



IL RUOLO DELLE BIOENERGIE NELLA TRANSIZIONE ENERGETICA

Il documento analizza il ruolo strategico delle bioenergie nella transizione energetica, evidenziando il potenziale delle biomasse come fonte rinnovabile di carbonio per settori hard-to-abate. Viene esplorata l'integrazione con FER e idrogeno verde, il valore socio-economico delle bioraffinerie e le prospettive di sequestro CO₂ tramite colture dedicate e tecnologie BECCUS.

La transizione energetica da un sistema basato su fonti fossili ad uno totalmente rinnovabili rappresenterà, nei fatti, un “ritorno” alle fonti rinnovabili. Prima della rivoluzione industriale del XIX secolo, ogni attività umana era energeticamente sostenuta da sole fonti rinnovabili (es. lavoro umano, animale, mulini a vento ed acqua, trasporto navale con vela, terrestre con animali, riscaldamento a biomasse, etc.). Successivamente tutte le attività umane industriali, agroindustriali e civili si sono sviluppate essenzialmente grazie allo sfruttamento di fonti fossili (carbone, petrolio, gas naturale) ed una quota nucleare negli ultimi decenni. Ad oggi, l'Inter-

national Energy Agency (IEA) riporta un consumo di complessivi 170.000 TWh/a di cui 81% fossili e 5% nucleare, con una quota di rinnovabili intorno al 14% (Fig. 1). Tanto ancora, quindi deve essere fatto per traghettare una transizione ad un 100% rinnovabili.

Per l'Italia i rapporti sono leggermente diversi ed i consumi totali sono circa 1.500 TWh/a, di cui la quota di rinnovabile non supera il 20%. Tale valore arriva a superare il 40% di utilizzi di Fonti Energetiche Rinnovabili (FER) se si va a considerare soltanto la produzione di energia elettrica, essenzialmente grazie ad elevate quote di idroelettrico. Le poten-

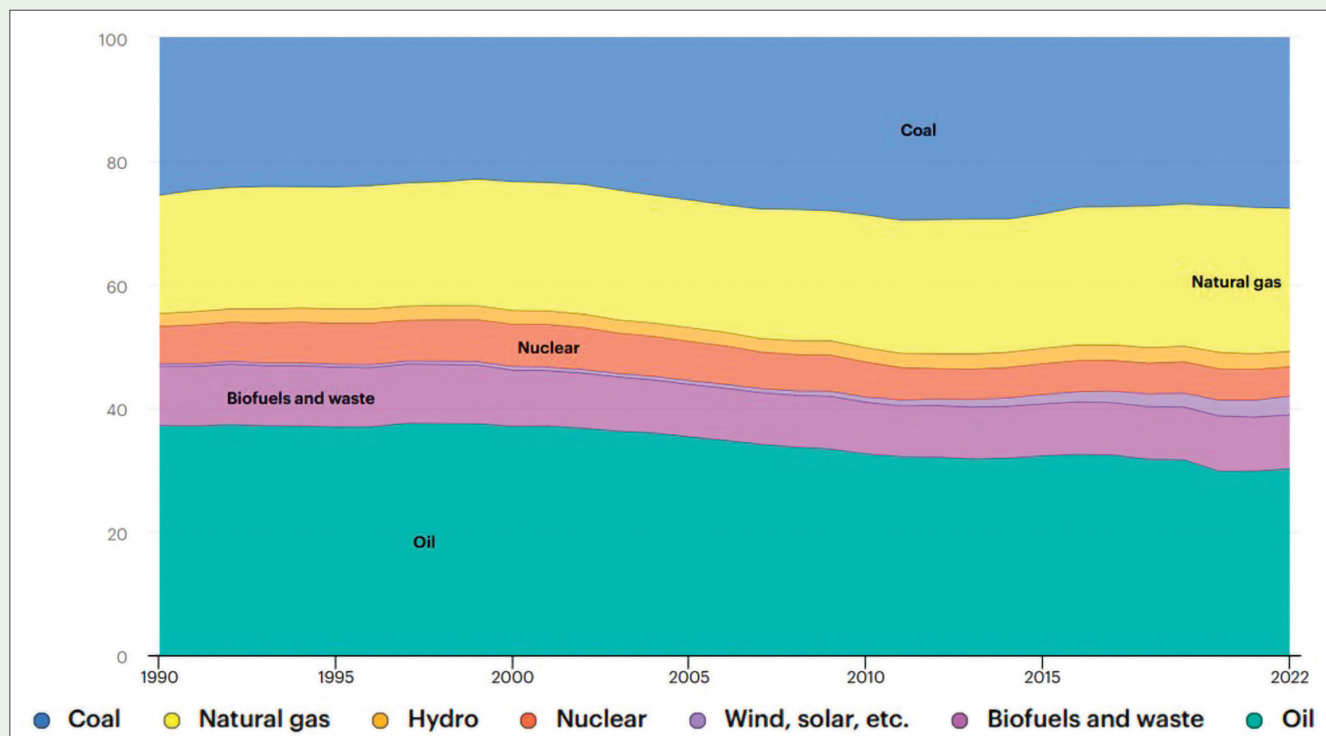


Fig. 1 - Distribuzione delle fonti di energia utilizzate per anno a livello globale dal 1990 al 2022 [1]

zialità delle FER non programmabili (fotovoltaico ed eolico) sono incredibilmente elevate, basti pensare che ricoprendo di pannelli fotovoltaici circa l'1% del territorio Italiano si potrebbe saturare l'intera domanda di elettricità consumata oggi [2]. Di conseguenza, un'ottima opportunità è rappresentata dall'elettrificazione dei consumi energetici, basti pensare alla mobilità privata che certamente transiterà ad una quota 100% auto elettriche nei prossimi decenni. L'elettrificazione dei consumi condurrà ad un aumento di elettricità che dovrà essere prodotta, sperabilmente da FER ed in particolare da quelle FER non programmabili, conducendo al problema derivante dalla necessità di accumuli di elettricità anche su intervalli temporali nell'ordine dei mesi (es. una quota di solare prodotto in mesi estivi da consumarsi nei mesi invernali). Una possibilità consiste nell'utilizzo di idrogeno verde (ottenuto da elettrolisi dell'acqua utilizzando eccessi di produzione da FER) come vettore energetico, per stoccare l'elettricità per lunghi periodi, riconvertendo, poi, l'idrogeno in elettricità quando serve (es. nei mesi invernali). Da qui, l'ipotesi di convertire alcuni dei consumi cosiddetti "hard-to-abate" in quanto settori ed utilizzi di energia per i quali non è pensabile una transizione ad elettrico sul medio-lungo termine (es. trasporto pesante, navale, aereo, industria acciaio, etc.) utilizzando idrogeno, abbattendo così di fatto le emissioni nel caso in cui quell'idrogeno fosse di origine rinnovabile [3]. Anche in questo caso però, diverse problematiche potrebbero frenarne lo sviluppo, ad esempio a causa degli elevatissimi costi che deriverebbero dai sistemi di generazione (elettrolizzatori), stoccaggio (compressi, liquefatti o in forma solida) e trasporto dell'idrogeno.

Mentre i biocarburanti offrono un'opzione immediata per sostituire i combustibili fossili per l'attuale flotta stradale dominata da motori a combustione interna (ICE) in attesa dell'elettrificazione, si prevede che la domanda da parte dell'aviazione (carburante per aviazione sostenibile, SAF), del trasporto marittimo (ad esempio, diesel a base biologica, biometanolo, bio-GNL) e anche del trasporto terrestre pesante a lunga distanza (diesel rinnovabile) crescerà.

Viste le motivazioni finora elencate, si evidenzia la necessità di diversificare le fonti energetiche rinnovabili che si andranno a prendere in considerazione per i vari utilizzi energetici, al fine di evitare sprechi e costi elevati nei casi in cui la transizione ad elettrico o eventualmente ad idrogeno verde non siano praticabili. Si evidenzia la necessità di ottenere una transizione energetica meno "traumatica" possibile, in questo contesto, diviene centrale il tema dello sfruttamento e della valorizzazione di fonti di carbonio rinnovabile, ossia biomasse/rifiuti e CO₂ da cattura. Le biomasse, infatti, rappresentano

l'unica fonte rinnovabile contenente atomi di carbonio (così come le convenzionali fonti fossili), e perciò particolarmente interessanti per applicazioni in quei settori che difficilmente nel prossimo futuro potranno, in maniera conveniente, essere coperte attraverso l'utilizzo di FER o idrogeno.

Le bioenergie rappresentano una fonte al contempo rinnovabile, programmabile, flessibile, oltre al vantaggio di essere versatile nei prodotti finali ottenibili, unica fonte di carbonio rinnovabile insieme alla eventuale conversione della CO₂ da cattura per produzione di combustibili e prodotti chimici [4]. La transizione energetica, quindi, deve basarsi anche su pilastri industriali e processi di conversione e sfruttamento consolidati, quali quelli Oil&Gas, così da poter in futuro vedere bioraffinerie in sostituzione di raffinerie, valorizzando know-how e infrastrutture esistenti.

La pleora di processi coinvolti nella valorizzazione delle biomasse (residuali e non) possono essere distinti in tre tipologie: termochimici, biochimici e catalitici, a seconda delle materie prime convertibili e dei prodotti ottenibili. In particolare, recentemente sono stati aggiornati i composti combustibili ottenibili dalle biomasse attraverso tecnologie ad elevati TRL e/o commerciali, i principali sono: biometano, bio-GPL, bioidrogeno, bioetanolo, biobutanolo, alcani lineari o ramificati/isomeri (diesel, cherosene) [5]. In aggiunta a questi composti bioenergetici si affiancano prodotti ad elevato valore aggiunto quali ad esempio: acido succinico, acido fumarico, acido malico, FDCA, acido levulinico, glicerolo, sorbitolo, xilitolo, BTX e aromatici ottenibili dalla lignina [6].

La conversione delle biomasse in tali prodotti incontra, però, barriere tecnologiche che ne limitano la convenienza economica e la loro diffusione. Principalmente le biomasse contengono un tenore di ossigeno molto elevato (fino al 40% in peso) e questo ne pregiudica le rese a composti carboniosi deossigenati, in particolare l'allontanamento dell'ossigeno avviene attraverso la formazione di CO₂, che deve necessariamente essere catturata affinché non venga emessa. Altra problematica generica riguarda la presenza di umidità, che, nel caso di biomasse particolarmente umide, necessita di processi di essiccazione fortemente energivori, in tanti casi compromettendone la sostenibilità energetica. A tal proposito, una caratteristica specifica dei processi di bioraffineria non può che non essere quella dell'auto-sostentamento dei consumi energetici. Elettricità, vapore AP/MP/BP devono essere ottenibili dalla valorizzazione di correnti di scarto della biomassa stessa, o, in alternativa, avere una provenienza 100% rinnovabile. Un esempio palese di processo che necessita di elevati consumi elettrici è quello della gassificazione con ossigeno puro, ottenibile attraverso processi criogenici. An-

che le bioraffinerie lignocellulosiche che prevedono step di pretrattamento con correnti di vapore (es. Steam Explosion) devono poter essere sostenute da energia termica ottenuta in loco attraverso la combustione di altre correnti di processo.

Infine, il reperimento in quantità sufficienti per rendere economicamente vantaggiose le bioraffinerie delle materie prime, soprattutto di scarto, risulta essere una problematica difficilmente risolvibile su territori poco votati all'agricoltura intensiva, da ciò l'interesse per colture dedicate in terreni marginali.

Tutto ciò decreta una difficile competizione con alternative fossili e non determina per molti utilizzi una convenienza reale rispetto ad altre rinnovabili.

Nonostante ciò, per ognuno dei limiti appena elencati, esiste una potenziale soluzione che potrà essere consolidata attraverso investimenti in ricerca e sviluppo e specifiche politiche di incentivazione. Ad esempio, in risposta alle preoccupazioni relative alla concorrenza con la produzione alimentare e all'accessibilità economica, l'opportunità deriva dalle alternative alle colture alimentari convenzionali come materia prima per la bioenergia, tra le altre: colture legnose o erbacee a breve rotazione coltivate su terreni coltivabili poco produttivi o abbandonati, pascoli o terreni degradati/marginali non adatti alle colture alimentari, coltivazione di colture da utilizzare in bioraffinerie che producono bioenergia insieme a prodotti alimentari e mangimistici e vari altri prodotti di origine biologica. L'approccio di avere molteplici usi per le colture esistenti presenta i suoi vantaggi in termini di domanda di mercato, flessibilità e accettazione sociale. L'aumento della produzione di biomassa legnosa o erbacea a breve rotazione in terreni marginali e pascoli, così come il passaggio dalle

colture bioenergetiche convenzionali alle colture lignocellulosiche, avrebbe anche un impatto positivo sulle emissioni, sequestrando circa 190 milioni di tonnellate di CO₂ entro il 2050 [7-9].

Una caratteristica distintiva delle biomasse, che può essere interpretata come un'opportunità strategica per la loro valorizzazione, risiede nella loro distribuzione spaziale e territoriale. A differenza delle fonti fossili, come i giacimenti petroliferi, le biomasse non si concentrano in aree geografiche circoscritte, ma sono diffuse in modo eterogeneo sul territorio. Questa dispersione comporta, da un lato, criticità logistiche ed economiche legate alla raccolta e al trasporto, soprattutto qualora si intenda beneficiare delle economie di scala attraverso impianti centralizzati.

Dall'altro lato, tale distribuzione può rappresentare un vantaggio, poiché favorisce lo sviluppo di filiere corte e locali, con ricadute positive in termini di valorizzazione dei territori, inclusione socio-economica e creazione di occupazione in aree rurali o marginali. Inoltre, questa peculiarità è condivisa con le fonti energetiche rinnovabili non programmabili, quali l'energia eolica e solare, aprendo la strada a sinergie tecnologiche e sistemiche tra flussi di carbonio rinnovabile (biomasse e CO₂ biogenica) e impianti FER. Tali integrazioni possono essere ulteriormente potenziate attraverso l'impiego di idrogeno verde prodotto via elettrolisi, che agisce come vettore energetico e molecolare, facilitando l'accoppiamento tra fonti rinnovabili intermittenti e processi biochimici o termochimici basati su biomassa.

La problematica inerente l'elevato contenuto di ossigeno nelle biomasse e conseguente necessità di allontanarlo essenzialmente sotto forma di CO₂, può essere mitigato grazie alle

tecnologie emergenti che rendono più semplice ed economica la cattura e utilizzo della CO₂ biogenica, permettendo così un bilancio di emissioni complessive nulle o negative [10]. Le emissioni negative, come quelle derivanti da tecnologie BECCUS, occupano un ruolo centrale nei futuri scenari di mitigazione climatica, offrendo una soluzione concreta per compensare le emissioni residue provenienti da settori difficilmente decarbonizzabili, tra cui l'agricoltura.

Il carbonio del biochar è altamente stabile e persiste per centinaia o migliaia di anni se utilizzato come ammendante del suolo. Inoltre, il biochar fornisce un'ulteriore mitigazione attraverso la riduzione delle emissioni di protossido di azoto dal

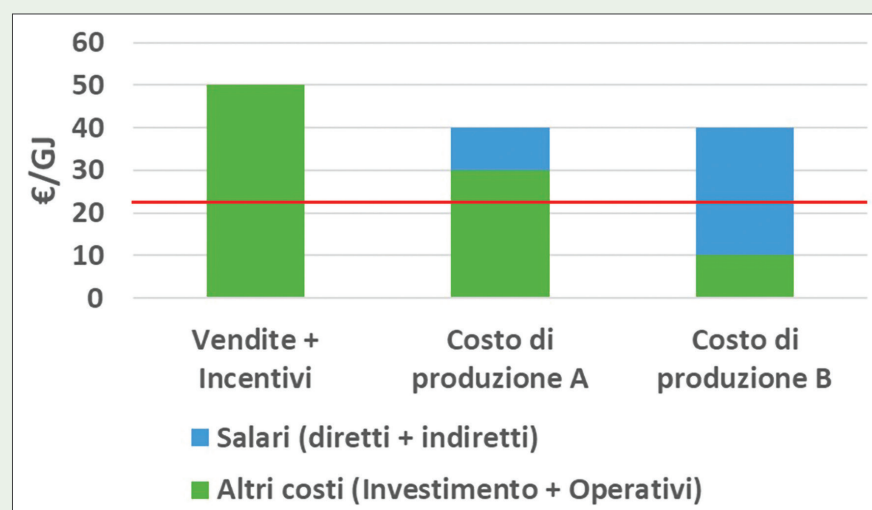


Fig. 2 - Esempio per il confronto tra tecnologie di produzione energetica, la prima (A) con costi legati a macchinari e investimenti, la seconda con elevati costi del personale (B). La linea rossa si riferisce al prezzo di mercato del combustibile

suolo e presenta benefici collaterali per la produzione alimentare, la ritenzione idrica e di nutrienti e la salute del suolo [9]. La differenza fondamentale tra il carbonio biogenico e il carbonio fossile è che il carbonio biogenico è stato recentemente rimosso dall'atmosfera durante la crescita delle piante. I sistemi forestali e agricoli gestiti per garantire che la perdita annuale di carbonio attraverso il raccolto o la decomposizione naturale non superi l'assorbimento annuale di carbonio non contribuiscono a rilasciare CO₂ in atmosfera, anche se il carbonio biogenico viene ossidato durante la combustione o la decomposizione dei bioprodotto al termine del loro ciclo di vita. Le emissioni di CO₂ biogenica non dovrebbero quindi essere trattate allo stesso modo delle emissioni di CO₂ fossile e l'assorbimento di carbonio durante la crescita delle piante dovrebbe essere preso in considerazione nella valutazione degli impatti climatici di bioenergia, BECCS, biochar e altri prodotti a base biologica [11].

In tale contesto, è auspicabile l'adozione di politiche più incisive volte a favorire la diffusione delle tecnologie di valorizzazione delle biomasse e lo sviluppo di bioraffinerie integrate. Un aspetto cruciale da considerare riguarda la valutazione dell'impatto socioeconomico sui territori coinvolti, con particolare attenzione agli indicatori occupazionali e alla distribuzione dei benefici locali. Oltre agli strumenti incentivanti tradizionali - quali la compartecipazione agli investimenti, sussidi diretti o premi di prezzo per i prodotti bio-based - una strategia complementare potrebbe consistere nell'introduzione di meccanismi di incentivazione legati all'occupazione, capaci di generare ricadute positive in termini di sviluppo territoriale e inclusione sociale, in particolare nelle aree rurali dell'Unione Europea. A titolo esemplificativo, come illustrato nel recente position paper AIDIC "Chimica Sostenibile" [4], la presenta un confronto tra due modelli di costo di produzione per combustibili rinnovabili. Nel primo caso (biocombustibile A), i costi sono prevalentemente associati agli investimenti infrastrutturali e ai costi operativi non salariali. Nel secondo caso (biocombustibile B), i costi di produzione risultano significativamente più elevati a causa dell'incidenza dei costi del lavoro, sia diretti (gestione dell'impianto di bioraffineria) sia indiretti (raccolta, trasporto e trattamento delle biomasse, costruzione e manutenzione degli impianti). Questo scenario evidenzia come l'intensità occupazionale possa rappresentare un criterio strategico per la definizione di politiche industriali e ambientali integrate.

I temi accennati in questo lavoro sono stati oggetto di discussione ed approfondimenti durante la prima Bioenergy School che si è tenuta presso le infrastrutture di ricerca della Divisione ENEA Bioenergia, Bioraffineria e Chimica Verde in esercizio presso il Centro Ricerche ENEA TRISAIA

lo scorso ottobre 2024. La scuola di dottorato è stata co-organizzata da ENEA e Progetto NEST (Network for Energy Sustainable Transition) ed in particolare dal prof. Leonardo Tognotti (UniPI, NEST Spoke 3), la dott.ssa Isabella De Bari (Enea, capo divisione Bioenergia, Bioraffineria e Chimica Verde), la dott.ssa Michela Chimienti (Fondazione NEST), l'ing. Giulia Monteleone (Enea, capo Dipartimento Tecnologie Energetiche e Fonti Rinnovabili) e l'ing. Giorgio Veronesi (AIDIC) (fonte <https://www.eventi.enea.it/tutti-gli-eventi-enea/eventi-enea/primo-piano/save-the-date-1-bioenergy-school.html>). Della scuola è prevista una seconda edizione (dettagli al link <https://www.eventi.enea.it/tutti-gli-eventi-enea/save-the-date-1-bioenergy-school-2.html>). 

BIBLIOGRAFIA

- [1] IEA - International Energy Agency, available online: <https://www.iea.org/data-and-statistics> (accessed on 15 September 2025).
- [2] <https://www.rinnovabili.it/energia/fotovoltaico/fotovoltaico-a-terra-consumo-suolo/>, 2024.
- [3] J. Sousa, I. Azevedo *et al.*, *Energies*, 2024, **17**, 3661, DOI: **10.3390/en17153661**.
- [4] A. Giuliano, M. Di Serio, B. Aydin, La Position Paper Sulla Chimica Sostenibile Del Gruppo Di Lavoro AIDIC Sulla Transizione Energetica, available online: <https://www.mcter.com/la-position-paper-sulla-chimica-sostenibile-24003> (accessed on 15 September 2025).
- [5] Biofuels Available online: https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/bioenergy/biofuels_en (accessed on 15 September 2025).
- [6] E. De Jong, H. Stichnothe *et al.*, *Bio-Based Chemicals: A 2020 Update*; 2020; ISBN 978-1-910154-69-4.
- [7] H. Haberl, T. Beringer *et al.*, *Current Opinion in Environmental Sustainability* 2010, **2**, 394, DOI: **10.1016/j.cosust.2010.10.007**.
- [8] What Does Net-Zero Emissions by 2050 Mean for Bioenergy and Land Use? - Analysis, available online: <https://www.iea.org/articles/what-does-net-zero-emissions-by-2050-mean-for-bioenergy-and-land-use> (accessed on 15 September 2025).
- [9] L. Pelkmans, A.L. Cowie, G. Berndes, How Does the IEA Net Zero Emissions for 2050 Roadmap See the Role of Bioenergy?
- [10] O. Olsson, M. Becidan *et al.*, From Concept to Commercialization.
- [11] A.L. Cowie, G. Berndes *et al.*, *GCB Bioenergy*, 2021, **13**, 1210, DOI: **10.1111/gcbb.12844**.