

Le biotecnologie per le applicazioni energetiche

Microrganismi, enzimi e processi biologici avanzati possono contribuire alla produzione sostenibile di energia e biocarburanti attraverso la valorizzazione di biomasse e rifiuti organici, integrata con la cattura e il riutilizzo della CO₂. L'articolo illustra alcune delle principali applicazioni in ambiti quali la produzione di bioetanolo, biometano, oli microbici, bioidrogeno e i processi di carbon capture and utilization (CCU), evidenziando il contributo dell'ingegneria metabolica, e delle scienze omiche allo sviluppo di nuovi biocatalizzatori e dei relativi processi industriali. Le biotecnologie emergono così come uno dei pilastri della decarbonizzazione e della bioeconomia circolare.

DOI 10.12910/EAI2025-085

di Isabella De Bari, Fiammetta Alagna, Roberto Albergo, Antonio Caporusso, Carlo Fasano, Federico Liuzzi, Francesco Panara, Egidio Viola

La transizione energetica richiede tecnologie capaci di ridurre la dipendenza dai fossili, valorizzare le rinnovabili e trasformare scarti e sottoprodotti in vettori energetici. In questo scenario, le biotecnologie offrono una piattaforma d'innovazione cruciale, impiegando organismi viventi, enzimi e comunità microbiche come biocatalizzatori per produrre energia in modo sostenibile. A differenza dei processi chimici tradizionali, i sistemi biologici presentano un'elevata selettività e operano in condizioni moderate di temperatura, pH e pressione. Sfruttando la versatilità metabolica di funghi, lieviti e batteri (in colture pure o consorzi), è possibile convertire substrati come biomasse residuali, rifiuti organici, reflui, CO₂ e idrogeno in prodotti come bioetanolo, biometano, bioidrogeno, bioelettricità e molti altri carburanti avanzati.

Un ambito primario riguarda la valorizzazione delle biomasse lignocellulosiche e dei residui agroindustriali tramite catalizzatori biologici come le cellulasi, prodotte da batteri e funghi, che degradano cellulosa ed

emicellulosa in zuccheri semplici fermentescibili. Questo passaggio chiave nelle bioraffinerie trasforma numerose materie prime biogeniche in zuccheri fermentabili ad esempio per la produzione di bioetanolo. Gli zuccheri derivanti dall'idrolisi (idrolizzati contenenti glucosio e xilosio) possono inoltre essere fermentati in acido lattico per produrre acido polilattico (PLA), una diffusa bioplastica biodegradabile. Nel tempo l'efficienza della conversione enzimatica è stata ottimizzata con cocktail avanzati attraverso ad esempio l'introduzione delle LPMO (*Lytic Polysaccharide Monooxygenases*), che consentono di aumentare le rese e di riflesso ridurre i costi. Similmente, le lipasi catalizzano l'idrolisi, l'esterificazione e la transesterificazione enzimatica di oli vegetali, grassi esausti e oli microbici per produrre biodiesel e carburanti rinnovabili, riducendo i consumi energetici ed i sottoprodotti rispetto alla chimica convenzionale a favore di un processo complessivamente più sostenibile.

Gli enzimi sono centrali anche nella produzione di idrogeno verde da

specie ingegnerizzate di microalghe. Questi organismi fotosintetici utilizzano le idrogenasi per catalizzare la formazione di idrogeno molecolare da protoni ed elettroni generati via biofotolisi, integrando la cattura biologica della CO₂ alla generazione energetica. All'interno del progetto PNRR - POR H2, sono stati sviluppati ceppi mutanti delle microalghe *Phaeodactylum tricornutum* e *Cyclotella cryptica* per accrescere la produzione di idrogeno verde in laboratorio. Le linee sono state modificate nei geni biosintetici e regolatori tramite genome editing con tecnologia CRISPR/Cas9, per poi essere caratterizzate a livello molecolare e coltivate in un fotobioreattore con controllo di temperatura, pH e agitazione, interfacciato con un sensore per l'idrogeno. L'ingegneria metabolica e la biologia sintetica potenziano così l'efficienza e la stabilità di tali sistemi biologici.

Un ambito emergente riguarda l'applicazione enzimatica alla *carbon capture* post-combustione, dove ad esempio la tecnologia CO2 Solutions™ by Saipem impiega l'anidrasi carbonica, un catalizzatore naturale

ultra-efficiente che accelera la conversione reversibile della CO_2 in bicarbonato. Saipem ha sviluppato una piattaforma industriale che unisce una versione ingegnerizzata di questo enzima a una soluzione acquosa di carbonato di potassio. L'enzima velocizza l'assorbimento della CO_2 dai fumi industriali e ne agevola il rilascio in rigenerazione a temperature molto inferiori rispetto ai processi basati su ammine, consentendo l'uso di calore di scarto a bassa temperatura con un forte risparmio energetico ed economico. Nel campo della *carbon capture and utilization* (CCU), il progetto COMETA ha dimostrato l'uso circolare del carbonio biogenico valorizzando

il cardo, una coltura non alimentare mediterranea adatta ad aree marginali. La biomassa vegetale fissa inizialmente la CO_2 atmosferica tramite fotosintesi; successivamente, le sue frazioni vengono trasformate tramite chimica verde e biotecnologie. Oltre all'estrazione di inulina e zuccheri dalle radici, la biomassa epigea è stata convertita per gassificazione in syngas (miscela di CO , CO_2 , H_2 e CH_4). L'innovazione principale ha riguardato la conversione biologica del syngas in acido acetico, inteso come piattaforma chimica anziché come mero combustibile. Sono stati testati microrganismi acetogeni (tra cui *Clostridium aceticum*, *Acetobacte-*

rium woodii, *Clostridium autoethanogenum* e *Clostridium ljungdahlii*) in grado di produrre acetato sfruttando i gas C1 tramite il metabolismo di Wood-Ljungdahl. I test con syngas sia simulato sia reale (prodotto da ENEA) hanno mostrato che l'ottimizzazione del trasferimento gas-liquido in scala beuta migliora sensibilmente la resa, evidenziando l'importanza della solubilizzazione di CO e H_2 . L'acido acetico ottenuto funge da fonte di carbonio per successive fermentazioni destinate alla produzione di oli microbici, polioidrossialcanoati e intermedi chimici. Il passaggio da beuta a bioreattore ha evidenziato limiti nel trasferimento di massa gas-liquido, criticità

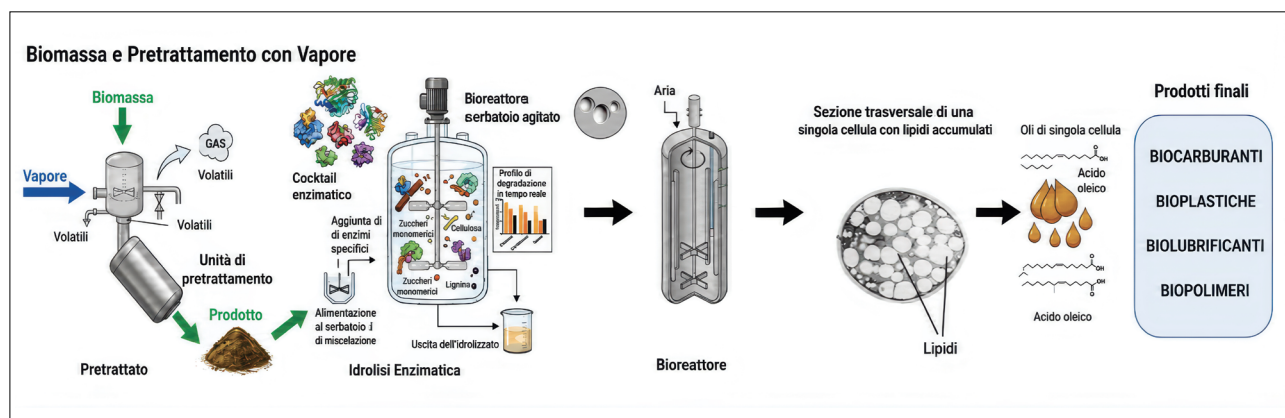


Figura 1 - Biotecnologie per la produzione di oli microbici - Immagine generata mediante AI

che COMETA punta a superare migliorando l'agitazione e lo sparging, ponendo le basi per processi avanzati di bio-CCU su biomasse residuali. L'integrazione tra processi biologici e termochimici si esprime anche nella fermentazione del gas di sintesi ad etanolo fuel grade. Tramite la via di Wood-Ljungdahl, i batteri acetogeni convertono il carbonio gassoso del syngas in bioetanolo, acido acetico, butanolo e intermedi, valorizzando anche le frazioni biomasse recalcitranti. Il primo step

di questa via è guidato da un enzima con attività CO_2 reductasica, capace di fissare la CO_2 e l'idrogeno in una molecola di formiato, utile sia come carrier organico di idrogeno (LOHC) sia come *building block* per microrganismi formatotrofi. Nel progetto POR- H_2 , ENEA ha individuato nuovi enzimi con potenziale attività CO_2 reductasica combinando analisi di banche dati e indagini metagenomiche su colture arricchite e microbiomi intestinali; tali enzimi sono stati poi sintetizzati per l'espressione e la ca-

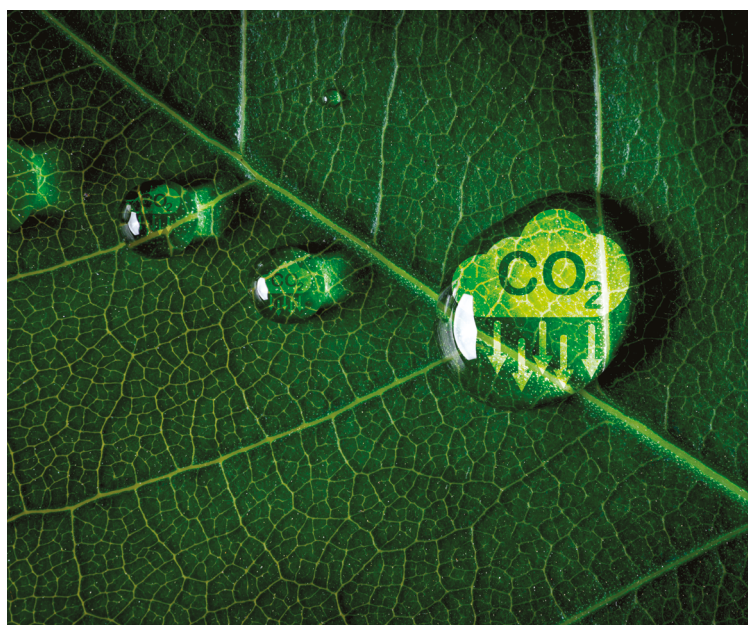
ratterizzazione in sistemi eterologhi. Nella produzione di biocombustibili alcuni biocatalizzatori microbici di grande interesse sono i lieviti oleaginosi (come *Yarrowia lipolytica*, *Lipomyces tetrasporus* e *Cutaneotrichosporon curvatus*), in grado di accumulare grandi quantità di trigliceridi intracellulari a partire da biomasse di scarto. Questi oli microbici (Single Cell Oils) rappresentano materie prime alternative per biodiesel, Sustainable Aviation Fuel (SAF) ed in generale biocombustibili avanza-

ti, evitando la competizione con le colture alimentari anche in un'ottica di economia circolare. Nell'ambito dell'accordo quadro di collaborazione tra ENEA ed ENI (JCA-2023-2025) è stata studiata la produzione di lipidi microbici da sottoprodotti agroindustriali e scarti come melasso e glicerolo grezzo. Tra i ceppi testati, il *Lipomyces tetrasporus* si è contraddistinto per la capacità di crescere su melasso tal quale al 10%. Il processo, ottimizzato in bioreattore da banco analizzando parametri come il rapporto C/N, l'aerazione e co-alimentando glicerolo grezzo, è stato trasferito su scala pilota in un bioreattore da 50 litri. In questa fase sono stati ottenuti 23-25 g/L di biomassa ed un contenuto lipidico del 24-30%. Sebbene il processo abbia margini di miglioramento, è stato possibile dimostrare la fattibilità tecnica di tale trasformazione (Figura 1).

Più in generale, l'uso di microrganismi per generare idrocarburi di tipo *drop-in* rispetto ai combustibili fossili è un'opzione di grande interesse nel contesto di una transizione sostenibile. A titolo di esempio il farnesano (2,6,10-trimetildodecano) è un idrocarburo paraffinico impiegato nei carburanti aeronautici e nel diesel rinnovabile che può essere ottenuto attraverso processi biotecnologici ottimizzati. L'impiego delle biotecnologie si rivela centrale in un altro settore bioenergetico, quello della digestione anaerobica di reflui e rifiuti organici, un ecosistema in cui batteri acetogeni e archea meta-

nogeni operano in sinergia.

Tra i tool delle biotecnologie applicate, gli approcci metagenomici permettono oggi di mappare tali interazioni microbiche ottimizzando l'efficienza dei processi. Di grande interesse è la biometanazione *in situ*, che prevede l'iniezione di idrogeno rinnovabile nel digestore per convertire biologicamente la CO₂ in metano, incrementando nettamente la resa in



biometano.

La ricerca sta svelando che il patrimonio funzionale degli ecosistemi risiede proprio nelle comunità microbiche. Le moderne tecnologie di sequenziamento e metagenomica permettono di mappare il microbioma di suoli e matrici complesse, individuando nuovi enzimi per il settore energetico. Lo studio della variabilità microbica in risposta a fattori ambientali è una strategia chiave: l'analisi di ecosistemi naturali perturbati (es. suoli trattati con ammendanti) svela consorzi autoctoni specializzati nella degradazione della materia, mentre la

manipolazione controllata in colture d'arricchimento artificiali esercita una pressione selettiva che accelera l'isolamento di ceppi performanti per funzioni quali la depolimerizzazione lignocellulosica o la produzione di bioidrogeno. Un esempio è il progetto internazionale REVINE, in cui ENEA ha ottimizzato la produzione di biochar da residui di potatura della vite, impiegando l'analisi del microbioma

e approcci metagenomici per evidenziare la risposta biologica del terreno all'applicazione del biochar, oltre ai benefici di fertilità e sequestro del carbonio.

Le biotecnologie energetiche evolvono così verso filiere industriali integrate basate sulla circolarità del carbonio, capaci di convertire rifiuti, biomasse e CO₂ in energia e bioprodotto. Diverse realtà industriali stanno commercia-

lizzando queste innovazioni: Amyris ha aperto la strada ingegnerizzando lieviti per produrre β-farnesene (precursore del farnesano per SAF); LanzaTech impiega batteri per convertire i gas di scarto industriali (CO e CO₂) in etanolo; Gevo usa microrganismi per trasformare biomasse zuccherine in isobutanolo; Viridos ottimizza microalghe ad alta produttività per oli destinati a biodiesel e jet fuel; Neste integra materie prime biologiche per la produzione su larga scala di carburanti rinnovabili terrestri e aerei. Nel quadro del progetto POR-H2 ENEA ha realizzato nuove infrastrut-

ture per lo sviluppo di biocatalizzatori, potenziando i laboratori di biologia molecolare per l'isolamento, l'espressione e la caratterizzazione enzimatica. Tra le novità figurano la tecnologia di sequenziamento di terza generazione Nanopore, la relativa infrastruttura informatica e pipeline interne per

l'analisi di dati metagenomici (16S e Shotgun) e metatrascrittomici. È stata inoltre integrata una piattaforma di screening di librerie enzimatiche/microbiche generate via mutagenesi per selezionare biocatalizzatori a prestazioni superiori. La governance di questi sistemi biologici farà delle bio-

tecnologie non solo una tecnologia abilitante per la neutralità climatica, ma un pilastro della bioeconomia circolare del futuro (Figura 2).

[per info: isabella.cognome@enea.it](mailto:isabella.cognome@enea.it)

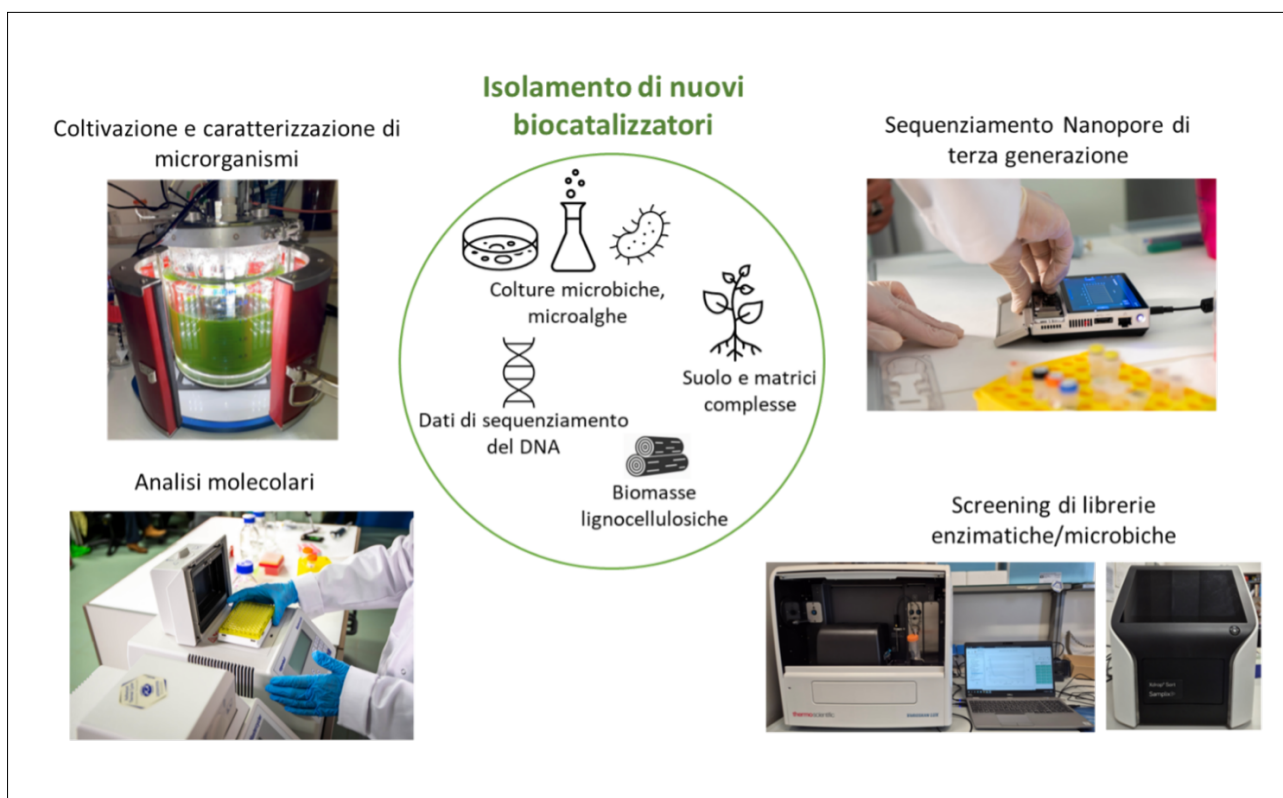


Figura 2. Piattaforme ENEA per l'isolamento, il sequenziamento e lo screening di nuovi biocatalizzatori.

Principali riferimenti scientifici e attività di ricerca citate

- Oleaginous Yeasts as Cell Factories for the Sustainable Production of Microbial Lipids by the Valorization of Agri-Food Wastes (2021). eai.enea.it
- Conversion of Cardoon Crop Residues into Single Cell Oils by *Lipomyces tetrasporus* and *Cutaneotrichosporon curvatus* (2021). eai.enea.it
- Optimized Conversion of Wheat Straw into Single Cell Oils and Synthesis of Advanced Biofuels (2023). eai.enea.it
- Syngas Derived from Lignocellulosic Biomass Gasification as an Alternative Resource for Innovative Bioprocesses (Processes, 2020). cetjournal.it, iris.enea.it
- Kinetics Analysis of the Syngas Fermentation to Produce Acetic Acid from Cardoon Residual Biomass (2022). iris.enea.it
- Biological Processes in the Green Hydrogen Value Chain (ENEA, 2021)
- In Situ Biogas Upgrading in a Randomly Packed Gas-Stirred Tank Reactor (Energies, 2023). scholar.google.com
- Coupling Dark Fermentation and Microbial Electrolysis to Enhance Bio-Hydrogen Production (International Journal of Hydrogen Energy, 2017). online.scu...ichelli.it