



Working Paper Series

Petrochemical Hub of Ferrara: Development Strategies Between Innovation and Sustainability

by

Alessandro Bratti, Alberto Cavazzini, Elisa Chioatto, Massimiliano Mazzanti, Fabiola Onofrio

03/2023

SEEDS is an interuniversity research centre. It develops research and higher education projects in the fields of ecological and environmental economics, with a special focus on the role of policy and innovation. Main fields of action are environmental policy, economics of innovation, energy economics and policy, economic evaluation by stated preference techniques, waste management and policy, climate change and development.

The SEEDS Working Paper Series are indexed in RePEc and Google Scholar.

Papers can be downloaded free of charge from the following websites:

<http://www.sustainability-seeds.org/>.

Enquiries: info@sustainability-seeds.org

SEEDS Working Paper 03/2023

November 2023

By Alessandro Bratti, Alberto Cavazzini, Elisa Chioatto, Massimiliano Mazzanti, Fabiola Onofrio

The opinions expressed in this working paper do not necessarily reflect the position of SEEDS as a whole.

**Polo Petrolchimico di Ferrara:
strategie di sviluppo fra innovazione e sostenibilità**

(Petrochemical Hub of Ferrara: Development Strategies Between Innovation and Sustainability)

Alessandro Bratti^a, Alberto Cavazzini^b, Elisa Chioatto^c, Massimiliano Mazzanti^c, Fabiola Onofrio^c

^a Segretario Generale di Autorità di bacino distrettuale del fiume Po (ADBPO) e Ricercatore Universitario UniFE

^bUniversity of Ferrara, DOCPAS, Italy

^cUniversity of Ferrara, DEM, Italy

Keywords: *green transition, green chemistry, innovation, petrochemical industry*

Executive summary

Scientific evidence underscores the urgency of addressing global warming, attributed to climate-altering gas emissions from fossil fuels and unsustainable resource use. This is confirmed by the IPCC 2022 report emphasising the imperative for swift reductions in greenhouse gas emissions. In this context, the European Union faces economic, financial, and geopolitical challenges, necessitating a sustainable transition guided by the simultaneous evolution of ecological, financial, technological, cultural, and social dimensions (EEA, 2019)

The European Green Deal, initiated in 2019, lays out a long-term growth plan to achieve climate neutrality by 2050. This strategy seeks to enhance the industrial competitiveness of the EU while adapting to global environmental shifts (Kleimann et al., 2023; Aghion et al., 2023). In alignment with these objectives, the European Green Deal has underscored the pivotal role of the circular economy in reshaping existing production systems toward sustainable models. These models aim to drive economic growth while addressing significant environmental challenges.

The decoupling of economic growth from resource consumption and the transition to circular patterns of production and consumption is imperative to attain the EU's climate neutrality by 2050 and facilitate a green recovery post-COVID-19. Achieving climate neutrality goals will pose greater challenges for certain member states and regions, especially those heavily reliant on fossil fuels or with a substantial workforce in carbon-intensive industries. Nevertheless, recent events such as the pandemic and the Ukrainian crisis highlight the circular economy's potential to reduce economic reliance on third-party raw materials and energy, enhancing resilience to external shocks (MITE, 2022). In Italy, for instance, where internal raw material supplies are limited, and markets are geographically peripheral compared to Central Europe, the circular economy stands as a strategic objective (MITE, 2022).

Of particular significance in the shift toward a circular paradigm is the plastics sector. European regulations have implemented various intervention strategies to, on the one hand, manage plastic waste safely and, on the other hand, support recycling endeavours aimed at adding value to waste and enabling new applications. These objectives underscore the pivotal role that chemistry will play in identifying new technologies to enhance existing and emerging recycling processes. Currently, many plastic materials (e.g., mixed or contaminated) still conclude their life cycle in waste-to-energy plants. These are materials that either cannot be recovered through mechanical recycling or, when subjected to mechanical recycling, fail to attain a quality sufficient for reintroduction to the market. Based on these considerations, numerous Companies are investing in the development of chemical recycling processes capable of restoring the polymer to its original state.

In the broader context of sustainable development and environmental stewardship, the pivotal role played by local systems cannot be overstated. These systems, intricately woven into the fabric of communities, hold the key to fostering resilience, driving innovation, and implementing effective strategies to address pressing challenges. Their influence extends across various sectors, including economic, social, and environmental dimensions, making them indispensable in shaping a more sustainable and interconnected future. As we navigate complex global issues, recognising and supporting the pivotal role of local systems becomes paramount for achieving holistic and lasting positive change.

Against this background, this report delves into the current state and future development goals of the Ferrara chemical hub, emphasising the significance of innovative approaches for a sustainable petrochemical industry (Bertoni et al., 2006; Bracci et al., 2020). The objective is to comprehend the state of the art and potential future objectives of the “Polo Chimico of Ferrara” (Petrochemical Hub of Ferrara). To understand the possible future scenario, it is important to understand at first, the grassroots of the Ferrara hub and its impact on the territory. This research has shown that the “Polo Chimico di Ferrara”, from the 1930s, has a long history of transformation and innovation arriving to be a leader in the petrochemical industry for innovation and technology. The need to align with the European environmental targets has created the need to rethink the role of the hub. The future of the petrochemical industry in Europe and Italy hinges largely on the readiness and determination to initiate a virtuous cycle of innovation to meet the new goals of the green transition. All the Companies located in the industrial hub have already undertaken various initiatives aimed at achieving carbon neutrality, energy efficiency, and sustainability can be represented by the increasing commitment to the comprehensive recycling of plastics for the future of the Italian petrochemical industry and beyond. To attain the established goals, the presence of world-class chemical plants supported by research centres with consolidated experience is indispensable. These entities will play a crucial role in bolstering the existing petrochemical industry by introducing more sustainable innovations and technologies. Through the involvement of various stakeholders, the report provides an insight into possible scenarios that unfold due to the need to reorganise the future of the Ferrara chemical district from a sustainable perspective: the relationship between innovation and green jobs; the role of the chemical sector as a catalyst for more sustainable use and management of plastic materials; the role of research and development and the creation of new competences for a new job market. These elements should form the foundation for Polo Chimico’s novel transformation and innovation strategies, establishing a positive feedback loop that, in conjunction with the 'Integral plastic recycling' Project, would yield various advantages, benefiting not only the hub but also the entire Ferrara area in terms of both the environment and socio-economic aspects.

Premessa

Questo working paper è stato predisposto dall'Università degli Studi di Ferrara su richiesta della Regione Emilia Romagna, con lo scopo di favorire la discussione su diversi scenari possibili di sviluppo futuro del Polo Chimico di Ferrara.

È, pertanto, da intendersi come un documento aperto, una base per un confronto con le aziende insediate, le istituzioni nazionali, regionali e locali, le rappresentanze sindacali per individuare possibili sviluppi futuri del Polo, all'interno di una strategia complessiva che mette al centro la transizione ecologica e gli obiettivi del Green deal europeo e dell'Agenda 2030.

La metodologia di lavoro che si è seguita è basata su un lavoro di recupero documentale, svolto in stretta collaborazione con il Centro Documentazione Studi (CDS), per ripercorrere sinteticamente la storia del Polo e su una serie di interviste con vari stakeholder nazionali ed esperti del settore. Si sono consultati, inoltre, vari documenti recenti riportati nella bibliografia finale.

Emergono due temi che vorremmo enfatizzare tra i tanti e che costituiscono a nostro avviso la chiave di lettura per tutto il documento.

Il primo, e più importante, è che le aziende del Polo sono in possesso, o stanno sviluppando, le tecnologie per affrontare le sfide della transizione ecologica. Ci sono numerosi esempi di processi altamente innovativi e tecnologicamente avanzati già sviluppati su scala pilota che vanno proprio in questa direzione.

L'altro tema, altrettanto evidente, è che la transizione, intesa qui come industrializzazione dell'innovazione, richiede tempo. In questo periodo è necessario garantire la sopravvivenza delle attività produttive attualmente presenti con azioni concrete che consentano anche l'efficientamento e l'ammodernamento generale del Polo chimico e che richiedano scelte politiche mirate.

L'Università può contribuire con le peculiarità che le sono proprie: la formazione delle giovani generazioni per l'acquisizione di nuove competenze (green skills) necessarie per rendere coerente il capitale umano con lo sviluppo tecnologico orientato alla transizione ecologica e giusta, per la gestione dei nuovi processi tecnologici e la ricerca di base a supporto di specifiche richieste del mondo produttivo con particolare attenzione al territorio.

È un dato di fatto che nella transizione stia emergendo ed emergerà sempre di più la richiesta di nuove occupazioni "verdi". Tuttavia, è rilevante notare che molte occupazioni chiave per la transizione ecologica sono occupazioni già esistenti. Data l'articolazione delle attività svolte nel luogo di lavoro, infatti, alcune competenze che potrebbero essere definite "brown" sono funzionali allo svolgimento di attività verdi. Non si possono creare occupazioni/bundles-di-competenze verdi al 100%, ma la complementarità tra competenze è centrale nel processo di transizione. Comprendere questa complementarità è fondamentale, così come è fondamentale mappare la distanza tra le competenze esistenti "brown" e quelle verdi, per favorire il riposizionamento dei lavoratori, soprattutto quelli con un basso livello di specializzazione e formazione (low-skilled).

Sommario

1. Introduzione e contesto.....	7
2. Il ruolo della politica ambientale nella transizione verde	10
3. Innovazione e nuove competenze verdi.....	12
4. Il settore della chimica come catalizzatore per un utilizzo e gestione più sostenibile dei materiali plastici	15
5. Passato del Polo chimico Ferrarese e rapporti con l'Amministrazione locale.....	22
6. Prospettive future.....	28
7. Altri scenari e prospettive per la transizione sostenibile del settore chimico	31
Ringraziamenti	64
Riferimenti bibliografici	65

Acronimi

CERCIS - CEntre for Research on Circular economy, Innovation and SMEs

DSSC - Celle solari sensibilizzate da coloranti

EPA – Environmental Protection Agency USA

E-PV – Tecnologie fotovoltaiche emergenti

EU – Unione Europea

FDCA - Acido furandicarbossilico

GH – Green chemistry (chimica verde)

IEA - Agenzia Internazionale dell'Energia

IP – Ipotesi di Porter

IRA - Inflation Reduction Act

ISCO – Indicatore sintetico di competitività strutturale

LCA – Life cycle assessment

LYB - LyondellBasell

MIUR – Ministero dell'Istruzione, dell'Università e della Ricerca

MoReTec - Molecular Recycling Technology

NREL – National Renewable Energy Laboratory

NZE – Net Zero emissions

OCLV - Oxy Low Carbon Ventures

OSC – Organic Solar Cell

PNNL – Pacific Northwest National Laboratory

PNRR - Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza

PSC – Perovskite Solar Cells

SER – Surfactant Enhanced Recovery

SMEs – Piccole e medie imprese (Small and medium-sized enterprises)

WCED – Commissione Mondiale sull'ambiente e sullo sviluppo

UE - Unione Europea

US DoE – Department of Energy degli Stati Uniti

1. Introduzione e contesto

L'evidenza scientifica della consistenza del riscaldamento globale e che a causarlo siano le emissioni di gas climalteranti dovuti all'impiego dei combustibili fossili e dall'uso non sostenibile delle risorse e del territorio, impone l'attuazione di una transizione finalizzata alla neutralità carbonica e di uno sviluppo sostenibile. Per realizzare una *transizione sostenibile* in Europa e al di fuori di essa, l'Unione Europea (UE) si trova ad affrontare sfide economiche, finanziarie e geopolitiche, tra cui l'elevata inflazione, la scarsa resilienza agli shock esterni (per esempio nuove pandemie e conflitti), la forte dipendenza dalle importazioni di energia e di materie prime critiche, gli elevati deficit fiscali e il debito pubblico di alcuni Paesi, potenziali divergenze in termini di crescita e sviluppo tra Paesi e regioni (IPCC, 2022). Da questo emerge che la transizione verso la sostenibilità dovrà essere guidata dalla co-evoluzione di molteplici transizioni (ecologica, tecnologico/digitale, culturale, sociale finanziaria/fiscale), avviate in diverse dimensioni geografiche e temporali, e con impatti su diverse scale sociali. Queste mega-tendenze demografiche (ad esempio, l'invecchiamento della popolazione nei Paesi più avanzati e Cina, esplosione della popolazione nel Sud-Est asiatico e in Africa, d'altra parte il calo delle aspettative di vita nell'UE e nel Regno Unito) e tecnologiche (ad esempio, intelligenza artificiale, eco-innovazioni), daranno inevitabilmente forma ai nuovi percorsi di sostenibilità, comportando cambiamenti nei modi di consumare e produrre, e di conseguenza negli approcci politici alla transizione stessa (EEA, 2019).

In merito all'emergenza dettata dagli impatti del cambiamento climatico, il rapporto IPCC del 2022 dimostra come le economie avranno bisogno di rapide e sostenute riduzioni delle emissioni di gas ad effetto serra, il target di azzeramento delle emissioni nette di CO₂ rappresenta infatti un obiettivo centrale. A questo proposito, nel dicembre 2019 la leadership europea ha stilato l'*European Green Deal* che delinea il piano di crescita a lungo termine dell'Europa con l'obiettivo di renderla un continente neutrale dal punto di vista climatico entro il 2050, in cui la crescita economica sia disaccoppiata dall'uso delle risorse, innovativo e socialmente inclusivo. Il piano è parte integrante della strategia della Commissione per l'attuazione dell'Agenda 2030 delle Nazioni Unite e degli obiettivi di sviluppo sostenibile che mirano a coniugare la piena sostenibilità ambientale, economica e sociale (Commissione Europea, 2019). Oltre alle proposte relative al raggiungimento di un'industria a zero emissioni, il Piano Industriale include, tra gli altri, proposte inerenti alla regolamentazione delle materie prime critiche (che ha portato a marzo 2023 all'emanazione del Critical Raw Materials Act), all'accelerazione dell'accesso ai finanziamenti per le tecnologie verdi e alla creazione di competenze per la transizione industriale verde. La strategia mira a rafforzare la competitività industriale dell'UE perseguendo gli obiettivi della transizione climatica e digitale. Il quadro strategico proposto si basa sui concetti di "autonomia strategica aperta" e "autosufficienza", portando così a un

cambiamento del ruolo internazionale e della politica commerciale dell'UE, anche in risposta alle spinte protezionistiche dell'IRA (Inflation Reduction Act) degli Stati Uniti (Kleimann et al., 2023; Aghion et al., 2023).

Con il Green Deal europeo è stato dato ulteriore impulso al ruolo dell'economia circolare nel plasmare gli attuali sistemi di produzione verso modelli sostenibili, in grado di accelerare la crescita economica affrontando al contempo le principali sfide ambientali. Il disaccoppiamento della crescita economica dall'uso delle risorse e il passaggio a sistemi circolari di produzione e consumo sono infatti riconosciuti come fondamentali per raggiungere la neutralità climatica dell'UE entro il 2050 e garantire una ripresa verde dopo il COVID-19. È chiaro che per alcuni Stati membri e regioni il raggiungimento degli obiettivi di neutralità climatica saranno più impegnativi che per altri. Infatti, alcuni dipendono maggiormente dai combustibili fossili o sono caratterizzati da un elevato numero di occupati in industrie ad alta intensità di carbonio. Tuttavia, circostanze recenti, come la pandemia e la crisi ucraina, hanno ulteriormente evidenziato le opportunità che l'economia circolare può offrire anche per alleviare la dipendenza economica da materie prime ed energia provenienti da Paesi terzi, rendendola così più resiliente agli shock esterni (MITE, 2022). In Italia, ad esempio, dove l'approvvigionamento interno di materie prime è scarso e i mercati sono geograficamente marginali rispetto all'Europa centrale, l'economia circolare rappresenta un obiettivo strategico (MITE 2022).

Congiuntamente i target stabiliti dall'Agenda 2030 e dal Green Deal Europeo rappresentano la bussola per la definizione di nuove politiche e strategie non solo per i governi nazionali degli stati membri, ma anche per i governi regionali e le amministrazioni locali, i quali assumono un ruolo chiave nell'attuazione della normativa. Il Patto per il Lavoro ed il clima è la strategia della Regione Emilia-Romagna per lo sviluppo del territorio in linea con gli obiettivi condivisi dall'Accordo di Parigi e dall'Unione Europea e in accordo con la Strategia Nazionale per lo Sviluppo Sostenibile e il Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR). Insieme a questo si distinguono altri documenti strategici ovvero: il documento strategico regionale per la programmazione unitaria delle politiche europee di sviluppo 2021-2027 (DSR); la Strategia specializzazione intelligente 2021-2027; la Strategia regionale FESR per la programmazione 2021-2027 e la VAS; e il Programma FSE+ per la programmazione 2021-2027.

Tra gli obiettivi del Patto per il Lavoro ed il clima emerge la centralità di improntare un progetto di sviluppo nuovo di ripartenza che ha come prerogativa l'affermazione di una transizione ecologica *giusta*: ciò significa considerare nel passaggio a modelli di produzione sostenibili anche l'inclusione di interventi sociali necessari a garantire i diritti dei lavoratori e i mezzi di sussistenza delle persone, posti di lavoro, nuove competenze e condizioni di vita dignitose. Tra gli altri, il Patto stabilisce il

target di azzeramento delle emissioni per raggiungere la neutralità carbonica prima del 2050 ed il passaggio al 100% delle energie rinnovabili entro il 2035. Rafforzare la base industriale utilizzando la spinta verde permetterà di affrontare congiuntamente la diffusione del nuovo protezionismo globale, l'emergenza ambientale e gli effetti della nuova rivoluzione digitale. Centrale in questo passaggio è il ruolo del sistema produttivo che è chiamato a svolgere il ruolo di motore del cambiamento, della crescita e dell'innovazione. Le imprese dovranno ripensare e creare nuovi modelli di business compatibili con un approccio circolare e porre l'innovazione al centro di questo percorso. Si tratta di una doppia dimensione. Da un lato, gestire le risorse in modo più efficiente, sicuro ed estendere il loro utilizzo (dimensione a monte). Dall'altro, ridurre i residui e consentirne il riutilizzo e il ritorno a nuovi processi produttivi (dimensione a valle). In questa prospettiva, il settore industriale necessita da un lato di sostegno da parte delle politiche per avviare investimenti in innovazione (*vedi par.2*) volti a riconvertire gli attuali modelli e dall'altro investimenti volti alla creazione di nuove imprese e posti di lavoro. (*vedi par. 3*) (Zoboli et al., 2020). Spianare la strada all'obiettivo vincolante di riduzione delle emissioni di gas serra richiede un sostanziale intervento in tutti i settori economici.

Di particolare rilevanza nello sviluppo verso un paradigma circolare è il settore, in senso lato, della plastica.¹ Molteplici sono state le linee di intervento adottate dalla normativa Europea per, da un lato, gestire in maniera sicura i rifiuti plastici e dall'altro supportare il riciclo finalizzato a fornire valore agli scarti consentendone nuovi impieghi. Questi obiettivi portano in primo piano il ruolo che dovrà giocare la chimica nell'individuazione di nuove tecnologie volte all'efficientamento dei processi di riciclo attuali ed emergenti. Attualmente ancora molti materiali plastici (per esempio misti o contaminati) terminano il loro ciclo vita nei termovalorizzatori. Questi sono materiali che o non riescono a essere recuperati tramite riciclo meccanico oppure che tramite il riciclo meccanico non riescono ad ottenere una qualità tale da essere poi reintrodotti nel mercato. Sulla base di queste premesse sono numerose le realtà che stanno investendo per realizzare processi basati sul riciclo chimico, in grado di riportare il polimero alla sua natura.

Questo rapporto si pone l'obiettivo di indagare lo stato dell'arte e possibili obiettivi di sviluppo futuri del polo chimico di Ferrara. Il futuro dell'industria Petrolchimica in Europa e in particolare nel nostro Paese dipende dalla disponibilità e ambizione di avviare un ciclo virtuoso di innovazioni che sappiano affrontare i nuovi obiettivi posti dalla transizione ecologica. Tutte le aziende insediate nel polo hanno già intrapreso diverse iniziative finalizzate alla neutralità carbonica, all'efficientamento energetico e alla sostenibilità. La sintesi di tali iniziative può essere rappresentata dall'impegno crescente nel

¹ Con il termine plastica, in questo report, si intende qualsiasi materiale organico a elevato peso molecolare, ottenuto industrialmente da monomeri derivati da fonti fossili, i quali determinano con la loro composizione il quadro specifico delle caratteristiche dei materiali stessi e la valorizzazione del suo rifiuto come input produttivo.

riciclo integrale della plastica per il futuro della Petrolchimica italiana e non solo. È del tutto evidente che per raggiungere gli obiettivi posti sia fondamentale la presenza di stabilimenti chimici di livello mondiale supportati da Centri di Ricerca con consolidata esperienza. Quello che si ha di fronte è infatti innanzitutto un obiettivo di sistema: garantire la salvaguardia dell'industria Petrolchimica attraverso il rilancio di uno sviluppo sostenibile. In questo senso, si ritiene che sia possibile ripercorrere il percorso già vissuto a Ferrara presso il Centro Ricerche Giulio Natta con la realizzazione del polipropilene negli anni '50 a livello pilota e poi industriale e successivamente, negli anni '80, con le svolte innovative del processo di produzione Spheripol, caratterizzato da notevoli risparmi energetici ed enormi vantaggi ecologici, seguito alcuni anni dopo dal processo Catalloy. Con lo stesso impegno, perseguire l'obiettivo del riciclo integrale della plastica potrebbe quindi essere lo strumento attraverso il quale il Polo chimico di Ferrara potrà trovare il suo futuro (Bertoni et al., 2006; Bracci et al., 2020).

2. Il ruolo della politica ambientale nella transizione verde

L'innovazione tecno-organizzativa, legata ai complementari processi di human resource management (Antonioli et al., 2013) è un fattore cruciale per permettere alle imprese di riorganizzare gli attuali modelli di produzione verso sistemi più sostenibili, *innovation e knowledge based* (Barbieri et al., 2016; Kemp, 2010). Tuttavia, la presenza di barriere come vincoli finanziari, rischi elevati, inerzia organizzativa (Ambec et al., 2013; Speck e Zoboli, 2017), possono ostacolare l'invenzione (brevetti), l'adozione di innovazione e la diffusione nei territori, settori, filiere. In questo contesto, risulta fondamentale il ruolo che le politiche ambientali (tassazione, sistemi di permessi scambiabili quale l'ETS europeo, schemi di liability, best available technology, etc.) assumono per sostenere l'introduzione di innovazione.

Uno dei primi contributi a favore dei potenziali effetti positivi della regolamentazione ambientale sulle imprese viene dal lavoro degli economisti Porter e van der Linde (1995), che segue il noto contributo di Porter sui vantaggi competitivi (Porter, 1991), i quali definirono la regolamentazione ambientale come non necessariamente dannosa per le prestazioni delle imprese. Fino a quel momento infatti, prevaleva tra gli economisti un filone di pensiero 'statico' secondo il quale richiedere alle imprese di ridurre un'esternalità come l'inquinamento, avrebbe comportato necessariamente un costo aggiuntivo, che per definizione avrebbe eroso profitti e competitività (Ambec et al., 2011).

L'ipotesi avanzata da Porter e van der Linde, innestata in un paradigma dinamico di effetti delle politiche e co-evoluzione tra politiche e innovazioni, sostiene che quando le politiche ambientali sono ben concepite (well designed nella formulazione Porteriana), l'innovazione indotta dalla

regolamentazione può generare effetti positivi nel medio e lungo periodo, portando a soluzioni "win-win" che controbilanciano (offset) i costi di adeguamento alla normativa. L'ipotesi è da esaminare settore per settore, al fine di quantificare il tempo necessario perché le innovazioni di processo e prodotto possano portare quei risparmi di efficienza (innovazione di processo) e maggiore valore aggiunto (ad esempio, di prodotti green), tali da più che compensare le spese di investimento (es. R&D, costi delle innovazioni, etc.). L'applicazione di pratiche innovative può portare quindi ad un miglioramento dell'efficienza nell'uso di quelle risorse e/o un incremento del valore aggiunto, che generano a loro volta effetti positivi in termini di produttività e posti di lavoro.

Successivamente, in un periodo di ampia discussione degli effetti delle politiche ambientali, tra la Rio Convention del 1992 e il Protocollo di Kyoto, Jaffe e Palmer (1997) articolano ulteriormente l'ipotesi e ne riconoscono diverse caratterizzazioni. La declinazione principale è la presenza (i) dell'effetto delle politiche sulle innovazioni, e (ii) l'effetto delle innovazioni su elementi di performance quali produttività, in primis, e possibilmente anche profitti e occupazione (Costantini e Mazzanti, 2012; Cecere e Mazzanti, 2017). Il perimetro di questi effetti può essere l'impresa, il settore, la regione, o un paese nel suo complesso.

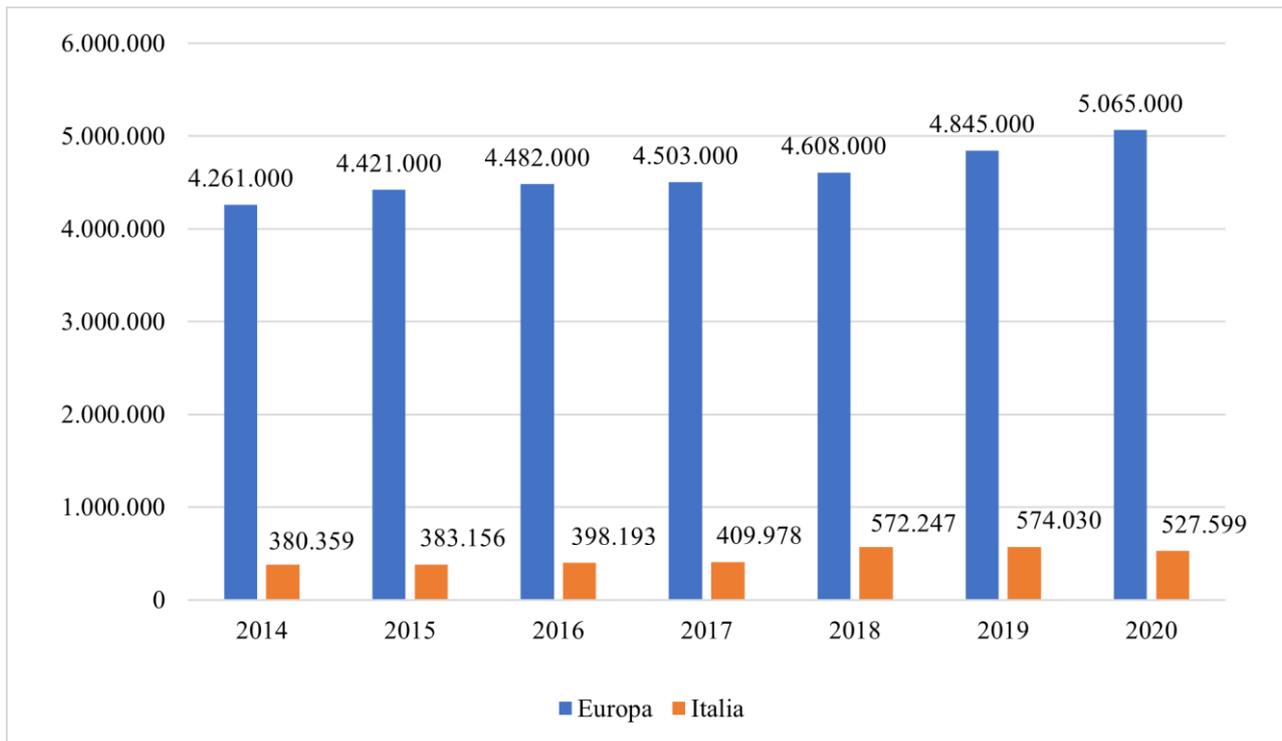
In sintesi, il quadro fondamentale di analisi è la valutazione dell'ipotesi che le politiche ambientali possano indurre innovazioni tecno-organizzative per l'impresa e il sistema produttivo, attraverso la diffusione delle innovazioni (Borghesi et al., 2015, Cainelli et al., 2012; Costantini e Mazzanti, 2013). L'approccio empirico valuta conseguentemente l'impatto delle innovazioni indotte dalla regolamentazione ambientale su indicatori di performance dell'impresa/settore/filiera (Antonioli et al., 2022). La disamina dell'ipotesi di Porter può supportare evidenze empiriche a supporto di una relazione positiva tra una efficace e ben congegnata regolamentazione ambientale e la competitività di un sistema economico. Questa visione contrasta con l'ipotesi secondo la quale una politica ambientale più stringente possa indurre le imprese a lasciare il Paese per stabilirsi dove i regimi normativi sono meno severi/costosi-

Questo tema diventa di particolare rilevanza nel contesto attuale, in cui l'emergere di problematiche ambientali globali ha determinato l'esigenza di sviluppare nuove soluzioni tecnologiche con il supporto di normative sempre più ambiziose.

3. Innovazione e nuove competenze verdi

Se da un lato risulta quanto politica ed innovazione siano strettamente collegate, dall'altro occupazione, lavoro e competenze costituiscono un tema centrale per guidare e implementare la transizione sostenibile.

Figura 1: Occupazione nel settore dei beni e servizi ambientali in Italia e UE27 2014-2020 (equivalente a tempo pieno)



Elaborazione propria da Eurostat, 2023²

Come mostra la Figura 1, tra il 2014 e il 2020, si è verificato in Italia ed in Europa un progressivo aumento dell'occupazione nei settori economici che generano *prodotti ambientali*, ossia beni e servizi prodotti per la protezione dell'ambiente o la gestione delle risorse. La necessità di un cambiamento radicale nelle tecnologie di produzione e nei modelli di business richiede infatti un profondo cambiamento nelle mansioni svolte dai lavoratori e, di conseguenza, delle competenze richieste per i posti di lavoro nuovi ed esistenti. Tuttavia, non solo i posti di lavoro rappresentano fattori cruciali

² I dati prendono in considerazione l'occupazione nei 27 paesi dell'Europa, nel periodo 2014-2020. L'unità di misura è espressa in "equivalente a tempo pieno", un'unità di misura utilizzata per comprendere il numero di lavoratori a tempo pieno necessari per svolgere una determinata attività. È usata anche per convertire le ore lavorate part-time in ore lavorate da lavoratori a tempo pieno. In altre parole, identifica la produttività totale in base alle ore di lavoro del personale. Eurostat. Employment in the environmental goods and services sector. ENV_AC_EGSS [https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/ENV_AC_EGSS1\\$DEFAULTVIEW/default/bar?lang=en](https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/ENV_AC_EGSS1$DEFAULTVIEW/default/bar?lang=en)

nella transizione, ma risultano anche una dimensione critica derivante dalla necessità di affrontare le conseguenze distributive negative che ne conseguono (Costantini et al., 2023). In questo contesto emerge anche l'importanza del ruolo della formazione, infatti le nuove competenze del mercato del lavoro richiedono un dialogo con le istituzioni e le università. Il sistema di formazione ha necessità di dialogare con i settori di competenza formando figure professionali che siano in grado di muoversi all'interno di un mercato in continua trasformazione. In più bisogna ricordare che i lavori di per sé possono non essere totalmente green o carbon intensive, ma possono avere fasi e mansioni che tenderanno più verso il green e la sostenibilità o più verso mansioni carbon intensive (Barbieri et al., 2023). In altre parole, anche nell'impresa più green, la sostenibilità dipende dalla singola mansione e/o compito svolto, e pertanto sono questi ultimi che devono essere valutati. Da questo consegue che le nuove figure professionali devono essere in grado di muoversi all'interno di un sistema flessibile lungo tutto lo spettro della sostenibilità.

Per queste ragioni, è importante attuare strategie in grado di sviluppare il giusto set di competenze per la duplice transizione verde/digitale e allo stesso tempo creare opportunità di lavoro per le figure che uscirebbero da questo nuovo mercato del lavoro. Attualmente, non sembra esserci una comprensione abbastanza chiara sul tema. I rapporti ILO-Cedefop degli anni 2010 e 2011 presentano una prima panoramica degli studi relativi all'identificazione delle competenze verdi. Le analisi condotte fino a quel momento, principalmente di natura qualitativa, hanno evidenziato che i lavori nel settore verde generalmente richiedono una base di competenze di tipo STEM (Scienze, Tecnologia, Ingegneria, Matematica) e competenze meno specifiche riguardanti la comunicazione, la leadership e la gestione. In seguito, il lavoro di Consoli et al. (2016) ha valutato le differenze sistematiche tra le professioni verdi e altre professioni simili. I risultati hanno indicato che le professioni verdi richiedono un maggior contenuto di competenze non routinarie di tipo cognitivo e comunicativo, oltre a requisiti più elevati in termini di istruzione formale, formazione sul posto di lavoro ed esperienza. Più di recente, Vona e colleghi (2018) hanno provato a identificare l'insieme delle competenze necessarie per le occupazioni verdi negli Stati Uniti. I risultati evidenziano la rilevanza di quattro gruppi di competenze: 1) tecniche e ingegneristiche; 2) scientifiche; 3) di monitoraggio; 4) di gestione operativa. Lo studio dimostra come questo set di competenze siano risultate maggiormente richieste in regioni con normative ambientali più severe (per esempio, controllo dell'inquinamento ambientale più stringente) rispetto ad altre aree. Tuttavia, questi risultati rappresentano solo un primo passo verso una più dettagliata comprensione delle competenze richieste per ciascuna tecnologia ambientale e/o modelli di business sostenibile. Diventa perciò urgente una maggiore comprensione di quale sia l'insieme delle competenze verdi rilevanti per aumentarne l'offerta e per indirizzare gruppi specifici di lavoratori attraverso politiche attive del mercato del

lavoro, formazione e politiche educative (Vona et al., 2018; Marin, 2021). Questo appare particolarmente importante se si prendono in considerazione altri dati che riguardano variazioni dell'occupazione per competenze generali verdi in seguito alla crisi da COVID-19 e il conseguente intervento da parte dei governi per stimolare una ripresa in chiave green in risposta all'eccezionale crollo del PIL e dei livelli occupazionali. Lo studio di Marin (2021) confronta dati di Stati Uniti e Italia e mostra come il calo assoluto dell'occupazione sia stato molto eterogeneo. In entrambi i Paesi, la maggior parte della distruzione di posti di lavoro sia nel breve che nel lungo periodo ha coinvolto occupazioni con bassi livelli di competenze “generali verdi” (green general skills), mentre la ripresa ha coinvolto principalmente occupazioni con alti livelli di competenze verdi. L'implicazione è che i posti di lavoro che probabilmente riceveranno una superiore richiesta grazie ai piani di ripresa verde non hanno subito perdite di posti di lavoro e, allo stesso tempo, i posti di lavoro che sono stati persi potrebbero non possedere le competenze adeguate a trarre vantaggio dagli stimoli fiscali verdi. Risultati simili si possono osservare considerando i dati sulle offerte di lavoro online del Centro europeo per lo sviluppo della formazione professionale (Marin, 2021). Questi ultimi dimostrano come offerte di lavoro online che implicano la presenza di competenze verdi (sul totale delle offerte di lavoro online) nell'UE27 rappresentano il 7,9% del totale, soprattutto per quanto riguarda le competenze ingegneristiche e tecniche (5,2%). Inoltre, la domanda di competenze verdi sta subendo crescita molto rapida: il tasso di crescita tra il primo trimestre del 2020 e il primo trimestre del 2021 è stato dell'88,5%, ossia quasi 9 volte più grande del tasso di crescita medio della domanda di competenze nello stesso periodo (10,2%) (Marin, 2021). In un recente lavoro Costantini e colleghi (2023) con lo scopo di illustrare come le competenze verdi influenzino le dinamiche del mercato del lavoro in Italia, mostrano l'andamento e la distribuzione degli annunci di lavoro raccolti nel periodo triennale 2020-2022 e analizzati nel contesto del WIH-OJA con una frequenza trimestrale. Il risultato significativo è che in Italia c'è una forte domanda di lavoratori altamente qualificati con competenze verdi. La richiesta di queste figure professionali ad alta intensità di competenze verdi è molto più elevata rispetto agli altri gruppi che hanno livelli di competenze diversi. Ogni trimestre, in media, si sono aperte circa 86mila posizioni lavorative per queste figure, mentre gli annunci relativi alle altre tre categorie sono stati in media inferiori a 45mila unità per trimestre. Tra queste, più della metà sono posizioni che richiedono competenze medie, mentre le posizioni con richiesta di competenze verdi associate a livelli di qualifica bassi sono una piccola porzione del totale.

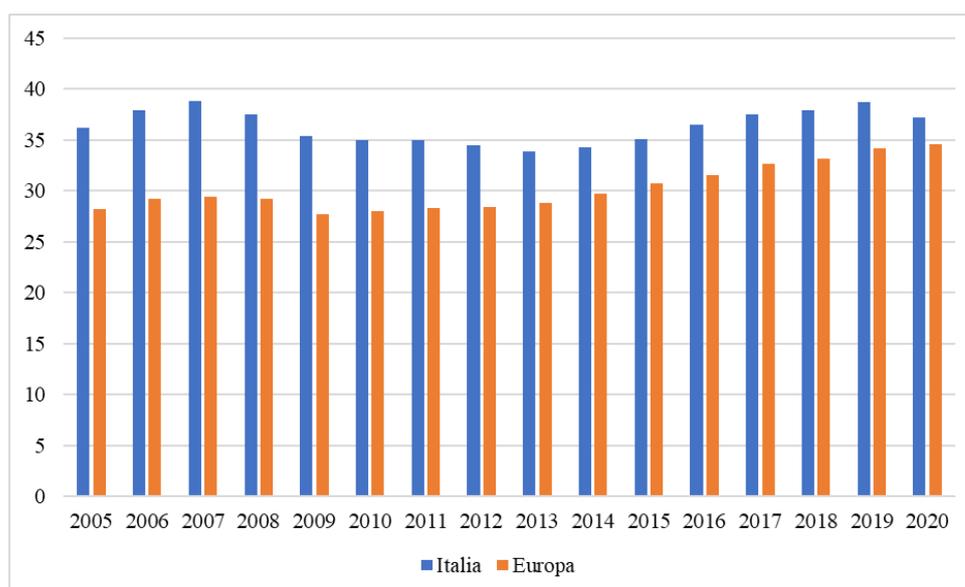
L'industria manifatturiera subirà profonde trasformazioni nei processi produttivi, necessarie per ottenere significative riduzioni dell'impatto ambientale. Di conseguenza, coloro che lavorano in settori con elevate emissioni di gas serra avranno meno opportunità di beneficiare della formazione per opportunità di lavoro verde. Affrontare queste sfide richiederà una riflessione e un aggiornamento

dei programmi di studio e dei corsi di formazione, al fine di consentire ai lavoratori di acquisire le competenze richieste dal mercato del lavoro in continua evoluzione (Costantini et al., 2023)

4. Il settore della chimica come catalizzatore per un utilizzo e gestione più sostenibile dei materiali plastici

La plastica ricopre un ruolo importante nello sviluppo dei processi produttivi e sistemi economici. Ciò deriva dalla sua flessibilità, leggerezza, resistenza, impermeabilità, facilità di sterilizzazione e stabilità, che consentono una varietà di applicazioni in diversi settori. Per questi motivi, la domanda di plastica e di conseguenza la generazione di rifiuti di materiale plastico sono ancora molto elevati.

Figura 2: Generazione di rifiuti derivanti da imballaggio di plastica in Italia ed UE27 2005-2020 (kg per capita)



Elaborazione propria da Eurostat, 2023³

Per esempio, per quanto concerne i rifiuti da imballaggio, la Figura 2 mostra un aumento dei rifiuti derivanti da imballaggi di plastica nel periodo compreso tra 2005 e 2020 in Europa e più nello specifico in Italia. I dati italiani, partendo dal 2005, mostrano un'oscillazione tra 2008 e 2009 probabilmente dovuta alla recessione economica di quegli anni, e successivamente, dal 2010, un

³ I dati mostrano l'andamento della produzione degli imballaggi di plastica nei 27 paesi dell'Europa. Con il termine "imballaggi" si intende tutti i prodotti utilizzati per il contenimento, la protezione, la movimentazione, la consegna e la presentazione delle merci, dalle materie prime alle merci lavorate, dal produttore all'utilizzatore o al consumatore.

Eurostat. Generation of plastic packaging waste per capita. CEI_PC050

https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/CEI_PC050/default/table

costante aumento, fino ad arrivare al 2020 con 35 chilogrammi per capita di rifiuti, contro il 37 chilogrammi della media europea.

Date le numerose proprietà fisiche dei prodotti plastici, il problema di questo materiale risiede in particolare nell'abuso e nel suo non corretto smaltimento. Per queste ragioni, negli ultimi anni l'UE ha progressivamente aumentato la sua attenzione per garantire un uso più sostenibile delle materie plastiche e una gestione dei rifiuti meno impattante a livello ambientale. Le strategie e direttive approvate in materia sono molteplici.

Da un lato, la normativa sulla plastica rientra sotto i target che regolano la raccolta dei rifiuti urbani, revisionata in seguito all'emanazione del Piano di Azione per un'economia circolare del 2015. L'UE ha rafforzato gli obiettivi fissati per il riutilizzo e il riciclaggio approvando il target del 65% di riciclo di rifiuti urbani, entro il 2035, e conferimento di rifiuti in discarica inferiore al 10%, con divieto di conferire rifiuti differenziabili, entro il 2035 (Direttiva 2018/851/UE). Inoltre, per contrastare i rifiuti da imballaggi, l'UE stabilisce che il 70% dei rifiuti da imballaggio vengano riciclati entro il 2030, con obiettivi diversi per singolo materiale. Per quanto riguarda la plastica, il 55% dei rifiuti derivanti da imballaggio dovranno essere sottoposti a pratiche di riciclo entro il 2030 (Direttiva 2018/852/UE). D'altra parte il settore della plastica è regolamentato da una normativa *ad hoc* tra cui la Direttiva 2019/904/UE che impone divieti/limitazioni sull'utilizzo di plastiche monouso da giugno 2019 e la Strategia europea per la plastica nell'economia circolare. Nello specifico, la Strategia europea per la Plastica nell'Economia Circolare fissa tre obiettivi da raggiungere entro il 2030: 1) almeno il 50% dei rifiuti in plastica dovrà essere riciclato; 2) il 100% degli imballaggi dovrà essere riutilizzabile o riciclabile; 3) la capacità di selezione e di riciclaggio dei rifiuti in plastica dovrà essere quadruplicata rispetto al 2015. Investire in ricerca e innovazione tecnologica è fondamentale per raggiungere questi obiettivi e ridefinire il futuro della plastica continuando allo stesso tempo a godere del valore economico di questo settore (EEA, 2023).

Analizzando i dati dello studio Ambrosetti infatti il settore della plastica ha generato, nel 2020, 44,9 miliardi di Euro di fatturato (il 4,6% del totale manifatturiero italiano), posizionandosi all'8° posto tra i settori manifatturieri italiani con riferimento a tale dimensione. Per quanto riguarda la domanda di plastica l'Italia si colloca al secondo posto in UE, con oltre 6,9 milioni di tonnellate (2020), seconda solo alla Germania con 23,3 milioni di tonnellate e con valori pari al doppio di quelli di Regno Unito e Spagna. La domanda di plastica è caratteristica di tutti i settori industriali, dal packaging (40,5%), alle costruzioni (20,4%), all'automotive (8,8%), all'elettrica ed elettronica (6,2%), casa, tempo libero e sport (4,3%) e agricoltura (3,2%). Inoltre, essa trova ampio impiego nel settore biomedicale. Dal lato della produzione, il settore della plastica italiana ha generato nel 2020 €45,8 mld di fatturato (8°

settore manifatturiero in Italia), €12,7 mld di Valore Aggiunto (5° settore manifatturiero in Italia), sostenendo circa 180 mila occupati. Infine, per quanto concerne l'occupazione, i dati dimostrano un aumento del numero di occupati pari al +17,3% tra il 2016 e il 2020, mentre, nello stesso arco temporale, si è ridotto il numero di imprese del -26,8%. Questo dimostra che l'industria italiana delle materie plastiche è un'industria capace sulla quale continuare a puntare (The European House – Ambrosetti, 2022).

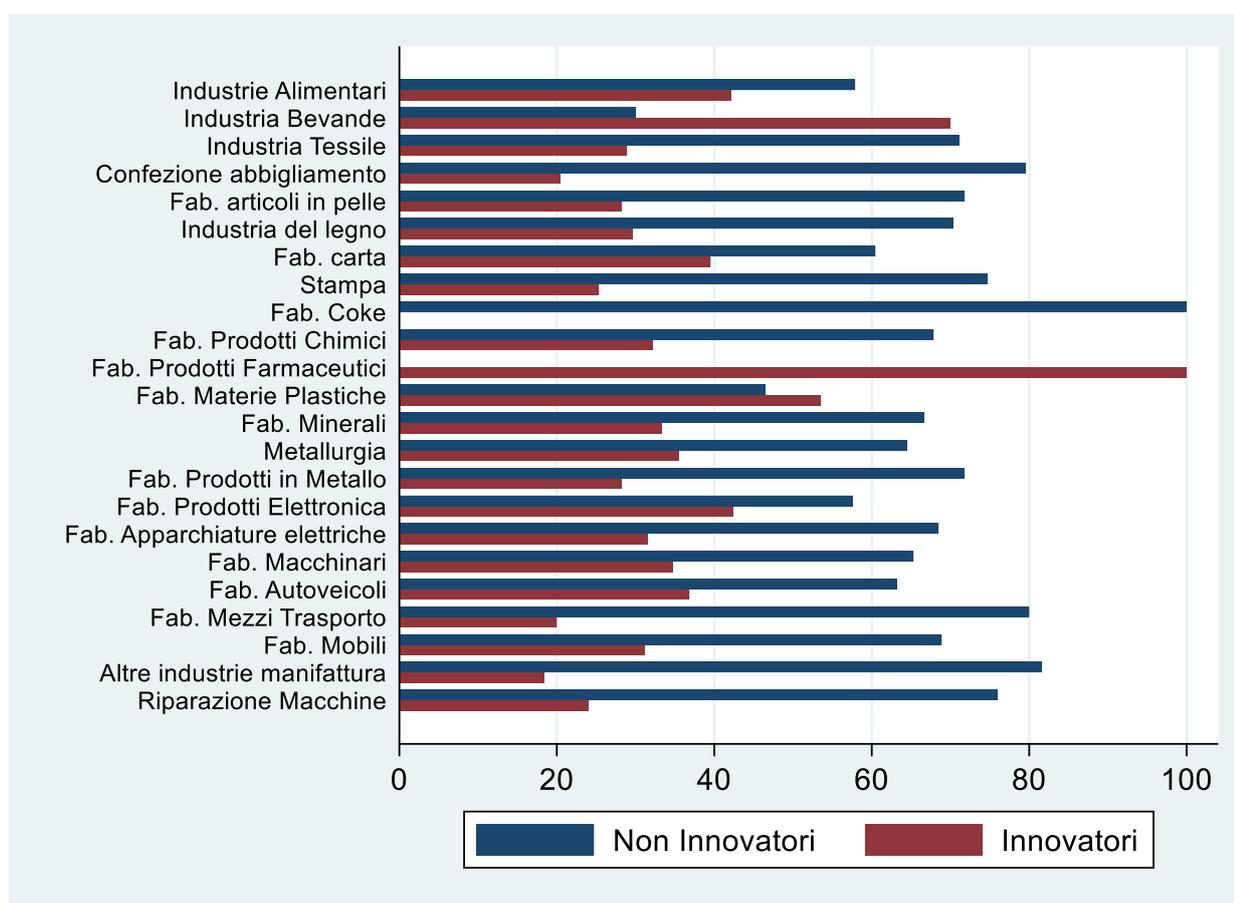
La possibilità di ripensare ad un nuovo futuro in ottica verde per la plastica e di mantenere perciò il valore che questa rappresenta a livello economico dipende fortemente dagli investimenti indirizzati al settore più ampio della chimica di cui fa parte.

Il settore della chimica è al sesto posto tra i settori industriali del paese, confermandolo uno dei settori principali dell'economia italiana. Secondo i dati di Federchimica, infatti, il valore della produzione chimica in Italia si aggira intorno ai 56 miliardi di euro, confermando l'Italia al terzo posto tra i paesi produttori di chimica con una quota del 9,5% del mercato. Secondo i dati ISTAT, l'industria chimica italiana si colloca ai vertici della classifica di competitività dei settori produttivi. Tale posizionamento - secondo l'Indicatore sintetico di competitività strutturale (ISCO) - rappresenta un prerequisito per lo sviluppo di piani d'azione per la sostenibilità sociale e ambientale dell'Italia. A partire dal 2022, però, secondo i dati Federchimica Confindustria, il settore della chimica italiana, nei mesi estivi ha subito una brusca frenata (-7,5% sullo stesso periodo del 2021), soprattutto a causa della crisi energetica e della situazione conflittuale tra Russia e Ucraina e nel 2023 si prevede un calo della produzione chimica del 2% circa. La crisi energetica ha particolarmente colpito il settore chimico, non solo perché i combustibili fossili sono fonti di energia (petrolio e gas naturale), ma anche perché sono utilizzati come materie prime. La crisi energetica potrebbe compromettere la competitività della chimica italiana ed europea; se infatti, il settore europeo era sempre stato in grado di produrre surplus, ai primi mesi del 2022 presentava un disavanzo di 6 miliardi anche in seguito alla fermata di alcune produzioni. Una frenata del settore potrebbe compromettere anche la transazione ecologica, basti pensare che dal 2019 al 2022, il 34% delle imprese chimiche in Italia ha introdotto innovazioni con benefici ambientali; l'impegno è soprattutto volto al miglioramento della sostenibilità interna, rientrando all'interno degli obiettivi dell'UE al 2030 (Federchimica, 2023).

Come dimostrato, data la capacità della chimica di essere impiegata in tutti i settori, il suo potenziale in termini di innovazione tecnologica ha rilevanti effetti moltiplicativi su tutta l'economia italiana, sia come miglioramento produttivo, sia a livello di competitività, sia della sostenibilità ambientale. Ed è proprio su quest'ultimo punto che il focus deve essere centrato maggiormente affinché il settore possa riprendersi dalla decrescita del 2021. Sulla scia della nuova transition wave – cioè le spinte

derivanti dal Green Deal verso un uso più efficiente delle risorse per promuovere la diffusione di un'economia sempre più circolare - risulta fondamentale comprendere le nuove ed impellenti esigenze del mercato. L'innovazione settoriale e di prodotto deve essere orientata alle necessità di mercati più ampi, andando incontro a quelle che sono le nuove esigenze della transizione ecologica. Una recente indagine svolta dal Dipartimento di Economia e Management dell'Università di Ferrara mostra il livello di adozione di innovazioni ambientali tra le imprese italiane, permettendo di mettere a confronto il settore della chimica con gli altri settori economici⁴ (Mazzanti et al., 2022; Antonioli et al., 2022).

Figura 3: Introduzione di Innovazioni Ambientali nei settori in Italia 2019-2020



⁴ L'indagine empirica è stata condotta utilizzando un dataset originale di Piccole e Medie Imprese italiane osservate in due periodi temporali 2017-2018 e 2019-2020. I dati sono stati raccolti attraverso l'elaborazione di due indagini nazionali, nel 2020 e nel 2021. Entrambi gli studi hanno assunto la forma di un'indagine CAWI (Computer Assisted Web Interview) attraverso la quale è stato somministrato alle imprese un questionario strutturato. L'obiettivo è raccogliere informazioni sullo stato dell'arte della transizione circolare a livello d'impresa. Particolare interesse è rivolto al ruolo dell'innovazione e al livello di implementazione di pratiche eco-innovative legate all'economia circolare. Il campione è stato stratificato per localizzazione geografica (macroarea, Istat), settore (intensità tecnologica, Eurostat), dimensione (10-49 addetti; 50-249 addetti; >250 addetti). Il campione finale conta 4565 aziende per il biennio 2017-2018 e 4649 per il biennio 2019-2020. 2305 imprese hanno risposto a entrambe le indagini.

Elaborazione propria dati Cercis (CEntre for Research on Circular economy, Innovation and SMEs⁵)

La Figura 3 mostra che nel biennio 2019-2020 circa il 30% delle imprese produttrici di prodotti chimici ed il 55% delle imprese produttrici di materie plastiche hanno introdotto almeno un'innovazione ambientale. Confrontando i dati con le performance delle imprese operanti negli altri settori, le imprese produttrici di materie plastiche si posizionano dietro solo alle imprese operanti nell'industria delle bevande e nelle industrie farmaceutiche. La Tabella 1 – valori espressi in percentuale - mostra quali sono le tipologie di innovazioni ambientali introdotte tra le aziende del settore chimico che corrispondono al codice ATECO 20 – Fabbricazione di prodotti chimici di base, di fertilizzanti e composti azotati, di materie plastiche e gomma sintetica in forme primarie - e qual è il loro grado di diffusione nel biennio 2019-2020. Si distinguono in innovazioni di processo e di prodotto tutte quelle innovazioni che si pongono come obiettivo quello di abbattere le emissioni, l'uso di materie prime, di energia e di rifiuti prodotti, di massimizzare la riciclabilità di prodotto. In particolare, su un totale di 38 imprese - le industrie del settore della chimica hanno puntato soprattutto ad innovare a livello di riduzione dell'utilizzo di materie prime – 18,42%% – riduzione e riutilizzo dei rifiuti –circa il 13% – e riduzione utilizzo di energia –circa il 13%.

Tabella 1: Introduzione di innovazioni di processo e di prodotto –codice ATECO 20 riferito al biennio 2019-2020

Innovazione	Percentuale di adozione (%)
Innovazione riduzione utilizzo di materiali	18,42%
Innovazione utilizzo energia rinnovabili	10,53%
Innovazione riduzione utilizzo energia	13,16%
Innovazione per riduzione rifiuti emessi	13,16%
Innovazione per riutilizzo rifiuti nel proprio ciclo produttivo	13,16%
Innovazione per conferimento dei proprio rifiuti	10,53%
Innovazioni di design prodotto per minimizzare uso materie prime	10,53%

⁵Il Centre for Research on Circular economy, Innovation and SMEs (CERCIS) fa parte del Dipartimento di Economia e Management dell'Università di Ferrara finanziato dal Ministero dell'Istruzione, dell'Università e della Ricerca (MIUR) su base competitiva per il periodo 2018-2022 per promuovere l'eccellenza nell'istruzione e nella ricerca ("Dipartimenti di Eccellenza").

Innovazione di design prodotto per massimizzare riciclabilità	7,89%
Innovazione di processo per riduzione emissioni Gas Serra	2,63%

Elaborazione propria dati Cercis

Allo stesso modo, la Tabella 2 mostra i dati facenti riferimento alle imprese con codice ATECO 22 – Fabbricazione di articoli in gomma. In questo caso vediamo come – su un totale di 269 imprese - la maggior parte delle imprese abbia introdotto innovazioni per favorire la riduzione dell'utilizzo di materiali (15,61%) e per la gestione dei rifiuti sia in termini di riduzione, riuso e conferimento ad altre imprese.

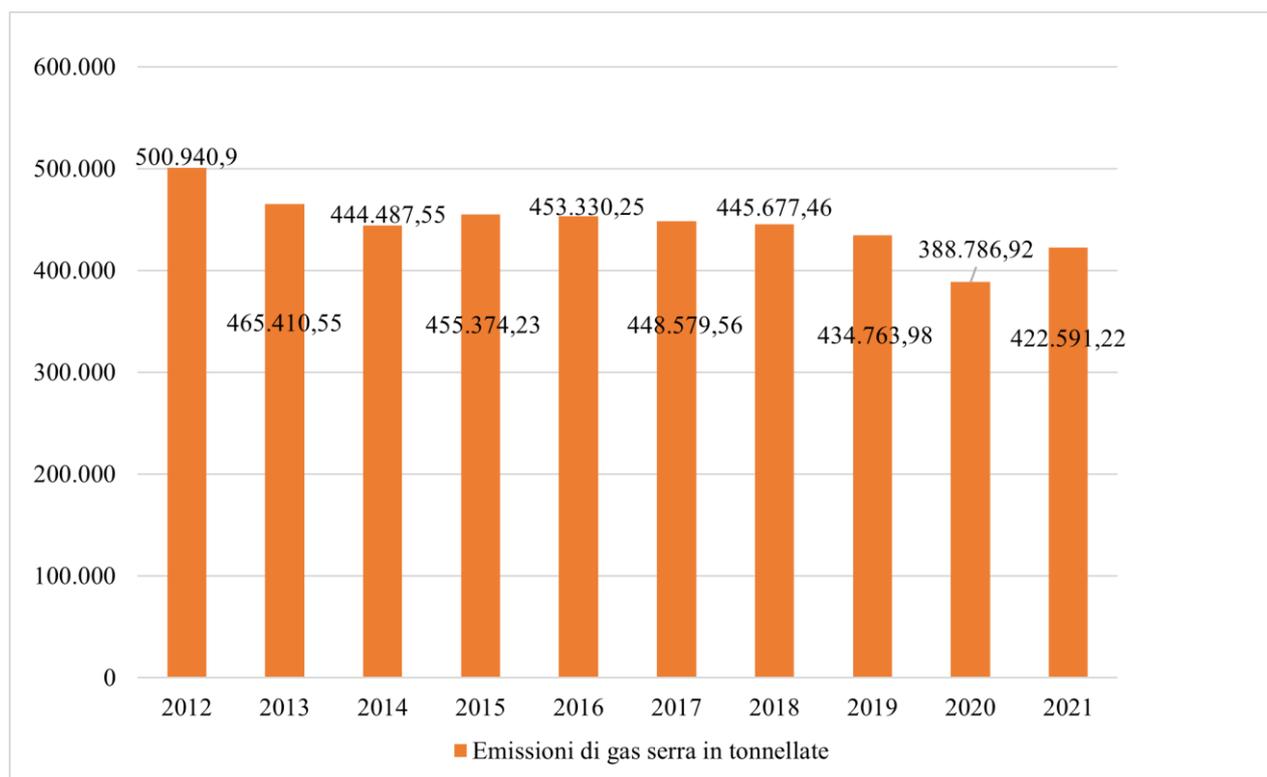
Tabella 2: Introduzione di innovazioni di processo e di prodotto –codice ATECO 22 nel biennio 2019-2020

Innovazione	Percentuale di adozione (%)
Innovazione riduzione utilizzo di materiali	15,61%
Innovazione utilizzo energia rinnovabili	7,06%
Innovazione riduzione utilizzo energia	14,87%
Innovazione per riduzione rifiuti emessi	12,64%
Innovazione per riutilizzo rifiuti nel proprio ciclo produttivo	13,75%
Innovazione per conferimento dei proprio rifiuti	13,01%
Innovazioni di design prodotto per minimizzare uso materie prime	9,29%
Innovazione di design prodotto per massimizzare riciclabilità	9,29%
Innovazione di processo per riduzione emissioni Gas serra	4,46%

Elaborazione propria dati Cercis

Come mostrano le tabelle in entrambi i settori ci sono ancora difficoltà nell'introduzione di innovazioni per ridurre le emissioni di gas serra. Il settore della chimica è infatti un settore che ha difficoltà a decarbonizzarsi a causa delle caratteristiche intrinseche dello stesso, la CO₂ è prodotta non solo dai processi di combustione, ma anche dai processi chimici stessi.

Figura 4: Trend delle emissioni di gas serra prodotte dal settore della chimica



Elaborazione propria da Eurostat, 2023⁶

La Figura 4 mostra i dati delle emissioni di gas serra del settore chimico in Italia dal 2012 al 2021. I dati mostrano come, in particolare dal 2016 ci sia stato un andamento di decrescita con un picco nel 2020 in corrispondenza del periodo segnato dalla crisi da COVID, per poi risalire nel 2021. Il settore deve quindi avere la capacità di lanciarsi su prodotti utili alla transizione, come ad esempio costruzioni ed automotive che sono tra i settori che più vengono influenzati dalla transizione ecologica e di puntare sulla chimica verde quali produzioni che siano riciclabili, recuperabili, biodegradabili e/o compostabili. L'altra necessità è quella della riconversione degli impianti, cambiare cicli e processi produttivi implica la necessità di competenze individuali nuove e particolari, si apre così la strada all'acquisizione di know how nuovi ed innovativi, a tratti multidisciplinari, poiché non è fondamentale solo aver competenze nel settore chimico, ma saper leggere i mercati di riferimento; la creazione di network e dialoghi risulta un passaggio fondamentale per creare virtuosismi economici e situazioni "win-win". Al contempo si deve essere in grado di mantenere sempre in considerazione la legislazione. La regolamentazione REACH, ad esempio, controlla le sostanze ristrette o vietate in Europa perché tossiche, sostanze cancerogene, mutagene o persistenti e

⁶ Eurostat. Greenhouse gas emissions by source sector (source: EEA). ENV_AIR_GGE https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/product/page/ENV_AIR_GGE_3

bioaccumulabili (ad esempio, rientrano tra le sostanze considerate tossiche il 1-bromopropano, diisopentilftalato, o 1,2-benzendicarbossilico)⁷. Si sente quindi il bisogno di essere in grado di rispondere tempestivamente ai cambiamenti di settore, reinventando usi non nocivi per sostanze con utilizzo restrittivo (Marin, 2023).

Da questo emerge che, per tramutare la transazione ecologica in occasione di sviluppo è fondamentale per il settore rimanere focalizzati sui tre principali assi dello sviluppo: ambiente, economia e società. L'industria della chimica rappresenta un modello di riferimento dato dal suo virtuosismo che combina ambiente, crescita e benessere con performance migliori della media manifatturiera in tutti gli ambiti della sostenibilità, tramutando ciò in vantaggio competitivo per il settore e per il paese (Federchimica, 2021).

5. Passato del Polo chimico Ferrarese e rapporti con l'Amministrazione locale

La storia del Petrolchimico di Ferrara è caratterizzata da alcuni passaggi chiave che lo pongono come precursore all'interno della Petrolchimica italiana e non solo.

L'industria chimica a Ferrara, avviata negli anni '30 dello scorso secolo, con l'impiego di materie prime ricavate dall'agricoltura (barbabietola, paglia di riso, granone, cascami di lavorazioni agricole, sale marino, ecc.), subisce una decisa spinta con l'entrata della Montecatini alla fine degli anni '40. Sono gli anni in cui negli Stati Uniti, grazie allo sviluppo di processi che utilizzano come materie prime le frazioni leggere del petrolio (Virgin nafta), si assiste al passaggio dalla Carbochimica alla Petrolchimica attraverso l'impiego delle olefine (soprattutto etilene e propilene) dalle quali si ottengono principalmente le materie plastiche sempre più indispensabili per lo sviluppo dei sistemi economico-produttivi avanzati (Bracci et al., 2020).

La Montecatini coglie immediatamente il vento favorevole, con la collaborazione del Politecnico di Milano e in particolare del Prof. Giulio Natta, avviando un piano di ricerche sui nuovi materiali, costruisce a Ferrara, nel 1951, il primo cracker realizzato per l'ottenimento delle olefine, con tecnologia della società inglese MW Kellogg e successivamente il primo impianto di produzione di politene a bassa densità. L'intensa attività di ricerca della Montecatini porta immediati risultati e nello stesso anno viene ottenuto il Polipropilene negli impianti pilota dell'I.R.I., la cui industrializzazione

⁷ Regolamento (CE) n.1907/2006 del Parlamento europeo e del Consiglio, del 18 dicembre 2006 [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32006R1907R\(01\)](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32006R1907R(01))

(Moplen) seguirà alcuni anni dopo, sempre a Ferrara: una vera rivoluzione, che salvò il neonato Petrolchimico e che fu seguita anche da altri filoni di ricerca (Bertoni et al., 2006; Bracci et al., 2020).

È una rivoluzione che ha effetti estremamente positivi per il territorio e non solo, in quanto trasferisce in una zona sottosviluppata, dedita prevalentemente ad una agricoltura di latifondo con oltre 100.000 braccianti, un'attività fortemente innovativa, che richiede occupazione professionalizzata. Da quella data in poi si assiste nel polo industriale ferrarese alla costruzione di decine di impianti per la lavorazione propriamente petrolchimica (olefine, butadiene, benzine, catalizzatori, stirolo, acetone, polistirolo, isopropanolo, oxosintesi, politene) e per quella di prodotti azotati (ammoniaca, acido nitrico, nitrato ammonico, urea agricola) con i necessari servizi (materie prime, utilities, effluenti, officine, magazzini, ufficio tecnico, amministrazione, sicurezza). Questo comporta una crescita esponenziale dell'occupazione (oltre 5.000 dipendenti nei primi anni '60) ed un rilevante posizionamento internazionale (Bertoni et al., 2006; Bracci et al., 2020).

Tale crescita si rivelerà comunque di breve periodo e non adeguata alle rapide trasformazioni di quei tempi al punto che (anche in seguito a scelte aziendali non corrette) portò alla crisi degli anni '60. Il Petrolchimico aveva impianti di taglia troppo ridotta e fuori mercato, l'investimento per la realizzazione di un secondo Petrolchimico a Brindisi si rivelò non tempestivo ed eccessivamente oneroso, l'entrata nella Petrolchimica dell'ANIC (azienda della società petrolifera pubblica ENI) introdusse elementi di concorrenza non corretta, si assistette inoltre ad una dispersione di risorse in iniziative industriali sostenute con soldi pubblici (SIR, Liquichimica, ecc.) in parte fallimentari già al momento della progettazione, e in aggiunta a questi elementi si ebbe anche la forte riduzione dei prezzi dei prodotti sui mercati internazionali per eccesso di produzione.

Il Petrolchimico registrò in quegli anni numerose ristrutturazioni societarie (divisione delle produzioni e delle attività di ricerca), l'entrata di nuovi soci per capitalizzazione (Monteshell) e per fusione societaria (Montedison) e l'ingresso di ENI nella società con scorporo degli assetti proprietari. Il prolungarsi della crisi attraversò anche gli anni '70 con una pesante ristrutturazione dello stabilimento, chiusura di numerosi impianti con processi e tecnologie obsolete, non compensati dalla costruzione di nuovi impianti (nuovo politene, Dutral, ABS, nuova Ammoniaca e Urea) e quindi con forte riduzione dell'occupazione e rischi di fallimento dello stesso progetto industriale (Bracci et al., 2020).

A partire dal 1980 la società, nel frattempo chiamata Montedison, incontra Mario Schimberni, già responsabile della gestione finanziaria, che assume la guida del gruppo e ne modifica sostanzialmente l'assetto e in parte la stessa missione. Gli anni '80 vedono enormi cambiamenti della Petrolchimica a livello mondiale con pesanti modifiche strutturali di tipo organizzativo e di riposizionamento

produttivo, che coinvolgono in Italia entrambi i gruppi, pubblico (ENI) e privato (Montedison), i quali trovano un accordo di diversificazione delle produzioni, con ulteriore chiusura di impianti e riduzione drastica dell'occupazione. È il periodo nel quale vengono realizzati da Montedison accordi di collaborazione con Hercules (Himont Inc.). Questo è l'inizio dell'internazionalizzazione del polo di Ferrara (Monteshell, negli anni '60 era stato solo un episodio), tutt'ora fortemente rilevante attraverso la multinazionale LyondellBasell. Questo è anche il periodo in cui nasce la società degli elastomeri Dutral e in cui parte l'esperienza privata di Raul Gardini naufragata, nei primi anni '90, nella bufera di tangenti, al termine del suo tentativo di unificare la chimica italiana.

Una decina di anni dopo nel settore degli azotati inizierà l'esperienza della norvegese Hydro Agri, che aveva rilevato gli impianti dell'area azotati di Montedison, e successivamente di Yara. Nel Petrolchimico si avvia lo spezzettamento delle produzioni (in atto tuttora), con la nascita di società di servizio (IFM, SEF, Syndiall, Sapio), che affiancano quelle originarie, che nel frattempo hanno cambiato nome (LyondellBasell, Versalis, Yara) e assetto proprietario ⁸.

In parallelo con il Petrolchimico, realizzato dalla Montecatini negli anni '50 dello scorso secolo, era presente a partire dagli anni '30, in un'area adiacente, un sito industriale chimico di proprietà della società belga Solvay, che produceva soda caustica e cloro da impiegare per l'ottenimento della cellulosa a partire da paglia. Successivamente, negli anni '50, Solvay avviò la produzione del PVC (cloruro di polivinile) una importante materia plastica impiegata per edilizia, cavi elettrici, profili per finestre, imballaggi, ecc. raggiungendo un volume di oltre 400 dipendenti. La storia della Solvay per certi aspetti ha seguito quella del Petrolchimico con lo spezzettamento a partire dagli ultimi anni dello scorso secolo con diverse proprietà e l'avvio di produzioni diversificate, comunque sempre nel settore chimico (Bertoni et al., 2006).

Dopo tale percorso, il Petrolchimico, stabilizzato con circa 1.800 addetti, assume un assetto sempre più multinazionale. In realtà è una stabilizzazione senza garanzie, sia perché la proprietà delle aziende private di maggiori dimensioni non è italiana, con i centri decisionali molto distanti dal nostro Paese, sia per le incertezze dell'azienda a partecipazione pubblica ENI restia a rimanere nella petrolchimica, con la sua società Versalis, che una decina di anni fa sembrava addirittura destinata alla cessione. È il periodo dove si completa l'integrazione dei petrolchimici dell'area padana (Porto Marghera, Mantova, Ferrara e Ravenna) con alcune pipelines percorse da materie prime (Lambertini).

Soprattutto nel decennio 1980-90, il Petrolchimico è un luogo di dibattiti, confronti aspri fra le aziende e il sindacato che travalicano l'essenza stessa dello scontro e pervadono il territorio oltre

⁸ Quella del Petrolchimico di Ferrara sembra essere una storia di occasioni perse. Insieme a grandi risultati di carattere

Ferrara, segnando innovazioni fondamentali sul terreno dei rapporti aziendali, per quanto riguarda l'occupazione, la ricerca, la professionalità, la parità di genere, la formazione continua, il rispetto dell'ambiente. Fra queste si ricorda l'Accordo, fortemente innovativo, sottoscritto, tra sindacato chimici, società Himont e la Regione Emilia Romagna del 10 luglio 1986, con il quale si stabiliscono modalità e tempi di formazione e delle assunzioni presso il Centro Ricerche Giulio Natta di Ferrara, nella misura di 20 giovani all'anno (personale sia maschile che femminile) per il periodo 1986-90, e con il quale si sancisce (novità assoluta), tra l'altro, il collocamento di personale femminile in attività operativa a turni, produttivo, scientifico, economico, sociale, ecc. ed esperienze di rilevanza nazionale si osservano contemporaneamente effetti che mettono in evidenza l'incapacità di cogliere opportunità strategiche altrettanto rilevanti. a partire dalla ricerca (Bertoni et al., 2006; Bracci et al., 2020).

Gli anni '80 però non saranno ricordati solo come il decennio delle ristrutturazioni aziendali e dei rapporti aziendali innovativi ma anche come quello della ripresa della ricerca che, grazie a fenomenali intuizioni di un gruppo dirigente particolarmente illuminato e di tecnici preparati, permise l'uscita dalla crisi del Petrolchimico con l'innovazione tecnologica nella produzione del polipropilene, attraverso i breakthrough del processo Spheripol, caratterizzato da notevoli risparmi energetici ed enormi vantaggi ecologici, seguito alcuni anni dopo dal processo Catalloy, processi inventati a Ferrara e applicati in oltre cento linee produttive in tutto il mondo oltre alla innovazione nel settore dei catalizzatori, che vede LyondellBasell tuttora leader mondiale.

Alcune note storiche: nel 1998 si assiste alla fermata totale delle attività di PVC-Solvay Chimica Italia S.p.A. dopo la fermata dell'impianto clorometani avvenuta nel 1983; nel 1984, d'altra parte, c'è l'avvio della produzione di Compound e l'assorbimento di Solvic S.p.A. in Solvay; nel 1997, si assiste alla nascita di Solvay-Benvic Italia. Nel 1999 il Gruppo Solvay, in sintonia con le Amministrazioni locali e le organizzazioni sindacali, decide di trasformare la fermata dell'impianto da problematica a nuova opportunità di sviluppo, promuovendo il progetto di Parco Industriale, che con cinque società operative, consente di recuperare la maggior parte delle maestranze del sito. Il progetto di reindustrializzazione si concretizza con sei società attive: 1) Solvay Benvic-Italia S.p.A. - produzione di compound di PVC; 2) SolVin-Italia S.p.A. - società di commercializzazione di PVC; 3) Vinyloop Ferrara S.p.A. - il primo al mondo che, grazie ad un'innovativa tecnologia Solvay, consente il recupero e riciclo di prodotti in PVC "a fine vita"; 4) Solvay Chimica Italia S.p.A. - proprietaria del Patrimonio immobiliare; 5) P-GROUP - produzione di compound di polipropilene; 6) GFC - specializzata in Ricerca e Formazione nel settore coating. Nel corso degli anni si sono verificate riorganizzazioni, assorbimenti, espansioni ma comunque il Parco tiene ed in particolare è

da notare il movimento di Benvic che nel 2012 ha acquisito l'attività di compoundizzazione di Celanese dopo avere assorbito anche Vinyloop.

A partire dal 2001, con "l'Accordo di programma sulla riqualificazione del Polo Chimico di Ferrara" e successivamente nel 2008 con il "Rinnovo ed estensione dell'Accordo di Programma sul Polo Industriale e Tecnologico di Ferrara", la relazione tra amministrazione e Polo Chimico diventa più strutturata con la stesura di accordi che coinvolgono oltre alle aziende presenti nel Polo anche Il Ministero dell'Industria del Commercio e dell'Artigianato, Il Comune di Ferrara, la Provincia di Ferrara, la Regione Emilia-Romagna, l'Osservatorio Chimico Nazionale, l'Unindustria di Ferrara, la Federchimica, le Organizzazioni Sindacali Confederali (CGIL, CISL, UIL) e di Categoria (FILCEA, FEMCA, UILCEM), l'EniChem S.p.A. I temi degli Accordi sono sempre più stringenti con obiettivi del tipo:

- costruire e mantenere nel Polo Chimico di Ferrara condizioni ottimali di coesistenza tra tutela dell'ambiente, sviluppo nel settore chimico, che consentano un miglioramento dell'impatto ambientale a fronte di un rafforzamento degli Impianti produttivi e dei Servizi.
- promuovere l'inserimento di nuove attività industriali, anche appartenenti a nuovi settori produttivi, ma comunque sinergiche con la cultura industriale del territorio ed il contesto infrastrutturale e produttivo.

In particolare, viene privilegiata l'estensione delle norme che salvaguardano la sicurezza dei lavoratori e l'ambiente all'esterno del Polo oltre ad intensificare le attività di bonifica dei terreni per nuove installazioni, rappresentando un esempio pressoché unico nel Paese (Bertoni et al., 2006; Bracci et al., 2020)

I rapporti fra il Petrolchimico di Ferrara e l'Amministrazione locale si sono inoltre sviluppati attraverso molteplici azioni di sostegno politico per la difesa dell'occupazione durante le numerose crisi che hanno attraversato la storia della Chimica nel nostro Paese. Tra le iniziative di collaborazione operativa si distingue la fondazione dell'Istituto tecnico Provinciale dedicato alla formazione di periti tecnici per le industrie del territorio ed in particolare per il Petrolchimico, accompagnato dalla scuola di formazione CESTA nel copparese che, seppure di origine privata (Istituto religioso), stabilì subito uno stretto rapporto di collaborazione con la Montecatini per la formazione di Analisti Chimico Industriali. D' impatto sul territorio fu il progetto Fabbrica-Scuola-Quartiere che fra le sue attività annoverò il recupero dell'attestato di scuola media, ma anche del diploma e successivamente della laurea per numerosi dipendenti del Petrolchimico (progetto 150 ore) dimostrando, sul campo,

l'efficacia della collaborazione fra Amministrazione, Aziende, Organizzazioni sindacali e UNIFE (Lambertini & Arpa Emilia Romagna, 2012).

Il tema della formazione ha costituito sempre un elemento di collaborazione fra l'Amministrazione nel suo complesso e il Polo chimico con esperienze di valore finalizzate soprattutto all'inserimento lavorativo. Nel giugno del 2000, al tavolo della Consulta provinciale viene firmato il "Piano di Azione Locale per l'Occupazione" (PALO). Il protocollo, in coerenza con le direttive europee e le normative nazionali, attribuisce agli Enti Locali e alle Parti Sociali un ruolo attivo nella programmazione delle politiche attive del lavoro. Il protocollo prevede l'estensione a livello territoriale dell'esperienza in Montell/Basell dei CAT (Contratti a Termine) poi CPE (Contratti di Prima Esperienza). L'obiettivo principale è l'occupabilità dei giovani attraverso un percorso di inserimento al lavoro di ragazzi di età superiore ai 18 anni, in possesso di titolo di studio di scuola media superiore, laurea o qualifica professionale. Il progetto prevede 500 ore di formazione (metà presso un centro di formazione e metà in azienda attivando uno stage) seguite da un contratto di lavoro a tempo determinato di durata variabile da 6 a 12 mesi, il CPE, al termine del quale l'azienda può stabilizzare l'assunzione.

In parallelo, si avvia la sperimentazione al Dipartimento di Economia dell'Università di Ferrara rivolta a giovani laureandi. Il progetto è coordinato dal Job Centre della Facoltà di Economia e finanziato dal FSE (fondo Sociale Europeo) attraverso la Provincia di Ferrara avvalendosi di un Ente di Formazione. L'obiettivo è dare a giovani laureandi la possibilità di maturare esperienze concrete sul lavoro, riconoscendo il valore dell'impresa come contesto di apprendimento e la pari dignità ai fini del riconoscimento di crediti da apprendimento informale (informal learning), della certificazione delle competenze acquisite in esito all'esperienza di inserimento.

Dal 2002, l'esperienza dei CAT si evolve: in UniFe si avvia l'esperienza dei PIL (Percorsi Inserimento Lavorativo) che prosegue fino al 2019/2020 interessando oltre mille laureandi/e. In analogia con questo assume particolare valore l'esperienza dei Master. Si riporta ad esempio di tale rapporto virtuoso "L'esperienza del MaSTeM universitario alla Basell", un Master che si avvale, oltre che di docenti accademici, di una "forte e specifica cultura aziendale" che ha consentito sia di meglio formare studenti, sia di favorire numerose sperimentazioni e innovazioni in campo tecnologico e organizzativo a sostegno della competitività sia dell'impresa "leader", sia delle piccole e medie imprese locali (Bertelli et al., 2005).

Una integrazione formativa tra l'Università e una impresa (o le imprese) più avanzata in termini di ricerca e know-how esistenti in loco, consente numerosi vantaggi per lo sviluppo locale. Oltre alle lezioni in aula il Master è stato integrato da attività pratiche di lavoro vero e proprio in azienda, dove il lavoro assume un ruolo centrale e ha il compito di accrescere e accelerare l'apprendimento che si

realizza all'interno dell'azienda, che diventa contesto formativo. In Bertelli et al., (2005) vengono analizzati i primi 6 anni di Master, confrontandoli con altre esperienze avanzate in Italia e all'estero e mostrando che il lavoro (integrato con lo studio) consente di apprendere in modo più "espansivo" rispetto ad un Master tradizionale. Ciò che qui interessa è però il fatto che una simile pratica aiuta non solo a qualificare l'Università e l'azienda ma diventa uno strumento fondamentale di sviluppo territoriale, in primis per le imprese che basano il loro sviluppo sull'innovazione, ma anche per quelle piccole imprese che possono così usufruire di giovani preparati in contesti di lavoro avanzati.

L'inserimento di giovani laureandi/laureati nelle squadre di lavoro, durante il percorso formativo, pertanto consente notevoli ricadute positive non solo per l'impresa ma anche per il territorio in quanto: 1) aumenta la flessibilità aziendale, 2) migliora la qualificazione professionale del territorio, e 3) si pone, all'esterno, come elemento attrattivo per interessi imprenditoriali.

Ora siamo di fronte alla vigilia di una possibile e auspicabile terza rivoluzione, con la ricerca che è chiamata ancora una volta a salvare il Polo chimico ferrarese. Le parole d'ordine quotidiane come cambiamento climatico, transizione ecologica, economia circolare, rivelano una nuova consapevolezza: i prodotti dell'economia futura saranno sempre più i processi. Per intervenire sui cambiamenti, per governare le transizioni e per essere davvero sostenibili sulle tre dimensioni economico, sociale e ambientale, bisognerà pensare per processi e non più per prodotti finiti. Anche il futuro del Petrolchimico di Ferrara dovrà essere inserito in un'ottica di processi circolari come ad esempio il riciclo della plastica.

6. Prospettive future

Il Polo chimico ferrarese si inserisce nel più ampio contesto nazionale che non può non essere preso in considerazione nel tentativo di delineare possibili scenari futuri.

L'Italia, sebbene da un lato venga riconosciuta come un'eccellenza dal punto di vista dello sviluppo delle tecnologie, dall'altro è caratterizzata da un deficit produttivo di polimeri che impone perciò la necessità di rivolgersi a mercati esteri. Disaggregare ricerca e produzione indebolisce la posizione strategica del Paese, specialmente in momenti di crisi nei quali la disponibilità di materia prima è fondamentale per non risultare passivi di fronte alle oscillazioni dei prezzi dettate da mercati e produttori esteri. In generale, perciò, una valutazione delle prospettive future del Polo chimico ferrarese non può prescindere dal considerare la più ampia cornice dettata dalle scelte strategiche nazionali, da cui il Polo dipende inevitabilmente, e che negli ultimi anni è andata in direzione di una

chiusura degli impianti produttivi. Come testimonia la sua storia, il Petrolchimico Ferrarese ha detenuto e detiene un'importante leadership a livello di innovazione tecnologica e ricerca, in particolare grazie alle competenze scientifiche del Centro Giulio Natta. La presenza di un centro di ricerca di tale rilevanza deve tuttavia essere sostenuto anche dalla presenza di impianti produttivi che permettano di rispondere alle esigenze di mercato soprattutto di polipropilene. Si necessita quindi di una politica industriale ambiziosa che delinei la strategia ferrarese puntando su tre punti fondamentali:

1) mantenere la leadership tecnologica quindi continuare a supportare investimenti in ricerca e sviluppo per confermare la posizione di eccellenza della realtà ferrarese;

2) cogliere le nuove possibilità delineate dal Green Deal Europeo e avviare investimenti volti al riciclo integrale della plastica con processi di riciclo sia meccanico che molecolare. Questa riconversione permetterebbe al Polo chimico di affermarsi come esempio di eccellenza in materia di innovazione tecnologica e di unire l'obiettivo di crescita economica locale con quello di tutela ambientale e quindi di raggiungere gli obiettivi comunitari;

3) investire in capitale umano e in green jobs per affermare la realtà di Ferrara e della regione Emilia Romagna in termini di competenze e know-how.

Con lo stesso impegno, profuso nel corso delle precedenti crisi, si ritiene sia possibile perseguire l'obiettivo del riciclo integrale della plastica, con processi di riciclo sia meccanico che molecolare, a partire da quelli messi a punto e realizzati grazie al lavoro di Ricerca e Sviluppo condotto, all'interno del Polo Industriale ferrarese, da LyondellBasell (progetto MoReTech), grazie alle notevoli competenze possedute nel campo dei catalizzatori e dei processi e da Versalis a Mantova (progetto Hoop).

Si tratta di un progetto, quello del "Riciclo integrale della plastica", che persegue numerosi obiettivi di elevata valenza sociale ed economica come la salvaguardia dell'ambiente, il risparmio energetico e della materia prima fossile, lo sviluppo sostenibile attraverso una potente innovazione tecnologica e la crescita dell'occupazione e della conoscenza nel territorio, con lo sviluppo di professioni di elevata qualità (CDS, 2022). Si nota come la ricerca e lo sviluppo, oltre a essere una determinante primaria dell'innovazione (generatore di brevetti), è un elemento di vantaggio competitivo rilevante dal punto di vista socio economico, consentendo a imprese e istituzioni di comprendere le innovazioni emergenti a livello internazionale (adozione e diffusione dell'innovazione) (Cainelli et al. 2012; Cainelli et al. 2020; Charlot, Crescenzi, Musolesi, 2014; Golinelli, Mazzanti & Musolesi, 2023)

A livello globale sono prodotte circa 400.000.000 di tonnellate ogni anno di materie plastiche (367 milioni di tonnellate nel 2020), di queste 90-000.000 sono composte da poliolefine (sostanzialmente

da polipropilene e polietilene) la cui destinazione dopo l'impiego è rappresentata, per oltre il 70%, dal "rifiuto" con combustione o discarica (Federchimica 2021; The European House – Ambrosetti, 2022).

La produzione di poliolefine del Petrolchimico di Ferrara genera pertanto indirettamente una quota di 250.000 tonnellate/anno di rifiuto non riciclabile meccanicamente che potrebbe essere recuperata. Con le tecnologie di riciclo chimico messe a punto da LyondellBasell e da ENI-Versalis, operando con due linee da 125.000 ton/anno si può ottenere una quantità di olio pirolitico (con composizione simile a quella della virgin nafta impiegata negli impianti di cracking) pressoché uguale alla quantità delle poliolefine "rifiuto" (polipropilene e polietilene) prodotte dal Petrolchimico in un anno. Tale olio pirolitico deve essere alimentato successivamente ad un cracker allo scopo di ottenere il propilene e l'etilene necessari per produrre il polipropilene e il polietilene presso gli impianti del Petrolchimico, completando in tale modo un riciclo integrale.

A livello nazionale sarebbero necessarie almeno 7-8 di linee di riciclo molecolare, con a valle un cracker nel nord (nell'area del quadrilatero della Petrolchimica) e con un cracker nel sud (in Sicilia), per l'ottenimento del propilene e dell'etilene, possibilmente sostenuti da fonti energetiche rinnovabili. Il polipropilene e il polietilene "rifiuto", necessari per alimentare le due linee di riciclo molecolare ipotizzate presso il Petrolchimico, possono essere ottenuti sia dall'azienda di raccolta e gestione dei rifiuti del territorio (ad esempio, Hera) sia direttamente dai trasformatori che possono raccogliere le plastiche dei manufatti trasformati in rifiuto (biomedicale, automotive, imballaggi, ecc.).

E' possibile creare, per ogni tipologia di manufatti di plastica, specifiche filiere che hanno nel produttore del manufatto, nel distributore, nell'utilizzatore, nel raccoglitore del rifiuto, nel selezionatore del rifiuto, nel processore del rifiuto selezionato, nel gestore del processo di pirolisi, nel gestore del cracking e così via i passaggi più evidenti con possibili articolazioni legate alle caratteristiche del materiale o alle caratteristiche del manufatto (plastica per l'automotive, imballaggi specifici, articoli per il biomedicale, ecc.).

L'individuazione delle diverse filiere potrebbe sollecitare la nascita di nuovi mestieri, innovazioni dei processi, necessità di nuove competenze scolastiche, con ricadute positive per lo sviluppo del territorio e per l'occupazione. Su tale argomento esistono già esperienze consolidate, soprattutto in Germania, Stati Uniti, Francia, Norvegia, che sarebbe opportuno cogliere. Un coinvolgimento di HERA nel nostro territorio con LyondellBasell, Versalis, il Polo del Biomedicale di Mirandola e il polo dell'automotive della Motor Valley emiliano romagnola potrebbe essere negli obiettivi dell'Amministrazione della Regione ER.

Investendo in formazione e ricerca in modo complementare, è possibile sviluppare competenze interdisciplinari per trasformare, con altre filiere di riciclo meccanico e molecolare, una quota rilevante delle centinaia di milioni di tonnellate di materie plastiche “rifiuto”, realizzando un'opera di bonifica ambientale e di valore economico, con il rilancio concreto della Petrolchimica nel nostro Paese.

7. Altri scenari e prospettive per la transizione sostenibile del settore chimico

La fine dell'economia basata sul petrolio chiama la chimica ad una nuova sfida che consiste nello sviluppo di nuovi processi e metodi per ottenere prodotti simili, migliorati o nuovi rispetto a quelli disponibili oggi, utilizzando però materie prime diverse dal petrolio.

Le biomasse vegetali o algali non utilizzabili altrimenti, le biomasse di scarto nelle fasi di lavorazione di prodotti agricoli od arborei, gli sfridi di produzioni industriali, i prodotti di scarto industriali, i rifiuti post-consumo, i gas di scarico derivanti da respirazione o combustione, rivestono un ruolo particolarmente importante come materie prime per le nuove produzioni. Nessuna delle materie prime potenzialmente utilizzabili è disponibile in quantità paragonabile a quello che è stato il petrolio. La sfida quindi non è semplice perché non è possibile pensare ad una chimica che parta da un'unica fonte di materia prima ma sarà necessario sviluppare molti processi chimici diversi, ciascuno adatto al substrato da utilizzare. La chimica attuale, infatti, è basata su processi a cascata che partono dal cracking del petrolio da cui si ottengono molecole piccole e semplici che vengono lavorate attraverso processi di sintesi per generare molecole a complessità crescente, fino ai materiali plastici ed alle molecole per usi farmaceutici. Cambiando la materia prima di partenza, non solo la fase iniziale di costruzione delle molecole piccole dovrà essere rivista ma tutta la filiera della produzione industriale di prodotti chimici dovrà essere ripensata, dal momento che le nuove fonti di materia prima potranno dare intermedi più complessi e/o comunque diversi da quelli ottenuti oggi dal cracking del petrolio. Nel settore della produzione industriale chimica, il comparto che avrà l'impatto maggiore dal cambio di materia prima sarà la produzione di materie plastiche e di materiali polimerici in generale. La ragione alla base della presente affermazione sta essenzialmente nei volumi di produzione. Quello dei materiali polimerici, siano essi *comodities* o *specialities*, è di gran lunga superiore a quello della maggior parte degli altri prodotti chimici.

La ricerca scientifica nel campo dei polimeri prodotti a partire da materie prime diverse dal petrolio sta già dimostrando che il cambio di materia prima in molti casi può generare nuove opportunità, ad esempio rendendo possibile, in aggiunta ai tradizionali prodotti di lavorazione del petrolio, anche la produzione di materiali con *caratteristiche* chimiche molto diverse da quelle tipiche dei derivati del

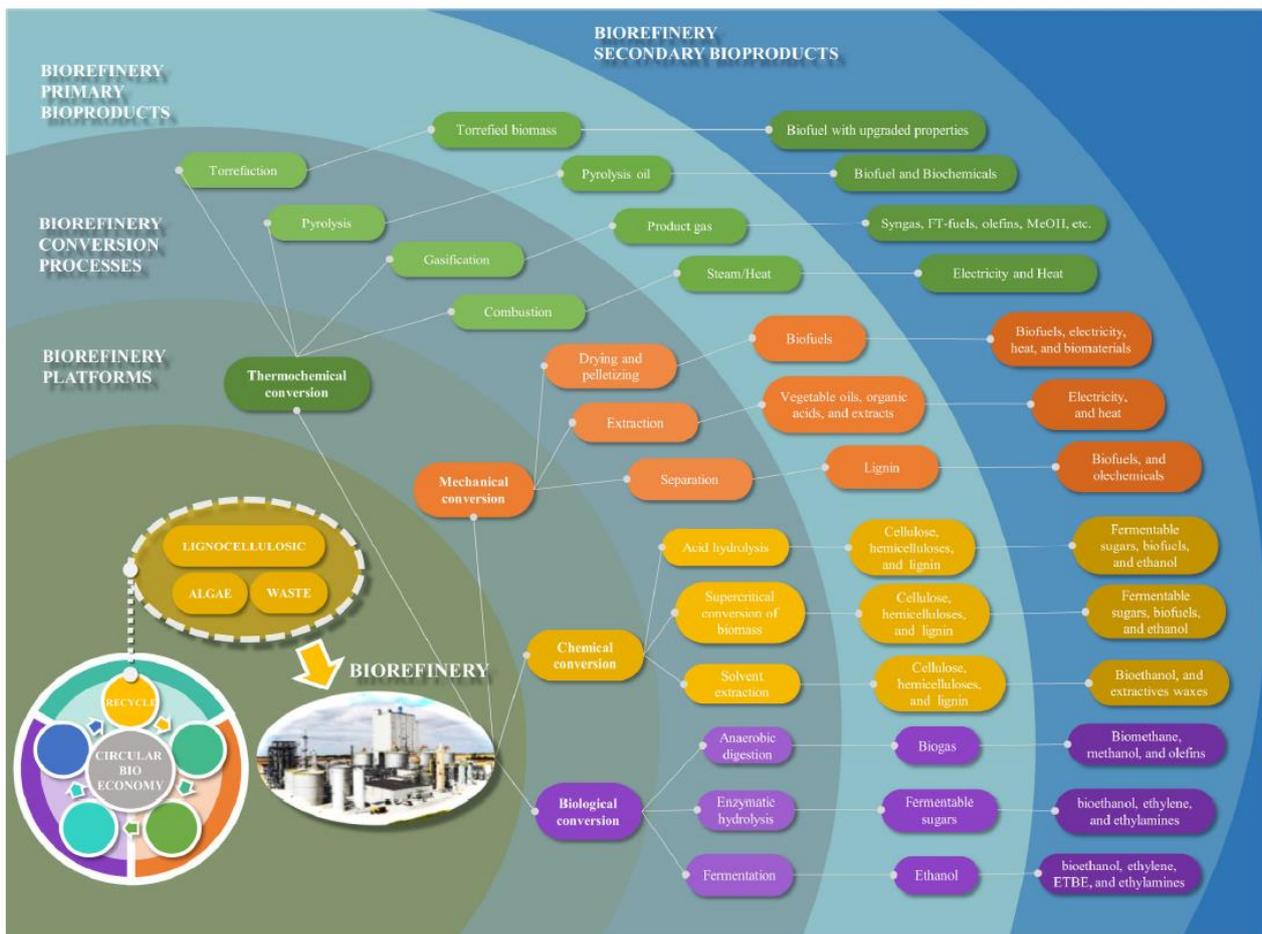
petrolio. L'elemento discriminante sono i costi di produzione. Partendo dal petrolio, che è composto sostanzialmente soltanto da carbonio ed idrogeno, la produzione di molecole contenenti altre specie atomiche richiede sforzi sintetici notevoli e, conseguentemente, costi maggiori rispetto ai semplici idrocarburi. Al contrario, partendo da materie prime già ricche per esempio di ossigeno ed azoto, quali le biomasse, in linea di principio è possibile ottenere molto più facilmente materiali con questi atomi nella loro struttura molecolare. Cambiando la composizione atomica e la struttura molecolare cambiano ovviamente le proprietà dei materiali che si ottengono. Queste possono essere migliori o peggiori di quelle dei derivati del petrolio, e solo la ricerca sui nuovi materiali potrà dire per quali applicazioni essi sono adatti o quali miglioramenti sono necessari e, infine, se essi risultano competitivi da un punto di vista economico e sostenibili a livello ambientale. La sostituzione di un'intera filiera produttiva comporta non solo lo sviluppo di nuovi metodi di sintesi, di nuovi catalizzatori, di nuovi processi industriali, ecc. ma anche di nuovi metodi analitici per il controllo delle varie fasi del processo e dei prodotti intermedi e finali.

Se pensiamo che l'attuale chimica è stata sviluppata in più di 100 anni, diventa evidente la sfida (e lo sforzo) a cui l'attuale ricerca scientifica e tecnologica è chiamata evitando al contempo gli errori del passato, in primo luogo in termini di impatto ambientale. La ricerca dovrà essere pronta ad accettare la sfida proponendo soluzioni ecosostenibili per ciascuna fase di queste molteplici nuove filiere produttive.

Bioraffinerie

Il territorio ferrarese con la sua forte tradizione agricola e la presenza di un polo chimico di rilevanza mondiale per la produzione di materiali polimerici potrebbe avere un ruolo importante in questa nuova fase economica se sarà in grado di sfruttare opportunamente gli scarti della fiera agricola facendoli diventare materia prima per la produzione di prodotti chimici di base, monomeri e quindi materiali polimerici. Questo sarà possibile solo se la ricerca sul territorio saprà fornire soluzioni ed opportunità per questa fase di transizione. L'insieme dei processi atti a trasformare prodotti agricoli o alimentari, inclusi i loro scarti, in prodotti chimici va sotto il nome di bioraffineria. Nella figura sottostante tratta da Bioresource Technology (2020, 299, 122585) sono illustrati i diversi tipi di processi che si possono utilizzare in una bioraffineria, suddivisi in macro-categorie. Essi fondamentalmente includono processi meccanici, chimici, termochimici e biologici. Molto spesso queste classi di processi sono combinate insieme per ottenere più prodotti e minimizzare quindi gli scarti e i residui.

Figura 5: Processo di bioraffineria

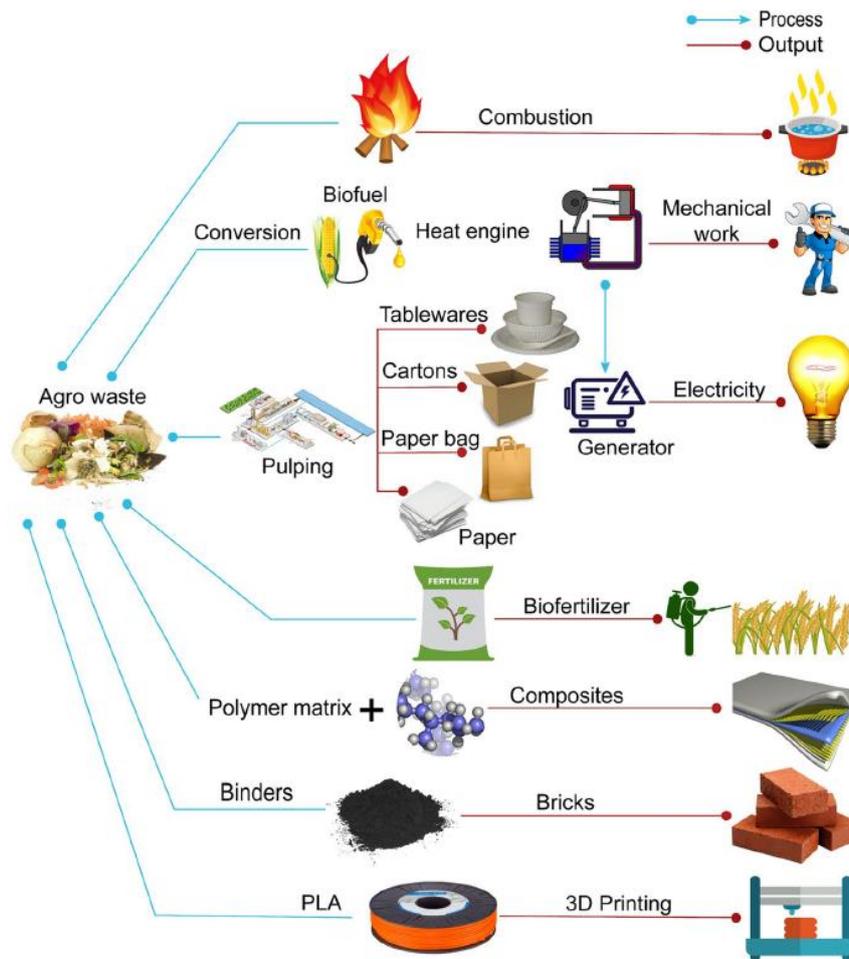


Oltre alla suddivisione per tipologia di processo, in figura sono riportate le principali classi di prodotti che si possono ottenere. Tra questi si individuano prodotti chimici di base, quali etanolo, olefine, formaldeide, ecc., ma anche e soprattutto biodiesel, metano ed energia. I prodotti ottenibili dipendono, in maniera minore, dal tipo di biomassa trattata. Questa ultima invece influenza la tipologia e le condizioni di processo necessari per la sua trasformazione. Si distinguono in generale tre principali macroclassi di biomassa, a cui corrispondono macroclassi di processi di trasformazione, le alghe, i residui alimentari e le masse ligno-cellulosiche. La distinzione è dovuta principalmente alla tipologia di processi che devono essere usati per le prime fasi di trattamento e che dipendono dalle caratteristiche chimico-fisiche delle tre macroclassi. Le alghe sono, infatti, prodotti ricchi di acqua che generalmente richiedono un trattamento idro-termico nella prima fase della lavorazione; i materiali lignocellulosici necessitano di una frammentazione meccanica e la separazione della lignina; i residui di cibo, viceversa, spesso possono essere trattati senza la necessità di questi pre-trattamenti iniziali. Le biomasse più studiate di rilevanza per il territorio regionale includono la paglia di riso, la paglia di grano, i residui della coltivazione del mais, i residui generici di cibo, i residui

lignocellulosici da potatura o da coltivazioni arboree, gli olii alimentari esausti, le vinacce, i residui di caffè, le alghe (comprese alghe appositamente coltivate), e i fanghi di depurazione.

Per molte di queste classi, sono già stati sviluppati processi di trasformazione per ottenere sia prodotti di bioraffineria primari che secondari, come illustrato nello schema seguente tratto da Environmental Science and Pollution Research (2022, 29, 73622):

Figura 6: produzione di 1-4-butaniolo (BDO)



Un esempio concreto di processo di bioraffineria è la produzione di 1-4-butaniolo (BDO) – Figura 6 - da scarti agroalimentari, attraverso un processo fermentativo. Un impianto di questo tipo, di proprietà di Novamont, è operativo già da qualche anno in Polesine (località Bottrighe). La possibilità di usare residui ricchi in carbonio di tipologie diverse, rende evidente la potenzialità dei processi di bioraffineria, qualora siano ottimizzati per la tipologia di residui presenti localmente.

Tecnologie innovative di bonifica

Forte dell'esperienza di bonifica sviluppata nel Polo Chimico a partire dagli anni 90, il Polo potrebbe diventare un riferimento per lo sviluppo e la valutazione di tecnologie innovative di bonifica. In particolare, la Società Eni Rewind S.p.A. possiede un'esperienza ormai più che ventennale nel settore delle bonifiche in Italia ed all'estero, affiancata da una rigorosa raccolta di conoscenze tecnico-scientifiche e dalla consultazione diretta di fonti istituzionali, di operatori del settore ed accademici italiani ed esteri (ENI) Ferrara è anche sede di RemTech Expo l'unico Hub Tecnologico Ambientale, internazionale e permanente, specializzato sui temi del risanamento, rigenerazione e sviluppo sostenibile dei territori. Composto di dieci segmenti – REMTECH e REMTECH EUROPE bonifiche dei siti contaminati, COAST tutela delle coste, porti, sostenibilità, ESONDA dissesto idrogeologico, inondazioni, frane, CLIMETECH cambiamenti climatici, mitigazione, adattamento, GEOSISMICA rischio sismico, prevenzione, ricostruzione, INERTIA opere sostenibili materiali, economia circolare, RIGENERACITY rigenerazione urbana, CHEMTECH industria chimica innovativa e sostenibile e FIRE prevention-innovation-research, prevenzione e sicurezza antincendio del Patrimonio Culturale italiano e HUTTE dedicato ai temi della sostenibilità e del benessere integrale – RemTech si tiene annualmente nel mese di settembre ospitando realtà governative, enti pubblici, organi di controllo, società private, start up innovative, università, centri di ricerca, associazioni di categoria, professionisti operanti nei settori sopra menzionati. Le tematiche di ricerca nel settore delle tecnologie innovative per le bonifiche sono in continua evoluzione. Tra i processi più rilevanti che si possono menzionare ci sono la Nanoremediation, la Electrokinetic Bioremediation, Surfactant Enhanced Recovery, Trattamento combinato di assorbimento e biodegradazione, Trattamento termico auto-alimentante in-situ. Eni Rewind è a sua volta proprietaria di tecnologie avanzate per le bonifiche di siti inquinati (es. Tecnologia e-hyrec, E-limina).

- *Micro e Nanotecnologie:* nell'ambito della bonifica di acquiferi contaminati, la Nanoremediation si sta affermando come un approccio efficace e competitivo per la generazione di zone reattive. Questa tecnica consiste nell'iniezione nel sottosuolo di sospensioni acquose di micro- e nanoparticelle reattive al fine di indurre la degradazione, la trasformazione e/o l'immobilizzazione in situ degli inquinanti. Ad oggi i nanomateriali di maggior interesse sono quelli a base di ferro: le particelle di ferro zerovalente microscopico (MZVI) o nanoscopico (NZVI) sono note per la loro efficacia nella dealogenazione riduttiva di numerosi inquinanti organici (principalmente composti organo alogenati, ma anche pesticidi) e nell'immobilizzazione dei metalli pesanti; gli ossidi di ferro sono invece

impiegati per la rimozione di metalli pesanti o quali accettori elettronici durante processi di biodegradazione di composti organici (ad esempio i BTEX).

- *Electrokinetic Bioremediation*: tale tecnologia consiste nella possibilità di generare in continuo, all'interno dell'acquifero, composti ossidanti che servono per il trattamento della contaminazione presente, rendendola applicabile con efficacia anche in litologie complesse e in configurazione PRB (barriere permeabili reattive), ovvero in situazioni non affrontabili con le tecnologie ISCO tradizionali basate sull'iniezione di reagenti ossidanti. In commercio sono presenti sistemi elettrocinetici sotterranei, collaudati sul campo, che integrano efficacemente i meccanismi ISCO, microbiologici e geofisici nelle falde acquifere contaminate. I contaminanti quali ad esempio solventi clorurati (PCE, TCE, DCE, VC), BTEX e MTBE, vengono eliminati attraverso reazioni multiple di ossidazione e biodegradazione accelerata utilizzando ossigeno e ferro come accettori di elettroni preferiti.

- *Surfactant Enhanced Recovery (SER)*: negli anni più recenti è stata applicata con successo la tecnologia di bonifica tramite composti surfattanti non ionici biodegradabili al fine di desorbire in maniera selettiva dalla matrice solida i contaminanti e rendere miscibili in fase liquida i NAPL. Con questa tecnologia è possibile trattare un'ampia gamma di contaminanti LNAPL (idrocarburi di origine petrolifera) così come DNAPL (i.e. solventi clorurati), soprattutto quando i sistemi tradizionali (skimmer e pompe) non risultano più produttivi per effetto del ridotto spessore di prodotto in fase libera presente, oppure quando occorre trattare elevate contaminazioni in frangia capillare, prima di eventuali altri trattamenti (quali ISCO, bioremediation, MPE, ecc). La modalità di azione dei surfattanti comporta minori costi e un ridotto impatto ambientale rispetto ai tensioattivi tradizionali. Inoltre, è utilizzabile anche in litologie poco permeabili.

- *Trattamento combinato di assorbimento e biodegradazione*: alcune tecnologie innovative per la bonifica in zone sorgente e aree altamente contaminate prevedono il trattamento congiunto a mezzo di due meccanismi combinati di funzionamento: assorbimento e biodegradazione. Ad esempio, esistono sul mercato prodotti che consentono una bio-distruzione accelerata della massa adsorbita fino al raggiungimento di concentrazioni estremamente basse. Altri prodotti, invece, sono in grado di rimuovere rapidamente gli idrocarburi dalla fase disciolta, adsorbendoli e stimolando la biodegradazione anaerobica in situ. I contaminanti trattati sono principalmente BTEX, idrocarburi petroliferi, MTBE, IPA, solventi clorurati, pesticidi e fenoli. L'applicazione di tali prodotti avviene o attraverso l'iniezione (direct push, pozzi) a bassa pressione oppure mediante applicazione in scavo.

- *Trattamento termico auto-alimentante in-situ*: tra le tecnologie innovative presenti sul mercato italiano, rientra anche una tecnologia di bonifica a marchio registrato altamente sostenibile basata sulla combustione senza fiamma, in cui i contaminanti da bonificare sono il carburante stesso del

processo termico. I principali contaminanti trattati risultano essere idrocarburi pesanti e leggeri soprattutto sottoforma pura (LNAPL).

Green chemistry

La percezione dell'impatto negativo di molte attività produttive sull'ambiente nasce e si sviluppa nell'opinione pubblica dei paesi occidentali negli ultimi decenni del secolo scorso. Questa mutata sensibilità viene raccolta per la prima volta in un atto di indirizzo politico nel Rapporto Brundtland pubblicato nel 1987 dalla Commissione mondiale sull'ambiente e lo sviluppo (WCED) che introduce il nuovo concetto di sviluppo sostenibile. Questa nuova visione pone la chimica di fine 20° secolo tra i settori produttivi a più bassa sostenibilità, mettendo purtroppo in ombra il contributo del settore all'incremento della vita media della popolazione mondiale attraverso lo sviluppo di nuovi materiali, farmaci, antiparassitari e fertilizzanti. La prima risposta del settore chimico alla richiesta di nuovi standard di sostenibilità è stata quella di adeguare i processi esistenti migliorandone le tecnologie di controllo e abbattimento degli inquinanti. Questa prima fondamentale risposta mostrava però i suoi limiti nell'incapacità di contrastare eventi eccezionali legati al fallimento dei sistemi di depurazione e abbattimento nonché nella mancata considerazione di eventuali effetti sinergici legati all'interazione degli inquinanti con sostanze presenti nell'ambiente. Una nuova visione strategica per lo sviluppo sostenibile dell'industria chimica (ma in realtà di tutti i settori produttivi) venne fornita dal Pollution Prevention Act, la legge federale del Governo degli USA del 1990 che richiama l'attenzione dell'industria sulla riduzione dell'inquinamento alla fonte indicando così un nuovo paradigma per la progettazione dei processi industriali. Questo atto fondamentale fu tradotto nel 1991 a favore della comunità chimica da Paul T. Anastas dell'Environmental Protection Agency USA (EPA) nei dodici principi della green chemistry (GC) che indicano criteri fondamentali per lo sviluppo di processi e/o prodotti chimici sostenibili fin dalla loro concezione («benign by design»).

Traducendo nella pratica i principi della GC ci si accorge di come essi guidino la progettazione dei processi attraverso azioni diverse che però convergono nel soddisfare il criterio base enunciato nel primo principio e cioè “prevenire la generazione di rifiuti piuttosto che trattarli o bonificarli una volta generati”. Per il raggiungimento di tale obiettivo è fondamentale ottimizzare lo sfruttamento delle materie prime, strategia tradotta dal secondo principio della GC nel concetto di “economia atomica” cioè “incorporare nel prodotto finale la maggior parte della massa dei composti usati nel processo”. A loro volta, l'ottavo e il nono principio della GC indentificano nella “riduzione del numero di passaggi sintetici” (concetto di step economy) e nell'impiego di “reazioni catalitiche in alternativa a quelle stechiometriche” le linee guida per l'incremento dell'economia atomica dei processi. Non va trascurato che, oltre alle materie prime che non confluiscono nei prodotti, contribuiscono alla

produzione di rifiuti anche i solventi e l'anidride carbonica generata per soddisfare le esigenze energetiche dei processi. Per tale motivo il sesto principio invita ad una "progettazione dei processi chimici finalizzata all'efficienza energetica". La riduzione complessiva delle emissioni di anidride carbonica di un processo chimico valutata in termini di Life Cycle Assessment (LCA), può essere favorita anche dall'impiego di materie prime rinnovabili, così come enunciato nel settimo principio della GC ("una materia prima o precursore dovrebbe essere rinnovabile piuttosto che esauribile, quando ciò sia fattibile tecnicamente ed economicamente").

Questa nuova filosofia e i suoi principi, hanno prodotto fondamentali mutamenti nell'approccio alla progettazione di processi e prodotti chimici che ha portato a riconsiderare alcune tecnologie tipiche della petrolchimica. Un'analisi della sostenibilità dei diversi segmenti dell'industria chimica basata sul calcolo del fattore E ideato da R. Sheldon nel 1992 evidenzia infatti la bassa sostenibilità dei processi della chimica fine e farmaceutica in confronto a quelli della chimica primaria. Se si considera che il fattore E determina la massa di rifiuti prodotti per unità di massa di prodotto finito la deduzione può sembrare banale considerando l'inevitabile complessità di processi dedicati alla produzione di molecole complesse come farmaci e intermedi avanzati rispetto ai processi progettati per trasformare materie prime fossili in molecole relativamente semplici. Questa semplice analisi è però alla base della rivisitazione di diversi processi multistep tipici dei settori farmaceutico e della chimica di specialità. Il caso più famoso è senza dubbio quello della sintesi dell'ibuprofene, un antiinfiammatorio con un mercato globale di 630 milioni di dollari nel 2022. L'ibuprofene è stato prodotto fino agli anni 90 attraverso la metodologia sviluppata dalla Boots che prevede sei passaggi con un'economia atomica del 40%. Agli inizi degli anni '90, il consorzio BHC, una joint venture tra la stessa Boots e la Celanese, ha sviluppato una sintesi estremamente più diretta e sostenibile grazie all'introduzione di due passaggi catalitici tipici dell'industria chimica pesante vale a dire un'idrogenazione ed una carbonilazione. Il nuovo percorso sintetico è caratterizzato da un ridotto numero di passaggi (quattro) e da un'economia atomica pari al 77%.

Il concetto di una nuova chimica basata sullo sfruttamento di materie prime rinnovabili enunciato nel settimo principio è stato invece raccolto nel Biomass Program, un atto d'indirizzo redatto dal Department of Energy degli Stati Uniti (US DoE). L'obiettivo di questo programma è quello di promuovere lo sviluppo di bioraffinerie integrate per la produzione di energia, biocombustibili e prodotti chimici. Grazie ad uno studio congiunto del National Renewable Energy Laboratory (NREL) e del Pacific Northwest National Laboratory (PNNL) questo programma ha portato nel 2004 alla pubblicazione di un documento (Top Value Added Chemicals from Biomass) nel quale vengono identificate le molecole più promettenti per lo sviluppo di una chimica basata sull'impiego di materie prime rinnovabili, indicandone strategie di sintesi e trasformazione. Questo documento ha dato un

impulso impressionante al mondo della ricerca accademica ed industriale e a distanza di vent'anni alcuni degli scenari in esso previsti hanno visto la realizzazione su scala industriale. L'esempio forse più citato è quello dell'acido furandicarbossilico (FDCA) una molecola prodotta da materie prime zuccherine ed impiegata come monomero nella produzione del PEF (polietilene furanoato), un poliestere completamente bio-based adatto alla produzione di diversi manufatti e particolarmente interessante nel settore del packaging alimentare (Top global players le olandesi Avantium e Corbion e la company svizzera AVA Biochem).

Va anche sottolineato come alcune molecole, inizialmente escluse dal documento del US DoE abbiano acquistato nell'ultimo ventennio un ruolo importante nello sviluppo della chimica da biomasse. Un caso emblematico è quello dell'etanolo che non era stato inserito tra i "Top Value Added Chemicals from Biomasses" in virtù del suo impiego esclusivo come bio-combustibile. Gli enormi volumi di bio-etanolo attualmente prodotti in Nord-America, Sud-America e Paesi Asiatici ha determinato da un lato la perdita di importanza del processo di idratazione dell'etilene per la produzione di etanolo di sintesi e allo stesso tempo ha spinto colossi della chimica come Braskem SA, Dow Chemical Company, LyondellBasell Industries Holdings B.V., SABIC, and Oxy Low Carbon Ventures (OCLV) ad investire sul processo inverso, vale a dire la produzione di bio-etilene attraverso la disidratazione dell'etanolo, rivisitando tecnologie sviluppate prima degli anni '50. Il mercato globale del bio-etilene valeva 414.34 milioni di dollari nel 2019 con una previsione di crescita fino 718.32 milioni per il 2028. Questo esempio, assieme a quanto detto in precedenza sottolinea come la petrolchimica, con il suo arsenale di tecnologie consolidate e a volte anche con quelle obsolete, rappresenti un bacino da cui trarre ispirazione nella transizione dalle materie prime di origine fossile a quelle rinnovabili. Questa filosofia è perfettamente rappresentata nel processo Ecofining di Eni e Honeywell-UOP per la produzione di biocarburanti di seconda generazione attraverso un processo di idrogenazione di oli di scarto (animali, vegetali e di cottura). Le tecnologie di idrogenazione catalitica sono ampiamente utilizzate nella raffineria petrolifera e la profonda conoscenza delle loro specificità ha permesso di adattarle alla trasformazione dei nuovi feedstock e di riconvertire raffinerie petrolifere in bioraffinerie. La bioraffineria di Porto Marghera è stato il primo esempio al mondo, nel 2014, di conversione da una raffineria di petrolio e al momento (affiancata dalla bioraffineria di Gela) ha completato la transizione da un'alimentazione dell'impianto che prevedeva anche l'uso di olio di palma ad un'alimentazione "palm free" basata su scarti e residui di lavorazione, come oli esausti di cucina e grassi animali per più dell'85%, e con altre biomasse regolamentate dalle normative europee e nazionali vigenti.

In generale, la GC impatta fortemente lo sviluppo di processi innovativi ad alta efficienza per la produzione di prodotti bio-based e materiali ecocompatibili, garantendo la sostenibilità industriale

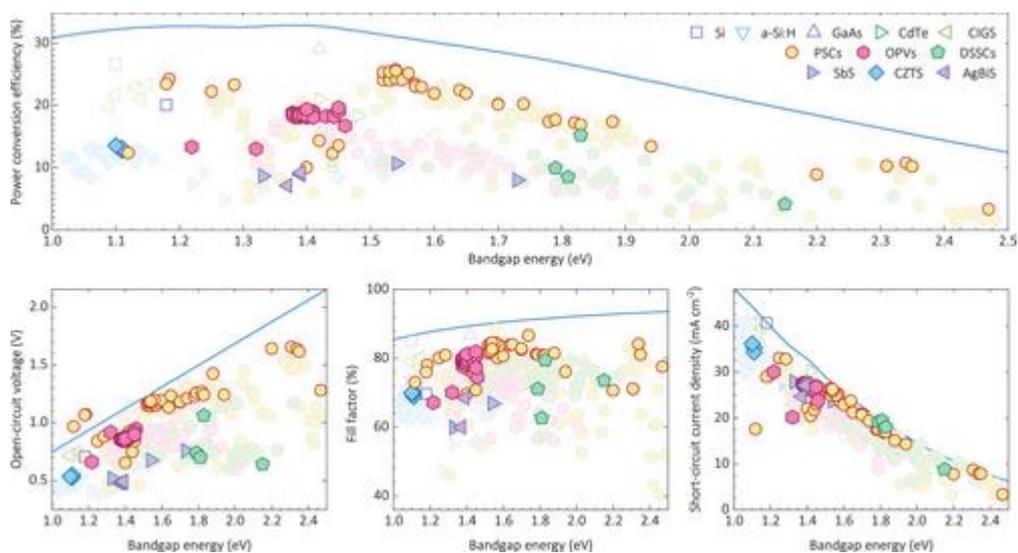
attraverso l'impiego di fonti rinnovabili. Come anticipato, il recupero e l'utilizzo delle biomasse residuali agricole e forestali (si vedano anche i paragrafi precedenti) rappresenta una valida alternativa all'impiego dei combustibili fossili in pieno accordo con il settimo principio della GC ("Uso di materie prime rinnovabili"). I residui dell'agricoltura includono prodotti sia di origine vegetale (paglia, sfalci d'erba, potature, bucce di semi, ecc.) che animale (letame, pelle, ossa, piume, lana, ecc.). La valorizzazione delle biomasse verso prodotti ad alto valore aggiunto (concetto di bioraffineria) può trovare applicazione in diversi campi della chimica come la produzione di agrofarmaci sostenibili, intermedi avanzati di sintesi, materiali bio-based (bioplastiche) e cosmetici. In particolare, la trasformazione delle biomasse tramite impianti di digestione anaerobica può, in prospettiva, impattare fortemente tutta la filiera del biometano e del biogas. Attualmente il settore del biogas è fortemente orientato all'ottenimento di energia rinnovabile, ma può potenzialmente fornire prodotti utili al settore della chimica, rendendo così l'impianto di digestione la parte centrale di una bioraffineria integrata. L'utilizzo a cascata del biogas e del biometano verso la produzione di molecole ad alto valore aggiunto richiede lo sviluppo di processi biotecnologici avanzati che in futuro potrebbero garantire un'economia circolare ancora più efficiente allungando il ciclo di vita dei prodotti. L'impiego di materie prime rinnovabili garantisce un forte contributo in termini di decarbonizzazione dei prodotti e dei processi chimici. In quest'ambito della GC la CO₂ ha dimostrato il suo valore come risorsa rinnovabile (C1 building block) per costruire prodotti utili all'industria della chimica fine attraverso diversi meccanismi catalitici ("catalisi", nono principio della GC). Rispetto alle reazioni di carbonilazione e carbossilazione a partire da diverse fonti fossili, le trasformazioni della CO₂ mostrano i vantaggi di essere sostenibili ed economiche, grazie alla sua abbondanza, disponibilità, e non tossicità. L'anidride carbonica può inoltre fungere da fonte di carbonio per sintetizzare combustibili idrocarburici applicando tecnologie avanzate basate su fotocatalisi, catalisi promossa da metalli non nobili ed elettrocatalisi. In generale, vi è oggi un enorme interesse nella chimica e nell'industria della CO₂. Il processo di cattura e stoccaggio dell'anidride carbonica (CCS) rimuove la CO₂ emessa in atmosfera consentendone il trasporto e lo stoccaggio sotterraneo. Questo processo richiede adsorbenti sempre più efficaci e può essere accoppiato in cascata dall'utilizzo dell'anidride carbonica (CCU) per trasformarla in diverse sostanze di interesse per l'industria chimica, farmaceutica, e delle bioplastiche.

Nuovi materiali e dispositivi Fotovoltaici Emergenti

Il presente paragrafo è una sintesi redatta sulla base della review di ricerca “Device Performance of Emerging Photovoltaic Materials” pubblicato da Almora e colleghi.

Le tecnologie fotovoltaiche emergenti (e-PV) sono probabilmente il campo di lavoro principale della comunità di ricerca operante nel settore fotovoltaico (PV): la ricerca in tale settore è orientata allo sviluppo di materiali e dispositivi per la conversione dell’energia solare basate su tecnologie economiche e adatta ad un’economia di scala. Tecnologie economiche sono quelle basate su materiali abbondanti, o su processi di fabbricazione che non richiedano alti consumi energetici, abbiano un basso impatto ambientale o non necessitino di un controllo rigoroso delle condizioni di fabbricazione (come quelle in essere nella tradizionale industria dei semiconduttori cristallini). L’obiettivo è quello di consolidare il fotovoltaico nell’ambito di un “commodity market”, in cui le celle solari, grazie a nuove versatili applicazioni rese disponibili grazie a dispositivi flessibili, trasparenti e integrati negli ambienti urbani (integrazione architettonica in elementi strutturali degli edifici (i.e. finestre, vetrate, parasoli) recupero energetico negli interni, alimentazione di dispositivi domotici) e agrivoltaica (Pascaris et al., 2020). I traguardi di efficienza registrati dalle e-PV riportati in giornali accademici sono stati sistematicamente parametrizzati e riportati a partire dal 2020, nei report annuali sulle e-PV (Almora et al., 2021; Almora et al., 2020; Green et al., 2022).

Figura 7: Efficienze più alte raggiunte da singole giunzioni in funzione del gap ottico



(Shockley et al., 1961)

La Figura 7 mostra le migliori efficienze di conversione da parte di celle solari di diversa natura e costituite da un singolo assorbitore (ovvero costituite da un solo tipo di materiale semiconduttore con il compito di assorbire e di convertire la luce solare). Le efficienze sono riportate in funzione del “band gap”, grandezza che determina l’intervallo di luce solare assorbibile dal materiale semiconduttore. Il grafico riporta tecnologie consolidate (Silicio, GaAs) basate su materiali cristallini o policristalline, a tecnologie inorganiche su film sottile (CIGS, CZTS, ovvero semiconduttori basati su rame indio gallio solfuro (CIGS) o rame zinco, stagno solfuro), già classificabili come e-PV, celle a organo-perovskite di piombo (PSC, Perovskite Solar Cells), celle solari organiche/polimeriche (OSC, Organic Solar Cells), e celle solari sensibilizzate da coloranti (DSSC). Le PSC le OSC e le DSSC sono classificabili tra le tecnologie solari più recenti, e sono contraddistinte da un processo preparativo basato su basse temperature, sulla fabbricazione “wet” ovvero che non richiede in modo stringente tecnologie ad alto vuoto, ma piuttosto deposizioni e cristallizzazioni secondo processi chimici. In linea di principio OSC, DSSC, PSC sono compatibili con processi di stampaggio e con il fotovoltaico flessibile. DSSC e PSC sono contraddistinte da ottima trasparenza e possono essere vantaggiosamente impiegate nell’integrazione architettonica. In condizioni di laboratorio si collocano molto favorevolmente rispetto al silicio cristallino tradizionale, in particolare quando l’assorbimento luminoso è limitato allo spettro visibile (gap compresi tra 1.4 e 1.8 eV).

Figura 8. Esempi di celle solari emergenti scalabili su larga area: (a) integrazione architettonica con celle trasparenti (DSSC); (b) celle flessibili (OSC) per dispositivi portatili/wearable. (c) modulo PSC (EPFL-UNIST) con efficienza sino a 25%

Fig. 8a



Fig. 8b

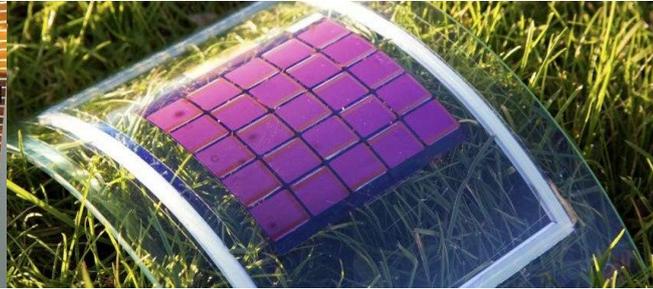
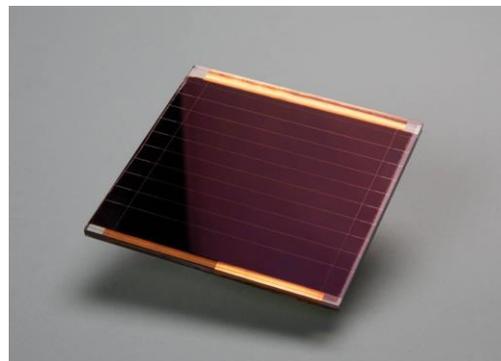
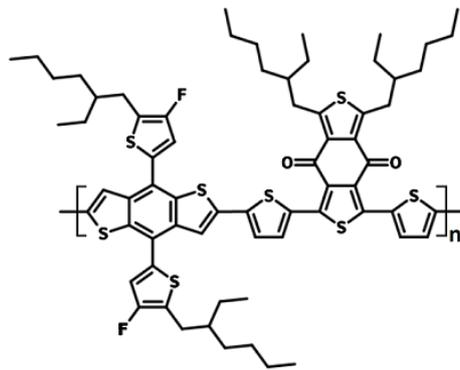


Fig. 8c



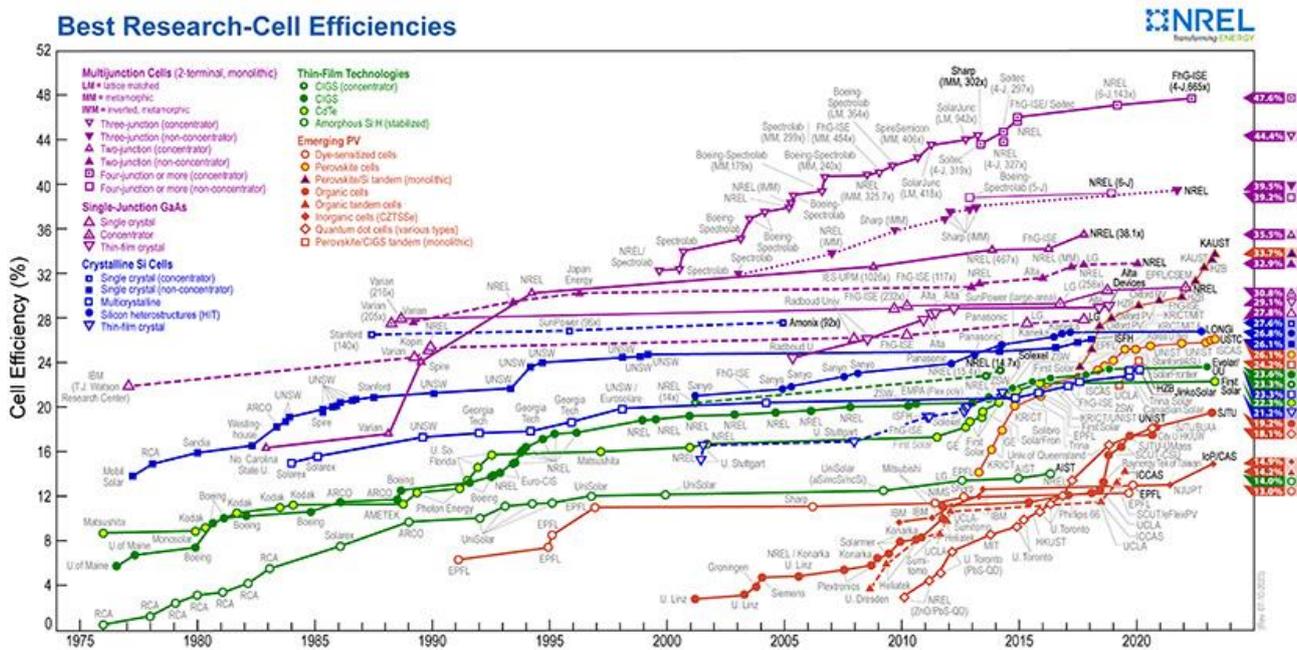
L'analisi dei dati riportati in figura 1 mostra che il gruppo delle PSC e delle OSC è certamente quello più fecondo di nuovi sviluppi, facendo segnare nuovi recenti record di efficienza nelle rispettive categorie. Si può osservare come i gradi di libertà composizionali nelle organo-perovskiti di piombo (composti aventi struttura cristallina cubica di formula $APbX_3$, dove A è catione organico o metallico, Pb è il piombo, X sono alogenuri (Cl^- , I^- , Br^-) consentano di regolare il gap, portando a valori di efficienza elevata in corrispondenza di molti valori diversi dei gap. Gli unici svantaggi delle tecnologie basate su perovskite sono dovuti all'utilizzo del piombo, metallo tossico, alla mancanza di trasparenza, alla sensibilità nei confronti di ossigeno e umidità. L'ultimo punto è tuttavia migliorabile con adeguate strategie di incapsulazione e protezione del mezzo attivo, tanto che vi sono diversi recenti report in cui moduli di perovskiti con efficienze superiori al 20% (quindi pari o superiori al silicio cristallino) hanno superato test di illuminazione continua di oltre 450 ore. Per quanto riguarda i sistemi fotovoltaici organici, tali sistemi tendono a raggiungere le massime efficienze quando il gap dell'assorbitore è prossimo a 1.4 eV, probabilmente a causa del polimero utilizzato nelle miscele usate nel mezzo attivo (PM6 figura 9). La più alta efficienza riportata per il solare organico è 19.6% (19.2% certificata) secondo Zhu e colleghi (2022) grazie ad un'ottimizzazione del blend di assorbitori.

Figura 9. Struttura del polimero PM6 a base politiofenica, impiegato in molte delle migliori celle solari organiche



Nell'anno appena trascorso nuovi e interessanti sviluppi hanno riguardato le DSSC, con un nuovo record di efficienza dopo molti anni di stagnazione, ottenuto grazie ad una strategia di pretrattamento dei substrati fotoattivi. In tali condizioni di ottimizzazione l'efficienza è prossima alle PSC e alle OSC di gap comparabile. Infine alcuni nuovi dispositivi a film sottile inorganico come antimonio selenosolfuro e solfuro di argento e bismuto hanno fatto registrare recenti e interessanti progressi, con efficienze prossime al 10%. Infine, come quadro riassuntivo mostriamo in Figura 10 il grafico prodotto annualmente dallo NREL di Golden (Colorado), dove si osserva il progresso della ricerca fotovoltaica in funzione del tempo e delle tipologie di materiali e architetture. Si osserva come le e-PV siano tecnologie in rapido sviluppo, concorrenziali con le tecnologie consolidate basate sul silicio poli- e mono- cristallino a singola giunzione. Celle multigiunzione cristalline, pur registrando le efficienze di conversione più elevate, sono attualmente troppo costose per una diffusione mass-market e per una distribuzione capillare sul territorio. Sono quindi dedicate ad applicazioni di potenza (centrali solari) o applicazioni aerospaziali.

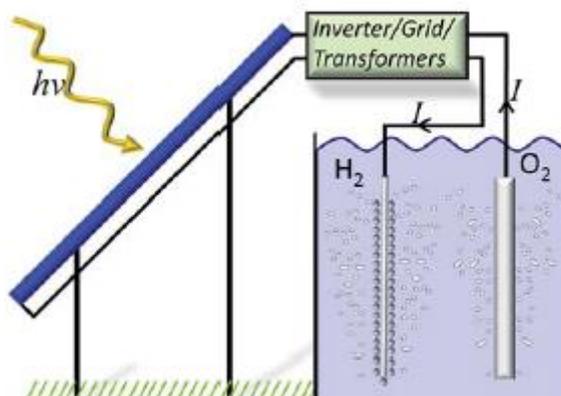
Figura 10. NREL chart aggiornata al 2023, dove sono mostrati i record di efficienza certificata per tipologia di materiale e architettura a partire dal 1975. Si osservano tecnologie emergenti, in rapido aumento di efficienza a partire dalla prima decade degli anni 200, e tecnologie mature (Silicio cristallino e sistemi ad esso correlati alcune architetture a film sottile) sostanzialmente a plateau di efficienza dagli anni 90/primi anni 2000.



Water splitting and riduzione dell'anidride carbonica

Uno dei principali ambiti di ricerca attualmente perseguiti riguarda lo sviluppo di dispositivi fotoelettrochimici in grado di sfruttare direttamente e in modo efficiente una risorsa rinnovabile, quale l'energia solare, immagazzinandola sotto forma di energia chimica di specifiche molecole di interesse industriale e/o combustibili chimici. In quest'ottica, la produzione di idrogeno attraverso la scissione fotoindotta dell'acqua rappresenta un obiettivo di grande rilevanza al giorno d'oggi. Diversi approcci al problema possono essere perseguiti che presentano gradi di complessità e punti di attenzione differenti. Il primo tra questi è basato sull'accoppiamento di un dispositivo fotovoltaico (cella solare) ad un dispositivo elettrolitico (Figura 11) in grado di trasformare l'acqua in idrogeno (reazione catodica) e ossigeno (reazione anodica). Questo approccio consente di disaccoppiare il problema dell'assorbimento e raccolta della luce (risolvibile ad esempio attraverso l'impiego di dispositivi fotovoltaici di nuova generazione a singola giunzione o in serie) dal problema chimico della reazione di conversione dell'acqua in idrogeno e ossigeno. Quest'ultima infatti presenta delle problematiche sia di tipo termodinamico (energia richiesta) sia di tipo cinetico (velocità di reazione), a causa della natura multi-elettronica e multi-protonica dei processi coinvolti. La ricerca e l'identificazione di opportuni catalizzatori in grado di favorire la riduzione dei protoni ad idrogeno e l'ossidazione dell'acqua ad ossigeno rappresenta quindi il focus principale degli studi nel settore.

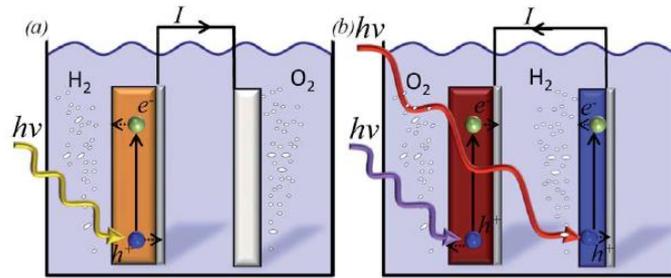
Figura 11: Rappresentazione schematica di un dispositivo accoppiato fotovoltaico/elettrolitico



Per quanto riguarda il processo catodico di sviluppo di H₂, il catalizzatore per eccellenza è il platino, tuttavia, data la sua scarsa abbondanza relativa in natura e gli elevati costi, la ricerca si è rivolta verso lo sviluppo di nuovi materiali. Materiali quali solfuro di molibdeno (MoS₂) o solfuro di tungsteno (WS₂) e leghe metalliche a base di nichel e molibdeno (NiMo) oppure nichel, molibdeno e zinco (NiMoZn) rappresentano alcune tra le più interessanti alternative (Poloni et al., 2014). Grande attenzione è poi riversata anche verso lo sviluppo di catalizzatori molecolari a base di complessi di coordinazione di ferro, nichel e cobalto che presentano analogie con i siti attivi di enzimi di batteri quali le idrogenasi. La costruzione di sistemi ibridi basata sull'accoppiamento di nanotubi di carbonio, grafene o grafene ossido e catalizzatori molecolari presenta grandi prospettive nell'ambito della produzione di idrogeno (Coutard et al., 2016). Per quanto concerne la reazione anodica di ossidazione dell'acqua lo sviluppo di ossidi di metalli della prima serie di transizione (ferro, cobalto e nichel) e ossidi misti rappresenta una delle principali attività di ricerca del settore. (Smith et al, 2013; Jung et al., 2016)

Un secondo approccio verso la reazione di scissione fotoindotta dell'acqua è rappresentato dalla cella fotoelettrolitica (PEC, Figura 12). Quest'ultima può presentare diverse strutture e gradi complessità. Essa è in generale costituita da due elettrodi immersi in soluzione acquosa in cui o uno solo (Figura 12a) od entrambi (Figura 12b) sono fotochimicamente attivi. Nel primo caso la messa in opera del dispositivo richiede in genere l'utilizzo di un bias di potenziale elettrico (che può essere fornito da un dispositivo fotovoltaico), mentre nel secondo caso la reazione di water splitting avviene grazie al solo assorbimento dell'energia solare.

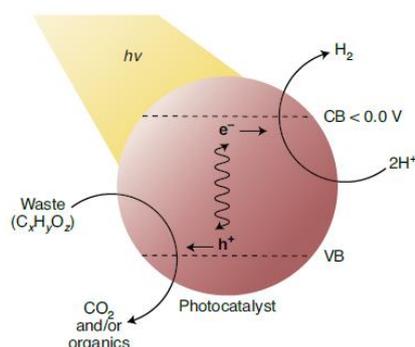
Figura 12: Rappresentazione schematica di un dispositivo PEC: a) configurazione a singolo fotoelettrodo, b) configurazione a doppio fotoelettrodo.



Lo sviluppo di una cella fotoelettrochimica come quella raffigurata in Figura 2b richiede dapprima l'ottimizzazione separata dei due fotoelettrodi, secondo la configurazione in Figura 2a (fotocattodo + anodo dark) o quella ad essa simmetrica (fotoanodo + catodo dark). L'attività di ricerca nell'ambito dello sviluppo di fotocattodi si incentra principalmente sull'impiego di semiconduttori di tipo p quali silicio, rame ossido (Cu_2O), etc. e sulla loro funzionalizzazione con catalizzatori (Lai et al., 2015). Anche in questo caso, l'impiego di materiali catalitici quali leghe metalliche oppure materiali ibridi a base di catalizzatori molecolari può garantire elevate prestazioni. In alternativa, semiconduttori di tipo p ad ampio band gap quali nichel ossido (NiO), opportunamente funzionalizzati con unità cromoforiche e catalizzatori, possono essere considerati (Gibson, 2017). Per lo sviluppo di fotoanodi invece sono impiegati materiali quali semiconduttori di tipo n come ossido tungstico (WO_3), bismuto vandato (BiVO_4), ematite (Fe_2O_3) opportunamente funzionalizzate con catalizzatori a basi di ossidi metallici (Francàs et al., 2021).

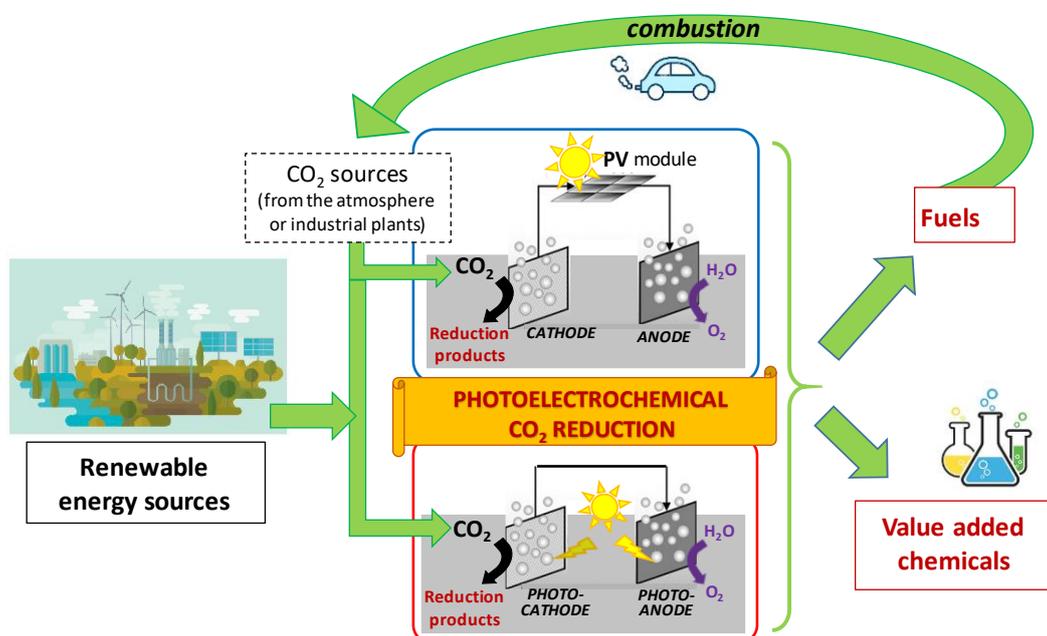
Un approccio alternativo di tipo più prettamente fotochimico, altresì seguito per la produzione di idrogeno, è basato su un design analogo a quello in Figura 2, ma rivolto all'accoppiamento della reazione catodica di riduzione di protoni ad H_2 con una reazione anodica diversa dall'ossidazione dell'acqua e più interessante ai fini applicativi. Questo concetto è alla base del cosiddetto "photoreforming" (Figura 3) e mira a sfruttare il potere ossidante di semiconduttori fotoeccitati per l'ossidazione e la rimozione di inquinanti emergenti quali in particolare plastiche, generando al contempo combustibile pulito e sostenibile come l'idrogeno (Uekert et al., 2021)

Figura 13: Rappresentazione schematica di un processo di “photoreforming”.



Riveste particolare interesse anche il processo di riduzione (foto)elektrochimica dell’anidride carbonica (CO_2), un gas serra immesso massivamente nell’atmosfera a seguito dell’utilizzo smodato di combustibili fossili in diverse attività antropiche, i cui livelli contribuiscono significativamente al riscaldamento globale nonché all’intensificarsi di determinati fenomeni atmosferici. Lo sviluppo di sistemi in grado di promuovere questa reazione presenta quindi il duplice vantaggio di valorizzare questa specie, generalmente considerata di scarto, mediante la sua successiva trasformazione in prodotti ad alto valore aggiunto, quali ad esempio il gas di sintesi, l’etilene o l’etanolo, ad oggi tra i composti chimici più richiesti a livello globale, preparati in processi con forte impatto produttivo. Il conseguimento di tali obiettivi mediante sistemi unicamente alimentati dall’energia solare porterà quindi alla realizzazione di processi sintetici alternativi con emissioni nette di gas serra pari a zero, secondo quanto previsto dal “Green Deal Europeo”.

Figura 14: Rappresentazione schematica delle diverse fasi di conversione e stoccaggio di una fonte rinnovabile (nello specifico, l'energia solare) in energia chimica di prodotti ad alto valore aggiunto e/o combustibili, ottenuti mediante riduzione fotoelettrochimica della CO₂.



La realizzazione di sistemi per la riduzione elettrochimica fotoassistita della CO₂ prevede la combinazione di competenze multidisciplinari in ambito di chimica, scienze dei materiali e ottica, con l'assemblaggio e l'ingegnerizzazione del dispositivo finale. Un esempio tra quelli attualmente in studio prevede la preparazione di un modulo fotovoltaico (PV) costituito di materiali con caratteristiche complementari di assorbimento della luce, in modo da convertire con la massima efficienza possibile l'energia solare incidente in energia potenziale elettrica, in grado poi di promuovere le reazioni chimiche desiderate su opportuni elettrodi catalitici (box blu in Figura 4). Tra i materiali catodici usati per la riduzione elettrochimica della CO₂, quelli a base di rame risultano particolarmente interessanti in quanto questo metallo è l'unico in grado di promuovere la formazione di prodotti a 2 e più atomi di carbonio, inclusi idrocarburi e alcoli (Kuhl et al., 2012). Per garantire la selettività desiderata risulta quindi cruciale l'ottimizzazione delle interfacce a base di rame, mediante ad esempio nanostrutturazione della superficie, esposizione di particolari facce cristallografiche, post-funzionalizzazione con strati organici/polimerici o catalitici (Thevenon *et al.*, 2019; Niorettini et al. 2022).

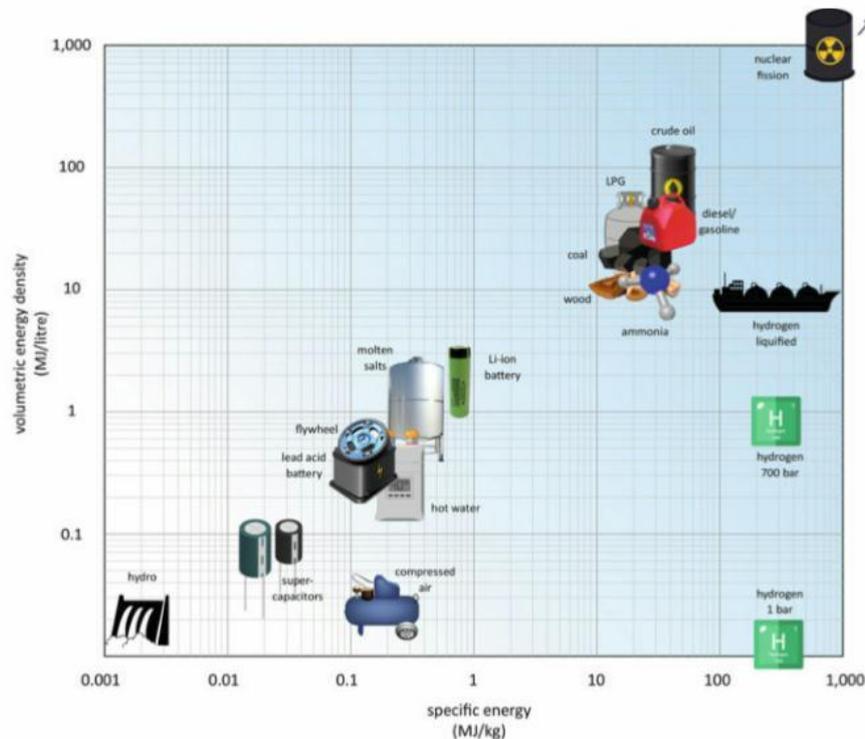
Alternativamente, sono in fase di studio sistemi basati sull'impiego di opportuni materiali semiconduttori fotocatodici, in grado di assorbire la radiazione solare e promuovere la reazione di riduzione della CO₂ all'interfaccia. In questo scenario, i fotocatodi più utilizzati sono ad esempio ossidi binari e ternari di rame (Cu₂O, CuFeO₂) oppure silicio di tipo p, eventualmente post-

funzionalizzati con layer protettivi o catalitici (Putri et al, 2022). Tali elettrodi possono essere connessi con dei fotoanodi con proprietà complementari di assorbimento della luce ed energetica opportuna, secondo lo schema nel box rosso in Figura 4, in cui l'impiego in tandem dei due fotoelettrodi permette il funzionamento del sistema fotoelettrochimico completo senza l'aggiunta di moduli fotovoltaici. In un approccio complementare, la reazione svolta nei dispositivi fotoelettrochimici di stoccaggio dell'energia solare in energia chimica può essere la scissione fotoindotta dell'acqua nei suoi componenti, ossigeno e idrogeno (*vide supra*). Quest'ultimo può quindi venir impiegato in una fase successiva per ridurre chimicamente l'anidride carbonica a metano o metanolo, utilizzando opportuni materiali catalitici (Moioli et al., 2019)

Storage Elettrochimico: alcuni approcci verso accumulatori ad alta efficienza

L'implementazione di fonti rinnovabili (solare, eolico ecc.) ha come naturale conseguenza l'intermittenza determinata dal ciclo diurno e da condizioni meteo variabili. In tale contesto è ovvia la necessità di provvedere allo stoccaggio dell'energia elettrica prodotta, al fine di poterla utilizzare quando è necessario. Attualmente la forma di stoccaggio energetico più comune (energia chimica) è in forma di combustibili fossili, che vengono utilizzati alla bisogna per soddisfare le richieste della rete energetica. Altre forme di stoccaggio dell'energia sono per esempio gli involucri idroelettrici, dove invece l'energia è stivata sotto forma di energia potenziale gravitazionale. L'elettrificazione del traffico veicolare pone inoltre un'altra sfida nei confronti di accumulatori elettrochimici di varia natura, che devono essere dotati di un rapporto peso/potenza vantaggioso, ovvero devono essere dotati della possibilità di accumulare elevate densità di energia (energia immagazzinata/massa dell'accumulatore) in un volume contenuto. Infatti, piccoli volumi semplificano il trasporto e lo stoccaggio, richiedendo meno strutture di contenimento e meno spazio. Il grafico sottostante mostra la relazione tra energia specifica (energia/unità di massa) rispetto alla densità volumetrica di energia.

Figura 15: Densità di energia specifica (energia/massa) rispetto alla densità di energia volumetrica. Il diagramma consente di valutare lo spazio occupato da diversi approcci verso lo stoccaggio di energia. Se la densità di energia/volumetrica è troppo bassa, sorgono problemi di spazio di stoccaggio⁹.

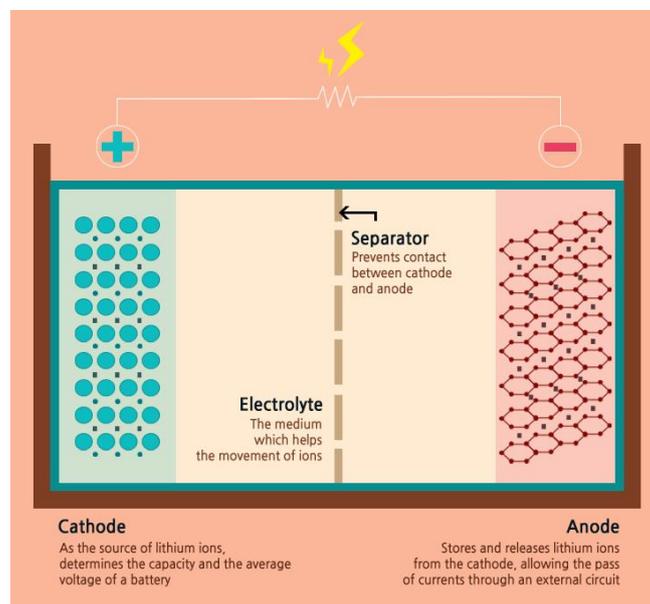


Dal grafico sottostante – Figura 16 - si vede come la densità volumetrica dell'idroelettrico è estremamente bassa, di conseguenza si tratta di un approccio implementabile solo in certe aree geografiche che possono essere destinate alla costruzione di invasi (valli montane disabitate), mentre vediamo che i combustibili fossili o piccole molecole a grande contenuto energetico (come ammoniaca per esempio) sono inferiori soltanto al nucleare da fissione in quanto a rapporto energia/volume. E' questa la ragione per cui la nostra rete energetica è dominata dai combustibili, che tuttavia, nel caso delle fonti fossili, non rappresentano una scelta sostenibile a lungo termine, per noti problemi connessi all'accumulo di gas serra, esaurimento nel lungo termine, distribuzione non omogenea a livello globale e spesso collocazione in aree geopolitiche instabili. Vediamo che l'idrogeno, combustibile green per antonomasia ha una energia specifica per peso molto elevata, ma una bassa densità volumetrica (essendo un gas). Diviene competitivo con le fonti fossili una volta che è portato in forma liquida. Mentre gli approcci sostenibili verso la produzione di combustibili rinnovabili saranno trattati in un diverso documento, osserviamo che al di sotto dei combustibili

⁹ Fonte: <https://energyskeptic.com/2018/power-density-of-biomass-wind-solar-requires-too-much-land-to-replace-fossil-fuels/>

chimici troviamo diversi tipi di accumulatori elettrochimici (dalle convenzionali batterie al piombo/acido solforico, ai più efficienti accumulatori al litio). Al di sotto degli accumulatori elettrochimici, troviamo i super condensatori, che hanno architetture e modalità di impiego per molti aspetti prossimi alle batterie al litio, sfruttando processi di intercalazione/de-intercalazione di ioni in materiali porosi. Le stesse batterie al litio mostrano un'ampia tipologia di materiali e di architetture che portano a diverse prestazioni, in termini di stabilità, sicurezza di utilizzo, e densità energetica. La classica architettura di una batteria a ioni di litio è mostrata in Figura 2. I due elettrodi sono costituiti da materiali porosi, dove normalmente l'anodo è un materiale a base di carbonio (grafite ecc.), mentre il catodo è costituito da materiali di diversa natura: spesso si tratta di ossidi e fosfati di cobalto e ferro. In fase di carica gli ioni litio sono accumulati nell'anodo, e migrano in fase di scarica al catodo. Molta della ricerca nelle batterie a ioni di litio è rivolta verso l'ottimizzazione del materiale catodico, la cui natura determina in larga misura l'efficienza della batteria (capacità e voltaggio). I più comuni catodi sono rappresentati da LiCoO_2 ; LiMn_2O_4 , LiFePO_4 , e composti del tipo $\text{Li}[\text{Ni}_x\text{Co}_y\text{Mn}_z]\text{O}_2$. Il trend generale va verso la sostituzione del cobalto con metalli meno tossici e abbondanti, come ferro e manganese.

Figura 16: Schema di una batteria a ioni di litio¹⁰

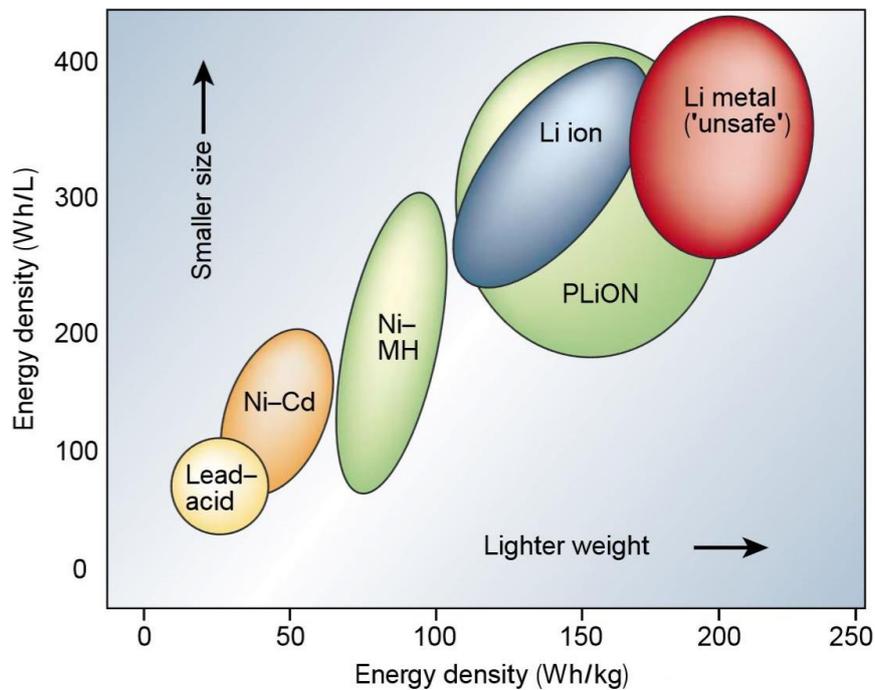


Il grafico in Figura 17 riporta le densità energetica (di peso e volumetrica) di diversi apparati per lo storage elettrochimico. Si vede che le batterie a ioni di litio rappresentano attualmente gli accumulatori più efficienti. Potrebbero essere superate da batterie a litio metallico (es. batterie

¹⁰ Fonte: <https://www.samsungsdi.com/column/technology/detail/55272.html>

litio/ossigeno) che tuttavia manifestano tutt'ora problemi di instabilità e di sicurezza, a causa della forte reattività chimica del litio metallico.

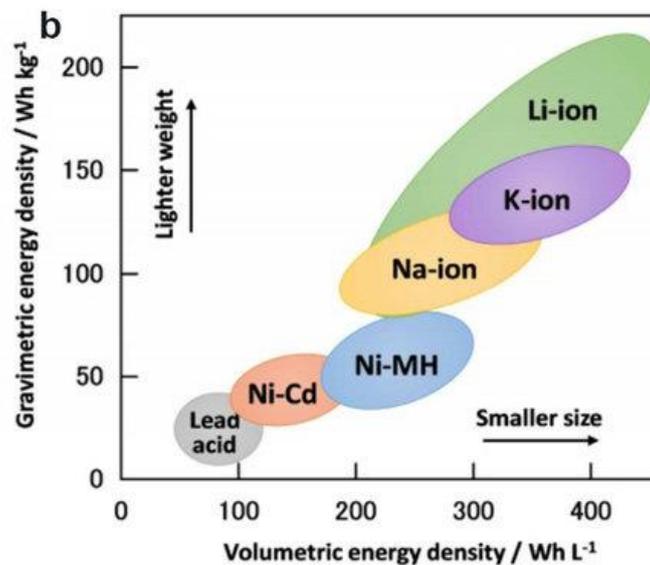
Figura 17: Efficienza energetica (energia/peso vs energia/volume) in dispositivi per lo storage elettrochimico



(Deng, 2015)

La ricerca verso l'ottimizzazione degli accumulatori a ioni litio spesso è focalizzata sull'implementazione di materiali ad alta area superficiale, spesso in forma nanostrutturata con l'obiettivo di ottenere basse resistenze di diffusione degli ioni, garantendo quindi alta capacità e alte conducibilità ioniche ed elettroniche. Simili concettualmente alle batterie a ioni litio, sono le batterie a ioni sodio e potassio. Tali batterie superano la relativa scarsa disponibilità del litio a livello globale, implementando ioni ubiquitari come sodio e potassio, al prezzo di una diminuzione nell'efficienza energetica (Figura 18).

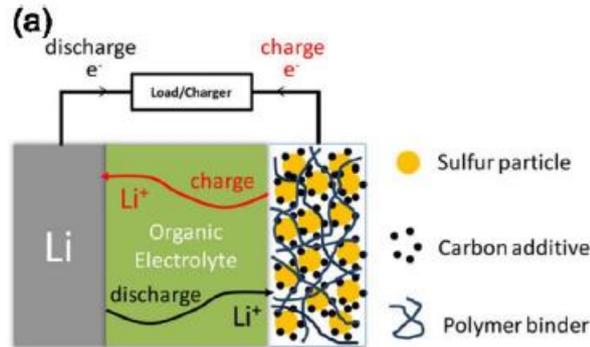
Figura 18: Efficienza energetica in batteria a ioni sodio e potassio, comparata al litio (



Bashir et al., 2021)

Le batterie litio/zolfo sono invece una promettente architettura basata su processi redox che coinvolgono un anodo di litio e un catodo di zolfo. Sono contraddistinte da una elevata densità energetica, mentre lo zolfo è generalmente considerato, rispetto ai composti usati nelle batterie a ioni litio convenzionali, un elemento abbondante e poco tossico. Il principio di funzionamento è basato su reazioni redox che coinvolgono lo zolfo, con formazione di solfuri/polisolfuri di litio quando si è in fase di scarica. Anche in questo caso, i processi elettrochimici coinvolgono il trasporto di ioni litio attraverso un elettrolita organico. Tale architettura è implementabile anche con ioni sodio. Permangono in questi casi rischi di sicurezza connessi a elettrodi metallici (litio e sodio) nel caso di esposizione di tali materiali ad aria o umidità, per cui sono allo studio strategie di incapsulamento e protezione.

Figura 19: Architettura di una batteria litio/zolfo. Il catodo è formato da un composito di zolfo, carbonio e legante polimerico. Il carbonio assicura la conducibilità elettronica, mentre il polimero ha un ruolo strutturale



(Manthiram *et al.*, 2014)

L'attività di ricerca sui catalizzatori è una componente fondamentale ed altamente strategica per Basell Poliolefine Italia e per LyondellBasell group (LYB) perché oltre a rappresentare un solido e remunerativo core business è una delle componenti, insieme alla ricerca su nuove tecnologie di polimerizzazione, che ha permesso a LYB di diventare leader mondiale in questo campo. La importanza della ricerca per lo sviluppo industriale di nuovi catalizzatori per la polimerizzazione delle olefine è testimoniata nei fatti dai numerosi risultati ottenuti e che hanno portato al deposito di circa 60 domande di brevetto solo negli ultimi 10 anni. L'attività di innovazione tecnologica è quindi fondamentale per mantenere e rafforzare la nostra posizione di leader globale nel campo delle vendite di catalizzatori e licenze per polipropilene e funge anche da solido punto di partenza per lo sviluppo di nuovi catalizzatori più performanti, in grado di produrre polimeri sempre più puliti in accordo il nostro impegno verso una sempre maggiore attenzione all'ambiente e alla sicurezza dei nostri prodotti. Proprio questa attività di miglioramento continuo del catalizzatore è un ottimo esempio della necessità e del successo della ricerca scientifica del sito di Ferrara.

La performance di un catalizzatore è in gran parte legata alla presenza di una particolare molecola al suo interno (il cosiddetto "donor interno") aggiunta nella preparazione dei catalizzatori. L'attività di ricerca e sviluppo su nuovi donor interni e sul continuo miglioramento delle prestazioni dei catalizzatori per la polimerizzazione di olefine è infatti principalmente localizzata nel Centro Ricerche G. Natta di Ferrara.

La ricerca è quindi fondamentale per il miglioramento continuo non solo delle prestazioni dei catalizzatori ma soprattutto per il miglioramento della sicurezza del polimero finale. A tale scopo, proprio a Ferrara, da alcuni anni sono in corso diverse attività di ricerca focalizzate sullo sviluppo e commercializzazione di una famiglia di catalizzatori contenenti nuovi "donor interni" più sicuri e pensati per sostituire e migliorare la precedente generazione di catalizzatori contenente ftalato (una sostanza che a livello europeo è stata riclassificata come dannosa alla riproduzione umana e quindi inserita nella lista REACH delle sostanze estremamente preoccupanti) e risolvere in questo modo

ogni potenziale rischio, anche solo potenziale, per l'utilizzatore finale. Gli obiettivi del progetto di sostituzione dello ftalato dai catalizzatori per polipropilene sono comuni a tutte le attività di scouting e sviluppo di nuovi sistemi catalitici. Lo scopo è infatti duplice:

- 1) la sostituzione dei catalizzatori esistenti garantendo la possibilità di produrre polimeri aventi le stesse o migliorate proprietà fisico-meccaniche e chimico-fisiche, garantendone nel contempo una maggiore pulizia e sicurezza di uso;
- 2) miglioramenti delle prestazioni del catalizzatore (come produttività oraria, tenuta morfologica in diverse condizioni di polimerizzazione) e delle caratteristiche del polimero da esso ottenuto.

Lo sviluppo di nuovi sistemi catalitici è anche alla base dell'allargamento del campo di applicazione dei catalizzatori prodotti a Ferrara, in particolare sfruttando la possibilità di utilizzare questi nuovi catalizzatori anche in tecnologie di polimerizzazione sviluppate da società concorrenti (terze parti). Come risultato netto, questo allargamento alle terze parti è in grado di generare un aumento sensibile della produzione industriale locale di catalizzatori per poliolefine.

Tra le più recenti attività ad avanzato stadio di sviluppo si segnala anche una nuova famiglia di catalizzatori contenenti un nuovo "donor interno" ad alte prestazioni che attualmente è in fase attiva di validazione. Dopo diversi test a livello di laboratorio e pilota che hanno confermato i risultati molto promettenti si è deciso di avviare ufficialmente la fase attiva di validazione finale di sviluppo e industrializzazione dei catalizzatori da esso derivati. Questa ulteriore famiglia di catalizzatori ad alte performance contribuisce ancora di più a rafforzare la posizione di leadership tecnologico della nostra società nel campo dei catalizzatori per la produzione del polipropilene, rafforzando il know-how scientifico del sito di Ferrara. Componenti fondamentali nella produzione dei catalizzatori sono i suoi precursori dalla forma sferica (chiamati "supporti") a base di cloruro di magnesio: anche questi vengono prodotti industrialmente a Ferrara. La continua attività di ricerca e di sviluppo dei "supporti" sferici persegue due diversi indirizzi:

- 1) garantire il mantenimento della qualità dei supporti introducendo, quando necessari, dei miglioramenti sfruttabili nell'ottenimento dei nuovi catalizzatori
- 2) migliorare affidabilità e produttività del processo di produzione dei supporti sferici.

In continuità con l'attività di ricerca, la produzione industriale di catalizzatori Ziegler-Natta a Ferrara riveste primaria importanza a livello mondiale. Negli ultimi 3 anni sono stati realizzati investimenti significativi per aumentarne la capacità produttiva.

In aggiunta, nell'ambito delle nuove attività di ricerca nel campo dell'economia circolare (in particolare il riciclo dei polimeri) e della chimica sostenibile è stata sviluppata a Ferrara una nuova tecnologia di riciclo avanzata proprietaria di LYB. La nuova tecnologia MoReTec (acronimo di "Molecular Recycling Technology") si basa sulla possibilità di riconvertire in materia prima i rifiuti

plastici che risulterebbero difficilmente riciclabili con altri metodi (ad esempio riciclo meccanico) e che andrebbero necessariamente in discarica o all'incenerimento sprecando una risorsa preziosa oltre che aumentare l'inquinamento. Con la tecnologia MoReTec, le catene polimeriche vengono scisse a livello molecolare per produrre una miscela di componenti idrocarburi a peso molecolare più basso, il così detto "olio pirolitico". Questo olio pirolitico (simile alla comune nafta) è quindi utilizzabile come materia prima per alimentare un impianto di cracking, in cui l'olio pirolitico viene trasformato di nuovo in etilene e propilene (chiamati monomeri) da utilizzare nuovamente per la produzione di nuovi polimeri, riducendo quindi la dipendenza dal petrolio. In questo modo, è possibile chiudere il cerchio della circolarità dei polimeri: monomero->polimero->manufatto->rifiuto plastico->MoReTec->nafta->monomero, trasformando così un rifiuto in una materia prima da rimettere in circolo. Il riciclo chimico MoReTec avviene attraverso una rottura delle lunghe catene polimeriche (pirolisi) favorita dalle alte temperature e dall'utilizzo di un catalizzatore specifico. Il lavoro di ricerca, svolto in gran parte proprio nel sito di Ferrara, ha dimostrato che un catalizzatore opportuno facilita la reazione di pirolisi e permette di utilizzare temperature sensibilmente più basse per il processo (risparmio di energia) ed ottenere, nello stesso tempo, una migliore qualità dell'olio pirolitico. Ancora una volta la ricerca sui catalizzatori si è dimostrata fondamentale per rendere vincente e industrializzabile una nuova tecnologia, come il MoReTec che attualmente è in fase pilota proprio Ferrara e in parallelo già in fase di implementazioni su scala Demo / semi-commerciale in Germania.

In prospettiva, lo sviluppo della tecnologia di riciclo chimico dei polimeri, potrebbe portare alla necessità della produzione industriale dei catalizzatori MoReTec nel sito Basell di Ferrara, aggiungendo ulteriore risorsa per aumentare la capacità produttiva degli impianti di produzione catalizzatori del sito.

Scenari di prezzo e di domanda dei combustibili fossili nel medio-lungo termine

Nel corso del 2022 il sistema economico globale si è trovato immerso in una crisi energetica legata a fenomeni bellici, che hanno alla base fenomeni economici quali disparità di crescita tra aree geografiche e la dipendenza europea dai fossili nella transizione. Il gas naturale, il fossile a minore impatto sul riscaldamento globale, vede una disponibilità delle fonti ancora più concentrata rispetto al petrolio. Le conseguenze dell'invasione dell'Ucraina da parte della Russia, primo esportatore di combustibili fossili al mondo, hanno cambiato radicalmente le supply chain di approvvigionamento del gas naturale da parte dell'Unione Europea, portando questa risorsa a livelli di prezzo mai visti prima. Inoltre, le sanzioni internazionali hanno colpito anche le esportazioni di petrolio e carbone russo, andando a intaccare in maniera significativa una delle arterie globali del mercato energetico.

Ad oggi, la strategia europea di sostituzione del gas russo tramite nuove importazioni di GNL (gas naturale liquefatto) sembra aver dato frutti ed il costo di questa risorsa è calato, ma il prezzo odierno dei tre combustibili fossili più importanti rimane abbastanza alto e soprattutto particolarmente volatile (in particolare per quello che riguarda il carbone). L'incertezza di prezzo e la conseguente difficoltà a definire aspettative su range plausibili è quasi sempre un fattore che può nuocere agli investimenti di lungo periodo, ancora più di prezzi elevati ma stabili. I prezzi medi rilevati attualmente sono:

Petrolio: 93\$/bbl (ICE – 25 settembre)

Gas naturale: 44€/MWh (ICE - 25 settembre)

Carbone: 125\$/ton (ICE – 25 settembre)

Questa situazione di crisi ha acceso i riflettori sui governi e sulle loro reazioni. Oltre alle misure a breve termine, molti governi stanno adottando misure a lungo termine: alcuni cercano di aumentare o diversificare l'offerta di petrolio e gas; molti cercano di accelerare il cambiamento strutturale. Partendo da un'analisi della situazione attuale l'Agenzia Internazionale dell'Energia (IEA), nel suo World Energy Outlook 2022, ipotizza tre scenari futuri possibili, differenziati principalmente da diverse assunzioni nei confronti delle politiche che verranno messe in atto:

- **Stated Policies:** questo scenario non considera ciò che i governi dicono di voler realizzare, ma ciò che stanno effettivamente facendo per raggiungere i traguardi e gli obiettivi che si sono prefissati. Si basa quindi su un'analisi dettagliata, settore per settore, delle politiche e delle misure effettivamente in atto o in fase di sviluppo in varie aree di intervento. Le emissioni non raggiungono lo zero netto e l'aumento delle temperature medie associato allo scenario è di circa 2,5 °C nel 2100 (con una probabilità del 50%).
- **Announced Pledges:** questo scenario presuppone che i governi rispettino, in pieno e in tempo, tutti gli impegni annunciati in materia di clima, compresi gli obiettivi a lungo termine di zero emissioni nette e gli impegni negli NDC (Nationally Determined Contributions).
- **Net Zero Emissions by 2050:** questo scenario normativo delinea un percorso verso la stabilizzazione delle temperature medie globali a 1,5°C sopra i livelli preindustriali senza fare affidamento sulla riduzione delle emissioni provenienti dall'esterno del settore energetico.

A seconda dello scenario considerato, le previsioni riguardo al livello di prezzo delle diverse risorse cambiano a volte radicalmente, come si evince dalla Tabella 3:

Tabella 3: Previsioni dei prezzi

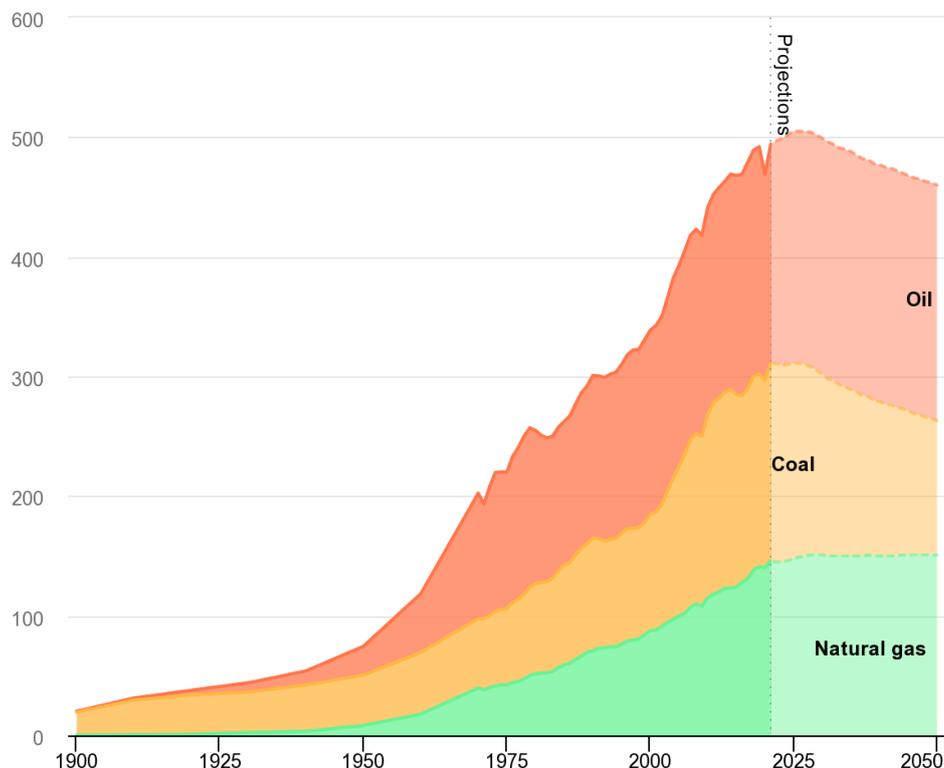
Scenario	Anno	Risorsa	Prezzo
STATED POLICIES	2030	Oil	~82\$/bbl
		Gas (EU)	~27€/MWh
		Steam Coal (EU)	~46\$/ton
	2050	Oil	~95\$/bbl
		Gas (EU)	~29€/MWh
		Steam Coal (EU)	~44\$/ton
ANNOUNCED PLEDGES	2030	Oil	~64\$/bbl
		Gas (EU)	~25€/MWh
		Steam Coal (EU)	~42\$/ton
	2050	Oil	~60\$/bbl
		Gas (EU)	~20€/MWh
		Steam Coal (EU)	~24\$/ton
NET ZERO EMISSIONS BY 2050	2030	Oil	~35\$/bbl
		Gas (EU)	~14€/MWh
		Coal	~22\$/ton
	2050	Oil	~24\$/bbl
		Gas (EU)	~12€/MWh
		Steam Coal (EU)	~17\$/ton

International Energy Agency, World Energy Outlook 2022¹¹

¹¹ <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>.

Già ad un primo sguardo è evidente come il prezzo sia destinato a crollare per quasi tutti gli scenari e le risorse considerate. Questo è dovuto al fatto che l’Agenzia prevede che le nuove politiche nei principali mercati energetici contribuiranno a spingere gli investimenti annuali in energia pulita a oltre 2 trilioni di dollari entro il 2030 (già nello scenario STEPS, il più “conservativo”), un aumento di oltre il 50% rispetto a oggi. Il report prevede quindi che la domanda globale per ciascuno dei combustibili fossili raggiungerà un picco o un plateau. Sempre nello scenario STEPS, si prevede che l’uso del carbone diminuirà nei prossimi anni, la domanda di gas naturale raggiungerà un plateau entro la fine del decennio e l’aumento delle vendite di veicoli elettrici porterà la domanda di petrolio a stabilizzarsi intorno alla metà degli anni ’30 prima di diminuire leggermente a metà del secolo. La domanda totale di combustibili fossili diminuirà costantemente dalla metà degli anni 2020 di circa 2 exajoule all’anno in media fino al 2050, una riduzione annua più o meno equivalente alla produzione in corso della vita di un grande giacimento petrolifero. Questa riduzione della domanda, collegata alla diminuzione del costo delle rinnovabili e al loro enorme aumento di disponibilità, porterà i prezzi dei combustibili fossili alla forte diminuzione visibile nella tabella precedente.

Figura 20: Domanda di combustibili fossili nello scenario STEPS



International Energy Agency, World Energy Outlook 2022¹²

Vediamo ora più in dettaglio la situazione delle tre risorse chiave nei diversi scenari:

- **Petrolio:** Nello Stated Policies Scenario (STEPS), la domanda globale di petrolio riprenderà e supererà i livelli del 2019 entro il 2023, nonostante i prezzi elevati; la domanda raggiunge il picco a metà degli anni '30 con 103 milioni di barili al giorno (mb/g). Nello scenario Announced Pledges (APS), un'azione politica più forte anticipa il picco della domanda di petrolio verso la metà degli anni 2020. Nello scenario Net Zero Emissions by 2050 (NZE), un'azione globale più rapida per ridurre le emissioni significa che la domanda di petrolio non tornerà mai al livello del 2019 e scenderà a 75 mb/g entro il 2030. Il settore chimico è stato l'unico settore in cui l'uso di petrolio è aumentato nel 2020, e si prevede che rappresenterà una quota crescente di utilizzo di petrolio in ciascuno scenario. Attualmente circa il 70% del petrolio utilizzato come materia prima petrolchimica viene utilizzato per produrre plastica. Numerosi paesi stanno annunciando politiche per vietare o ridurre la plastica monouso, migliorare i tassi di riciclaggio e promuovere materie prime alternative. I tassi medi globali di riciclo della plastica aumenteranno dall'attuale livello del 17% al 27% nel 2050 nello scenario STEPS, al 50% nello scenario APS e al 54% nello scenario NZE.

- **Gas naturale:** La profondità e l'intensità della crisi odierna hanno portato a serie preoccupazioni sul costo futuro e sulla disponibilità del gas naturale, danneggiando la fiducia nella sua affidabilità e intaccato gravemente l'idea che possa servire come combustibile di transizione. Di conseguenza, l'era della rapida crescita globale della domanda di gas naturale sta volgendo al termine. Nello scenario STEPS, la domanda aumenterà di meno del 5% tra il 2021 e il 2030, rispetto a un aumento del 20% tra il 2011 e il 2020. Dal 2030 rimarrà poi stabile fino al 2050, con la crescita nei mercati emergenti e nelle economie in via di sviluppo compensata dal calo nelle economie avanzate. Nello scenario APS, la domanda raggiunge velocemente il picco ed è inferiore del 10% rispetto ai livelli del 2021 entro il 2030. Nello scenario NZE la domanda scende del 20% nel 2030 ed è inferiore del 75% rispetto a oggi nel 2050.

- **Carbone:** La domanda globale di carbone ha registrato una forte ripresa nel 2021 grazie alla ripresa delle economie post-pandemia. La produzione di energia elettrica a carbone ha raggiunto un massimo storico nel 2021. Sia la Cina che l'India hanno incrementato gli investimenti nella produzione nazionale di carbone, ma la produzione globale ha faticato a tenere il passo con l'aumento della domanda, provocando un'impennata dei prezzi del carbone. La Russia – il terzo maggiore esportatore di carbone al mondo – e la sua invasione dell'Ucraina hanno complicato le dinamiche del mercato del carbone e hanno esercitato ulteriore pressione sui prezzi. Le prospettive per il carbone dipendono fortemente dalla determinazione degli Stati ad affrontare il cambiamento climatico. Nello scenario STEPS, la domanda di carbone diminuisce gradualmente. Nello scenario APS scenderà di circa il

20% al di sotto dei livelli attuali entro il 2030, e del 70% entro il 2050; la domanda di carbone raggiunge il picco in Cina all'inizio degli anni 2020 e in India alla fine degli anni 2020. Nello scenario NZE, la domanda scende del 45% entro il 2030 e del 90% entro il 2050.

- CO2: Anche per quello che riguarda i prezzi della CO2 vediamo una forte variabilità nei diversi scenari, come si evince dalla tabella sottostante:

Tabella 4: Andamento dei prezzi in diversi scenari

Scenario	Anno	Prezzo (EU)
STATED POLICIES	2030	90\$/ton
	2050	113\$/ton
ANNOUNCED PLEDGES	2030	135\$/ton
	2050	200\$/ton
NET ZERO 2050	2030	140\$/ton
	2050	250\$/ton

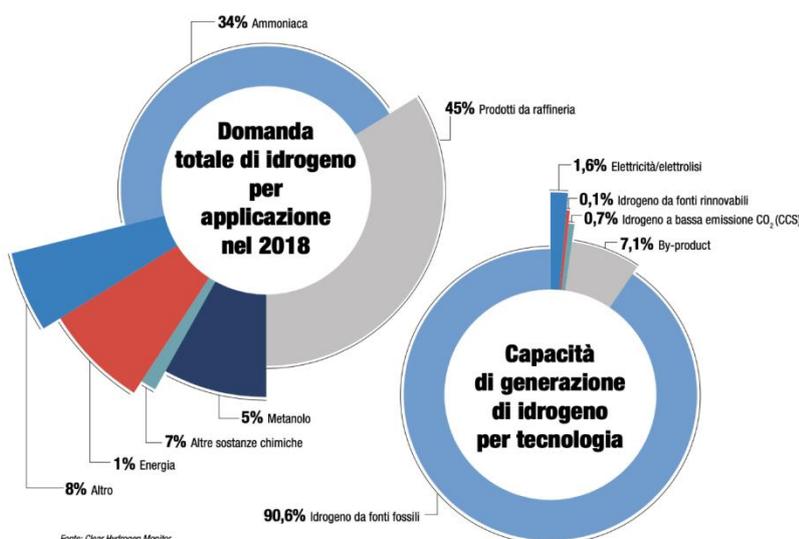
International Energy Agency, World Energy Outlook 2022

Ad oggi esistono 68 strumenti diretti per la tariffazione della CO2, che coprono più di 40 paesi. Le entrate globali derivanti dalla tariffazione della CO2 nel 2021 sono aumentate di quasi il 60% rispetto ai livelli del 2020, raggiungendo circa 84 miliardi di dollari. Gli schemi di tariffazione della CO2 esistenti e previsti si riflettono nello scenario STEPS, coprendo la generazione di energia elettrica, l'industria, i settori di produzione di energia e i settori di uso finale, ad es. aviazione, trasporti stradali ed edifici, ove applicabile. Nello scenario APS, vengono introdotti prezzi più alti della CO2 in tutte le regioni con impegni a zero emissioni nette. Non si prevede alcuna tariffazione esplicita nell'Africa sub-sahariana (escluso il Sud Africa), nella regione del Caspio e in altre regioni dell'Asia. Queste regioni si affideranno invece a interventi politici diretti per favorire la decarbonizzazione in questo scenario. Nello scenario NZE, i prezzi della CO2 coprono tutte le regioni e aumentano rapidamente in tutte le economie avanzate, nonché nelle economie emergenti con impegni di emissioni nette pari a zero, tra cui Cina, India, Indonesia, Brasile e Sud Africa. I prezzi della CO2 sono più bassi, ma sono comunque in aumento in altre economie emergenti come il Nord Africa, il Medio Oriente, la Russia

e il Sud-Est asiatico. I prezzi della CO2 sono più bassi in tutti gli altri mercati emergenti e nelle economie in via di sviluppo, poiché si presume che perseguano politiche più dirette per adattare e trasformare i loro sistemi energetici.

- Idrogeno: Per quello che riguarda l'idrogeno, un altro report dell'Agenzia, il Global Hydrogen Review 2023, nota come la produzione di idrogeno a basse emissioni possa crescere in modo massiccio entro il 2030, ma le sfide legate ai costi rischiano di ostacolare l'implementazione. Le iniziative di cooperazione internazionale possono aiutare ad aggregare la domanda di idrogeno a basse emissioni, ma i segnali di domanda provenienti da queste iniziative non sono chiari. Queste iniziative mirano prevalentemente a nuove applicazioni dell'idrogeno e non esiste una coalizione dedicata mirata al settore chimico e di raffinazione, che sono in una posizione migliore per adottare l'idrogeno a basse emissioni su larga scala nel breve termine. In Europa, l'uso dell'idrogeno ha subito un duro colpo a causa della riduzione dell'attività – in particolare nell'industria chimica – come conseguenza del forte aumento dei prezzi del gas naturale derivante dalla crisi energetica innescata dall'invasione russa dell'Ucraina. Diversi impianti di fertilizzanti hanno ridotto la produzione o addirittura interrotto le operazioni per periodi prolungati dell'anno, riducendo l'uso di idrogeno di quasi il 6% nella regione. Il grafico sottostante – Figura 21- inoltre, presenta in maniera chiara la necessità di aumentare la capacità di generazione di idrogeno “verde” (non da fonti fossili) per far sì che questa tecnologia rappresenti un'arma in più per la lotta al cambiamento climatico, essendo ad oggi proveniente da fonti fossili più del 90% dell'idrogeno utilizzato nei processi industriali.

Figura 21: Domanda e capacità di generazione di idrogeno verde



Ringraziamenti

I ringraziamenti sono rivolti a Ing. Giuseppe Riva (*Direttore Federchimica PlasticsEurope Italia*); Ing. Valeria Frittelloni (*ISPRA- Direttore Dipartimento per la valutazione, i controlli e la sostenibilità ambientale*); Dott. Fabio Pascarella (*ISPRA*); Ing. Giuseppe Rossi (*Ex dirigente Montedison, Basell Poliolefine Italia, Lyondell Basell*); Ing. Gabriele Mei (*Presidente Basell Poliolefine Italia, Vice-presidente Process and Catalysts, LyondellBasell*); Ing. Dario Liguori (*Manager New Polyolefins, MoReTec and PE Catalysts, LyondellBasell*); Ing. Alessandro Mignona (*LyondellBasell*); Prof. Roberto Zoboli (*Facoltà di Scienze Politiche e Sociali, Università Cattolica*); Enrica Barnabesi (*ENEL - Responsabile Collegamento Relazioni Istituzionali*); Guido Bonfredi (*ENEL- Responsabile Environmental Engineering & Market Development*); Troni Michele (*ENEL- Responsabile Remediation*); Dr. Paolo Schiavina (*IFM SCPA, Ferrara*); Prof. Giovanni Marin (*Dipartimento di Economia, Società e Politica, Università di Urbino Carlo Bo*); Prof. Nicolò Barbieri (*Dipartimento Economia e Management, Università di Ferrara*); Dott. Sergio Foschi (*Centro Documentazione Studi – CDS*), Dott.ssa Cinzia Bracci (*Centro Documentazione Studi – CDS*), Dott. Giuseppe Ferrara (*Centro Documentazione Studi – CDS*); Prof.ssa Monica Bertoldo (*UniFE*), Prof. Alessandro Massi (*UniFE*), Prof. Pier Paolo Giovannini (*UniFE*), Prof. Stefano Caramori (*UniFE*), Prof. Mirco Natali (*UniFE*), Prof.ssa Serena Berardi (*UniFE*), Dott. Riccardo Colantuono (*UniFE*).

Riferimenti bibliografici

- Aghion, P., K. Ahuja, C. P. Bown, U. Cantner, C. Criscuolo, A. Dechezleprêtre, M. Dewatripont, R. Hausmann, G. Lalanne, B. McWilliams, D. Rodrik, S. Tagliapietra, A. Terzi, C. Trasi, L. Tyson, R. Veugelers, G. Zachmann and J. Zysman (2023). Sparking Europe's new industrial revolution: a policy for net zero, growth and resilience. *Bruegel*.
- Almora, O., Baran, D., Bazan, G. C., Cabrera, C. I., Erten-Ela, S., Forberich, K., ... & Brabec, C. J. (2023). Device performance of emerging photovoltaic materials (Version 3). *Advanced energy materials*, 13(1), 2203313.
- Almora Rodríguez, O., Baran, D., Bazan, G., Berger, C., & Cabrera, C. I. (2021). Device Performance of Emerging Photovoltaic Materials (Version 2).
- Almora, O., Baran, D., Bazan, G. C., Berger, C., Cabrera, C. I., Catchpole, K. R., ... Brabec, C. J. (2020). Device performance of emerging photovoltaic materials (version 1). *Advanced Energy Materials*, 11(11). doi:10.1002/aenm.202002774
- Ambec, S., Cohen, M. A., Elgie, S., & Lanoie, P. (2013). The Porter hypothesis at 20: can environmental regulation enhance innovation and competitiveness?. *Review of environmental economics and policy*.
- Antonioli, D., Ghisetti, C., Mazzanti, M., & Nicolli, F. (2022). Sustainable production: The economic returns of circular economy practices. *Business Strategy and the Environment*, 31(5), 2603-2617.
- Antonioli, D., Ghisetti, C., Pareglio, S., Quatrosi, M. (2022). Innovation, Circular economy practices and organisational settings: empirical evidence from Italy. Nota di Lavoro 07.2022, Milano, Italy: *Fondazione Eni Enrico Mattei*.
- Antonioli, D., Mancinelli, S., & Mazzanti, M. (2013). Is environmental innovation embedded within high-performance organisational changes? The role of human resource management and complementarity in green business strategies. *Research Policy*, 42(4), 975-988.
- Barbieri, N., Ghisetti, C., Gilli, M., Marin, G., & Nicolli, F. (2017). A survey of the literature on environmental innovation based on main path analysis. *Environmental Economics and Sustainability*, 221-250.
- Barbieri, N., Marzucchi, A., Rizzo, U. (2023). Green technologies, interdependencies, and policy. *Journal of Environmental Economics and Management*, 118, 102791.
- Bashir, T., Ismail, S. A., Song, Y., Irfan, R. M., Yang, S., Zhou, S., ... & Gao, L. (2021). A review of the energy storage aspects of chemical elements for lithium-ion based batteries. *Energy Mater*, 1, 100019.
- Bertelli C., Gandini A., Tacchi Venturi C. (2005). *Il nuovo Master: lavorare apprendendo*. Franco Angeli editori.
- Bertoni, R.; Foschi, S.; Guerra, D.; Zannoni, B. (2006) *Ferrara e il suo Petrolchimico, volume primo*. CDS Edizioni.
- Bracci, C., Foschi, S., Suar, M., Zannoni, B. (2020). *Ferrara e il suo Petrolchimico, volume secondo*. CDS Edizioni.

- Brunnermeier, S.B. and Cohen, M.A. (2003). Determinants of Environmental Innovation in US Manufacturing Industries. *Journal of Environmental Economics and Management*, 45, 278–293.
- Cainelli, G., D’Amato, A., & Mazzanti, M. (2020). Resource efficient eco-innovations for a circular economy: Evidence from EU firms. *Research Policy*, 49(1), 103827.
- Cainelli, G., Mazzanti, M., & Montresor, S. (2012). Environmental innovations, local networks and internationalization. *Industry and Innovation*, 19(8), 697-734.
- CDS. (2022). *Il riciclo integrale della plastica*. <https://www.cdscultura.com/2022/08/11-petrolchimico-di-ferrara-puo-trovare-nel-riciclo-integrale-della-plastica-il-suo-futuro/>
- Cecere, G., & Mazzanti, M. (2017). Green jobs and eco-innovations in European SMEs. *Resource and Energy Economics*, 49, 86-98.
- Charlot, S., Crescenzi, R., & Musolesi, A. (2014). *Augmented and Unconstrained: revisiting the Regional Knowledge Production Function* (No. 2414). SEEDS, Sustainability Environmental Economics and Dynamics Studies.
- Commissione Europea (2019). The European Green Deal, COM(2019) 640 final, 11 Dicembre.
- Consoli, D., Marin, G., Marzucchi, A., & Vona, F. (2016). Do green jobs differ from non-green jobs in terms of skills and human capital?. *Research Policy*, 45(5), 1046-1060.
- Costantini, V., & Mazzanti, M. (2012). On the green and innovative side of trade competitiveness? The impact of environmental policies and innovation on EU exports. *Research policy*, 41(1), 132-153.
- Costantini, V., Mazzanti, M., & Montini, A. (2013). Environmental performance, innovation and spillovers. Evidence from a regional NAMEA. *Ecological Economics*, 89, 101-114.
- Costantini, V., Marin, G., Napierala, J., Paglialunga, E. (2023). Domanda di competenze e transizione ecologica, in “L’impresa delle competenze, i nuovi saperi e il lavoro”, *Rivista di Politica Economica*.
- Coutard, N., Kaeffer, N., & Artero, V. (2016). Molecular engineered nanomaterials for catalytic hydrogen evolution and oxidation. *Chemical Communications*, 52(95), 13728-13748.
- D’Amato A.; Nicolli, F.; Paleari, S.; Schlupe M.; Specker, A.; Tuscano J.; Piscitello, C.; Wilts. H. The fate of EU plastic waste.
- Deng, D. (2015). Li-ion batteries: basics, progress, and challenges. *Energy Science & Engineering*, 3(5), 385-418.
- Directive (EU) 2018/ 852 of The European Parliament and of The Council of 30 May 2018 amending Directive 94/62/EC on packaging and packaging waste
- Directive (EU) 2018/850 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 amending Directive 1999/31/EC on the landfill of waste
- Directive (EU) 2018/851 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 amending Directive 2008/98/EC on waste
- EEA (2019). The sustainability transition in Europe in an age of demographic and technological change- An exploration of implications for fiscal and financial strategies.

ENI. Vademecum Tecnologie di Bonifica.

https://www.eni.com/syndial-assets/documents/2_attivita/2.1_bonifica-sostenibile/2.1.2_tecniche-di-risanamento-dei-suoli/ITA_VADEMECUM_eni_Rewind.pdf

European Environmental Agency. (2023). European Topic Centre – Circular Economy and Resource Use (ETC CE Report 2023/2).

Eurostat. BERD by NACE Rev. 2 activity RD_E_BERDINDR2. [Access 29/07/2023. Available at [https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/RD_E_BERDINDR2\\$DEFAULTVIEW/default/table](https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/RD_E_BERDINDR2$DEFAULTVIEW/default/table)]

Eurostat. Employment in the environmental goods and services sector. ENV_AC_EGSS! [Access 29/07/2023. Available at [https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/ENV_AC_EGSS1\\$DEFAULTVIEW/default/bar?lang=en](https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/ENV_AC_EGSS1$DEFAULTVIEW/default/bar?lang=en)]

Eurostat. Generation of plastic packaging waste per capita. CEI_PC050. [Access 29/07/2023. Available at https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/CEI_PC050/default/table]

Eurostat. Greenhouse gas emissions by source sector (source: EEA). ENV_AIR_GGE [Last access 29/07/2023. Available at https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/product/page/ENV_AIR_GGE]

Federchimica. (2021). Il volto della chimica in Italia. https://www.federchimica.it/docs/default-source/la-chimica-in-cifre/3_il-volto-della-chimica-in-italia.pdf?sfvrsn=c0e57493_31

Federchimica. (2023). Situazione e prospettive per l'industria chimica. https://www.federchimica.it/docs/default-source/scenari-e-tendenze/prospettive-chimica_ago2020.pdf?sfvrsn=9d2d4793_18

Francàs, L., Selim, S., Corby, S., Lee, D., Mesa, C. A., Pastor, E., ... & Durrant, J. R. (2021). Water oxidation kinetics of nanoporous BiVO₄ photoanodes functionalised with nickel/iron oxyhydroxide electrocatalysts. *Chemical Science*, 12(21), 7442-7452.

Frohwein, T., & Hansjürgens, B. (2005). Chemicals regulation and the porter hypothesis-a critical review of the new European chemical regulation. *Journal of Business Chemistry*, 2(1).

Gandini A., Foschi S., Zannoni B.,(2022). *Per Pino, oltre l'orizzonte*. CDS Cultura Edizioni.

Gandini, A.; Foschi, P.; Flammini, R. (1990). *Apprendere Lavorando*. Edizioni Diabasis.

Gibson, E. A. (2017). Dye-sensitized photocathodes for H₂ evolution. *Chemical Society Reviews*, 46(20), 6194-6209.

Green, M. A., Dunlop, E. D., Hohl-Ebinger, J., Yoshita, M., Kopidakis, N., Bothe, K., ... Hao, X. (2022). Solar Cell Efficiency Tables (version 60). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 30(7), 687–701. doi:10.1002/pip.3595

International Energy Agency, World Energy Outlook 2022. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>

Jaffe, A. B., & Palmer, K. (1997). Environmental regulation and innovation: a panel data study. *Review of economics and statistics*, 79(4), 610-619.

- Jaffe, B., A.; Newell, G., R., Stavins, N., R. (2001). Technological Change and Environment. Discussion paper 00-47 REV, Resources for the Future, Washington, D.C.
- Johnstone, N.; I. Hascic, and Popp, D. (2010). Renewable Energy Policies and Technological Innovation: Evidence Based on Patent Counts. *Environmental and Resource Economics*, 45, 133–155.
- Kemp, R. (2010). Eco-innovation: definition, measurement and open research issues. *Economia politica*, 27(3), 397-420.
- Kleimann, D., N. Poitiers, A. Sapir, S. Tagliapietra, N. Véron, R. Veugelers and J. Zettermeyer (2023). How Europe should answer the US Inflation Reduction Act. *Policy Contribution 04/2023, Bruegel*.
- Kuhl, K. P., Cave, E. R., Abram, D. N., & Jaramillo, T. F. (2012). New insights into the electrochemical reduction of carbon dioxide on metallic copper surfaces. *Energy & Environmental Science*, 5(5), 7050-7059.
- Jung, S., McCrory, C. C., Ferrer, I. M., Peters, J. C., & Jaramillo, T. F. (2016). Benchmarking nanoparticulate metal oxide electrocatalysts for the alkaline water oxidation reaction. *Journal of Materials Chemistry A*, 4(8), 3068-3076.
- Lai, Y. H., Park, H. S., Zhang, J. Z., Matthews, P. D., Wright, D. S., & Reisner, E. (2015). A Si photocathode protected and activated with a Ti and Ni composite film for solar hydrogen production. *Chemistry—A European Journal*, 21(10), 3919-3923.
- Lambertini, A. *Le fasi di bonifica di un sito attivo – Sintesi non tecnica*. Comune di Ferrara.
- Lambertini, A. & Arpa Emilia Romagna. (2012). *Gli accordi volontari al Polo chimico di Ferrara*. file:///C:/Users/fabio/Desktop/lambertini_es6_12.pdf
- Lanoie, P.; Laurent-Lucchetti, J.; Johnstone, N.; & Ambec, S. (2011). Environmental policy, innovation and performance: new insights on the Porter hypothesis. *Journal of Economics & Management Strategy*, 20(3), 803-842.
- Manthiram, A., Fu, Y., Chung, S. H., Zu, C., & Su, Y. S. (2014). Rechargeable lithium–sulfur batteries. *Chemical reviews*, 114(23), 11751-11787.
- Mazzanti, M., & Musolesi, A. (2020). *Modeling green knowledge production and environmental policies with semiparametric panel data regression models* (No. 1420). SEEDS, Sustainability Environmental Economics and Dynamics Studies.
- Mazzanti, M., Nicolli, F., Pareglio, S., Quatrosi, M. (2022). Adoption of Eco and Circular Economy-Innovation in Italy: exploring different firm profiles. Nota di Lavoro 06.2022, Milano, Italy: *Fondazione Eni Enrico Mattei*.
- Ministero della Transizione Ecologica (MITE). Strategia Nazionale per l’Economia Circolare. Giugno, 2022.
- Moioli, E., Mutschler, R., & Züttel, A. (2019). Renewable energy storage via CO₂ and H₂ conversion to methane and methanol: assessment for small scale applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 107, 497-506.

- Nioiretini, A., Mazzaro, R., Liscio, F., Kovtun, A., Pasquini, L., Caramori, S., & Berardi, S. (2022). Indium-modified copper nanocubes for syngas production by aqueous CO₂ electroreduction. *Dalton Transactions*, 51(28), 10787-10798.
- Pascaris, A. S., Schelly, C., & Pearce, J. M. (2020). A first investigation of agriculture sector perspectives on the opportunities and barriers for agrivoltaics. *Agronomy*, 10(12), 1885.
- Pathak, M., Slade, R., Shukla, P.R., Skea, J., Pichs-Madruga, R., Ürge-Vorsatz, D. (2022). Technical Summary. In: *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khouradajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA.
- Poloni, R., Lee, K., Berger, R. F., Smit, B., & Neaton, J. B. (2014). Understanding trends in CO₂ adsorption in metal–organic frameworks with open-metal sites. *The journal of physical chemistry letters*, 5(5), 861-865.
- Popp, D. (2006). International Innovation and Diffusion of Air Pollution Control Technologies: The Effects of NO_x and SO₂ Regulation in the US, Japan, and Germany. *Journal of Environmental Economics and Management*, 51(1), 46–71.
- Porter, M. (1991). Towards a dynamic theory of strategy. *Strategic Management Journal*, 12(8), 95-117
- Porter, M. and Van Der Linde, C. (1995). Towards a New Conception of Environment Competitiveness Relationship. *Journal of Economic Perspectives*, 9, 97–118.
- Putri, L. K., Ng, B. J., Ong, W. J., Chai, S. P., & Mohamed, A. R. (2022). Toward excellence in photocathode engineering for photoelectrochemical CO₂ reduction: *Design rationales and current progress. Advanced Energy Materials*, 12(41), 2201093.
- Regolamento (CE) n.1907/2006 del Parlamento europeo e del Consiglio del 18 dicembre 2006. [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32006R1907R\(01\)](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32006R1907R(01))
- Shockley, W., & Queisser, H. J. (1961). Detailed balance limit of efficiency of P-n junction solar cells. *Journal of Applied Physics*, 32(3), 510–519. doi:10.1063/1.1736034
- Smith, R. D., Prévot, M. S., Fagan, R. D., Zhang, Z., Sedach, P. A., Siu, M. K. J., ... & Berlinguette, C. P. (2013). Photochemical route for accessing amorphous metal oxide materials for water oxidation catalysis. *Science*, 340(6128), 60-63.
- Speck, S., & Zoboli, R. (2017). The green economy in Europe: In search for a successful transition. *Green Economy Reader: Lectures in Ecological Economics and Sustainability*, 141-160.
- Thevenon, A., Rosas-Hernández, A., Peters, J. C., & Agapie, T. (2019). In-situ nanostructuring and stabilization of polycrystalline copper by an organic salt additive promotes electrocatalytic CO₂ reduction to ethylene. *Angewandte Chemie*, 131(47), 17108-17114.
- The European House – Ambrosetti (2022). La circolarità della plastic: opportunità industriali, innovazione e ricadute economico-occupazionali per l'Italia.

- Uekert, T., Pichler, C. M., Schubert, T., & Reisner, E. (2021). Solar-driven reforming of solid waste for a sustainable future. *Nature Sustainability*, 4(5), 383-391.
- Van Leeuwen, G., & Mohnen, P. (2017). Revisiting the Porter hypothesis: an empirical analysis of green innovation for the Netherlands. *Economics of Innovation and New Technology*, 26(1-2), 63-77.
- Vona, F., Marin, G., Consoli, D., & Popp, D. (2018). Environmental Regulation and Green Skills: An Empirical Exploration. *Journal of the Association of Environmental and Resource Economists*, 4(5), 713-753.
- Zhu, L., Zhang, M., Xu, J., Li, C., Yan, J., Zhou, G., ... & Liu, F. (2022). Single-junction organic solar cells with over 19% efficiency enabled by a refined double-fibril network morphology. *Nature Materials*, 21(6), 656-663.
- Zoboli, R.; Mazzanti, M.; Paleari, S.; Bonacorsi, L.; Chioatto, E.; D'Amato, A.; Ghisetti, C.; Maggioni, M. A.; Zecca, E.; Pareglio, S. (2020). *Energy and the Circular Economy: Filling the Gap through New Business Models within the EGD*. FEEM Report No. 13 – 2020.