energy Letters 2022 7 (2), 712-719; DOI: 10.1021/acsenergylett.1c02602; Critical Reviews in Environmental Science and Technology; Volume 51, 2021…; Batteries 2024, 10(1), 38; https://doi.org/10.3390/batteries10010038

ancora funzionanti, con l'usura perdono le caratteristiche tipiche per l'applicazione primaria per le quali sono state progettate: queste batterie possono essere riutilizzate in applicazioni richiedenti performance minori, come nell'accumulo di energia domestica o a supporto della rete elettrica.

In questo quadro, L'ENEA sta sviluppando tecnologie mirate al recupero e/o riciclo di materie prime/seconde e valutazioni di sostenibilità mediante analisi del ciclo di vita attraverso una serie di progetti finalizzati al recupero di materiali da LIBs a fine vita:

- Acrobat (2022-2024) cofinanziato dal MUR mediante i fondi della rete paneuropea ERA-MIN3): ENEA si occupa della valorizzazione dell'elettrolita contenuto nelle batterie litio ferro fosfato;
- IEMAP (2021-2024) finanziato dal MASE attraverso il programma Mission Innovation): l'attenzione è sulla produzione automatizzata dei materiali per i sistemi di accumulo e sul loro riciclo per via idrometallurgica.
- EubatIn (2022-2027, finanziamento IPCEI): l'obiettivo è lo sviluppo di un processo di riciclo di più ampio respiro, ove anche la frazione plastica è valorizzata, seguendo un approccio "prodotto-centrico" che mira a valorizzare tutte le componenti presenti nel rifiuto.

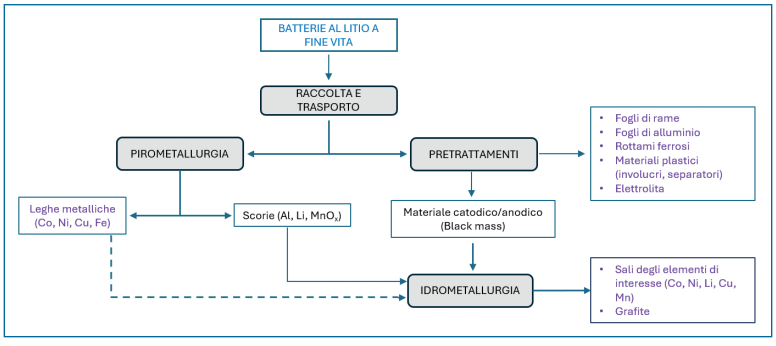


Figura 8: Il fine vita delle batterie agli ioni di litio: schema a blocchi delle principali operazioni di trattamento

Recentemente presso l'Università degli Studi di Brescia e in collaborazione con INSTM (Consorzio Interuniversitario Nazionale per la Scienza e Tecnologia dei Materiali) è stata proposta una nuova tecnologia (brevettata), che ha l'ambizione di sostituire i classici metodi pirometallurgici[26]. Essa si basa sull'utilizzo di radiazioni a microonde per facilitare il processo di riduzione carbotermica, rendendo il recupero di materiali strategici, come litio e cobalto, più efficiente ed ecologicamente sostenibile rispetto ai metodi tradizionali.

Questa tecnologia si applica direttamente alla cosiddetta "black mass", la polvere ottenuta dal pretrattamento delle batterie esauste, che contiene materiali catodici e anodici come nickel, cobalto, manganese, grafite e litio. Questo materiale ha la capacità di assorbire le microonde, che generano un riscaldamento diretto e generalmente uniforme al suo interno. Le microonde agiscono riscaldando selettivamente i componenti della black mass contenenti carbonio, in particolare la grafite (il materiale anodico della batteria). Le microonde generano un movimento rapido delle cariche elettriche e dei dipoli presenti all'interno del materiale. Questo riscaldamento è più efficiente rispetto ai metodi di riscaldamento tradizionali, poiché avviene direttamente all'interno del materiale, senza bisogno di trasferire calore dall'esterno verso l'interno.

Il grande vantaggio della tecnologia a microonde è che il processo può essere eseguito a temperature relativamente basse (circa 600°C), significativamente inferiori rispetto ai metodi pirometallurgici tradizionali, che tipicamente richiedono temperature più alte. Ciò non solo riduce i costi energetici, ma minimizza anche la produzione di emissioni nocive e gas tossici che sono comunemente associati ai metodi di recupero convenzionali.

L'uso delle microonde consente di operare in aria, eliminando la necessità di atmosfere inerti come l'argon, spesso utilizzato per prevenire l'ossidazione indesiderata durante i processi ad alta temperatura. Questo rende il processo più

[26] *Resour., Conserv. Recycl., 2023, 194, 106989, https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.106989; RSC Sustainability, 2024, 2, 2505, https://doi.org/10.1039/D4SU00202D; Energy Storage Materials, 2024, 72, 103703, https://doi.org/10.1016/j.ensm.2024.103703*

semplice da gestire e riduce ulteriormente i costi operativi. Dopo il trattamento a microonde, il litio può essere recuperato attraverso la lisciviazione in acqua, un processo relativamente sicuro ed ecologico. Invece gli altri metalli possono essere recuperati attraverso lisciviazione successiva in acidi deboli (alcuni dei quali potrebbero essere ottenuti da scarti di frutta). Grazie a questa metodologia, è possibile ottenere metalli come il litio sotto forma di sali, che possono essere successivamente raffinati e riutilizzati per la produzione di nuove batterie. Questo sistema riduce notevolmente la produzione di rifiuti tossici e la necessità di smaltimento, contribuendo alla riduzione complessiva dell'impatto ambientale. Il progetto CARAMEL, di oltre 1M€, destinato allo sviluppo di un forno a microonde dedicato, è stato finanziato dal MUR nell'ambito del Fondo Italiano per le Scienze Applicate, ed è iniziato a gennaio 2025.

Indicatori di impatto

La realizzazione di un impianto di recupero di LIBs esauste in Italia, anello mancante della relativa filiera, potrebbe avere importanti impatti sociali ed economici. Riguardo agli effetti sociali, in termini qualitativi, si può schematizzare:

- **Mitigazione del rischio ambientale:** l'impianto di recupero contribuirebbe alla riduzione del rischio di inquinamento causato dalle LIBs esauste che potrebbero altrimenti essere smaltite in modo errato o finire in discarica. Ciò potrebbe aiutare a preservare l'ambiente e ridurre l'impatto negativo sulla salute umana, con risparmi per il risanamento ambientale e nella gestione dei rifiuti. Altro contributo risiede nella potenziale riduzione dell'impronta ecologica, di consumo di risorse naturali, delle emissioni di gas serra e dell'inquinamento legati all'estrazione e trasporto dei materiali dalle risorse primarie.
- **Sensibilizzazione ambientale**: La presenza sul territorio di un impianto di recupero delle LIBs potrebbe aumentare la consapevolezza pubblica sull'importanza del riciclo e del corretto smaltimento delle batterie. Ciò potrebbe incoraggiare una maggiore partecipazione nel la raccolta differenziata delle batterie da parte dei cittadini e delle aziende.

- **Creazione di posti di lavoro:** l'installazione e la gestione di un impianto di recupero richiederebbe personale specializzato per le opere di ingegnerizzazione, per il trattamento, il recupero e il riciclo delle LIBs e per l'indotto generato. Ciò potrebbe portare alla creazione di opportunità di lavoro qualificato e innovativo e contribuire alla crescita economica, con l'assunzione di tecnici, ingegneri e operatori di vario tipo.

Riguardo agli effetti economici, gli impatti relativi alla realizzazione di un impianto di recupero di LIBs esauste in Italia potrebbero essere significativi:

- **Crescita dell'industria del riciclaggio:** un impianto di recupero promuoverebbe ulteriormente l'industria del riciclaggio in Italia. Ciò consentirebbe di sfruttare meglio le risorse in via di esaurimento, riducendo la necessità di estrarre nuove materie prime. L'industria del riciclaggio potrebbe quindi crescere e generare maggiori entrate per le aziende coinvolte.
- **Dipendenza dall'importazione di materie prime:** la produzione di LIBs richiede l'importazione di materiali, come il litio stesso. Un impianto di recupero potrebbe contribuire a ridurre la dipendenza dall'importazione di tali risorse, riducendo i costi per le aziende e l'economia italiana nel complesso e garantendo una maggiore autonomia e sicurezza energetica.
- **Crescita dell'innovazione e della ricerca:** la realizzazione di un impianto di recupero delle LIBs potrebbe incoraggiare l'innovazione e la ricerca nel settore delle batterie, al fine di migliorare le tecniche di riciclaggio, favorendo lo sviluppo di nuove tecnologie e processi più efficienti, sicuri e sostenibili. Ciò potrebbe portare a nuove scoperte scientifiche e tecnologiche, che potrebbero avere un impatto positivo sull'economia italiana nel lungo termine.

In conclusione, si può dire che un impianto per il trattamento delle LIBs a fine vita può avere un impatto industriale positivo e significativo, sia dal punto di vista economico che ambientale che tecnologico. Tuttavia, ci sono anche delle sfide

da affrontare, come la complessità dei processi di riciclo, la necessità di adeguare le normative e le infrastrutture, la concorrenza internazionale e la sensibilizzazione dei consumatori.
È pertanto fondamentale garantire una gestione adeguata ed efficiente per minimizzare gli impatti negativi e massimizzare i benefici per la società.

Risorse economiche necessarie

Gli investimenti richiesti per gli impianti di riciclo delle LIBs dipendono da diversi fattori, come la dimensione dell'impianto, la tecnologia utilizzata e il mercato di riferimento. In linea generale, gli impianti di riciclo richiedono investimenti significativi a causa dell'alta complessità dei processi di recupero dei materiali. Il processo di realizzazione di un impianto di riciclo comprende la fase di progettazione, che include la pianificazione dei processi di riciclo, la selezione delle attrezzature e la definizione delle specifiche tecniche, nonché la fase di costruzione, che coinvolge la fabbricazione e l'installazione delle attrezzature dell'impianto e la messa in funzione dei processi. Altro fattore da non trascurare è il processo autorizzativo da intraprendere con gli enti locali.
Si stimano costi che possono variare dai milioni alle decine di milioni di euro, a seconda della capacità produttiva dell'impianto. Questi costi includono l'acquisto delle attrezzature e delle macchine necessarie per separare i materiali delle batterie, come il litio, il cobalto e il nichel, nonché la costruzione o l'adattamento di un'infrastruttura adeguata.
I tempi necessari per la realizzazione di impianti di riciclo delle LIBs dipendono da diversi fattori, tra cui la complessità dell'impianto, la disponibilità di risorse e materiali, l'esperienza del team di progettazione e costruzione e il livello di automatizzazione dell'impianto.
È importante considerare che il settore del riciclo delle LIBs è in continua evoluzione e l'implementazione di nuove tecnologie e processi può richiedere tempi di realizzazione più lunghi. Inoltre, la complessità delle normative ambientali e delle certificazioni necessarie per operare un impianto di riciclo può influenzare i tempi di realizzazione.

NUOVE TECNOLOGIE DI EVOLUZIONE ASSISTITA (TEA) PER L'AGRICOLTURA

Oggi, l'agricoltura si trova davanti alla difficoltà di fronteggiare problemi legati al cambiamento climatico e alla crescente siccità che interessa l'intero pianeta e colpisce la produzione delle colture. Diventa sempre più importante garantire la produttività a livello locale, anche per rimanere competitivi rispetto a prodotti importati.

Inoltre, le recenti politiche europee (es. il Green Deal), richiedono una forte diminuzione nell'utilizzo di fitofarmaci e fertilizzanti. In tale contesto si collocano le TEA.

Le più recenti metodologie che hanno come obiettivo la modifica mirata dei genomi denominate Tecnologie per l'Evoluzione Assistita (TEA), meglio conosciute col termine inglese di *New Genomic Techniques* (NGT) o *Genome editing,* permettono di indirizzare modifiche genetiche in modo controllato e preciso nel genoma, anche in più posizioni contemporaneamente, anche attraverso la sola correzione di un solo nucleotide nella sequenza di un gene.

Con il metodo TEA, è possibile introdurre in una specie nuovi caratteri, senza dover ricorrere all'inserimento di geni provenienti da altre specie. Dal momento che la modifica riguarda un solo carattere, le TEA consentono di conservare inalterato tutto il resto del patrimonio genetico di quella varietà tipica, caratteristica molto apprezzata soprattutto per tutti i prodotti Made in Italy.

All'interno delle NGT, di notevole interesse è la tecnica di ingegneria genetica che prevede l'utilizzo del sistema CRISPR associato all'enzima CAS9, che fa parte della classe delle nucleasi, cioè enzimi in grado di tagliare il DNA. CAS9 dirige il suo taglio verso posizioni precise del genoma grazie a una molecola guida, un piccolo RNA che può essere facilmente sintetizzato in laboratorio e inserito all'interno di una cellula, insieme al gene che codifica per CAS9. Una volta raggiunto il sito bersaglio, CAS9 taglia il DNA; tale rottura è poi riparata dalla cellula con i normali

meccanismi di riparazione presenti nella cellula stessa, generando quindi mutazioni, siano esse inserzioni o delezioni, casuali.

Rispetto alle tecniche precedenti, è possibile una maggiore precisione nell'individuazione della sequenza di DNA di interesse e nel taglio, che permette di modificare il DNA nei punti desiderati, inducendo, con estrema precisione, delle mutazioni identiche a quelle che si potrebbero generare spontaneamente in natura.

Si tratta di una tecnologia relativamente semplice ed economica, che sta avendo uno straordinario impatto in tutti gli ambiti produttivi basati sull'utilizzazione di esseri viventi (piante, animali, microrganismi), così come lo è già in campo medico. Un caso significativo è quello rappresentato dall'esperienza giapponese, dove è stato sviluppato un pomodoro denominato "Sicilian Rouge High GABA", che, a seguito della modifica generata con la tecnica CRISPR Cas9, presenta un alto accumulo di GABA (acido γ-amminobutirrico), una sostanza naturalmente presente nei pomodori, nota per il suo coinvolgimento nella lotta all'ipertensione (Figura 9).



Figura 9: Pomodoro che accumula GABA[27]

Le esigenze in questo settore sono numerose, basti pensare alla possibilità di ridurre l'impatto ambientale dei pesticidi riducendone l'utilizzo grazie alla possibilità di inserire resistenze genetiche, per contribuire ad una riduzione dell'uso di queste sostanze.

L'enorme flessibilità delle nuove tecniche di evoluzione assistita potrebbe essere applicata al miglioramento genetico e consentire quindi la valorizzazione del pa-

trimonio di agro-biodiversità, di cui l'Italia è ricca, senza correre il rischio di alterare i caratteri di interesse delle varietà italiane selezionati negli anni.

Motivazione per lo sviluppo

Le sfide sia in campo medico, per prevenire o curare patologie, che in campo agroalimentare, per garantire sicurezza e nutrizione adeguate, sono numerose e l'utilizzo delle nuove tecniche di evoluzione assistita potrebbe dare un notevole impulso agli obiettivi che tutta la comunità mondiale si è prefissata. Tra i più importanti c'è quello di contribuire a migliorare la produttività e la qualità nutrizionale, diminuendo contemporaneamente il negativo impatto ambientale delle coltivazioni. Inoltre, le più avanzate biotecnologie possono essere applicate alla caratterizzazione degli alimenti, creando una vera e propria "impronta" che definisca la composizione, l'origine e le caratteristiche chimiche, proteggendo il consumatore da tutto il preoccupante problema delle truffe alimentari come adulterazioni o sofisticazioni.

Anche l'Unione Europea, per poter raggiungere gli obiettivi di sostenibilità ambientale che si è data con la strategia Farm to Fork, nell'ambito nel Green Deal Europeo[28], sembra puntare sull'utilizzo delle nuove tecniche genomiche.

Il panorama mondiale in cui si inserisce il dibattito sull'utilizzo delle TEA è molto complesso. Questo sia perché la legislatura è differente tra i vari paesi: un esempio ne è il Giappone rispetto all'Italia, sia perché anche quando la legislazione non intralcia l'utilizzo e la commercializzazione delle TEA, come appunto in Giappone, intervengono problemi di tipo etico-sociale legati in particolar modo all'applicazione del *genome editing* su esseri umani, animali o embrioni umani, nonostante il prodotto ottenuto mediante *genome editing* non sia un OGM, perché non contiene DNA esogeno. Il *genome editing* può quindi dare origine a mutazioni equivalenti a quelle che insorgono in natura e a quelle indotte da mutagenesi (processi chimico-fisici che inducono mutazioni), ma in modo totalmente predeterminato. Ne consegue che le piante o più in generale gli individui ottenibili

[27] https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33014001/

[28] https://www.ogieweb.eu/il-green-deal-europeo-e-la-transizione-ecologica-nuovistrumenti-per-rilanciare-la-leadership-dellue-sul-_piano-internazionale-elastrategia-farm-to-fork/

mediante *genome editing* sono equivalenti a quelli generati in maniera naturale, proprio perché in grado di modificare un solo carattere.

Recentemente il Parlamento europeo di Strasburgo ha approvato un testo che propone di escludere la tecnologia TEA dalla legislazione sugli OGM e a regolamentare le tecniche che alterano il materiale genetico di un organismo. L'obiettivo di queste norme è regolare la commercializzazione delle nuove varietà vegetali, in quanto ad oggi tutte le piante ottenute con le nuove tecniche genomiche sono soggette alle stesse regole degli organismi geneticamente modificati (OGM).

Con questa nuova regolamentazione, l'idea è quella di suddividere le piante in due categorie diverse e quindi soggette a leggi diverse. Più in dettaglio, si pensa di dividere i prodotti ottenuti con le NGT in NGT di tipo 1 se il prodotto è indistinguibile da un prodotto presente anche "in natura" o NGT di tipo 2 nel caso in cui invece sia distinguibile per la presenza, ad esempio, di un gene esogeno; in quest'ultimo caso il prodotto sarà classificato quindi come OGM e soggetto a tutte le verifiche e maggiori limitazioni previste dal 2001. Ciò apre la strada alla coltivazione in campo aperto e alla commercializzazione di organismi, prodotti utilizzando le tecniche TEA, che sarebbero più vantaggiose delle specie tradizionali perché ad esempio più resistenti agli stress biotici e abiotici.

Rilevanza

L'uso delle biotecnologie avanzate, come le TEA, si configura come strategia fondamentale per il conseguimento degli obiettivi di sostenibilità ambientale cui punta l'Unione Europea. Nell'ambito delle TEA, il genome editing offre la possibilità di indirizzare modifiche genetiche in modo controllato in punti precisi del genoma e permette quindi di introdurre nuovi caratteri, senza dover ricorrere alla tecnica del DNA ricombinante.

Per la relativa semplicità, questa tecnologia è facilmente applicabile al sistema produttivo italiano, caratterizzato da colture di nicchia con varietà e razze tipiche ed antiche e da piccole imprese.

Le nuove biotecnologie possono quindi garantire una maggiore produttività e migliorare il prodotto a livello qualitativo e nutrizionale.

Aspetti simili possono essere declinati non solo per quanto riguarda le produzioni agro-industriali, ma anche nel contesto delle produzioni animali, in cui l'uso del *genome editing* ha già dimostrato di poter rispondere alle richieste del settore relativamente alla resistenza alle malattie, al benessere animale o alla produttività.

Stato dell'arte

La tecnologia del *genome editing* è relativamente semplice, e per questo motivo si è velocemente diffusa tra i laboratori di ricerca che in Italia si occupano di biotecnologie applicate. Un passo fondamentale è stata l'approvazione nel giugno 2023 dell'emendamento (Decreto Siccità) che rende possibile la sperimentazione in campo aperto delle piante ottenute con tecniche TEA.

La situazione è molto diversa nell'ambito della ricerca privata, con pochissime imprese attive in questo settore a livello nazionale, a causa del contesto normativo che non permette la commercializzazione di piante prodotte con le tecniche TEA; di fatto, la produzione di queste piante avviene solo nei laboratori di ricerca.

In questo contesto, il progetto Biotecnologie sostenibili in agricoltura (BIOTECH) ha dato un contributo fondamentale promuovendo la ricerca basata su *genome editing* coinvolgendo numerosi laboratori di ricerca italiani.

Il progetto BIOTECH, coordinato dal CREA, si prefigge di ottenere miglioramenti genetici nell'ambito delle colture di maggior rilievo per il settore agroalimentare

italiano (pomodoro, melanzana, vite, olivo, carciofo, frumento, albicocco, pesco, ciliegio, melo, riso, pioppo) utilizzando tecniche di cisgenesi e *genome editing* allo scopo di ottenere, ad esempio, la resistenza a stress biotici e abiotici, e il miglioramento della produttività e di alcuni aspetti qualitativi. Alcuni esempi di piante sviluppate nell'ambito di questo progetto sono meli e peri resistenti al "fuoco batterico" (malattia causata dal batterio *Erwinia amylovora*), kiwi resistenti alle infezioni da parte di *Pseudomonas* spp., pomodori resistenti a stress idrico o linee di frumenti tolleranti all'oidio (Figura 10).

In Italia, ad oggi esiste un'ottima competenza scientifica sulle biotecnologie agrarie, che sta cominciando a produrre i primi risultati anche di natura applicativa su numerose specie di interesse agro-industriale come orzo, riso e frumento, pomodoro, melo, pero, agrumi. Per tutte queste specie caratteristiche del Made in Italy, la ricerca è molto focalizzata nell'ottenimento di varietà resistenti alle malattie, soprattutto per limitare l'uso di prodotti chimici in agricoltura e quindi in grado di creare sia un vantaggio ambientale che economico lungo tutta la filiera. Alcuni altri esempi a livello agroindustriale sono la ricerca per creare vitigni resistenti all'oidio o pomodori con migliori caratteristiche nutrizionali e diminuita allergenicità, e molte altre applicazioni ancora.



Figura 10 : Piante di frumento ottenute nell'ambito del progetto BIOTECH

Altra linea di ricerca importante è legata alla produzione di piante resistenti alla siccità o ai parassiti, e più in generale ai cambiamenti climatici. Recentemente (maggio 2024) è stata inaugurata la prima sperimentazione in campo aperto di piante ottenute tramite TEA. Si tratta di una varietà di riso, ottenuta in un laboratorio dell'Università di Milano, i cui geni di suscettibilità a una malattia fungina (brusone) sono stati inattivati grazie alla tecnologia CRISPR/Cas9.

Se si vuole allargare lo sguardo sull'orizzonte mondiale, lo scenario a livello normativo, e quindi anche di mercato, vede alcuni Paesi, come USA e Giappone, agire in maniera diversa dall'Europa, con varietà generate con le TEA trattate a livello legislativo come varietà non OGM e già commercializzate.

In Giappone, come accennato in precedenza, il pomodoro denominato "Sicilian Rouge High GABA", che accumula l'acido γ-amminobutirrico, rappresenta un esempio di utilizzo della tecnologia con possibili applicazioni nei confronti del miglioramento della salute umana (lotta all'ipertensione). È evidente quindi sottolineare quanto appaia opportuno valutare anche in Europa un cambiamento normativo che generi un trasferimento tecnologico rapido ed efficace dei risultati acquisiti grazie all'eccellenza della ricerca scientifica.

Indicatori di impatto

Le possibilità di gestire le varietà prodotte con tecniche TEA al pari di varietà tradizionali/naturali ha un evidente valore aggiunto a livello europeo e nazionale in termini sia di trasferimento della ricerca in prodotti commerciabili, sia di sostenibilità, in linea con gli approcci di bioeconomia circolare (BBE).

In questo contesto, è importante evidenziare la crescente sensibilità dell'opinione pubblica che è fondamentale per rendere possibile l'uso delle TEA, con il primario obiettivo di contribuire alla sostenibilità ambientale delle pratiche agricole.

Se l'applicazione della tecnologia TEA in agricoltura, o almeno di alcune categorie di utilizzo delle TEA (che la normativa in discussione classifica attualmente come NGT tipo 1), verrà considerata al pari di altre coltivazioni naturali, quindi escluse dagli ambiti applicativi della legislazione sugli OGM, questo aprirà la strada allo sviluppo e commercializzazione da parte di imprese private, che diventeranno quindi parte attiva del settore.

Gli obiettivi da raggiungere con il miglioramento genetico tradizionale o con le nuove tecniche genomiche sono i medesimi: ottenere varietà di specie coltivate con caratteristiche superiori, sfruttando la variabilità genetica esistente, mediante il trasferimento di caratteri che apportano le caratteristiche desiderate.

È difficile definire i principali settori di applicabilità delle tecniche di evoluzione assistita, perché in realtà le applicazioni sono numerosissime e spaziano da quelle più agroindustriali a quelle zootecniche a quelle mediche. Nel settore delle piante coltivate, ad esempio, come frumento tenero e duro, pomodoro, agrumi, riso, melo, pero, pesco, vite, olivo, l'uso delle TEA potrebbe essere determinante per produrre piante resistenti alle malattie, per limitare l'uso di prodotti chimici e la contaminazione da micotossine, oppure piante più ricche di fattori nutrizionali (antiossidanti, fibre e vitamine). Nel settore medico, ad oggi la ricerca nell'ambito dell'editing genomico spazia dalle malattie genetiche, in particolar modo quelle rare (come la distrofia muscolare di Duchenne, la beta-talassemia e la fibrosi cistica).

La discussione a livello normativo dovrà essere accompagnata da un confronto aperto con l'opinione pubblica rispetto ai rischi e benefici di tali tecnologie, per assicurare uno sviluppo delle TEA con un impatto positivo sulla società.

L'opinione pubblica, specialmente la fascia dei giovani, mostra una spiccata sensibilità verso la questione ambientale: sarà quindi fondamentale il confronto anche

con questa fascia di popolazione, ad esempio dimostrando che le tecniche TEA possono essere applicate contemporaneamente alle tecniche tradizionali senza andare in contrapposizione.

In questo contesto va tenuto conto del concetto di principio di precauzione, che si applica sempre qualora esista la possibilità che una determinata iniziativa possa arrecare danno ai cittadini o all'ambiente e qualora non vi sia ancora un consenso scientifico sulla questione, come nel caso dell'utilizzo delle TEA. Seguendo questo principio, l'azione o l'iniziativa in questione non dovrebbe essere perseguita. In realtà la discussione è molto più complessa e la soluzione va cercata trovando un modo che favorisca lo sviluppo della ricerca in questo settore combinandola però con gli interessi del cittadino e dell'ambiente.

Nello specifico, i rischi che si corrono con la coltivazione di piante prodotte con le Tecniche di Evoluzione Assistita sono essenzialmente due:

- Il primo, molto più controllabile, è che queste tecniche possono causare mutazioni non desiderate nel DNA della pianta. Questo però è facilmente valutabile: basterebbe regolamentare la messa in campo del nuovo genotipo solo a valle del sequenziamento del DNA della pianta e verifica dell'assenza di altre mutazioni non desiderate.
- Il secondo, più concreto, è che le nuove piante geneticamente modificate potrebbero trasferire materiale genetico ad altre piante selvatiche della stessa specie in maniera incontrollata e con effetti imprevedibili sull'ecosistema in generale, dato che le piante tradizionali sarebbero costantemente esposte a contaminazione da parte delle piante ottenute con tecniche TEA.

La sfida è trovare un compromesso tra i possibili effetti negativi sopra citati e i molteplici effetti positivi, come la limitazione di prodotti chimici e pesticidi che ci sarebbe utilizzando piante prodotte con tecniche TEA resistenti alle malattie causate da patogeni.

Risorse economiche necessarie

Le applicazioni delle nuove tecnologie di evoluzione assistita sono talmente tante e varie - abbracciano diversi settori da quello ambientale, medico, energetico, ecc. - che elaborare un quadro previsionale di risorse economiche necessarie non è al momento possibile.

Tale quadro è inoltre strettamente connesso alle decisioni finali della Commissione Europea sulla possibilità di equiparare di fatto le piante ottenute tramite TEA a piante naturali, e quindi a dare il via libera alla loro commercializzazione. Se questo accadrà le ricadute in ambito economico, industriale, innovativo, etico, sociale, ambientale, medico, ecc. avranno un impatto significativo a livello mondiale. Nel frattempo, si deve tenere conto che le grandi realtà finanziarie sono già pronte a investire in modo ingente. Possedere la conoscenza e il trasferimento delle TEA costituisce pertanto un elemento competitivo di primaria importanza.

Una valutazione dei costi necessari per realizzare un sistema di produzione di piante di interesse agronomico ottenute con tecniche TEA può essere fatta prendendo ad esempio il progetto Biotech precedentemente citato. Considerando tutta la filiera, dalla progettazione della modifica da effettuare a carico della pianta alla messa in campo e produzione, una stima approssimativa si potrebbe quantificare intorno agli 1-2 milioni di euro.

TECNOLOGIE FERMENTATIVE PER I PRODOTTI BIO-BASED

Gli obiettivi di decarbonizzazione, di tutela del capitale naturale, di sfruttamento sostenibile delle risorse e progressiva sostituzione dei prodotti fossil-based, di maggiore tutela della biodiversità degli ecosistemi terrestri e marini (Biodiversity strategy for 2030[29]) e di sostegno alla creazione di condizioni di maggiore salute e qualità della vita delle persone (Farm to Fork Strategy[30]) possono essere raggiunti attraverso l'affermazione di modelli di produzione bioeconomici circolari (Circular economy action plan[31]), intendendo con tale terminologia l'insieme di processi e sistemi in grado di convertire risorse rinnovabili (vegetali e forestali, agroalimentari, marine e zootecniche, microrganismi, alghe) in bioprodotti ad alto valore aggiunto ed energia, a partire da materie prime seconde (sottoprodotti/scarti di origine agroindustriale e rifiuti organici).

Le Tecnologie Fermentative (Figura 11) si inseriscono pienamente in tale contesto produttivo e nei più avanzati modelli di bioraffineria. Alcune tipologie sono industrialmente consolidate, versatili e a basso costo, e permettono la bioconversione in energia/biocarburanti; favoriscono la produzione di prodotti biobased ad alto valore aggiunto o alta valenza tecnologica (es. composti ad alto valore nutrizionale come proteine e vitamine, metaboliti, principi attivi ad attività biologica, biostimolanti, biofertilizzanti, intermedi per la formazione di biopolimeri), in favore di settori quali ad esempio quello alimentare e nutraceutico, cosmetico, farmaceutico, dei materiali, dimostrandosi altamente sostenibili.

Alle tecnologie di fermentazione tradizionali vanno affiancandosi approcci di processo differenti che valorizzano le biomasse (*biomass fermentation*) e/o ottimizzano il processo mediante ingegnerizzazione dei microrganismi (*precision fermentation*). Nel processo di fermentazione da biomasse, i microrganismi (ad esempio lieviti, batteri, funghi filamentosi o microalghe) vengono utilizzati come strumento per proporre fonti alimentari alternative a quelle convenzionali per effetto della produzione di biomassa edibile (es. micoproteine), di specifici ingre-

[29] https://environment.ec.europa.eu/strategy/biodiversity-strategy-2030_en

[30] https://food.ec.europa.eu/horizontal-topics/farm-fork-strategy_en

[31] https://environment.ec.europa.eu/strategy/circular-economy-action-plan_en

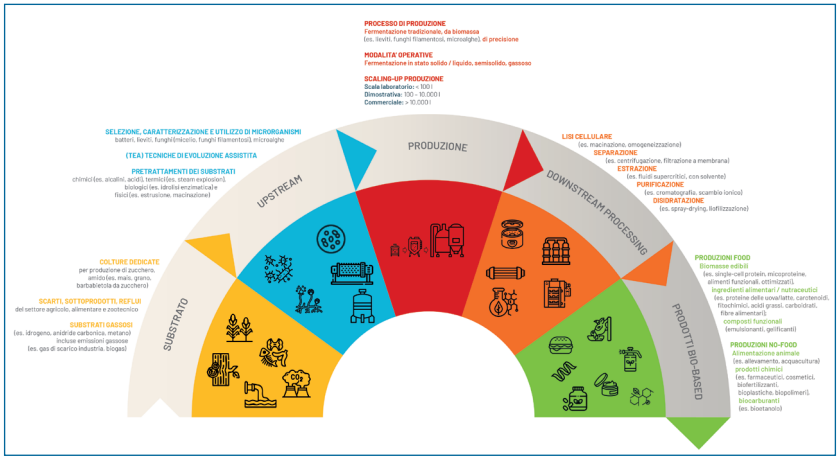


Figura 11 : Processi di fermentazione e produzione biobased (Fonte: ENEA)

dienti nutrizionali/funzionali (polisaccaridi, proteine, lipidi/acidi grassi omega-3, vitamine, minerali e fibre alimentari) o componenti alimentari minori (es. antiossidanti, coloranti, aromi, enzimi e vitamine).

Più recentemente l'attenzione si sta spostando verso soluzioni di fermentazione di precisione in grado di accrescere l'efficienza e la gamma di composti prodotti. Questo grazie alla sinergia con gli ambiti delle scienze omiche (es. metagenomica), della biologia di sintesi, dell'intelligenza artificiale, della bioinformatica e biologia computazionale. Mediante l'ingegnerizzazione dei percorsi metabolici dei microrganismi, questi ultimi diventano delle vere e proprie micro-bio-fabbriche in cui tutte le risorse disponibili vengono utilizzate per produrre in via preferenziale i composti desiderati, favorendo la maggiore competitività per via di una maggiore resa produttiva e di un miglioramento delle fasi di downstream (es. recupero e purificazione molecole di interesse).

Funzionali ai processi di fermentazione vanno inclusi: i trattamenti di preparazione della matrice (*upstream*) utile a rendere disponibili gli zuccheri utilizzati dai mi-

crorganismi e che possono prevedere un preliminare trattamento enzimatico (es. delignificazione enzimatica); di produzione dei microrganismi brevettati in grandi volumi per soddisfare le esigenze aziendali; di recupero della biomassa o biomolecole dal brodo di fermentazione ed eventuale purificazione (*downstream*) che coinvolgono al livello industriale tecnologie collaterali quali quelle separative (es. centrifugazione, filtrazione a membrana), estrattive (es. fluidi supercritici), evaporative (es. spray-drying, liofilizzazione).

Motivazione per lo sviluppo

Le tecnologie fermentative rappresentano la soluzione produttiva più sostenibile per molti settori industriali: il ricorso a materie prime rinnovabili e le condizioni operative normalmente blande rendono la fermentazione un processo con un impatto ambientale molto inferiore rispetto alle attuali filiere di produzione o alla sintesi (petrol) chimica convenzionale; le materie prime possono presentarsi sotto forma di colture dedicate (con il conseguente assorbimento di anidride carbonica durante la crescita), sottoprodotti o rifiuti di altre industrie, o talvolta anche la stessa anidride carbonica. Queste caratteristiche delle tecnologie fermentative permettono di perseguire gli obiettivi di decarbonizzazione delle produzioni in linea con i dettami dell'Economia Circolare.

Il settore alimentare è il principale ambito di declinazione produttiva della tecnologia.

Oggi alla produzione di proteine animali si associa circa il 15%-24% delle emissioni globali di gas serra, oltre a un sostenuto consumo di risorse naturali (acqua, suolo), a fenomeni di deforestazione e desertificazione, e a perdita di biodiversità. Di contro è stato stimato che il ricorso alla fermentazione di precisione consentirebbe di ridurre il consumo di acqua (circa 90%), l'emissione di gas serra (circa 75%) e la necessità di suolo (circa 80%), limitando peraltro l'uso di antibiotici e ormoni.

Approcci di Life Cycle Assessment (LCA) hanno confermato il vantaggio rispetto

agli alimenti tradizionali sia per produzioni di micoproteine che di sieroproteine. Esempi di studi LCA applicati a ingredienti per formulazioni cosmetiche evidenziano i medesimi risultati.
Il ricorso a scarti lignocellulosici, agroalimentari, urbani (FORSU), quali substrati di crescita o biomassa oggetto di bioconversione, permette non solo la valorizzazione economica di tali matrici residuali verso produzioni a elevato valore aggiunto, nutrizionale o funzionale come antiossidanti, conservanti naturali, coloranti, enzimi, ma consente anche di generare nuove catene di valore, vantaggi economici e sociali, riduzione degli effetti negativi su ecosistemi terrestri e acquatici.

La prospettiva di crescita demografica rappresenta un ulteriore spinta allo sviluppo delle tecnologie di fermentazione: si stima infatti che la popolazione raggiunga i 9 miliardi nel 2050, con tassi di crescita più elevati[32] in aree che dipendono maggiormente dal settore agricolo (colture, bestiame, silvicoltura e pesca) e in cui si registreranno elevati tassi di insicurezza alimentare per effetto degli impatti negativi dei cambiamenti climatici (scarsità d'acqua, eventi meteorologici estremi, diminuzione della salute dell'ecosistema) e per il rischio di tensioni internazionali. In tale contesto, le produzioni derivate da fermentazione assumono un ruolo strategico nella costruzione di ingredienti e prodotti alimentari di prossima generazione[33], collocandosi tra le tendenze emergenti della Quarta Rivoluzione Industriale (Industria 4.0) in quanto in grado di favorire il superamento degli aspetti di malnutrizione, attraverso la produzione di massa di prodotti alimentari, l'accrescimento del loro valore nutrizionale, la maggiore sicurezza delle produzioni.

La scalabilità delle produzioni su scala commerciale richiede processi in grado di accrescere con certezza le rese produttive, favorendo un costo finale del prodotto minore e più competitivo. Accanto alle tecniche di ingegneria dei microrganismi, all'adozione di soluzioni di standardizzazione dei flussi di rifiuti, superando gli aspetti legati alla stagionalità e alla diversificazione delle fonti, si affiancano diverse sfide tecnologiche:

[32] *World Population Prospects 2024 Summary of Results, United Nations Publication Sales No. E.22.XIII.5, ISBN 9789210031691, eISBN 9789211065138, https://population.un.org/wpp/assets/Files/WPP2024_Summary-of-Results.pdf.*

[33] *United Nations Environment Programme, What's kooking?, Frontiers 2023 special issue, 2023. Good Food Institute, State of the Industry Report: Fermentation, 2023.*

- **Sviluppo di soluzioni di fermentazione continua** (es. bioreattori con integrazione di tecnologie di perfusione) su scala commerciale al fine di aumentare la produttività, favorire la crescita della densità cellulare e migliorare le fasi di downstream, garantire una qualità del prodotto riproducibile necessaria alla fase di approvazione normativa dei nuovi alimenti, ridurre gli spazi della facility di produzione;
- **Sviluppo di soluzioni di tecnologia monouso** (SUT, single-use technology), funzionali a una gestione asettica del processo; al momento oltre una scala di produzione di 2.000 litri tali soluzioni sono non economiche o tecnicamente poco fattibili. Inoltre, dovrebbero includere il ricorso a nuovi materiali più economici rispetto ad acciaio o vetro, in grado di assicurare le performances di adeguati scambio termico e resistenza alla pressione;
- Valutando in circa il 50% l'incidenza dei costi operativi del downstream su quelli totali di produzione, risulta importante **sostituire gli attuali sistemi di downstream** (cromatografia, processi di essiccazione a spruzzo o liofilizzazione) in quanto ad alta intensità energetica e con effetti possibili sulle qualità funzionali delle molecole prodotte (es. bioattività, nutrizionale);
- Sviluppo di soluzioni in grado di affrontare in modo tecnicamente valide le **fasi di conservazione e stoccaggio** (es. crioconservazione rapida) adeguate alla scala delle produzioni industriali;
- **Sviluppo di sensoristica** per la supervisione dei parametri del bioprocesso che influenzano i risultati finali e software per la gestione del processo e implementazione di algoritmi di statistica e intelligenza artificiale.

I tempi di commercializzazione dei prodotti basati su tecnologie di fermentazione possono stimarsi almeno pari a 3-5 anni, dovuti principalmente a:

1. Sviluppo del processo (selezione, ottimizzazione o sviluppo del

ceppo) e ottimizzazione dalla scala banco sino a quella produttiva; questa fase può beneficiare della creazione di partnership tra grandi aziende e start-up biotecnologiche;

2. Attivazione del sito di produzione: la scelta può prevedere riconversione di impianti esistenti (es. nati per l'industria farmaceutica, per la produzione di enzimi industriali, di carburanti o bevande) con tempi stimati fino a 6 mesi per la fermentazione allo stato solido e tra 13 e 18 mesi nel caso di fermentazione in mezzo liquido; la realizzazione di nuove infrastrutture richiede invece un tempo di attesa tra 17-24 mesi o 24-36 mesi rispettivamente per una scala commerciale che si occupi di fermentazione da biomassa o di precisione; alternativamente si possono ridurre i tempi, esternalizzando la produzione tramite aziende CMO (Contract Manufacturing Organization);

3. Iter di autorizzazione per alcuni prodotti secondo le regolamentazioni vigenti (es. Regolamento UE sui nuovi alimenti[34]; Regolamento CE 1829/2003 sugli alimenti e mangimi geneticamente modificati): esempi con esito positivo formalizzate a inizio 2023 hanno riguardato la produzione di proteine di pisello e riso da micelio di funghi Shiitake MycoTechnology, Inc.[35], a fronte di una richiesta presentata nel 2019.

Rilevanza

L'affermazione delle tecnologie di fermentazione favorisce, tra gli altri, in modo diretto e indiretto, il perseguimento degli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile (SDGs), grazie al minore ricorso di risorse naturali (SDG12; SDG13) e di suolo e alla maggiore tutela della biodiversità animale e vegetale (SDG15).

A ciò si associano le ripercussioni positive derivanti dalle specificità applicative dei prodotti e alla loro capacità di proporsi come alternativa a quelli fossil-based, come nel caso delle bioplastiche (SDG12).

[34] *"Novel Food": https://food.ec.europa.eu/food-safety/novel-food_en*

[35] *EFSA Panel on Nutrition, Novel Foods and Food Allergens (NDA), D. Turck, T. Bohn, J. Castenmiller, S. De Henauw, K. Ildico Hirsch-Ernst, A. Maciuk, I. Mangelsdorf, H. J. McArdle, A. Naska, C. Pelaez, K. Pentieva, A. Siani, F. Thies, S. Tsabouri, M. Vinceti, F. Cubadda, T. Frenzel, M. Heinonen, R. Marchelli, M. Neuhäuser-Berthold, M. Poulsen, M. Prieto Maradona, J. R. Schlatter, H. van Loveren, R. Roldán-Torres, H. K. Knutsen, Safety of pea and rice protein fermented by Shiitake (Lentinula edodes) mycelia as a Novel food pursuant to Regulation (EU) 2015/2283, EFSA journa, Volume 20, Issue 4, 2022 (https://doi.org/10.2903/j.efsa.2022.7205).*

Le biomasse algali sono un esempio virtuoso di realizzazione di modelli di Bioeconomia Circolare mediante valorizzazione di scarti e reflui di processo, derivanti da filiere agroalimentari, forestali e urbane. Infatti, esse consentono produzioni (es. biocarburanti o bioplastiche) economicamente più sostenibili grazie agli effetti di biorisanamento delle acque (SDG6) e favoriscono la riduzione degli impatti sugli ecosistemi (SDG14).
La necessità di creare nuove infrastrutture produttive favorisce la crescita industriale sostenibile (SDG9) e la proliferazione di start-up biotecnologiche, determinando:

- Uno sviluppo socioeconomico (SDG1; SDG8): maggiore occupazione produttiva, creazione di nuovi posti di lavoro;
- Un miglioramento dello stato di ricchezza (SDG1) di territori a reddito medio non elevato, grazie alla capacità di produzione di bioenergia da scarti o alla valorizzazione di prodotto alimentari tradizionali che possono diventare fonti di reddito;
- Una riduzione delle diseguaglianze (SDG10) del tessuto nazionale/internazionale.

Stato dell'arte

Uno dei settori maggiormente coinvolti dal ricorso alle tecnologie di fermentazione è quello alimentare: se i processi fermentativi tradizionali sono da tempo oggetto di applicazioni per l'ottenimento di produzioni a migliorata shelf-life o con modificazioni organolettiche favorevoli, più recentemente il focus del settore della ricerca e sviluppo si è spostato verso la produzione di ingredienti alimentari come proteine, grassi, agenti aromatizzanti, vitamine, pigmenti o verso l'ottenimento di proteine microbiche da microalghe, batteri e funghi mediante bioconversione di scarti quali agroalimentari, lignocellulosici di tipo agricolo o forestale, FORSU (waste-to-protein system).
I prodotti alimentari commercializzati derivanti da processi di fermentazione sono quelli a base di micoproteine o di proteine alternative a quelle di derivazione lattiero-avicola o della carne.

Gli investimenti industriali globali per i processi di fermentazione a uso alimentare sono pari a 4,1 miliardi di dollari nel decennio 2013-2023 (il 72% si riferisce agli ultimi 3 anni): un settore produttivo in forte espansione, come dimostrano i dati relativi al 2023 in termini di incremento di aziende operanti (+16%), la formazione di partenariati che coinvolgono anche grandi aziende di produzione alimentare, la realizzazione di sette nuovi impianti al livello globale[36] e l'attivazione in Europa di diverse facilities su scala pilota[37] che ha condotto a una produzione di proteine mai registrata prima. In Europa, si registrano nel 2023 investimenti pari a 179,4 milioni di dollari nel contesto dei programmi di ricerca e innovazione dell'UE per la creazione di siti di produzione e supporto alle start-up[38].

Strettamente connesso a quello alimentare è l'ambito dei prodotti nutraceutici, un mercato europeo che è valutato nel 2023 pari 83,8 miliardi di dollari, con un CAGR nel periodo 2025-2030 stimato tra il 4,9%[39] e il 7,4%[40] al 2029. In Italia il fatturato del settore ha ormai superato i 4,5 miliardi di euro con una produzione cresciuta del 5% rispetto all'anno precedente: le spinte che guidando la crescita del mercato si devono a una più ampia consapevolezza fra i cittadini dei concetti di benessere della persona e allo stesso tempo a un'età media maggiore, nonché alle capacità legate all'innovazione sia in termini di produzioni maggiori che di standard sempre più rigorosi[41].

[36] *Ad es. l'impianto della Meati Foods Thornton, Colorado, per la produzione di micoproteine; impianto di fermentazione di precisione della Liberation Labs Richmond, Indiana, con capacità di 600.000 litri per la produzione di proteine alimentari.*

[37] *Ad es. Arkeon Biotechnologies presso il Seestadt Innovation Hub di Vienna per la produzione di ingredienti proteici con utilizzo di anidride carbonica di scarto; MicroHarvest a Lisbona per la produzione di 25 kg/die di proteine unicellulari; Nosh Biofoods per la produzione di micoproteine a partire dalla riconversione di un birrificio.*

[38] *Finanziamenti pari a 14 milioni di euro sono stati effettuati per la creazione di una facility di produzione in Francia (Sylplant Project, 2022) tramite Circular Bio-based Europe Joint Undertaking (CBE JU), pari a 5,5 milioni di euro dal programma European Innovation Council's (EIC) Pathfinder per la produzione di sieroproteine (Solar Foods, 2023), dal finanziamento di 50 milioni di euro nel contesto dell'EIC's Work Programme 2024 per supportare start-up in grado di scalare il processo di produzione di proteine alternative a partire da fermentazione di precisione e colture algali.*

[39] *https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/europe-nutraceutical-market*

[40] *https://www.marketdataforecast.com/market-reports/europe-nutraceuticals-market*

[41] *Virtue Market Research, Europe Nutraceuticals Market Research Report – Segmentation by Product type (Functional Food, Functional Beverage, Dietary Supplements), by Distribution Channel (Supermarkets and Hypermarkets, Convenience Stores, Online Retail Stores, Specialty Stores, Others); and Region; - Size, Share, Growth Analysis | Forecast (2024– 2030), 2023*

I processi di fermentazione rientrano in questi scenari di innovazione sia con la produzione di alimenti fermentati ricchi di batteri benefici (es. probiotici) sia con la presenza di nutrienti, come vitamine, peptidi e acidi organici.

Nell'industria farmaceutica le molecole bioattive (es. carotenoidi, composti polifenoli, fitoestrogeni, fibre alimentari e acidi grassi, polisaccaridi, sostanze fitochimiche) sono sempre più richieste per l'impatto impatto positivo che esercitano nella prevenzione di diverse malattie cronico-degenerative (es. cardiovascolari, neurodegenerative, tumorali). L'analisi del settore farmaceutico evidenzia che il costo degli ingredienti attivi incide per il 30%. Questo scenario rende particolarmente interessante lo sviluppo di farmaci biologici derivanti da processi di fermentazione che utilizzino ceppi microbici o linee cellulari. Il mercato dei principi attivi da fermentazione (anticorpi, peptidi, proteine, piccole molecole, vaccini) è stimato in 55 miliardi di dollari[42].

L'industria cosmetica, un settore in rapida crescita (valutato a 262 miliardi di dollari nel 2022 e previsto ad un tasso di crescita annuale composto (CAGR) del 4,2% fino al 2030[43]), necessita dell'approvvigionamento di composti/intermedi per la formulazione di cosmetici, cui si può rispondere mediante l'approccio fermentativo di biomasse specifiche (colture dedicate come zucchero di canna, scarti di processo agroalimentare), in grado di offrire prodotti in elevate quantità e con grado di purezza superiori a quelli dei processi tradizionali.

La dimensione del mercato globale dei prodotti chimici da fermentazione è stata valutata a 68,7 miliardi di dollari nel 2022 e dovrebbe espandersi a un CAGR del 5,73% considerando un periodo di previsione al 2028: in particolare possono essere citate realtà industriali di produzione di building block (1,3-propandiolo) per la produzione di polimeri, quella dei β-lattamici e di riboflavina.

[42] https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/unlocking-step-change-improvements-in-biologic-fermentation

[43] https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/cosmetics-market#:~:text=Report

Indicatori di impatto

- Il mercato dei prodotti da fermentazione (anche di precisione) statunitense ed europeo acquisterà sempre più importanza, in particolare per le applicazioni rivolte al settore alimentare[44]. La crescita è testimoniata dai volumi di investimento su scala globale dell'ultimo decennio e, per esempio, dalla creazione di oltre 200 aziende nel corso del 2023.
- La tecnologia beneficerà inoltre dell'attenzione degli investitori anche per effetto delle favorevoli credenziali ESG (Environmental, Social and Governance) delle aziende che opereranno su tale tecnologia.Le produzioni derivate dai processi di fermentazione diventeranno progressivamente più competitive rispetto ai prodotti tradizionali, favorendo la loro affermazione nei mercati: è previsto ad esempio che il costo delle proteine derivate da fermentazione sarà prossimo a 10 $/kg entro il 2025, sbloccando il mercato dei prodotti alimentari che gioverà anche dello sviluppo di microrganismi ingegnerizzati.
- Lo sfruttamento di sottoprodotti e scarti derivati dalle filiere agroalimentari, dei settori forestali o urbani come fonti alternative carbonio e azoto contribuirà a ridurre l'impatto sugli ecosistemi.
- Vantaggi nel tessuto industriale nazionale deriveranno dalla creazione/crescita di aziende biotecnologiche operanti nella produzione e/o sviluppo conto terzi (CMO; CDMO), in grado di offrire competenze e infrastrutture produttive rispondenti ai requisiti normativi, nel settore della produzione di apparecchiature industriali (fermentazione, downstream, congelamento, conservazione).
- Il contesto di forte transdisciplinarietà, necessario allo sviluppo di percorsi di innovazione e l'industrializzazione di processi, porterà alla nascita di start-up biotecnologiche per la messa a punto delle fasi di ingegnerizzazione dei microrganismi o di quelle di processo per l'individuazione di soluzioni di ottimizzazione (es. sequestro della

anidride carbonica prodotta) e di quelle operanti nell'ambito dell'intelligenza artificiale.

- La possibilità di delocalizzare la produzione ad ambiti territoriali ristretti consentirà di favorire un miglioramento delle condizioni socioeconomi che sul territorio nazionale, grazie alla creazione di nuove fonti di reddito, nuovi posti di lavoro e possibilità di una maggiore autosufficienza energetica.



(a) (b) (c)

Figura 12 : Esempi di impianti pre-pilota di fermentazione (a), filtrazione tangenziale a membrana (b) e spray-drying (c).

Risorse economiche necessarie

La scelta delle modalità di produzione, ad esempio ricorrendo alle CMOs[45] o prevedendo la creazione di nuove infrastrutture, ha effetti diretti sui costi di investimento: in generale al crescere dei volumi, la soluzione preferenziale è verso strutture di proprietà.

In generale, facendo riferimento alla somma delle spese in conto capitale (CAPEX) e di quelle operative (OPEX) per produzioni commerciali, il costo varia da 130 $/L a 200 $/L rispettivamente nel caso di fermentazione della biomassa e fermentazione di precisione, con volumi di investimento complessivi superiori a 100 milioni di dollari (forbice 100 – 250 MM $); una produzione su scala minore (5.000-100.000 litri) di ingredienti alimentari può prevedere un costo prossimo inferiore di 20 milioni di dollari[46].

Alternativamente, si può procedere alla riconversione delle strutture produttive già presenti derivanti da filiere differenti (es. farmaceutica, enzimi, bevande) che

[45] *Secondo il Good Food Institute, dei circa 61 milioni di litri di capacità fermentativa presenti al livello globale, l'80% è già sotto contratto. A fronte del 12 milioni restanti, solo 2 milioni offrono facilities in grado di offrire servizio di downstream necessari ad applicazioni di natura alimentare (Good Food Institute, State of the Industry Report: Fermentation, 2023).*

[46] *Good Food Institute, Manufacturing capacity landscape and scaling strategies for fermentation-derived protein, 2023.*

richiede però l'ammodernamento degli impianti, il loro adeguamento in termini di sensoristica e controllo, automazione, continuità della lavorazione secondo normative/standard di produzione rigorosi: dati derivanti da casi reali[47], forniscono delle stime di risparmio nel caso della fermentazione allo stato solido su scala demo pari al 70% dei costi da affrontare per acquisto di una struttura di nuova realizzazione. Volendo riferirsi a investimenti per la proposta di un intero ciclo produttivo in una scala intermedia tra quella di laboratorio e quella dimostrativa, il costo può essere stimato in 5-10 milioni di euro sulla scorta delle soluzioni di downstream (Figura 12) necessarie all'ottenimento dei prodotti finali.

[47] *bidem, pp. 40-41.*

TECNOLOGIE E SOLUZIONI PER L'AGRICOLTURA CONSERVATIVA INTEGRANDO MECCANICA, ELETTRONICA E BIOTECNOLOGIE

Il settore agricolo ed in particolare quello delle produzioni erbacee si avvantaggia dell'applicazione di soluzioni innovative integrate che pongono il suolo e le sue caratteristiche chimiche, fisiche e biologiche al centro delle azioni dell'agricoltore nella conduzione aziendale. Le soluzioni che ruotano intorno alla cosiddetta agricoltura conservativa (AC), i cui elementi principali sono mostrati in figura, consentono di gestire al meglio il suolo e la sua fertilità, soprattutto nel caso dei seminativi, attraverso l'integrazione di nuove tecnologie meccaniche combinate, l'uso dell'elettronica per gestire in modo preciso lavorazioni, semine, spandimenti ed altre operazioni colturali, l'uso delle colture di copertura per proteggere il suolo e di biosoluzioni per gestire la fertilità.

Quasi tutti i seminativi e molte altre aree agricole del nostro paese possono potenzialmente avvantaggiarsi dell'introduzione e diffusione di tali soluzioni con gli opportuni adattamenti legati ai diversi contesti pedoclimatici. Le tecniche impiegate possono essere utilizzate, con i necessari adattamenti, anche per le coltivazioni arboree specializzate (vite, olivo, fruttiferi) ed orticole di pieno campo.

La diffusione della tecnologia ISO 11783/ISOBUS[48] per la **gestione delle macchine operatrici** consente di ottimizzare il controllo delle operazioni, profondità, precisione, velocità di rotazione dello strumento o distribuzione a rateo variabile di input. Le macchine combinate effettuando due o più operazioni in un solo passaggio velocizzano le operazioni e consentono un risparmio di tempo uomo oltreché di carburante; i nuovi sistemi di tillage diminuiscono l'ossidazione della sostanza organica ed i tempi per la lavorazione di ampie superfici generando risparmi di gasolio tangibili[49].
Le **colture di copertura** proteggono il terreno e aumentano la sostanza organica nei suoli e se integrate con **ammendanti innovativi, biostimolanti e biofertilizzanti,** prodotti a partire da residui agricoli ed agroalimentari, permettono di chiudere il ciclo dei nutrienti e della sostanza organica e diminuire l'impiego dei fertilizzanti minerali onerosi o limitati nella loro disponibilità, come il fosforo.

[48] *ISO 11738 (noto anche come ISOBUS) è un protocollo di comunicazione internazionale standardizzato che permette agli equipaggiamenti/attrezzature agricole di comunicare tra loro attraverso un unico linguaggio comune*

[49] *Cillis D., Pezzuolo A., Marinello F., Basso B., Colonna N., Furlan L., Sartori L. 2017: Conservative Precision Agriculture: an assessment of technical feasibility and energy efficiency within the LIFE+ AGRICARE project. Advances in Animal Biosciences: Precision Agriculture. Pp 439–443 doi:10.1017/S2040470017000019X*

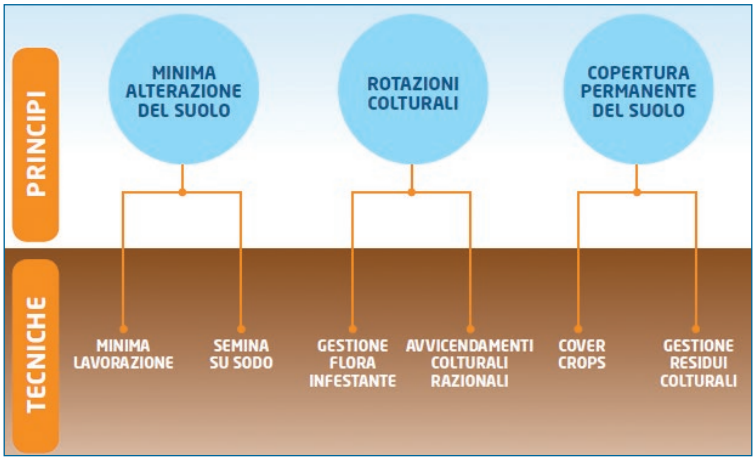


Figura 13 : Principi base della agricoltura conservativa (fonte ENEA[50])

Motivazione per lo sviluppo

La competitività e lo sviluppo del comparto agricolo nazionale sono minacciati da una serie di criticità, tra cui possiamo annoverare da una parte l'intensificazione eccessiva delle produzioni agricole e zootecniche, in alcuni areali produttivi e all'opposto la marginalità produttiva di alcune aree e tipologie di aziende agricole che conduce spesso all'abbandono dei terreni. Tutto ciò mentre aumenta l'impatto dei cambiamenti climatici sui cicli produttivi che si rivela sempre più diffuso e frequente, e la competizione economica in un contesto internazionale ed europeo con la pressante richiesta di una maggiore sostenibilità dei sistemi produttivi.

Peraltro, la recente strategia UE "*From Farm To Fork*" e gli obiettivi del piano "*FIT for 55"* pongono sfide temporali ed organizzative cui l'agricoltura, e più in generale l'intero settore agroalimentare, devono rispondere con tempestività pur se il settore, per capacità economica e di innovazione, sconta dei limiti oggettivi. La stessa Politica Agricola Comune (PAC 2023-2027) europea e la sua applicazione a livello nazionale evidenzia come le sue priorità ed i nove macro-obiettivi devono

[50] *La figura è una elaborazione basata sulla definizione di AC sviluppata nel 2001: Conservation agriculture, a worldwide challenge, Proceedings of the First World Congress on Conservation Agriculture, Madrid, 1-5 October 2001 XUL, Cordoba, Spain*

coniugarsi con le aspettative economiche e sociali dei protagonisti del mondo agricolo per realizzare un sistema rurale resiliente al cambiamento climatico e competitivo nel mercato.

Il settore della meccanica agricola italiana è leader europeo per alcune categorie di macchine e la competizione passa tramite l'innovazione di prodotto.
La sfida è sviluppare soluzioni che integrino meccanica e digitale (in ottica ISO-BUS), funzionali a risparmiare input e adatte a contesti aziendali e pedologici differenti, al fine di gestire in maniera più efficiente e sostenibile ogni fase della coltivazione, favorendo l'adozione delle tecniche di precisione.

Ci sono già esempi virtuosi e grazie a specifici incentivi è cresciuto il mercato delle macchine innovative ma la loro reale applicazione ed impiego sono ancora limitati sia per motivi "culturali" che per la necessità che tali macchine mostrino livelli di affidabilità ed efficienza elevate e ci siano operatori in grado di sfruttarne appieno le loro potenzialità.

La varietà dei suoli e delle colture italiane ha favorito lo sviluppo di soluzioni meccaniche ad hoc per i diversi contesti, che hanno poi trovato eco e mercato anche oltre i confini extraeuropei. Mantenere la leadership nel settore significa crescere innovando l'offerta di macchine e soluzioni sempre più performanti e capaci di integrarsi con le tecniche di precisione.

Tutto questo deve allinearsi con l'obiettivo della gestione della fertilità dei suoli che passa necessariamente attraverso la conservazione della sostanza organica presente nel suolo e l'incremento della sua quantità attraverso l'introduzione di ammendanti e di fertilizzanti organici, o organo-minerali di qualità, formulati per la specifica coltura e suolo. In questo settore si osserva una grande crescita dell'offerta di prodotti che vanno sotto il nome di Soil Improvers o Ammendanti che provengono da percorsi di bioeconomia circolare collegati ai settori agri-

colo-zootecnico ed agroalimentare tramite la valorizzazione di sottoprodotti o residui di coltivazioni o processi di produzione, sia dopo compostaggio che digestione anaerobica o pirolisi[51].

Vi sono per esempio ammendanti innovativi che usano molecole da materia prima vegetale il cui comportamento risulta simile ad un fiocco di argilla, ed il cui effetto è di migliorare la capacità di scambio cationico del suolo, promuovere lo sviluppo radicolare, l'assorbimento dei nutrienti e l'efficienza nella fertilizzazione, nonché un'ottimizzazione delle risorse idriche. Tali prodotti possono essere combinati in maniera efficace con i fertilizzanti innovativi, sempre a base biologica, come quelli di quarta generazione che agiscono a livello nutrigenomico[52].

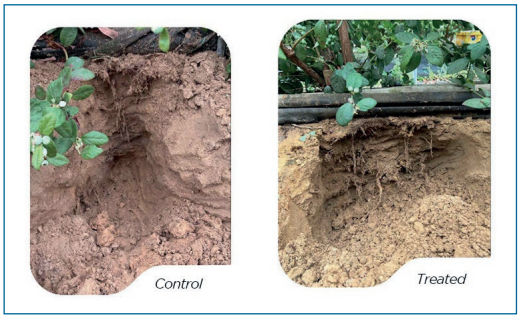


Figura 14 : esempio di applicazione di una combinazione di innovativi ammendanti e fertilizzanti che agiscono a livello nutrigenomico. Pianta di mirtillo coltivata su terreno sabbioso, con elevata permeabilità ma limitata capacità di trattenere sostanze nutritive e acqua. Si osserva una maggiore esplorazione delle radici nel campione trattato (fonte: Baic Agro Italia)

Il rafforzamento e lo sviluppo di filiere nazionali di produzione di ammendanti organici per fini agricoli è elemento centrale sia nelle politiche di qualità che di sostenibilità ma anche di adattamento ai cambiamenti climatici. I quasi 7 milioni di ettari di superfici a seminativo del nostro paese insieme ai quasi 2 milioni di ettari di colture arboree rappresentano un mercato importante per ammendanti o fertilizzanti organici o organo minerali la cui domanda è in crescita, anche alla luce della forte dipendenza dei concimi minerali dal costo dell'energia che ha

[51] *Si veda ad esempio il Progetto Horizon Europe DeliSoil: Delivering safe, sustainable, tailored and societally accepted soil improvers from circular food production processes for boosting soil health*

[52] *Attività di ricerca e innovazione sui sistemi Viacqua+ di BAIC Agro Italia.*

visto negli ultimi anni incrementi molto elevati del costo dell'unità di azoto di origine sintetica. Sia nel settore meccanico che delle biotecnologie per il suolo vi sono già soluzioni virtuose giunte sul mercato ma il parco circolante delle macchine italiane vetusto ed il costo ed approvvigionamento dei biofertilizzanti ne limitano l'impiego.

Rilevanza

Come già sintetizzato nelle motivazioni l'insieme di soluzioni integrate di AC contribuisce agli obiettivi ambientali energetici ed anche sociali sia a livello europeo che planetario.

La sostituzione delle tecniche tradizionali (aratura, operazioni singole, fertilizzazione minerale) con le soluzioni integrate di AC consentono risparmi di energia fossile, di tempo e la diminuzione delle emissioni di CO_2, dirette ed indirette, con benefici accessori relativamente alla prevenzione del compattamento del suolo, ai processi erosivi ed alla miglior gestione aziendale dei tempi delle operazioni, anche in relazione alle condizioni meteorologiche, vantaggi per la tempestività delle operazioni in relazione alle esigenze specifiche della coltura. Se correttamente condotte non comportano alcun rischio in relazione al principio del DNSH (*Do No Significant Harm)*.

Relativamente agli SDGs ONU vi sono molteplici relazioni positive soprattutto con gli SDGs 2, 12, 13 e 15 relativi alle azioni sulla produzione di cibo, i sistemi di produzione e di consumo più sostenibili, la diminuzione delle emissioni climalteranti e la vita sulla terra.

1) Transizione verso un'economia circolare:

L'agricoltura ha necessità di sostanza organica (S.O.) di qualità per mantenere e/o migliorare le caratteristiche chimiche, fisiche e microbiologiche del suolo sostituendo il tradizionale letame con prodotti, ottenuti da scarti animali o vegetali, a più alto valore aggiunto, o da digestati. L'uso di sottoprodotti agroalimentari

attiva circuiti di recupero e riuso dei nutrienti della fertilità in sostituzione di torbe e/o di prodotti importati. In ultima analisi è lo stesso settore agroalimentare che ne beneficia ed a sua volta fornirà nuovamente scarti idonei per sostenere il ciclo. La presenza degli elementi della fertilità nei prodotti di origine agroalimentare diminuisce la richiesta di concimi chimici di sintesi il cui costo economico, energetico ed ambientale è molto elevato.

La produzione di ammendanti organici grazie alle avanzate tecniche di microbiologia consente oggi di aumentare il valore fertilizzante di un semplice sottoprodotto compostato o digerito, tramite l'aggiunta di consorzi microbici *ad hoc* che ne aumentano la qualità e promuovono la crescita sana delle piante e la ricerca mette a punto consorzi specifici per suoli e/o colture diverse.

Oltre a chiudere i cicli dei nutrienti lo sviluppo del settore può beneficiare di azioni di valorizzazione in cascata andandosi ad integrare con i processi di recupero di sostanze ad alto valore aggiunto o con i processi di digestione anaerobica.

2) Prevenzione e riduzione dell'inquinamento:

Lo sviluppo e la diffusione delle tecniche integrate di AC conducono ad una riduzione delle emissioni di GHG, alla protezione del suolo ed alla sicurezza alimentare. In particolare, l'uso di macchine più leggere, una minore profondità di lavorazione e operazioni combinate e quindi la diminuzione del numero di passaggi in campo per svolgere le operazioni colturali genera una riduzione significativa dei consumi di gasolio agricolo e quindi delle emissioni dirette cui si associa una riduzione delle emissioni indirette poiché disturbando il suolo al minimo si diminuiscono i processi di ossidazione della sostanza organica ed emissione di CO_2. In prove condotte su seminativi nel Nord Italia[53] si sono ottenute riduzioni tra il 40% ed il 60% dei consumi di gasolio e simulazioni decadali hanno mostrato una stabilità o accumulo di S.O. nel suolo in determinate condizioni. Quando le macchine sono dotate di guida assistita e la distribuzione degli input avviene a

[53] *Si veda il Progetto AGRICARE (LIFE13 ENV IT 00583). Introducing innovative precision farming techniques in AGRIculture to decrease CARbon Emissions. LIFE Policy and governance.*

rateo variabile si possono ottenere ulteriori efficienze sia nel consumo di gasolio che nel consumo di concimi minerali generando ulteriori benefici ambientali[54].

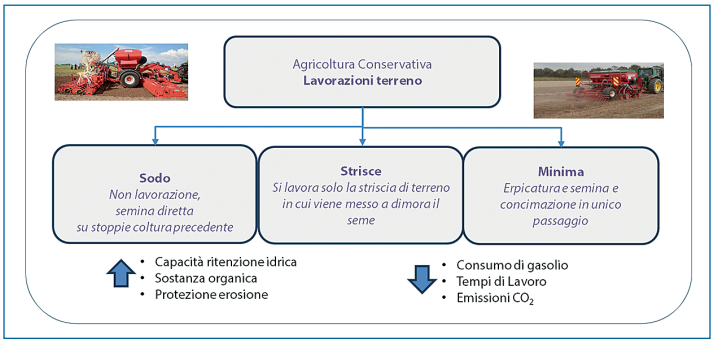


Figura 15 : Tecniche di lavorazione conservativa e benefici attesi, ed esempio di macchina combinata per minima lavorazione superficiale (sx) e macchine per semina diretta su sodo (dx) (fonte: ENEA)

Lo sviluppo e l'impiego di ammendanti prodotti da processi di economia circolare insieme all'impiego delle colture di copertura contribuisce sia all'accumulo di Sostanza Organica nel suolo che alla parziale sostituzione di fertilizzanti minerali o organo-minerali generando ulteriori benefici ambientali. L'impiego di ammendanti prodotti a partire dai prodotti di scarto agroalimentari genera ulteriori vantaggi per una valorizzazione in cascata dei sottoprodotti e residui evitandone la dispersione impropria o impieghi meno efficienti.

3) Transizione digitale: L'insieme di queste tecniche, per una loro corretta, precisa ed efficace applicazione, di avvantaggiano della disponibilità di dati e della loro elaborazione a basso costo grazie a sensori a bordo delle trattrici, informazioni dalla costellazione di satelliti europea SENTINEL, sistemi di posizionamento, mappe digitali del terreno e delle colture e del dialogo continuo tra trattrice e macchina operatrice tramite lo standard ISOBUS. L'ampliamento delle applicazioni in agricoltura di tali soluzioni contribuisce a spingere le aziende agricole verso l'innovazione digitale e lo sviluppo di applicativi e servizi ai fini di migliorare la conoscenza delle relazioni suolo, pianta, clima e pratiche agricole per raggiungere

[54] *Buone pratiche LIFE - AGRICARE*

gli scopi produttivi e quelli ambientali e rendere il nostro sistema produttivo più capace di competere. Il diminuito costo dei sensori e dei sistemi di acquisizione, raccolta ed elaborazione dati consente nuovi modelli produttivi basati sulla conoscenza del complesso sistema Pianta, Suolo, Clima ed una migliore gestione aziendale con alcuni applicativi che si affacciano sul mercato.

De fatto i principi dell'agricoltura di precisione trovano concreta applicazione grazie da un lato allo sviluppo delle tecnologie e dall'altro dallo sviluppo di sistemi capaci di integrare dati di fonti differenti per gestire meglio le colture.

Stato dell'arte

Nel nostro paese negli ultimi anni si è assistito ad un rapido incremento nella disponibilità sul mercato di prodotti innovativi sia per le operazioni colturali che per la gestione della fertilità.

Il settore meccanico e quello della bioeconomia hanno mostrato una notevole capacità di innovazione di prodotto e le fiere di settore hanno mostrato un panorama di realtà imprenditoriali, medio-piccole, con proposte proprie ed originali (Fiera EIMA[55]). Alcune recenti misure legislative incentivanti hanno favorito l'acquisto di macchine dotate di tecnologie moderne e più efficaci (Agricoltura 4.0) ed evidenziato una eterogeneità di soluzioni allineata alla eterogeneità del nostro sistema produttivo. Pur se non vi sono dati ufficiali si valuta che almeno 380.000 ettari di superfici in Italia siano coltivate secondo i dettami della AC[56]; sempre pochi se comparati con i circa sette milioni di ettari di Superficie Agricola Utilizzata (S.A.U.) a seminativi mentre a fronte della aumentata vendita di tecnologie per l'agricoltura di precisione non si conosce il numero di ettari condotti con tale approccio.

Il nostro sistema imprenditoriale appare comunque dinamico ma estremamente frammentato e, se escludiamo alcuni brand, poco capace di muoversi in un mer-

[55] https://www.eima.it/it/novita-tecniche-eima-2024.php

[56] *Troccoli, A.; Maddaluno, C.; Mucci, M.; Russo, M.; Rinaldi, M. Is it appropriate to support the farmers for adopting conservation agriculture? Economic and environmental impact assessment. Ital. J. Agron. 2015, 10, 169–177*

cato internazionale dove nel settore delle **macchine operatrici** deve competere con produttori americani e tedeschi di rilievo. È da rilevare il fatto che una delle manifestazioni internazionali più importanti del settore (EIMA) si tiene in Italia nonostante il mercato italiano delle macchine sia estremamente limitato nei numeri. Questo avviene perché l'industria meccanica italiana è in grado di rispondere rapidamente con soluzioni *ad hoc* alla varietà di condizioni pedologiche, colturali e contesti aziendali del nostro Paese, soluzioni che sono estremamente apprezzate in molti altri paesi.

Nel settore della **bioeconomia** legata al comparto suolo non vi sono dati che permettono di valutarne l'adozione reale e l'impiego sui terreni e sulle colture, ma è certo che le statistiche ISTAT dei fertilizzanti ed ammendanti mostrano trend di sviluppo rilevanti per alcune categorie di prodotti organici innovativi ed in particolare per i biostimolanti. L'aumento delle superfici gestite in regime biologico è un altro indicatore di un aumentato ricorso a sistemi alternativi di gestione della fertilità tramite l'impiego di ammendanti e fertilizzanti esclusivamente organici e l'Italia in questo campo è tra i leader europei.

Indicatori di impatto

Al momento i dati disponibili non consentono una lettura precisa dei fenomeni di nostro interesse ma vi sono fonti utili che producono periodicamente dati che potranno aiutare a monitorare alcuni specifici aspetti:

- Superfici agricole sulle quali sono adottate le tecniche di agricoltura conservativa (dati di sintesi dei piani di sviluppo rurale delle Regioni).

- Numero di macchine operatrici vendute per realizzare la semina su sodo o il minimum tillage (dati Federunacoma).

- Vendita di fertilizzanti e ammendanti organici attraverso le voci statistiche dell'indagine ISTAT sulla distribuzione annuale in Italia di Fertilizzanti.

Sul piano ambientale alcune delle soluzioni proposte hanno ricadute ambientali positive e potranno trovare espressione nelle azioni di carbon farming e dei processi di certificazione di aziende agricole e agroalimentari che adottano soluzioni che aumentano lo stock di carbonio nel suolo attraverso azioni di agricoltura conservativa e gestione della sostanza organica.

Al momento i settori che abbiamo sopradescritto appaiono sostanzialmente separati (meccanizzazione, elettronica, biofertilizzanti) e indipendenti. Al di là di pochi players nazionali, che operano a livello internazionale, la sfida dell'integrazione rischia di essere persa a favore di sistemi e standard prodotti da players di altri paesi. Su questo aspetto certamente sono necessari investimenti e una cooperazione pubblico-privato, anche per mettere a punto sistemi standardizzati, perché le imprese agricole dovranno necessariamente disporre di sistemi di facile impiego e di limitata manutenzione. In particolare, in analogia allo standard ISOBUS per le macchine operatrici, è necessario uno sforzo comune di settore per una standardizzazione e ampia interoperabilità dei sistemi di navigazione, acquisizione e storage dati.

Risorse economiche necessarie

Il dato economico, per una soluzione così ampia e articolata non è facilmente stimabile, si tratta infatti non tanto dello sviluppo di una soluzione specifica tecnologica ma di creare un sistema di soluzioni integrate che permetta alle imprese agricole di adottare nuovi modelli di gestione integrata del suolo e delle coltivazioni che comprendonio le lavorazioni così come le semine e le concimazioni.

Si può ipotizzare una fascia di investimento tra i 10 ed i 30 milioni di euro per lo sviluppo di soluzioni meccatroniche quali nuove attrezzature (software e hardware) e sensori per la gestione ottimizzata delle operazioni colturali.

Il settore dei biofertilizzanti, invece, può avvalersi delle innovazioni meccatroniche per una migliore e più precisa distribuzione al campo, integrando le tecniche dell'agricoltura di precisione e ottimizzandone così l'impiego, mentre è necessario un maggior impegno per ampliare la disponibilità di prodotti innovativi biobased nei quali le matrici organiche sono integrate con consorzi microbici ad hoc capaci di conferire un valore aggiunto al prodotto per usi specifici. In questo caso il livello di investimento atteso (per progetti di ricerca pubblico-privato focalizzati su specifiche colture e contesti pedoclimatici) può aggirarsi intorno ai 3-5 milioni di euro.

TECNOLOGIE PER LA VALORIZZAZIONE DELLE ACQUE REFLUE

Le acque reflue si configurano come una fonte sempre più rilevante di preziose risorse di recupero, tra cui acqua pulita, elementi fertilizzanti, sabbie, olii e grassi, materiali grigliati, sostanza organica, cellulosa ed energia, in linea con i principi di efficienza e circolarità.

Lo sviluppo e l'implementazione di tecnologie volte alla valorizzazione di acque reflue è di fondamentale importanza in un Paese come l'Italia contraddistinto da limitate risorse minerarie e naturali, dalla scarsità di risorse idriche e da una più frequente esposizione agli impatti dei cambiamenti climatici.

Si distinguono diverse famiglie di tecnologie volte alla valorizzazione delle acque reflue, e all'interno di ciascuna sono presenti diverse tipologie di trattamento, alcune già consolidate e più agevolmente implementabili, altre invece con carattere innovativo, che richiedono valutazioni strategiche relative a costi, rischi e al potenziale di mercato.

Motivazione per lo sviluppo

Le necessità legate alle crescenti pressioni antropiche, alla scarsità delle materie prime critiche, ai delicati equilibri tra risparmio energetico e raggiungimento di elevate qualità allo scarico, nonché agli effetti sempre più evidenti dei cambiamenti climatici, impongono un cambio di paradigma per il settore della depurazione delle acque reflue verso approcci integrati in grado di coniugare le esigenze depurative con la valorizzazione delle acque reflue anche in funzione delle priorità del territorio in cui l'impianto di depurazione è ubicato.

Il trattamento delle acque reflue oggi non può essere disconnesso da una visione sostenibile e strategica che preveda una loro valorizzazione, nell'ambito di un rinnovato approccio che vede gli impianti di depurazione come moderne bioraffinerie urbane.

I sistemi e i processi di trattamento delle acque reflue comunemente impiegati in ambito sia municipale che produttivo offrono rilevanti margini di efficientamento sia dal punto di vista ambientale che economico, coniugando l'esigenza di conseguimento degli standard di qualità richiesti allo scarico, con i principi di efficienza e circolarità.

In linea con la Strategia Nazionale per l'Economia Circolare[57], nel settore idrico occorre definire nuovi strumenti normativi, autorizzativi e fiscali, per potenziare i percorsi circolari e creare un mercato delle materie di recupero che risulti competitivo in termini di disponibilità, purezza dei prodotti, prestazioni, costi e accettazione del consumatore, oltre all'adeguamento infrastrutturale e tecnologico.

Gli attuali casi di successo di valorizzazione di materie di recupero sono presenti in nicchie di mercato dove l'industria e i gestori del servizio idrico hanno dato vita a forme innovative di collaborazione pubblico-privato tra settori economici e industriali complementari e simbiotici.

Rilevanza

Le acque reflue, così come i fanghi di depurazione generati dal loro trattamento, contengono una notevole quantità di risorse potenziali che è possibile estrarre e recuperare negli impianti di depurazione in ottica di bioraffineria, in linea con il Piano d'azione Europeo per l'Economia Circolare e contribuendo al conseguimento degli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile (in particolare SDG6) promossi nell'Agenda ONU 2030. Una loro valorizzazione contribuisce al contempo alla lotta alla scarsità idrica e all'attenuazione degli impatti ambientali negativi delle acque reflue sui componenti ambientali, perseguendo gli obiettivi legati alla transizione ecologica.

In accordo con le attuali proposte di adeguamento normativo sia in ambito europeo che nazionale, occorre dunque favorire l'implementazione di nuovi approcci

[57] *TMITE, 2022: Strategia Nazionale per l'Economia Circolare.*

gestionali e l'uso di tecnologie innovative finalizzati alla sostenibilità di lungo termine, ponendo in primo piano:

i) Il riutilizzo delle acque depurate (es. per scopi irrigui);
ii) La valorizzazione di materie di recupero;
iii) L'efficienza e la neutralità energetica, garantendo al contempo il mantenimento delle capacità depurative del processo di trattamento, anche in relazione ai cosiddetti contaminanti emergenti che vengono inclusi dalle nuove normative in fase di definizione tra i parametri di qualità allo scarico.

Oltre alla valorizzazione delle acque reflue, la gestione sostenibile degli impianti di depurazione non può prescindere da implementare misure quali il monitoraggio alla fonte, l'ottimizzazione nell'uso dei reagenti chimici, il monitoraggio e la riduzione delle emissioni dirette di gas climalteranti (es. N_2O) e l'efficientamento energetico, in linea con il principio dell'energy neutrality introdotto nella nuova direttiva del Parlamento europeo e del consiglio n. 2024/3019 del 27 novembre 2024 concernente il trattamento delle acque reflue urbane[58]. Infine, la valorizzazione delle acque reflue non può prescindere dalla progressiva digitalizzazione del settore, fondamentale per visualizzare, monitorare, programmare e gestire il funzionamento dei depuratori in linea con il fabbisogno e le esigenze locali e nazionali.

Stato dell'arte

In Italia, secondo i dati più recenti (censimento del 2020[59]) gli impianti di depurazione delle acque reflue urbane in esercizio sono 18.042 e coprono, in modo completo o parziale, il 96,3% dei comuni italiani. Tuttavia, solo il 56% delle acque reflue nazionali è trattato in conformità con la vigente direttiva UE di riferimento (Council Directive 91/271/EEC), causa questa di una serie di procedimenti sanzionatori da parte dell'Unione Europea. Tale percentuale si colloca notevolmente al di sotto della media dell'Unione Europea, attestata al 76%, confermando la situazione critica in cui versa il settore della depurazione italiano[60].

[58] *Directive - EU - 2024/3019 - EN - EUR-Lex.*

[59] *ISTAT - CENSIMENTO DELLE ACQUE PER USO CIVILE – Anno 2020. Data di pubblicazione: 29/12/2022.*

[60] *WISE Freshwater, Country profiles on urban waste water treatment.*

Solo il 43,7% degli impianti in esercizio è costituito da impianti secondari o avanzati, mentre il 56,3% è composto da impianti primari e vasche Imhoff. A questo quadro va aggiunto il fatto che, nonostante molte tecnologie per la valorizzazione delle acque reflue possano considerarsi mature, la loro implementazione in scala reale è ancora molto limitata a livello sia nazionale che estero. Basti pensare che in Italia, sebbene il potenziale di riutilizzo idrico raggiunga il 23% del volume degli effluenti, corrispondente alla quota di acque reflue che viene sottoposta a trattamenti di affinamento terziario[61], solo il 5% del totale delle acque reflue depurate è effettivamente destinato a riutilizzo diretto[62], ai sensi della normativa vigente[63].

Le tecnologie per la valorizzazione delle acque reflue possono essere suddivise in una serie di famiglie a seconda dell'obiettivo finale:

Tecnologie per il recupero di materia da trattamenti primari

Esistono diverse tecnologie finalizzate al recupero di materia da trattamenti primari; tra questi ve ne sono alcuni consolidati e più facilmente implementabili come:

- Il recupero di grigliati (CER 19.08.01) dalla fase di grigliatura mediante sistemi di lavaggio del grigliato e compattatori che consentono la valorizzazione del grigliato come co-substrato per la digestione anaerobica o come Combustibile Solido Secondario (CSS), oltre che il recupero di sostanza organica biodegradabile dall'acqua di lavaggio;
- Il recupero di sabbie (CER 19.08.02) dalla fase di dissabbiatura mediante sistemi di lavaggio e classificazione che permettono la valorizzazione come materiale inerte nei cementifici e nell'industria dei laterizi, o come terreni di copertura;
- Il recupero di oli e grassi (CER 19.08.10) dalla fase di disoleatura per una

[61] *ENEA, Fronteggiare la siccità: il riutilizzo delle acque reflue depurate in agricoltura, 2023. DOI 10.12910/EAI2023-011.*

[62] *UTILITALIA, Il riutilizzo delle acque reflue in Italia, 2022.*

[63] *D.M. 185/2003, Regolamento 2024/1765/Ue.*

loro valorizzazione energetica mediante co-digestione anaerobica o valorizzazione agronomica mediante compostaggio, previa miscelazione con altro materiale.

Tra le tecnologie emergenti rientrano quelle che consentono il recupero di sostanza organica e cellulosa dalla sedimentazione primaria (es. concentratori avanzati, setacci a maglia fine, filtri a nastro rotante). L'implementazione di tali tecnologie va valutata in funzione:

- Dei conseguenti impatti in linea acque e linea fanghi;
- Dei quantitativi di cellulosa presenti nei reflui municipali (che dipendono dalla lunghezza del sistema fognario);
- Del contesto normativo e autorizzativo (es. sottoprodotto, end of waste);
- Della possibilità di definire un mercato e della necessità di un know-how specifico.

La cellulosa recuperata, oltre al potenziale utilizzo in digestione anerobica per la produzione di biogas, può essere utilizzata come agente rinforzante per i materiali da costruzioni o per l'asfalto, come materia prima per l'industria della pasta di carta, come biocombustibile previo essiccamento, oltre che per la produzione di acidi volatili grassi (VFA) e bioplastiche.

Un esempio di impianto pilota per il **recupero di cellulosa** dalle acque reflue è stato implementato dal Gruppo CAP nel 2020, presso l'impianto di depurazione di Truccazzano (MI), per la produzione di compositi e biopolimeri nell'industria di plastica e bioplastica, e nella produzione di materiale da costruzione come l'asfalto stradale (Figura 16).

Il recupero di sabbie esauste dei processi di dissabbiatura come End of Waste, ai sensi dell'art. 208 del D.Lgs. 152/2006, è stato implementato presso l'impianto di

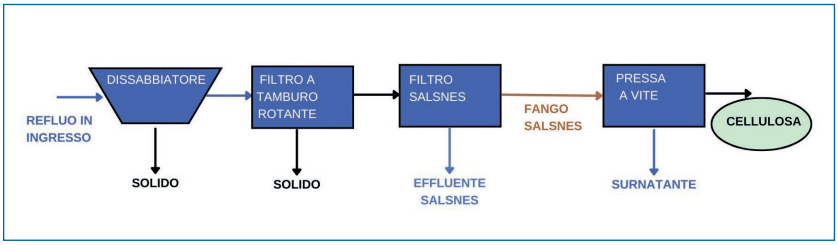


Figura 16 : Schema dell'impianto pilota di Truccazzano (MI) per il recupero della cellulosa

Robecco sul Naviglio (MI) dal Gruppo CAP: l'impianto ha una potenzialità attuale di ricezione di 10 ton/d (Figura 17), ed è in attesa di essere autorizzato al trattamento fino a 48 t/d.

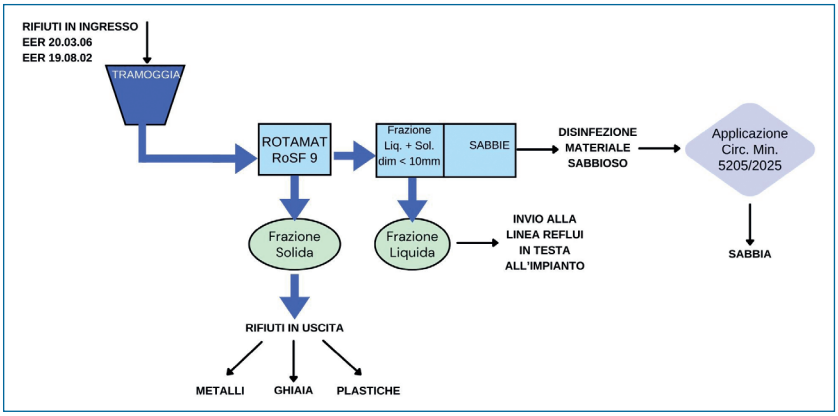


Figura 17 : Schema dell'impianto di Robecco sul Naviglio (MI) per il recupero di sabbie esauste dei processi di dissabbiatura

L'ottimizzazione della **gestione dei grigliati** prodotti dagli impianti di depurazione delle acque reflue è un tema che è stato affrontato dal Gruppo Acea, con la sua controllata Acea Infrastructure.

A seguito di attività sperimentali portate avanti a scala di laboratorio in collaborazione con l'Università la Sapienza - Dipartimento di Chimica, è stata verificata la

capacità di produzione di biometano da grigliati[64] e sono stati sviluppati diversi scenari di gestione dei grigliati, confrontati in termini economici e di riduzioni di emissioni di CO_2.

Processi biologici innovativi per la rimozione dell'azoto

I trattamenti biologici permettono, attraverso reazioni di ossidazione/riduzione mediate dalle comunità batteriche, l'intercettazione e l'inglobamento dei solidi e la riduzione o rimozione dei nutrienti e dei composti organici e inorganici presenti nelle acque reflue. Dagli anni '70 del 1900, il processo convenzionale a fanghi attivi (CAS) è il processo biologico più largamente diffuso negli impianti di depurazione per la rimozione della sostanza organica. Esso è stato sviluppato e integrato nel corso di decenni per incorporare la nitrificazione/denitrificazione per la rimozione dell'azoto e per migliorare la rimozione biologica del fosforo. Tuttavia, la produzione di grandi quantità di fanghi e gli elevati consumi energetici dei sistemi a fanghi attivi, anche legati al processo di nitrificazione, hanno portato allo sviluppo di diverse tecnologie innovative. Tra le tecnologie emergenti vanno citati:

- I sistemi che prevedono la conduzione dei processi di nitrificazione e denitrificazione mediante logiche di controllo automatizzate che permettono di monitorare il processo e ottimizzarne i consumi energetici, sia in reattori convenzionali (CSTR) sia in reattori sequenziali (SBR), a membrana (MBR), a biomassa adesa (MBBR);
- Il sistema a fanghi granulari aerobici (AGS), che vanta la capacità simultanea di nitrificazione e denitrificazione, la capacità di resistere a tossicità e carichi d'urto, un minore fabbisogno energetico, e una migliore sedimentabilità;
- I processi via nitrito o il processo combinato nitritazione/anammox per reflui con bassi rapporti COD/N. Entrambi permettono di diminuire i consumi energetici legati alla fornitura di ossigeno, diminuire la produzione di fango di supero e l'eventuale dosaggio esterno di carbonio a

[64] *Valorisation of residues from municipal wastewater sieving through anaerobic (co-)digestion with biological sludge, Maria Rosaria Boni, Alessandra Polettini, Raffaella Pomi, Andreina Rossi, Alessandro Filippi, Giancarlo Cecchini, Alessandro Frugis, Simone Leoni, https://doi.org/10.1177/0734242X211028449.*

supporto del processo di denitrificazione.
- Il trattamento aerobico algale-batterico, che vanta maggiori resistenze alla salinità e consente notevoli risparmi energetici.

L'ottimizzazione dei cicli di denitrificazione e nitrificazione mediante controllori di processo è stata implementata nella quasi totalità delle sezioni biologiche degli impianti gestiti dal Gruppo CAP. I controllori possono essere di terze parti o elaborati internamente dal gestore.
Un esempio di sistema a *fanghi granulari* aerobici (AGS), associato ad un controllore delle fasi di aerazione per incrementare le rese di rimozione dell'azoto, è implementato in scala reale presso l'impianto di Robecco sul Naviglio (MI) ed è in esercizio dal 2024.
Una sperimentazione in scala reale della tecnologia **Granular Sequencing Batch** Reactor (GSBR) è stata avviata anche dal Gruppo ACEA nel 2020 presso alcuni depuratori urbani.
Un esempio di **processo di parziale nitritazione/anammox** è invece implementato in scala reale presso l'impianto di depurazione di Lavis (TN) in un reattore di tipo SBR per il trattamento del percolato vecchio di discarica.
Nell'ambito del progetto 1.6 del programma nazionale "Ricerca di Sistema elettrico -PTR 19-21", l'ENEA, in collaborazione con l'Università di Trento, l'Università Federico II di Napoli e l'Agenzia per la Depurazione della Provincia Autonoma di Trento, ha potuto effettuare simulazioni matematiche del processo mettendo in evidenza le opportunità di ottimizzazione del processo, sia in termini depurativi che energetici.

Tecnologie di recupero dei nutrienti dell'azoto

Attualmente sono disponibili molteplici tecnologie finalizzate al recupero dei nutrienti, quali azoto e fosforo, dalle acque reflue e, in particolare, dai surnatanti della linea fanghi, con la possibilità di riduzione del carico di nutrienti ricircolato in linea acque, di circa il 20% per quel che concerne l'azoto in particolare, in accordo

al nuovo Regolamento UE sui prodotti fertilizzanti[65].

Tra le tecnologie con un maggior livello di maturità e che prevedono il recupero dell'azoto come prodotto specifico vi sono ad esempio lo strippaggio con aria e l'uso di membrane idrofobiche in PTFE per la produzione di solfato d'ammonio [$(NH_4)_2SO_4$]. Una tecnologia che consente invece il recupero contestuale di azoto e fosforo è la precipitazione della struvite [$(NH_4)\ MgPO_4{\cdot}6(H_2O)$]. Altre tecnologie per il recupero del fosforo dalla fase liquida sono i processi di separazione selettiva (Scambio Ionico) e i processi elettrochimici.

Il recupero del fosforo dalle acque reflue è di notevole interesse, seppur a oggi non economicamente vantaggioso, perché inserito nell'elenco delle "Critical Raw Materials" redatto dalla Commissione europea[66]. Invece, il recupero dell'azoto dalle acque reflue appare importante nel settore agronomico e anche industriale, dove si registra, tra l'altro, un crescente interesse verso tecnologie che consentono la produzione di idrogeno dall'ammoniaca recuperate dalle acque reflue (es. elettrolisi dell'ammoniaca a bassa temperatura e sistemi bioelettrochimici).

Uno studio di fattibilità tecnico-economica su due impianti (di cui uno in Italia), per la **produzione di idrogeno (mediante tecnologia di plasmalisi) dall'ammoniaca** recuperata dai surnatanti provenienti dalla disidratazione dei digestati prodotti dalla digestione anaerobica di un fango civile è attualmente in corso nell'ambito del progetto europeo LIFE GreenH2Orn, iniziato a settembre 2024 da parte di Acea e dalla sua controllata Acea Infrastructure. Lo studio è portato avanti con la collaborazione di altri sette partner internazionali.

Trattamenti di filtrazione e disinfezione per il riutilizzo agricolo

In linea con il Regolamento delegato (UE) 2024/1765 della Commissione[67], che definisce le prescrizioni minime per il riutilizzo dell'acqua ai fini irrigui in agricoltura secondo un approccio basato sull'analisi di gestione del rischio, si prevede

[65] *Regolamento Ue 2019/1009 sui prodotti fertilizzanti, in vigore in Italia dal 16 luglio 2022.*

[66] *Bruxelles, 3.9.2020 COM(2020) 474 final.*

[67] *Decreto dell'11 marzo 2024, entrato in vigore il 10 luglio 2024; integra il regolamento (UE) 2020/741 in vigore in Italia dal 26 giugno 2023.*

che gli impianti di depurazione siano dotati, oltre ai trattamenti secondari, di trattamenti specifici in funzione della classe di qualità delle acque affinate (che dipende dalla tipologia di coltura da irrigare e dalle relative tecniche irrigue). In particolare, il regolamento prevede trattamenti di filtrazione e disinfezione per le acque che rientrano nella Classe di qualità A, e trattamenti di disinfezione per le acque in Classe B, C, e D.

Tra le tecnologie di filtrazione emergenti e oramai consolidate in larga scala vi sono le tecniche basate su processi a membrana, quali la microfiltrazione, l'ultrafiltrazione, la nanofiltrazione e l'osmosi inversa, e le tecniche basate su altri processi quali i filtri a sabbia, i carboni attivi e i filtri percolatori.

Tra i trattamenti di disinfezione, oltre alla tradizionale clorazione si sono oramai consolidati l'irraggiamento tramite raggi UV, l'utilizzo dell'ozono e l'uso dell'acido peracetico.

Va evidenziato che l'implementazione di trattamenti di filtrazione e disinfezione determina un aumento dei consumi energetici, il che richiede attenzione in termini di efficientamento energetico dell'impianto di depurazione nel rispetto del principio di energy neutrality.

Ulteriore avanzamento tecnologico, seppur non previsto dalla normativa, è lo sviluppo di un sistema di monitoraggio in continuo della qualità delle acque reflue depurate, con particolare riferimento alla componente microbiologica.

Un prototipo completamente automatizzato per il **monitoraggio, il controllo in continuo della qualità degli effluenti secondari e terziari e la regolazione della fertirrigazione** in un campo sperimentale con piante di pesco e piante di pomodoro è stato messo a punto nel 2019 nell'ambito del progetto di ricerca

industriale VALUE CE-IN (VALorizzazione di acque refLUE e fanghi in ottica di economia CircolarE e simbiosi Industriale), coordinato da ENEA, presso l'impianto di depurazione di Cesena.

Trattamenti quaternari per la rimozione dei contaminanti emergenti

La nuova direttiva europea sulle acque reflue urbane (UE 2024/3019) introduce la definizione di trattamento quaternario, ovvero un trattamento aggiuntivo che ha lo scopo di rimuovere quelle sostanze per le quali sino ad oggi non erano previsti obblighi di trattamento (microinquinanti, composti organici di origine farmaceutica o chimica presenti nelle acque, che possono risultare nocivi per la salute umana o per l'ambiente se presenti in concentrazioni elevate o in combinazione con altre sostanze).

Tra le tecnologie innovative rientrano i trattamenti avanzati quali l'ozonolisi, i carboni attivi granulari (GAC), i processi di ossidazione avanzata (e.g. processo Fenton, uso di perossido di idrogeno, uso combinato di diversi agenti ossidanti con gli UV, ossidazione fotocatalitica), la cavitazione (idrodinamica o acustica), i processi basati su fasci di elettroni (electron beam).

Diverse tecnologie AWWT (Advanced Wastewater Treatment) sono state indagate nell'ambito del progetto Horizon 2020 denominato PROMISCES, di cui ACEA è partner con le sue controllate Acea Infrastructure e SIMAM. Nell'ambito del progetto è stato dimostrato che le tecnologie AWWT, se implementate correttamente, riescono a rimuovere la maggior parte dei microinquinanti organici emergenti, mentre risultano poco efficaci nella rimozione dei PFAS (PerFluorinated Alkylated Substances) presenti anche nelle acque reflue a causa del loro vasto impiego in molte applicazioni industriali e domestiche grazie alle loro proprietà idrorepellenti e oleorepellenti. Il potenziale più elevato di rimozione dei PFAS dalle acque reflue sembra essere rappresentato dai filtri GAC o dai sistemi PAC con serbatoi di ricircolo dedicati, compreso il trasferimento del PAC alla fase di trattamento biologico.

Considerando il dibattito internazionale sulla metodologia di rilevamento e misura dei microinquinanti emergenti, diverse realtà in Italia hanno iniziato a monitorare i contaminanti emergenti nelle acque reflue e nei fanghi, sviluppando prototipi di campionamento e metodiche analitiche.

Metodiche di campionamento e analisi di contaminanti emergenti e microplastiche in acque reflue e fanghi sono state recentemente sviluppate da ENEA, nell'ambito del progetto di ricerca industriale VALUE CE-IN.

Uno **screening dei microinquinanti** presenti in ingresso e uscita impianto e in ingresso alle sezioni di disinfezione (UV e acido peracetico) è stato realizzato dal Gruppo CAP negli impianti di Bresso e Peschiera Borromeo (MI) per le valutazioni preliminari in merito al Risk Assesment. Nello studio sono stati rilevati valori dell'80% sotto i LOQ strumentali sia in ingresso che in uscita dagli impianti.

All'interno del progetto U.P.S.T.R.E.A.M, il gruppo CAP svilupperà inoltre un **protocollo di monitoraggio dei quantitativi di microplastiche** e ospiterà campagne analitiche in diverse sezioni degli impianti di trattamento delle acque reflue per l'implementazione di un impianto pilota che testerà la rimozione sia in linea acque che linea fanghi delle microplastiche, con particolare attenzione alle fasi di sedimentazione, primaria e secondaria, e di ossidazione a fanghi attivi. Nell'ambito del progetto sarà valutata la ripartizione delle microplastiche di origine fossile o biologica, a distribuzione granulometrica nota, tra linea acque e linea fanghi, e sarà stimata la potenzialità di utilizzo di bioplastiche nella realizzazione di supporti per impiego in reattori a biomassa adesa a letto mobile (MBBR).

Tecnologie per il recupero di energia

Esistono diverse tecnologie che consentono di recuperare l'energia termica e idraulica delle acque reflue. Le tecnologie ad oggi disponibili prevedono l'installazione di uno scambiatore di calore e di una pompa di calore (COP fino a 4.5).

L'implementazione di tale soluzione può avvenire a scala locale (all'interno dell'edificio), a scala intermedia (lungo i collettori fognari principali), e a larga scala (a valle dell'impianto di depurazione).

Per quello che concerne il recupero dell'energia idraulica è possibile installare microturbine, viti di Archimede o ruote idrauliche lungo le fognature o in corrispondenza degli scarichi degli impianti di depurazione, laddove si sia in presenza di salti idraulici non trascurabili. Ad oggi le microturbine hanno potenze nominali che vanno da 1 kW fino a 250 kW, lavorano con prevalenze minime di 2-3 m, e sono capaci di adattarsi alle variazioni di portata e prevalenza del flusso che le attraversa, mantenendo comunque alto il rendimento. Per entrambe le tecnologie, lo sviluppo di mappe di potenzialità dei sistemi fognari può consentire la visualizzazione immediata delle condotte fognarie o degli impianti di depurazione maggiormente idonei al recupero di energia. Infine, è auspicabile l'integrazione in impianti con fonti di energia rinnovabile (solare, eolica, geotermica, biomasse).

Un'interessante metodologia per valutare la capacità di recupero di energia termica dal sistema fognario attraverso mappe di potenzialità dei siti è stata sviluppata dall'Università degli studi di Bologna nell'ambito del progetto 1.6 del programma nazionale "Ricerca di Sistema elettrico -PTR 19-21" coordinato da ENEA (Figura 18).

Tecnologie di efficientamento energetico

Le tecnologie di efficientamento energetico che è possibile implementare in un impianto di depurazione sono molteplici, e comprendono l'installazione di apparecchiature elettromeccaniche efficienti, dotate di soft – starter e inverter, la selezione di dispositivi e logiche di controllo adeguati e l'implementazione delle relative ottimizzazioni dei parametri per migliorare la resa dall'impianto.

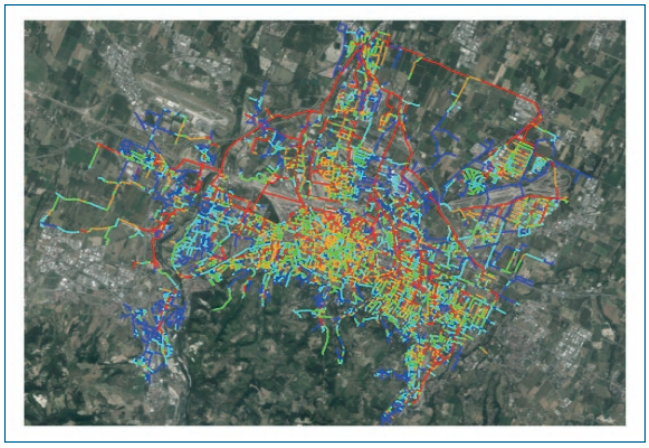


Figura 18 : Schema Rappresentazione dell'indicatore PE (potenzialità energetica) della città di Bologna. Immagine elaborata attraverso il software QGIS

Indicatori di impatto

Lo sviluppo e l'implementazione di tecnologie per la valorizzazione delle acque reflue genera una serie di impatti positivi per il sistema paese Italia.
Tra gli impatti ambientali più significativi è possibile prevedere il recupero di acqua per l'agricoltura o per industrie idroesigenti, contribuendo alla riduzione dello stress idrico, al recupero e al risparmio di energia, al recupero di materie prime seconde (es. ammendanti agricoli, fertilizzanti e altre sostanze utili) e alla riduzione della produzione dei fanghi di depurazione.

È possibile sicuramente prevedere anche un impatto industriale/economico medio-alto per tutte le famiglie di tecnologie individuate, in quanto è possibile attendersi lo sviluppo di nuove realtà societarie e modelli di business, oltre che di nuove competenze e ricadute occupazionali.

Il tema affrontato ha inoltre un forte impatto politico e sociale; esso richiede infatti sia la definizione di ulteriori strumenti normativi, autorizzativi e fiscali

che possano consentire, nel rispetto della disciplina comunitaria e nazionale, la valorizzazione delle acque reflue, sia azioni volte a favorire l'accettabilità sociale delle tecnologie proposte e delle risorse recuperate, promuovendo l'incontro tra domanda e offerta.

Inoltre, va valutata la possibile sinergia attivabile con l'implementazione dell'opzione del riutilizzo delle acque reflue in agricoltura, che consente di non spingere la rimozione dei nutrienti ai livelli richiesti altrimenti dalla direttiva 2024/3019 sul trattamento delle acque reflue urbane (anche se non è chiaro quali limiti sui nutrienti si debbano applicare in caso di riutilizzo), con conseguente risparmio energetico nonché operativo e di revamping impiantistico.

Risorse economiche necessarie

L'implementazione di tecnologie per la valorizzazione delle acque reflue risponde all'esigenza di adeguamento alle nuove normative comunitarie e nazionali in materia di gestione delle acque reflue e di riutilizzo idrico in ambito agricolo, oltre a rappresentare un'opportunità di sviluppo del settore in ottica di economia circolare.
Gli obiettivi fissati dalle normative e le diverse esigenze di ammodernamento e completamento dei cicli depurativi comportano dei corrispondenti fabbisogni di intervento il cui valore economico appare tutt'altro che trascurabile, ponendo al contempo anche una serie di sfide in ambito di pianificazione, valutazioni tecniche, procedure di carattere autorizzativo.

Per dare un'idea dei costi, nell'intero servizio idrico integrato si sta assistendo, grazie all'azione regolatoria, a un rilevante incremento della spesa per investimenti, passata da valori prossimi al miliardo di euro nell'anno 2012 a circa il quadruplo nel 2022 e a 4,5 miliardi di euro del 2023, corrispondenti a circa 69 euro/abitante, avvicinandosi molto alle medie europee[68]. Tale incremento sta favorendo un percorso di miglioramento della qualità del servizio idrico integrato. Secondo una

[68] *ARERA, Relazione Annuale sullo Stato dei servizi e sull'Attività svolta, 2023.*

stima di ARERA il 16,1% degli investimenti interessa il miglioramento della qualità dell'acqua depurata (macro-indicatore M6)[69].

Tra le misure a sostegno del comparto, la misura M2C4 Investimento 4.4 del PNRR, attuata dal MiTE, riguarda l'ammodernamento delle fognature e degli impianti di depurazione, carenti soprattutto nel Mezzogiorno e oggetto di numerose procedure di infrazione comunitaria, e prevede un contributo di 600 milioni per il periodo 2022-2026. Essa non è sufficiente a coprire il fabbisogno del comparto depurativo, ma sta rappresentando uno stimolo per sostenere il settore e contribuire alla risoluzione delle problematiche del Paese.

[69] *ARERA, Relazione Annale – Stato dei Servizi 2022 – Volume 1.*

APPROCCIO INTEGRATO ALLA GESTIONE SOSTENIBILE DEI FANGHI DI DEPURAZIONE

Nell'ambito della depurazione delle acque reflue, una delle principali sfide da affrontare è rappresentata dalla gestione dei fanghi di depurazione, che rappresentano il residuo dei processi depurativi e sono classificati dal punto di vista normativo come rifiuti speciali. L'approccio integrato alla gestione sostenibile dei fanghi di depurazione, che sia in grado di conciliare gli aspetti ambientali a quelli più prettamente economici, è un tema di grande attualità che coinvolge diversi settori, tra cui la depurazione, il waste management, l'agricoltura e l'energia. Questo approccio mira a trasformare la gestione dei fanghi da un mero costo operativo a una reale opportunità, attraverso l'adozione di una visione circolare e sostenibile basata sulle potenzialità di recupero di materia e di energia insite nei fanghi.

L'analisi dei possibili impatti determinati dai fanghi di depurazione impone valutazioni approfondite della scelta dei possibili scenari di gestione. I fanghi di depurazione devono essere diversificati in base alle loro caratteristiche qualitative, al contesto territoriale, tenendo presente la gerarchia dei rifiuti e le possibilità di recupero di energia e materia offerte dall'attuale panorama tecnologico e normativo. Un approccio integrato alla gestione sostenibile dei fanghi di depurazione richiede una collaborazione tra diversi settori, un quadro normativo solido e l'adozione di tecnologie innovative ed efficaci.

Tale nuovo approccio è tanto più necessario in relazione alla nuova direttiva europea sul trattamento delle acque reflue e agli obiettivi di neutralità energetica che essa pone in capo ai gestori del settore della depurazione, obiettivi la cui implementazione può essere supportata anche mediante un'oculata gestione integrata dei fanghi.

Motivazione per lo sviluppo

I fanghi di depurazione sono matrici bifasiche caratterizzate da un certo contenuto di acqua e da sostanze solide, rappresentate soprattutto da materia organica e

nutrienti essenziali, il che ne rende evidente il potenziale di valorizzazione, soprattutto per le applicazioni agricole.

Secondo quanto riportato dalla Direttiva UE 2024/3019 sul trattamento delle acque reflue, l'adozione di misure di monitoraggio per gli scarichi non residenziali, finalizzate a migliorare la qualità delle acque in ingresso agli impianti di depurazione, avrà un impatto positivo anche sulla qualità dei fanghi prodotti e potrebbe incrementare le opportunità di riutilizzo dei fanghi in ambito agricolo. Allo stesso tempo, la crescente preoccupazione per i rischi ambientali a essi legati sta portando all'introduzione di normative che restringono sempre più le possibilità di utilizzo in agricoltura, con l'attesa di ulteriori limitazioni con la revisione dell'attuale Direttiva europea sull'utilizzo dei fanghi in agricoltura (86/278/CEE). Nasce quindi la necessità di esplorare vie alternative di valorizzazione per quei fanghi che non sono adatti allo spandimento o che potrebbero non esserlo più a causa dell'applicazione di normative più severe.

Allo stesso tempo, i principi dell'economia circolare (SEC/2022) e la gerarchia nella gestione dei rifiuti (2008/98/CE, PNGR/2022) richiedono la ricerca di soluzioni per la minimizzazione nella produzione dei fanghi e lo studio di scenari alternativi al loro smaltimento in discarica, conferendo in linea generale una priorità superiore al recupero di materia e, successivamente, al recupero di energia. Il D.lgs. 121/2020, in attuazione della direttiva EU 2018/850 relativa alle discariche, definisce che a partire dal 2030 sarà vietato il conferimento in discarica di tutti i rifiuti idonei al riciclaggio o al recupero. Inoltre, riguardo al conferimento dei fanghi in discarica, stabilisce criteri di ammissibilità sulla base di limiti imposti per parametri del fango e dell'eluato. Infine, all'interno del Sistema Idrico Integrato (SII), lo smaltimento in discarica è scoraggiato da un obiettivo specifico stabilito dall'ARERA, nell'ambito della Regolazione della Qualità Tecnica (RQTI), rappresentato dal macro-indicatore M5, che si focalizza sulla riduzione dello 'Smaltimento dei fanghi in discarica'.

Questo si traduce nella necessità di costruire nuove soluzioni impiantistiche per il trattamento dei fanghi, che possono essere realizzate sia dagli stessi gestori del SII, sul singolo impianto o in hub centralizzati e tali da consentire un trattamento delocalizzato anche per i fanghi prodotti negli impianti di piccola taglia, sia da iniziative private attraverso la realizzazione di piattaforme di trattamento esterne, che sono importanti soprattutto nei contesti caratterizzati da una gestione frammentata del SII.

La necessità di trovare soluzioni di trattamento adeguate è particolarmente urgente soprattutto nel Centro-Sud Italia, dove le difficoltà nella gestione del SII e la scarsa disponibilità di piattaforme per il trattamento fanghi hanno fino ad oggi favorito il trasferimento territoriale di elevate quantità di fanghi, con aggravio delle emissioni e dei costi di trasporto; nel 2021 il Centro e il Sud Italia hanno esportato complessivamente circa 480 mila tonnellate di fanghi verso altre regioni, soprattutto del Nord.

Anche nel resto delle Regioni italiane l'implementazione di una impiantistica diversificata consentirebbe di perseguire soluzioni in grado di assicurare maggior tutela dell'ambiente e della salute, di garantire una migliore pianificazione nella gestione e di stabilizzare un mercato che in passato ha subito notevoli oscillazioni e appare ancora oggi caratterizzato da molta incertezza. Lo sfruttamento di possibili sinergie tra il settore pubblico e quello privato risulta importante anche ai fini della realizzazione, in prospettiva, di hub per il trattamento combinato di fanghi civili e altri rifiuti/matrici provenienti da altri ambiti, come quello urbano (es. FORSU) o industriale (es. scarti agroalimentari), sfruttando le capacità residue di trattamento degli impianti municipali.

È necessario quindi sviluppare un pool di tecnologie di cui poter disporre a seconda della tipologia di fango da trattare, del contesto normativo e autorizzativo (che vede spesso una differente interpretazione da parte dei diversi enti

regolatori rispetto al singolo progetto) e delle simbiosi industriali che è possibile sviluppare nel territorio.

Rilevanza

La gestione integrata dei fanghi di depurazione può avere un impatto significativo su diverse aree della transizione. In primo luogo, la riduzione della produzione dei fanghi all'interno degli impianti di depurazione e la loro gestione sostenibile riduce l'impatto ambientale degli stessi impianti di trattamento.
Il recupero di risorse dai fanghi promuove il riciclo della sostanza organica e nutrienti, riducendo così l'impronta ecologica e contribuendo alla conservazione delle risorse naturali come indicato nello Zero Pollution Action Plan e nella EU Soil Strategy for 2030. Oltre ai nutrienti, dal trattamento dei fanghi è possibile ricavare altre materie prime quali acidi organici, biopolimeri, bio-olio, biocarburanti, ecc.

Nella sua accezione più estesa, la gestione sostenibile dei fanghi contribuisce al:

- Conseguimento degli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile, in particolare i SDG 6, 7, 12 e 13;
- Rispetto delle politiche europee sul clima e sul suolo, alla salute, alla sicurezza alimentare;
- Sostegno all'economia circolare;
- Indipendenza nell'approvvigionamento dei fertilizzanti e delle materie prime critiche;
- Neutralità energetica, riducendo la dipendenza dai combustibili fossili e supportando la transizione verso un sistema energetico più sostenibile;
- Miglioramento delle condizioni ambientali e il benessere delle comunità locali (ad esempio riduzione degli odori);
- Creazione di nuovi posti di lavoro, contribuendo allo sviluppo economico locale.

Stato dell'arte

I fanghi sono ricchi di sostanza organica e di elementi nutritivi, per cui il loro utilizzo in agricoltura, previo trattamento, può essere effettuato come rifiuto (R10), preferibilmente previa stabilizzazione biologica mediante digestione anaerobica, che permette un contestuale recupero di energia grazie alla produzione di biogas/biometano, oppure, qualora il fango cessi la qualifica di rifiuto, producendo un ammendante (compost) o un correttivo (gessi di defecazione) secondo la normativa sui fertilizzanti.

Laddove la qualità del fango non permetta di rispettare i limiti normativi per il recupero in agricoltura, i fanghi possono essere sottoposti a trattamenti termochimici, in grado di favorire in primo luogo una sensibile riduzione della massa di fango da smaltire e tali da consentirne la valorizzazione mediante il recupero di energia e materia (acidi, bioplastiche, nutrienti).

Se da un lato i processi per il recupero di energia sono piuttosto consolidati e risultano vantaggiosi a partire da una determinata taglia impiantistica, quelli che riguardano il recupero di materia appaiono ancora poco sostenibili dal punto di vista economico (es. recupero del fosforo) o si scontrano con barriere normative che ne limitano il riutilizzo (es. char).

Attualmente, l'Italia è il terzo paese per produzione annuale di fanghi municipali, preceduto da Germania e Spagna. Secondo il rapporto Ispra sui rifiuti speciali, riferito ai dati del 2022, in Italia sono stati prodotti 3,2 milioni di tonnellate di fanghi di depurazione civili (EER 190805) di cui il 43,4% destinati al recupero e il 54,2% smaltiti, ovvero inviati a discarica, tal quali o previo trattamento biologico o chimico/fisico (D1/D8/D9), o a incenerimento (D10), con situazioni piuttosto diversificate tra le macroaree. In particolare, del quantitativo totale dei fanghi gestiti, per le operazioni di recupero, lo 0,7% compare come recupero energetico (R1), il 2,9% come recupero in agricoltura (R10), il 31,5% come riciclo di sostanze

organiche (R3). Dai dati si evince come la percentuale dei fanghi destinati a discarica sia ancora alta e sia importante implementare trattamenti che ne favoriscano il recupero di materia e di energia.

Le tecnologie per la gestione sostenibile dei fanghi di depurazione sono diverse. Di seguito vengono elencate le principali:

Processi di minimizzazione della produzione di fanghi in linea acque

In accordo con la scala della gerarchia dei rifiuti, il primo step nella gestione sostenibile dei fanghi è rappresentato dalla riduzione della loro produzione. A tal proposito, diverse tecnologie possono essere implementate direttamente nella linea di trattamento delle acque, riducendo così la quantità di fanghi da trattare. Tale opzione è preferita negli impianti di piccole-medie dimensioni, dove non è presente la digestione anaerobica, e la riduzione dei fanghi è ottenuta mediante trattamenti di tipo meccanico (es. ultrasuoni, cavitazione idrodinamica), chimico (es. ozonolisi), termico (T=90-95°C) e biologico (es. sostituire con OSA - Oxic Settling Anaerobic), che si applicano sulla linea di ricircolo del fango attivo. In impianti dov'è presente un comparto di digestione anaerobica, la riduzione della produzione di fanghi può avvenire all'interno della linea di trattamento fanghi, inserendo un'unità di pre- o post-trattamento alla digestione anaerobica, con contestuale incremento della produzione di biogas.

Esempi di tecnologie di minimizzazione basate su processi biologici sono state implementate a Levico (TN), dove è stato realizzato il processo OSA, e a Marmirolo (MN), dove è stato realizzato il processo UTN.

Altro esempio è dato dall'applicazione, da parte del Gruppo CAP, del processo di ozonolisi su un impianto di ossidazione biologica, nel corso del 2020 all'interno del progetto Perform Water 2030. L'applicazione di tale tecnologia ha consentito di ridurre la produzione di fanghi di supero di circa il 39%, migliorare la sedimen-

tabilità dei fanghi, ottimizzare il processo biologico grazie al contemporaneo trasferimento ad alta efficienza di ossigeno puro nel bulk di ossidazione.

Efficientamento dei processi di disidratazione

I processi di disidratazione dei fanghi permettono di diminuirne il contenuto di acqua e di ridurre il volume di fanghi da gestire nelle operazioni di trattamento a valle o da avviare a smaltimento.
In una linea di trattamento fanghi convenzionale, tra i processi di disidratazione si annoverano:
L'ispessimento (collocato generalmente a monte della fase di stabilizzazione biologica), solitamente di tipo gravitazionale, che permette di raggiungere, a seconda della tipologia di fango trattato, tenori di secco dall'1% al 5%.

Tra le tecnologie di ispessimento emergenti vanno citati i sistemi di ispessimento dinamico quali le presse a vite. Queste permettono di ottenere una percentuale di solidi totali intorno al 6-7%, migliorando significativamente i tenori di secco che si raggiungono con l'ispessimento statico e permettendo di ottimizzare il dimensionamento e il bilancio energetico dell'unità di stabilizzazione dei fanghi posta a valle.

La disidratazione (collocato a monte dello smaltimento finale), permette di raggiungere tenori di secco che vanno dal 15% al 25%. Alcuni impianti prevedono un ulteriore step di disidratazione mediante tecnologie di essiccamento, che consentono di raggiungere tenori di solidi fino al 95%. Quest'ultimo processo appare particolarmente importante per ottimizzare la progettazione e la gestione delle unità di trattamento quali l'incenerimento, la pirolisi e la gassificazione.

Tra le tecnologie emergenti per l'essiccamento, il bio-essiccamento è una tecnologia in cui l'essiccamento del fango avviene in parte grazie alla produzione di calore derivante dal naturale processo di degradazione batterica del materiale

organico; ciò permette un risparmio importante sull'energia termica impiegata nel processo rispetto a un essiccamento termico tradizionale. A partire dal 2020, impianti di bio-essiccazione sono stati installati dal gruppo CAP presso il depuratore di Robecco sul Naviglio. L'applicazione di questa tecnologia ha permesso di raggiungere una percentuale di sostanza secca pari in media al 70% con un consumo energetico riferito al quantitativo di fango alimentato, disidratato al 26%, pari a 31 kWh/ton di energia elettrica e 328 kWh/ton di energia termica (38 m^3 di metano di rete), conseguendo notevoli risparmi di energia rispetto ad un essiccamento termico classico.

Efficientamento processo di digestione anaerobica

Il processo di digestione anaerobica è un processo consolidato che permette la stabilizzazione del fango (rendendolo idoneo al recupero in agricoltura) contestualmente alla produzione di biogas/biometano. La recente crisi energetica ha messo in luce il ruolo chiave del biometano nel contribuire alle forniture di metano. In quest'ottica esistono diversi processi di upgrading del biogas prodotto a biometano, tra cui la separazione a membrana, il lavaggio ad acqua, il lavaggio chimico, la pressure swing adsorption (PSA).

Tuttavia, il requisito di sostenibilità, necessario affinché i biocarburanti e bioliquidi possano accedere agli incentivi, non è sempre facilmente applicabile nel caso di co-trattamento di più flussi. Il biometano liquido (GNL), se adeguatamente incentivato, potrebbe risultare un elemento importante per lo sviluppo del settore.

Tra le tecnologie di upgrading, l'ENEA ha realizzato un impianto pilota di biometanazione idrogenotrofa per l'upgrading ex-situ del biogas a biometano, operativo presso il centro ricerca del Brasimone. Il processo di digestione anaerobica presenta diversi margini di ottimizzazione, tra cui: applicazione di condizioni termofile, co-digestione con altre matrici organiche, recupero della CO_2 presente nel biogas prodotto, laddove il contesto lo permetta, eventualmente anche con

schemi di tipo power-to-gas, pretrattamento dei fanghi con tecnologie di tipo fisico (centrifuga disintegratrice, ultrasuoni, cavitazione idrodinamica), termico (T = 165 °C e 180 °C), termochimico (idrolisi termochimica, HTC- hydrothermal carbonization), chimico (ozonolisi) e biologico (TPAD-Temperature-phased anaerobic digestion) al fine di aumentarne la resa.

Il digestato generato dal processo di digestione rappresenta una matrice fertilizzante organica di qualità. Esso possiede infatti un ottimo potere ammendante e fertilizzante e il suo riutilizzo in agricoltura può avvenire, previa verifica dei livelli di qualità ottenibili, sia direttamente (gestendolo ai sensi della normativa sui rifiuti, in R10) sia previa stabilizzazione aerobica, posta in serie alla fase anaerobica, mediante produzione di compost in co-trattamento con altre matrici. È inoltre possibile il recupero selettivo dell'azoto ammoniacale, dal digestato (es. Impianto Acqua & Sole S.r.l. a Vellezzo Bellini) o dalla sua frazione liquida, che può essere utilizzato come fertilizzante o sfruttato per altre applicazioni in fase di sviluppo (es. come combustibile navale o per la produzione di idrogeno a seguito di cracking). Dalla fase liquida del digestato è possibile recuperare anche sali di fosforo per il riutilizzo in agricoltura, seppur attualmente il recupero del fosforo non è economicamente vantaggioso. Questi sono infatti stati classificati come categoria di materiali costituenti (CMC12) secondo il Regolamento europeo sui fertilizzanti (2019/1009), rendendoli idonei all'uso nella produzione di fertilizzanti.

Tra gli esempi di applicazione di queste tecnologie troviamo quello del Gruppo CAP che, dal 2024, nell'ambito del progetto europeo BIOMETHAVERSE, ha installato un impianto di ozonolisi del fango digerito e/o del fango misto caricato al digestore, per incrementare la solubilizzazione dei substrati organici e ottenere un maggior rateo di produzione di biogas presso l'impianto di trattamento di Bresso-Niguarda. Inoltre, l'incremento della percentuale di metano nel biogas ridurrà i costi di separazione per l'immissione in rete di biometano (in esercizio dal 2019).

Anche il Gruppo Acea, nel 2019, ha avviato la sperimentazione e la successiva messa in servizio di un impianto di ozonolisi installato presso la linea fanghi di uno dei depuratori della città di Roma. L'impianto ha permesso di traguardare la riduzione del quantitativo di fanghi da smaltire, l'ottimizzazione della dose di ozono richiesta per il raggiungimento di tale obiettivo e la convenienza economica nell'applicazione di tale tecnologia, in considerazione dei costi di investimento ed esercizio richiesti rispetto ai costi di smaltimento (€/ton) dei fanghi di supero.

Infine, la stessa Acea, insieme alla sua controllata Acea Infrastructure, sta realizzando uno studio di fattibilità tecnico-economica su due impianti (di cui uno in Italia), per la produzione di idrogeno dalla conversione del biometano proveniente dall'upgrade del biogas della DA dei fanghi, mediante l'impiego di diverse tecnologie, tra cui la "plasmalisi". Lo studio di fattibilità mira a confrontare dal punto di vista economico e ambientale le tecnologie della plasmalisi e quella dello steam reforming ed è portato avanti nell'ambito del più complesso progetto europeo LIFE GreenH2oOrn, iniziato a settembre 2024 e della durata complessiva di 60 mesi con la collaborazione di altri 7 partner internazionali.

Processi di trattamento termochimici

Nel contesto delle tecnologie avanzate per il trattamento dei fanghi non adatti al riutilizzo in ambito agricolo, emerge come particolarmente significativo il processo di mono-incenerimento. Questo processo si affianca ad altre tecnologie di trattamento termochimico emergenti e di notevole interesse scientifico, tra cui la pirolisi, l'idrolisi termica, la carbonizzazione idrotermica (HTC), il reforming termocatalitico (TCR), la gassificazione e la liquefazione idrotermica (HTL), quest'ultima ancora in fase sperimentale. Tra questi, i processi condotti in fase liquida, come l'HTC e l'HTL, appaiono interessanti poiché permettono il trattamento dei fanghi in fase umida, riducendo significativamente i fabbisogni energetici per l'essiccamento, step imprescindibile nei processi di pirolisi, gassificazione e incenerimento.

Per quanto riguarda il recupero di materia, il processo di mono-incenerimento consente di produrre ceneri con elevate concentrazioni di fosforo. A seguito della normativa introdotta nel luglio 2022, le ceneri risultanti dall'ossidazione termica dei fanghi di depurazione sono state classificate come categoria di materiali costituenti (CMC13) secondo il Regolamento europeo sui fertilizzanti (2019/1009), rendendole idonee all'uso nella produzione di fertilizzanti, a condizione che rispettino i limiti imposti dalla legge.

Parallelamente, i processi di pirolisi, reforming catalitico e HTL sono interessanti perché permettono il recupero di olio, mentre il processo HTC produce una fase liquida (HTC liquor) dalla quale è possibile recuperare acidi grassi volatili e nutrienti e che può essere sfruttata per la produzione di biopolimeri. Il residuo solido (char) che si origina dai diversi trattamenti termochimici dei fanghi di depurazione non è attualmente riconosciuto all'interno del regolamento europeo dei fertilizzanti, ma può essere utilizzato come end of waste in altre tipologie di applicazioni (materiale adsorbente, materiale da costruzione), qualora autorizzato, caso per caso, dall'autorità competente.

Nell'ambito del recupero energetico, l'incenerimento rappresenta un meccanismo efficace per il recupero di energia, laddove sia presente la sezione di termovalorizzazione che trasforma il calore prodotto dalla combustione dei rifiuti in energia elettrica e termica. Contemporaneamente, la gassificazione, la pirolisi e il reforming catalitico permettono la conversione della materia organica in gas di sintesi (syngas), una fonte energetica rinnovabile per la produzione di energia. Il char, risultante da processi come la pirolisi, l'HTC e l'HTL, può trovare impiego come combustibile alternativo in ambiti industriali, ad esempio nei cementifici, per la generazione di energia termica.

A tal proposito è stata emanata la UNI11853:2022 per incentivare l'utilizzo dell'idrochar prodotto dal processo HTC in alternativa al carbon fossile. In aggiunta, il

liquido ottenuto dal processo HTC può essere reintegrato nel ciclo di digestione anaerobica, incrementando la produzione di biogas e biometano. Tale pratica si rivela particolarmente vantaggiosa negli impianti di trattamento delle acque reflue dove è già in atto il processo di digestione anaerobica, poiché massimizza l'efficienza nella generazione di energie rinnovabili.

Per quanto riguarda il grado di sviluppo tecnologico delle tecnologie presentate, in Italia l'incenerimento è il processo termochimico più consolidato e i fanghi vengono trattati prevalentemente in co-combustione con altri rifiuti, mentre sono in via di sviluppo impianti dedicati al mono-incenerimento, tecnologia già consolidata in Europa. Tra le iniziative italiane nel campo del mono-incenerimento, si distingue il progetto della Biopiattaforma di Sesto San Giovanni (MI), operato dal Gruppo CAP e in fase di realizzazione. Il termoimpianto, prima linea produttiva, valorizzerà 65.000 tonnellate/anno di fanghi umidi (pari a 14.100 tonnellate/anno di fanghi prodotti dai depuratori), generando 11.120 MWh/anno di calore per il teleriscaldamento. Questo progetto non si focalizza solo sulla termovalorizzazione dei rifiuti, ma incorpora anche un processo di recupero di fosforo residuo dalle ceneri.

Diverse sono le iniziative di implementazione dei trattamenti termochimici emergenti sul territorio italiano, seppur si tratti per lo più di impianti dimostrativi. Senza la pretesa di fornire una panoramica esaustiva, alcuni esempi applicativi sono:

- L'impianto HTC installato dalla ditta HBI a giugno 2021 presso il depuratore di Bolzano e successivamente spostato a Fusina, presso il sito GPLab della società Veritas a Venezia, dove il char generato viene utilizzato per la valorizzazione energetica e l'autosostentamento del processo;
- L'impianto HTC installato dalla ditta Terranova nel 2021 presso il depuratore di San Rocco a Milano;
- L'impianto sperimentale HTL nell'ambito del progetto EU LIFE FREEDOM presso il depuratore delle acque di Cassano D'Adda del Gruppo CAP Holding

Spa di Milano in collaborazione con Agrosistemi S.r.l., UniPavia, e altri. Obiettivo del processo HTL su scala pilota è quello di ottenere dai fanghi di depurazione non pericolosi (EER 190805) rivenienti dal depuratore CAP, catrame e bio-olio (biofuel o hydro-fuel) (genericamente detto "greggio sintetico"), utilizzabili anche per la produzione di bio-asfalti e conglomerati bituminosi.
Un altro importante aspetto ambientale della proposta è il recupero del fosforo;

- Per quanto riguarda impianti a larga scala, in Toscana, presso il Polo integrato di economia circolare di IREN Ambiente a Scarlino (GR), è stato autorizzato un impianto HTC che tratta i fanghi della depurazione civile e la frazione organica dei rifiuti per un totale di 100.000 tonnellate annuali. Altri impianti per il trattamento fanghi sono attualmente in fase autorizzativa.

Indicatori di impatto

L'avanzamento e l'applicazione di tecnologie innovative per la gestione sostenibile dei fanghi di depurazione comportano molteplici benefici, sia sotto il profilo ambientale che economico.
Dal punto di vista ambientale, un'attenta gestione dei fanghi può ridurre l'emissione di gas serra e la contaminazione di suoli e corpi idrici. I fanghi rappresentano altresì una fonte rilevante di nutrienti essenziali come l'azoto e il fosforo, i quali, attraverso processi di recupero, possono essere reimpiegati, per esempio nel settore agricolo. Questa pratica si colloca all'interno dell'ottica dell'economia circolare, convertendo i rifiuti in risorse e diminuendo la dipendenza da input esterni.

Sul fronte economico, la gestione sostenibile dei fanghi può comportare una riduzione considerevole dei costi legati al loro smaltimento, elemento che costituisce una delle maggiori spese operative per gli impianti di trattamento delle acque reflue. Tuttavia, sarà importante, vista la particolare matrice in argomento, non promuovere una strategia di gestione finalizzata esclusivamente a una mera riduzione del costo di smaltimento/recupero, in quanto porterebbe a un incremento degli impatti sul territorio: dovranno essere considerate, soprattutto per le

nuove tecnologie più virtuose, tutte le esternalità positive correlate.

Dal punto di vista industriale si prospetta un impatto medio-alto per le tecnologie considerate, in particolare per quelle termochimiche innovative. Ciò è dovuto alla potenziale emergenza di nuove entità imprenditoriali e modelli di business, nonché allo sviluppo di competenze inedite e all'incremento dell'occupazione. Pertanto, si prevede che l'effetto a livello politico e sociale sarà rilevante, in quanto emergerà la necessità di regolamentare e introdurre sul mercato nuovi prodotti derivanti da questi processi di trattamento. Ciò favorirà la creazione di nuove opportunità di simbiosi industriale e l'accettazione sociale delle medesime. L'accettazione sociale può essere influenzata da fattori come impatto ambientale positivo, trasparenza nei processi, vantaggi economici per le comunità, riduzione dei rifiuti, sicurezza tecnologica e coinvolgimento dei cittadini nel processo decisionale.

Ricorse economiche necessarie

Per comprendere l'entità degli investimenti richiesti e agevolare la loro realizzazione, è imprescindibile disporre di un quadro normativo chiaro e stabile, coordinato dal legislatore in campo ambientale e in campo agricolo, al momento non ancora disponibile. Una normativa deve riguardare tanto le opzioni di riuso agricolo quanto le opportunità di intraprendere pratiche sostenibili di economia circolare nell'impiego delle tecnologie di trattamento all'avanguardia.
Tuttavia, guardando ai dati della produzione italiana dei fanghi si è osservata una crescita lenta ma costante, con un incremento del 10% negli ultimi 6 anni[70]. Questa tendenza è destinata a continuare in seguito all'estensione delle reti di collettamento, all'adeguamento e al potenziamento degli impianti di depurazione esistenti e all'evoluzione del contesto normativo italiano e comunitario, che imporrà livelli di trattamento sempre più elevati.

[70] *Laboratorio Ref, I fanghi della depurazione nell'economia circolare: urge una visione d'insieme, 2022.* https://laboratorioref.it/i-fanghi-della-depurazione-nelleconomia-circolare-urge-una-visione-dinsieme/.

In Italia, secondo le stime Utilitalia le tonnellate di fanghi di depurazione prodotte a regime su base annuale, una volta completate le opere di collettamento e adeguamento, passerebbero dalle attuali 3,2 milioni di tonnellate annue a circa 4 milioni di tonnellate annue[71] . Si rende quindi essenziale l'allocazione di nuovi investimenti infrastrutturali, mirati sia alla riduzione del volume dei fanghi attualmente destinati alle discariche, sia al soddisfacimento delle crescenti esigenze di trattamento che si prospettano per il futuro.

Questa urgenza si acuirebbe ulteriormente se le normative future dovessero limitare il riutilizzo dei fanghi attualmente avviati in agricoltura, sia direttamente che indirettamente mediante produzione di ammendanti o gessi di defecazione. La misura M2C1 Investimento 1.1 del Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR), implementata dal Ministero della Transizione Ecologica (MiTE), rientra nella linea d'intervento C. Questa misura è dedicata all'ammodernamento e alla creazione di nuovi impianti innovativi per il trattamento e il riciclo di determinati tipi di rifiuti, inclusi i fanghi di depurazione, con un finanziamento totale di 450 milioni di euro. Sebbene tale somma non sia adeguata a soddisfare tutte le necessità del settore, costituisce comunque uno stimolo per promuovere e supportare l'industria del settore.

[71] https://www.utilitalia.it/notizia/ac3300ce-fdb0-47f2-8a21-3f278f6e914b

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 978-88-98935-70-3
9 788898 935703