

LUISS



Dipartimento di Impresa
e Management

Cattedra di Microeconomia

Innovazione e opportunità imprenditoriali nel sistema dell'economia circolare: il riciclo dei rifiuti in plastica

Prof. Lorenzo Carbonari

RELATORE

Claudio Mario D'Alessandro

Matr. 280051

CANDIDATO

Anno Accademico 2024/2025

A mia madre,
che con il suo esempio mi ha trasmesso i valori del *mos maiorum*.

A mio padre,
che mi ha insegnato il significato profondo del lavoro e del sacrificio.

INDICE

Introduzione.....	5
1 - Il modello dell'economia circolare: definizioni e finalità.....	7
1.1 Dall'economia lineare all'economia circolare.....	7
1.2 Modalità attuative del modello circolare.....	8
1.3 I benefici attesi del modello circolare.....	11
1.4 Problematiche nell'adozione del modello circolare.....	13
2 - Il riutilizzo dei rifiuti in plastica come risorse per l'industria chimica: dinamiche del mercato globale e prospettive di medio-lungo termine.....	15
2.1. La plastica: definizione e impatto sul mercato globale ed europeo.....	15
2.1.1 Il riciclo meccanico.....	17
2.1.2 Il riciclo chimico.....	19
2.2 Prospettive economiche del riciclo: scenari futuri per la transizione verso un'economia circolare.....	20
2.3 La value chain del riciclo: ottimizzazione della circolarità.....	22
2.4 Soluzioni tecnologiche per la conversione dei rifiuti in plastica in risorse per i processi industriali	26
2.4.1 Fattori economici critici e misure abilitanti per l'efficacia del riciclo.....	26
2.4.2 Processi innovativi per il recupero: dal riciclo meccanico al riciclo chimico, le opportunità del settore alimentare.....	28
3 - I processi decisionali per l'industria del riciclo: metodi di analisi tecnico-economica...32	32
3.1 Introduzione ai processi decisionali nell'industria del riciclo.....	32
3.1.1 Il metodo Life Cycle Assessment (LCA).....	32
3.1.2 Il metodo Techno-Economic Analysis (TEA).....	33
3.2 Technology readiness levels (TRLs).....	35
3.3 Indicatori economici per il riciclo chimico nel modello TEA.....	38
3.3.1 Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA).....	38
3.3.2 Relative Gross Profit.....	39
3.3.3 Relative Profit.....	39
3.3.4 Static Profit.....	40
3.3.5 Net Present Value (NPV).....	41
3.3.6 Dynamic Payback Period.....	42

3.3.7 Levelized Cost of Carbon Abatement (LCCA).....	43
3.4 I dati tecnici ed economici per la valutazione di tecnologie di riciclo chimico.....	43
3.4.1 Dati tecnici e organizzativi di processo.....	46
3.4.2 Dati economici o di mercato.....	50
 4 - Il riciclo chimico delle plastiche miste come alternativa al riciclo meccanico. Casi di studio	53
4.1 Introduzione ai casi di studio.....	53
4.2 Caso studio 1: impianto di pirolisi liquida alimentato da plastiche miste (USA, 2023).....	53
4.2.1 Contesto e composizione del feedstock.....	53
4.2.2 Descrizione del processo: dissoluzione, reattore di pirolisi e condensazione.....	54
4.2.3 Analisi tecnico-economica (TEA).....	55
4.2.4 Analisi di sensitività.....	57
4.3 Caso studio 2: il processo PlastPyro con metallo fuso (Belgio, 2021).....	58
4.3.1 Tecnologia impiegata e configurazione dell'impianto.....	58
4.3.2 Analisi economica dell'impianto.....	59
4.3.3 Analisi di sensitività.....	60
4.4 Confronto tra i due impianti: implicazioni strategiche.....	61
 Conclusioni	62
 Bibliografia	64
Sitografia	65

INTRODUZIONE

La crescente attenzione verso la sostenibilità ambientale ha portato a un ripensamento dei modelli di produzione e consumo, favorendo l'emergere del paradigma dell'economia circolare, che si concentra sul recupero delle risorse al termine del ciclo di vita dei prodotti, gestite come rifiuti ai sensi delle norme ambientali vigenti¹, e punta alla conservazione degli equilibri naturali.

Un ambito di particolare interesse è quello della produzione dei manufatti in plastica, a causa dell'elevata incidenza ambientale del materiale utilizzato e della sua amplissima gamma applicativa. Nella pratica della gestione d'impresa in questo comparto industriale l'adozione dei principi dell'economia circolare implica soluzioni tecnologiche innovative, tali da permettere di superare i limiti del riciclo meccanico tradizionale, soprattutto in presenza di rifiuti post-consumo eterogenei e contaminati.

Tra le tecnologie emergenti risultano assai rilevanti quelle di riciclo chimico che, tramite processi come la pirolisi o la gassificazione, prevedono il trattamento delle plastiche miste in modo da riconvertire i rifiuti in materie prime secondarie di qualità.

Il presente studio si propone di analizzare, in un'ottica imprenditoriale e microeconomica, le condizioni che determinano la sostenibilità economica di investimenti in impianti di riciclo chimico di tipo tecnologicamente avanzato.

Il primo capitolo mira a fornire una ricostruzione teorica dell'economia circolare, così da poterne definire i principi fondamentali.

Successivamente, il secondo capitolo analizza le dinamiche del mercato dei prodotti e dei rifiuti in plastica, evidenziandone i dati più significativi, attuali e di prospettiva, e presentando sia le tecnologie di riciclo attuali, sia quelle emergenti.

Nel terzo capitolo si approfondiscono i metodi di valutazione per progetti d'investimento per la realizzazione di sistemi industriali di riciclo chimico; in particolare, il metodo LCA (*Life-Cycle Assessment*) per la valutazione ambientale e il metodo TEA (*Techno-Economic Analysis*) per la valutazione tecnico-economica, con specifico riferimento ai principali indicatori di redditività e ai fattori che consentono di valutare la profittabilità degli investimenti.

Il quarto e ultimo capitolo dell'elaborato verte sull'analisi di due casi studio tratti dalla recente letteratura scientifica, in cui si esaminano le condizioni di fattibilità economica dell'esercizio di impianti di riciclo pirolitici. Il primo caso analizza un processo di pirolisi liquida sviluppato negli Stati Uniti, mentre il secondo riguarda un impianto realizzato in Belgio che adotta una tecnica innovativa di trasmissione termica. L'obiettivo è quello di mostrare come possano

¹ In Italia la norma di riferimento è costituita dal D. Lgs. 152/2006 e ss.mm.ii.

trovare applicazione concreta i metodi di valutazione descritti precedentemente, mettendo in luce le variabili critiche che incidono sulla fattibilità economica degli impianti, anche facendo ricorso ad analisi di sensitività degli indicatori economici di riferimento.

L'intento finale è quello di fornire un quadro ragionato delle opportunità e delle criticità connesse allo sviluppo di iniziative imprenditoriali nel settore del riciclo chimico, evidenziando il ruolo centrale dell'analisi economica come strumento di supporto alle decisioni nel contesto della transizione verso modelli produttivi più sostenibili.

1 - Il modello dell'economia circolare: definizioni e finalità

1.1 Dall'economia lineare all'economia circolare

Negli ultimi anni, il concetto di sostenibilità, intesa come l'idea di un progresso equilibrato delle condizioni di vita che garantisca il benessere delle generazioni presenti e future nel rispetto dell'ecosistema, ha assunto un ruolo sempre più rilevante in ambito ambientale, sociale ed economico. Tuttavia, il modello tecnico-organizzativo prevalentemente applicato nei processi di produzione e consumo resta quello tradizionale dell'economia lineare, che si basa sul paradigma estrazione-produzione-consumo-smaltimento.

Caratteristica principale del modello dell'economia lineare è che gli input utilizzati nei processi produttivi non sono pensati per essere recuperati alla fine del ciclo di vita del prodotto/servizio. Il modello lineare rappresenta l'approccio prevalente sin dalla prima rivoluzione industriale del 1700 e ha permesso alle imprese di passare da una produzione su piccola scala a una produzione su larga scala, transizione che ha provocato un drastico cambiamento degli equilibri socio-ecologici, contribuendo all'inquinamento dell'ambiente e allo sfruttamento eccessivo e incauto delle risorse naturali. Secondo la Ellen MacArthur Foundation², l'estrazione di materie prime vergini, è passata, a livello globale, da 40 miliardi di tonnellate nel 1980 a 82 miliardi di tonnellate nel 2020. Questo fenomeno si scontra con la crescente attenzione alle condizioni ambientali e ha portato alla ricerca di un'alternativa che potesse armonizzare le esigenze economiche delle imprese e le esigenze ambientali e di benessere in una visione prospettica lungimirante.

In questo contesto emerge il concetto di economia circolare, definita dal Parlamento Europeo come *“un modello di produzione e consumo che prevede la condivisione, il riutilizzo, la riparazione, la rimessa a nuovo e il riciclaggio di materiali e prodotti esistenti il più a lungo possibile. In questo modo si estende il ciclo di vita dei prodotti.”*³ L'obiettivo dell'economia circolare è dunque quello di ridurre gli sprechi al minimo, mantenendo i materiali contenuti nei prodotti, al termine del relativo periodo funzionale, all'interno del sistema economico e moltiplicandone i cicli di utilizzo e le correlate catene del valore.

² MCKINSEY & COMPANY. *Towards the Circular Economy: Economic and Business Rationale for an Accelerated Transition*. Ellen MacArthur Foundation, 2013.

³ Parlamento europeo. *Economia circolare: definizione, importanza e vantaggi*. <https://www.europarl.europa.eu/topics/it/article/20151201STO05603/economia-circolare-definizione-importanza-e-vantaggi>

1.2 Modalità attuative del modello circolare

Definita l'economia circolare, è necessario approfondire in che modo è possibile raggiungere gli obiettivi di rigenerazione delle risorse naturali, salvaguardia della biodiversità e riduzione dell'inquinamento a livello globale. Tali obiettivi devono essere perseguiti tenendo conto anche dell'aspetto economico, in modo che l'applicazione del modello circolare non sia economicamente sfavorevole per le imprese.

In tal senso, la Ellen MacArthur Foundation ha individuato i tre principi fondamentali su cui si basa l'economia circolare:

- a) eliminare gli sprechi e l'inquinamento;
- b) massimizzare la rotazione di prodotti e materiali;
- c) rigenerare le risorse naturali.

Il significato dei tre principi può essere illustrato come segue.

Eliminare gli sprechi e l'inquinamento: attualmente l'economia si fonda sul paradigma lineare estrazione-produzione-consumo-smaltimento, che consiste nello sfruttamento di fonti energetiche e nell'estrazione di materie prime presenti nel pianeta per la produzione di beni e servizi, il relativo consumo e il successivo smaltimento come rifiuti in discariche o inceneritori. Questo schema è caratterizzato dalla pressoché totale assenza di fasi di recupero di materiali o energia dai prodotti alla fine del loro ciclo di vita (fa eccezione il caso dell'incenerimento con termovalorizzazione dei rifiuti), e in una prospettiva di lungo termine è gravemente controproducente poiché le risorse naturali sono in gran parte finite e non rinnovabili; il primo principio dell'economia circolare è quindi proprio quello di eliminare la dissipazione di risorse e l'inquinamento correlati a questo processo.

A questo proposito, la Ellen MacArthur Foundation ha individuato come causa principale degli sprechi l'errato design dei prodotti: *“I rifiuti sono in realtà il risultato di scelte progettuali. Non ci sono rifiuti in natura, è un concetto che abbiamo introdotto.”*

In questo contesto, l'economia circolare si propone di reinserire prodotti e materiali nell'economia al termine del proprio utilizzo, partendo proprio da appropriate scelte di design.

L'applicazione principale di questo principio riguarda il campo del *packaging*, in particolare per quanto riguarda gli alimenti, che nella maggior parte dei casi sono imballati singolarmente in plastica, che si trasforma inevitabilmente in uno scarto non recuperabile.

Quindi tramite l'applicazione di questo principio, attuando scelte di design sostenibile, è possibile creare un ciclo chiuso per i materiali, in modo da ridurre al minimo la produzione di rifiuti e l'inquinamento.

Massimizzare la rotazione di prodotti e materiali: il modello dell'economia circolare, come emerge dalla definizione riportata in precedenza, si concentra sul mantenere i materiali e i prodotti al termine del loro ciclo di vita all'interno dell'economia. Questo concetto trova un riscontro nel secondo principio fondamentale del modello circolare, quello di far ricircolare nella maggior misura possibile prodotti e materiali: in altri termini, aumentare la “rotazione” di materiali e prodotti all'interno delle dinamiche produttive e di mercato attraverso il riuso e il riciclo negli stessi processi originari o in processi differenti.

Al fine di applicare correttamente questo principio, è necessario analizzare i diversi tipi di materiali, che, sempre secondo l'anzidetta fonte, si dividono in due categorie.

La prima categoria è quella dei materiali tecnici, ovvero quei materiali che non vengono consumati durante l'uso. I materiali che rientrano in questa categoria sono quelli ottenuti con processi di estrazione o lavorazione, per esempio i metalli e la plastica.

La seconda categoria è quella dei materiali biologici, ovvero quei materiali che vengono ottenuti direttamente da cicli naturali. I materiali che rientrano in questa categoria sono tutti quei materiali di origine organica, che possono essere riassorbiti all'interno della biosfera.

La distinzione tra queste due categorie è rilevante poiché materiali diversi divengono oggetto di operazioni differenti per il reinserimento all'interno dell'economia. Questa circostanza è ben rappresentata nel diagramma a farfalla della figura seguente (figura 1), in cui si mostrano i due cicli simmetrici ramificati che permettono di dare valore sia ai materiali biologici, sia ai materiali tecnici.

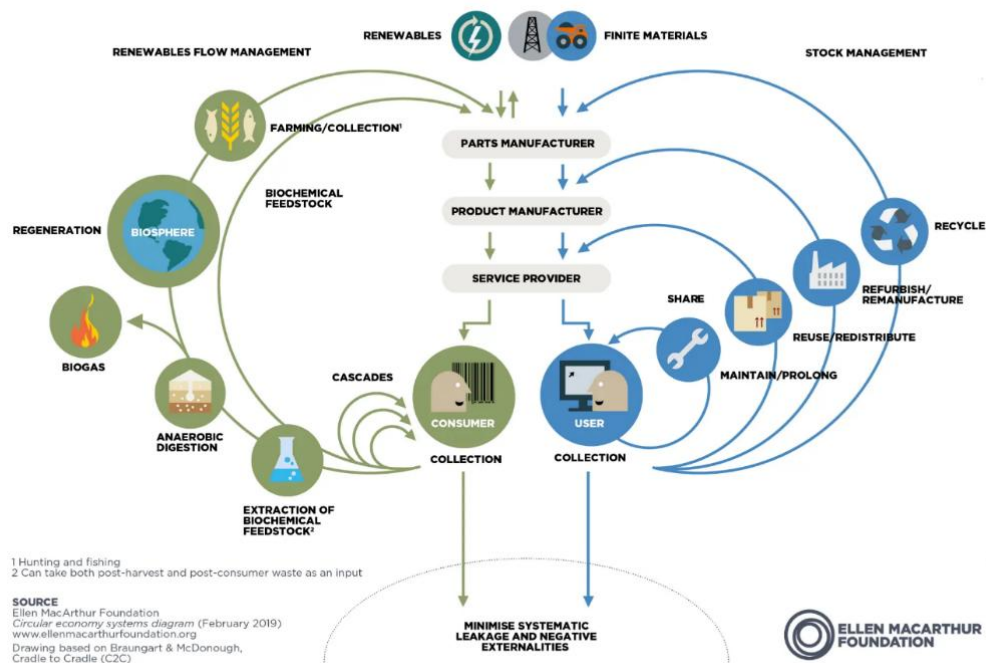


Figura 1: Diagramma a farfalla della circolarità. Ellen MacArthur Foundation (2019)

A sinistra nell'immagine è rappresentato il ciclo biologico, che ha l'obiettivo di reintegrare i materiali nella biosfera, in modo da ottenere una rigenerazione naturale. Il processo di riassorbimento dei materiali biologici segue diverse fasi:

- *Extraction of biochemical feedstock*: fase che individua il trattamento biochimico dei rifiuti organici, in modo da creare prodotti nutraceutici e biochimici di valore;
- *Anaerobic digestion, biogas*: i materiali organici possono essere lavorati tramite compostaggio per ottenere fertilizzanti naturali, oppure tramite processi di digestione anaerobica è possibile ottenere biogas, che rappresenta una fonte di energia naturale e sostenibile;
- *Farming/Collection*: trattasi di pratiche di allevamento e caccia sostenibili, come le tecniche di agricoltura rigenerativa o acquacultura riparativa;
- *Cascades*: attività che utilizzano direttamente gli scarti biologici per dare vita a nuovi prodotti, come la produzione di mangimi o tessuti.

A destra dell'immagine è riportato il ciclo tecnico, che riguarda i materiali che non possono essere direttamente reintegrati. A differenza della rappresentazione del ciclo biologico, nel ciclo tecnico gli archi sono disposti in maniera concentrica. I cicli interni sono quelli in cui si riesce a catturare maggiore valore, poiché sono i più vicini al recupero del prodotto integro (caso emblematico è quello della riparazione che restituisce al prodotto la sua piena e originaria funzionalità).

Partendo dal ciclo più interno, per il ciclo tecnico si distinguono le seguenti fasi:

- *Share*: corrisponde alla condivisione di beni o servizi che non vengono sfruttati in maniera efficiente tramite un utilizzo individuale. Esempi rilevanti sono il *car sharing* per quanto riguarda i servizi o la condivisione di strumenti tramite piattaforme online;
- *Maintain/Prolong*: fa riferimento alle pratiche applicabili per allungare la vita di un prodotto, come la manutenzione, al fine di massimizzare la durata del bene nel tempo;
- *Reuse/Redistribute*: questa fase del ciclo tecnico consiste nel reimpiego; quindi, al caso in cui non si scarta un prodotto dopo un singolo utilizzo, ma lo si vende o cede a un'altra persona in modo che possa ancora trarne vantaggio. All'interno dello stesso ciclo è inclusa la redistribuzione, che consiste nella vendita di prodotti invenduti a un'altra categoria di consumatori;
- *Refurbish/Remanufacture/Recycle*: nell'ultimo arco del ciclo tecnico sono presenti le attività di ricondizionamento, rigenerazione e riciclaggio. Il ricondizionamento è un modo per ripristinare il valore di un prodotto, mantenendo lo stesso utilizzo, sostituendo

alcune componenti o migliorandone l'aspetto estetico. Si parla invece di rigenerazione quando il prodotto non può mantenere lo stesso utilizzo, ma è necessario il ripensamento totale dell'oggetto o di alcune sue componenti. L'ultimo stadio del ciclo tecnico è quello del riciclo, che si riferisce alla perdita del valore del prodotto in quanto tale e si concentra sul recupero dei materiali che lo compongono.

Il diagramma a farfalla rappresenta un quadro completo ed eloquente delle modalità di recupero del valore su cui si basa il modello circolare. È però fondamentale notare che tali cicli risultano funzionali soltanto se applicati a prodotti che si prestano a pratiche circolari, idonei all'inserimento in più di un ciclo di produzione o consumo.

Rigenerare le risorse naturali: il terzo e ultimo principio dell'economia circolare verte sulla rigenerazione delle risorse naturali. In effetti, l'estrazione di materiali e lo sfruttamento eccessivo delle risorse impediscono alla natura di riprodursi e determinano un consumo di risorse esauribili.

In definitiva, l'obiettivo dell'economia circolare è quello di emulare i processi naturali: *“Se passiamo a un modello rigenerativo, iniziamo a emulare i sistemi naturali. Non ci sono rifiuti in natura. Quando una foglia cade da un albero, nutre la foresta. Per miliardi di anni, i sistemi naturali si sono rigenerati. I rifiuti sono un'invenzione umana.”*⁴

Questo principio è perseguibile tramite l'applicazione di pratiche circolari: se i materiali restano all'interno del ciclo economico non è necessario estrarne altri e si concede alla natura il tempo di rigenerarsi. La riduzione delle estrazioni di materiali ha ovviamente anche un effetto sulle emissioni, al punto da stimare che, adottando i principi dell'economia circolare, l'industria alimentare potrebbe dimezzare le emissioni di gas serra previste per il 2050.

1.3 I benefici attesi del modello circolare

L'economia circolare si configura come uno strumento per affrontare le criticità e ottenere benefici, non solo dal punto di vista ambientale ma anche, e per certi versi inaspettatamente, sotto l'aspetto micro e macroeconomico. In sintesi, i principali benefici raggiungibili tramite l'applicazione del modello circolare si possono così sintetizzare.

Benefici ambientali: come già evidenziato, l'adozione del modello circolare, grazie al riutilizzo e al riciclo delle materie e dei prodotti a fine vita, consentirebbe di limitare l'impiego di

⁴ Ellen MacArthur Foundation. *Regenerate nature*. <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/regenerate-nature>

risorse naturali e ridurre in maniera significativa l'inquinamento atmosferico, contrastando il cambiamento climatico in atto. Questo consentirebbe di salvaguardare la biodiversità e limitare fenomeni involutivi come la desertificazione e la carenza di risorse idriche. Infatti, secondo il rapporto della CDP (Cassa Depositi e Prestiti) sull'economia circolare (2024), il 90% della perdita della biodiversità e della scarsità idrica mondiale è riconducibile all'estrazione e la trasformazione di materiali, combustibili e alimenti, che contribuiscono per circa la metà delle emissioni totali di gas serra.

Benefici economici: il riciclo delle materie prime consente di superare tutte le barriere e i correlati limiti tipici del modello lineare. In particolare, l'economia circolare consente di attenuare i rischi relativi alla volatilità dei prezzi delle materie prime ed energetiche, che sono influenzati da eventi imprevedibili. Esempi di cause della volatilità dei prezzi sono rappresentati dalla pandemia del Covid-19 e dal conflitto russo-ucraino degli ultimi anni. In più, il modello circolare permette alle imprese di aumentare la propria resilienza negli approvvigionamenti di materie prime vergini, in quanto le tensioni geopolitiche che caratterizzano il mercato globale espongono i sistemi produttivi dipendenti dall'estero a rischi di crisi nel soddisfacimento dei propri fabbisogni. Con l'adozione del modello circolare si riducono le importazioni da paesi terzi di energia e materie prime dal momento che scarti e rifiuti possono essere riutilizzati come input per la creazione di nuovo valore per l'impresa.

Benefici commerciali e d'immagine: l'adozione del modello circolare rappresenta anche un vantaggio strategico per le imprese, dal momento che è una dimostrazione di attenzione verso la sostenibilità. Questo provoca un miglioramento della reputazione aziendale, che consente all'impresa di ottenere un vantaggio competitivo tramite l'ampliamento del proprio mercato di riferimento, nuove opportunità di collaborazioni e partnership, differenziazione e credibilità aziendale.

A livello macroeconomico, vi è poi da sottolineare la riduzione dei costi per lo smaltimento dei rifiuti, infatti nel modello circolare la quantità di rifiuti destinati allo smaltimento si riduce drasticamente, con una conseguente riduzione dei relativi costi. Inoltre, la diffusione dell'economia circolare consente la creazione di nuove opportunità imprenditoriali nel mercato tecnologico; infatti, i processi di recupero e trasformazione delle risorse richiedono competenze e tecnologie non ancora largamente diffuse.

1.4 Problematiche nell'adozione del modello circolare

Nonostante i numerosi possibili vantaggi elencati nel paragrafo precedente, l'applicazione del modello circolare comporta anche sfide e barriere per le imprese. In merito, è interessante considerare lo studio svolto da Kirchherr et al. (2018), che analizza le barriere all'applicazione dell'economia circolare nel contesto europeo, nel quale si propone di distinguere le barriere in quattro categorie differenti: culturali, normative, di mercato e tecnologiche.

Per quanto riguarda le barriere di tipo culturale, esse riguardano sia la cultura dei consumatori, sia la cultura e i valori delle imprese. Più specificamente, le barriere culturali legate ai consumatori riguardano la consapevolezza del valore di un prodotto ottenuto tramite un processo sostenibile. La percezione di tale valore resta un'incognita per le imprese a causa della rapidità con la quale i consumatori cambiano le proprie idee e convinzioni. E in effetti, nonostante negli ultimi anni l'interesse per le tematiche di sostenibilità sia cresciuto, la volatilità delle opinioni dei consumatori costituisce una barriera significativa, in quanto può determinare uno svantaggio economico nel momento in cui l'attenzione per la sostenibilità e l'ambiente da parte delle imprese non trova riscontro sul lato della domanda, e cioè della disponibilità ad accettare i maggiori prezzi di mercato. Per superare questa difficoltà sarebbero necessarie campagne di sensibilizzazione rivolte ai consumatori, tramite investimenti nel marketing, al fine di diffondere i valori e i benefici del modello circolare.

D'altra parte, sono importanti anche le barriere culturali e organizzative interne alle imprese, giacché la predominanza del modello lineare ha causato la rigidità delle *supply chain* aziendali che potrebbero non essere compatibili con i principi e le condizioni operative del nuovo sistema circolare. Per superare questa barriera sarebbe necessario ripensare l'intera catena di approvvigionamento, andando però incontro ad un'ulteriore barriera, rappresentata dall'avversione delle imprese al rischio e al cambiamento. Tale avversione è causata principalmente dai costi e dalla complessità e dalla scarsa conoscenza dei metodi di valutazione dei rischi e della convenienza dell'eventuale transizione.

Per altro verso, le barriere normative non si configurano come limitazioni dirette all'applicazione del modello circolare, ma piuttosto emerge la mancanza di un quadro normativo uniforme e dettagliato. Nonostante l'attenzione da parte dell'Unione Europea verso le tematiche ambientali e di sostenibilità, gli ostacoli normativi più significativi non sono ancora stati rimossi.

In particolare, è possibile fare riferimento alla mancanza di supporti finanziari che indurrebbero le imprese a investire in pratiche circolari.

Un'ulteriore tipologia di barriere è rappresentata dalle barriere di mercato. Nel contesto di mercato rileva nuovamente il basso prezzo delle materie prime vergini; secondo Preston, F. (2012), *“il riciclo di molti materiali non avviene perché è antieconomico rispetto alla produzione di*

materie prime vergini”. Questo rende molto sfavorevole la competizione di prodotti ottenuti tramite procedimenti circolari rispetto a prodotti ottenuti sfruttando materie prime vergini.

Un'altra significativa barriera di mercato è rappresentata dagli alti costi di investimento iniziali necessari per attuare processi interni sostenibili, che possono essere affrontati da grandi imprese o grandi gruppi, ma rappresentano un impedimento non marginale per le piccole e medie imprese.

Infine, ci sono le barriere tecnologiche, dovute alla condizione che la base per una transizione efficace verso un modello circolare è proprio la tecnologia. Tali barriere si configurano sia come mancanze effettive di macchinari che come mancanze di conoscenze tecniche e gestionali adeguate. Le conoscenze e le capacità sono rilevanti sotto numerosi punti di vista, per esempio nel ripensamento della catena di approvvigionamento.

Un'altra area influenzata da queste barriere è quella del design di prodotto, come sostenuto da Pheifer, A.G. (2017), secondo il quale: *“alcuni aspetti del product design sono un ostacolo chiave per il successo dell'innovazione del modello di business dell'economia circolare”*.

2 - Il riutilizzo dei rifiuti in plastica come risorse per l'industria chimica: dinamiche del mercato globale e prospettive di medio-lungo termine

2.1 La plastica: definizione e impatto sul mercato globale ed europeo

Il primo capitolo di questo studio si è concentrato sulla presentazione del modello circolare come paradigma applicabile all'intero sistema economico. L'approccio generale utilizzato fino a questo momento ha una rilevanza teorica, al fine di comprendere i principi e gli elementi fondanti della gestione circolare delle risorse.

Lo studio del modello trova molteplici sviluppi con riferimento a campi applicativi e contesti produttivi specifici.

A partire da questo capitolo ci si concentrerà sul settore delle materie plastiche, che si presta perfettamente all'applicazione del modello circolare a causa del largo utilizzo di tali materiali in campo produttivo e del correlato impatto ambientale.

Il Parlamento Europeo offre una definizione di plastica nella direttiva (UE) 2019/904 del 5 giugno 2019: la plastica è *“il materiale costituito da un polimero cui possono essere stati aggiunti additivi o altre sostanze, e che può funzionare come componente strutturale principale dei prodotti finiti, a eccezione dei polimeri naturali che non sono stati modificati chimicamente”*. Quindi il concetto di plastica è strettamente collegato a quello di polimero, che è definito sempre dal Parlamento Europeo nel regolamento (CE) n. 1907/2006 come: *“una sostanza le cui molecole sono caratterizzate dalla sequenza di uno o più tipi di unità monomeriche”*. È importante sottolineare come il parlamento europeo esclude dalla definizione di plastica i polimeri naturali che non sono stati modificati chimicamente, ovvero che non hanno subito una trasformazione artificiale. Inoltre, in base al tipo di struttura si possono distinguere diversi tipi di polimeri; tra le categorie più diffuse in ambito manifatturiero si possono annoverare le seguenti: poliolefine (gruppo che comprende polipropilene, polistirolo e polietilene), polimeri vinilici, polieteri, poliammidi, poliuretani, poliesteri e policarbonati.

Queste tipologie di polimeri si distinguono per i legami che definiscono la loro struttura; a seconda che quest'ultima sia ordinata o meno, i diversi polimeri assumono diverse caratteristiche, in termini di colore, rigidità e resistenza chimica.

Grazie alla sua versatilità, alle sue caratteristiche fisiche e nelle sue molteplici forme, sin dalla sua introduzione nel 1861 grazie alla scoperta di Alexander Parks, la plastica ha trovato ampia applicazione in tutti i settori produttivi: dall'edilizia all'elettronica, dal packaging alla produzione di suppellettili, dall'industria automobilistica a quella dell'abbigliamento. La produzione di plastica sta seguendo un trend positivo, come testimoniato dal report di *Plastics Europe* (associazione europea dei produttori di materiali plastici), secondo cui la produzione di plastica a

livello globale è aumentata dai 370,5 milioni di tonnellate nel 2018 ai 400,3 milioni di tonnellate nel 2022⁵, evidenziando un aumento dell'8,05% della produzione globale, come riportato nella figura che segue (figura 2).

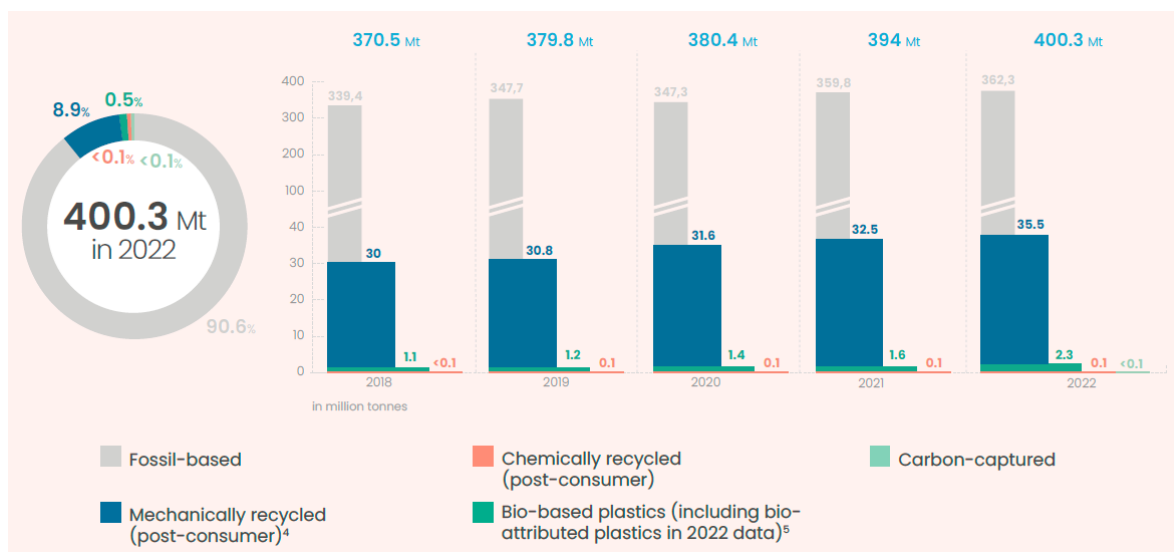


Figura 2: Global plastics production. Plastics Europe (2023)

Questa larghissima diffusione dei materiali plastici nel sistema produttivo pone corrispondentemente, in una logica circolare, il problema della loro reintroduzione nei cicli di fabbricazione e consumo al termine della vita utile dei manufatti, nel momento in cui gli stessi si trasformano in rifiuti. La figura 2 mostra come la produzione totale di plastica è suddivisa in base alla provenienza della stessa e che, in particolare, gran parte della produzione è composta da plastica di origine fossile, ed è quindi non sostenibile, nel senso che utilizza risorse naturali non rinnovabili e produce inquinamento per la loro trasformazione. Si registra tuttavia un aumento delle frazioni di plastica di origine sostenibile. Nello specifico, nel 2022 il 90,6% della produzione globale è composto da plastica di origine fossile, l'8,9% è composto da plastica riciclata meccanicamente e il restante 0,5% è composto da plastica riciclata chimicamente, plastica di origine biologica e plastica da *carbon-captured*. I risultati dello studio precedentemente menzionato, realizzato da *Plastics Europe*, evidenziano che nel 2022 si è raggiunto un tasso di ricircolo della plastica nella produzione di nuovi beni del 13,5% (pari a 7,3 milioni di tonnellate), con un incremento dell'utilizzo dei materiali post-consumo del 70% dal 2018. In parte prevalente i materiali plastici riciclati in nuovi prodotti derivano dal riciclo meccanico, mentre solo una piccola quota è ascrivibile al riciclo chimico, che tuttavia rappresenta uno dei processi più promettenti (+300% di produzione dal 2018 al 2022) per la possibilità di integrazione con l'industria chimica di base e per il quale sono pianificati investimenti dell'industria europea di circa

⁵ PLASTICS EUROPE. *Plastics – the fast Facts 2023*. Bruxelles: Plastics Europe AISBL, 2023.

8 miliardi di euro finalizzati alla produzione di circa 3 milioni di tonnellate di plastica riciclata all'anno al 2030. La *roadmap* dei produttori europei definita nel 2023 ha posto inoltre come obiettivi per l'impiego di plastica "circolare" il 25% al 2025 e il 65% al 2030 e a tal fine prevede investimenti totali per 235 miliardi di euro. È interessante notare che nel 2022 il recupero di materia dai rifiuti in plastica prodotti in Europa è risultato del 27% circa, mentre il 50% del totale è stato destinato a recupero energetico e il restante 23% ha trovato collocazione nelle discariche senza alcun recupero di risorse. Per quanto riguarda la distribuzione dell'assorbimento di rifiuti plastici riciclati tra i vari settori dell'economia europea, nel 2022 l'utilizzo prevalente si è realizzato nell'industria edile (41%), seguito da quello per la produzione di packaging (31%) e da quello per i manufatti agricoli (13%)⁶.

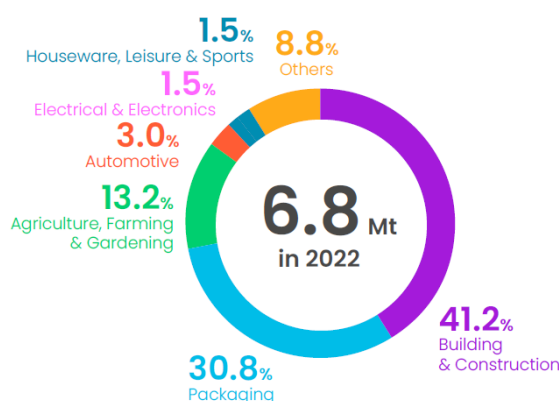


Figura 3: The circular economy for plastics. Plastics Europe (2023)

Per interpretare in maniera più chiara questi dati è necessario fornire una descrizione di riciclo meccanico e del riciclo chimico delle materie plastiche.

2.1.1 Il riciclo meccanico

Il riciclo meccanico, come evidenziato dalla figura 2, è la principale forma di riciclo degli scarti in plastica, con 35,5 milioni di tonnellate processate nel 2022.

Il riciclo meccanico si compone in generale di quattro fasi: selezione del materiale per tipo di polimero, triturazione, lavaggio ed essiccazione, fusione ed estrusione per la produzione di pellet, ovvero piccoli grani di plastica che vengono commercializzati o utilizzati direttamente per realizzare nuovi prodotti, negli stessi cicli produttivi di partenza (riciclo primario) ovvero in cicli differenti (riciclo secondario).

⁶ PLASTICS EUROPE. *The circular economy for plastics: a European analysis*. Bruxelles: Plastics Europe, 2024

La plastica destinata al riciclo meccanico può essere selezionata alla fonte, tramite raccolta differenziata da parte dei consumatori, oppure può essere selezionata a valle della raccolta grazie ad appositi impianti di scomposizione di flussi multimateriale, cioè contenenti frazioni merceologiche diverse.

Nel primo caso è generalmente possibile recuperare plastica di qualità superiore, e ciò permette di fornire più agevolmente un materiale riciclato con le specifiche richieste dall'industria manifatturiera, effettuando soltanto un trattamento minimo per eliminare eventuali impurità.

Nel caso della separazione post-raccolta, invece, è normalmente possibile raccogliere una quantità maggiore di materiale, che però necessita di una separazione più complessa da altre tipologie di rifiuti, da cui consegue una qualità inferiore del materiale riciclato a causa del rischio di contaminazione per la presenza di frazioni merceologiche estranee.

Si fornisce di seguito un'analisi delle singole fasi del riciclo meccanico.

Selezione: il primo passaggio consiste nel trasporto dei rifiuti presso un impianto di smistamento, al fine di selezionare il tipo di plastica che si intende riciclare (questa fase ha tipicamente l'obiettivo di raggruppare i materiali in base al polimero costituente).

La selezione di un tipo specifico di plastica può essere più o meno complicata a seconda che si parli di plastica da raccolta pre-consumo, costituita da scarti di produzione industriali, o di plastica da raccolta post-consumo, cioè di rifiuti prodotti dai consumatori finali. In quest'ultimo caso la plastica sarà contaminata da impurità non plastiche, rendendo necessario un processo di raffinazione; infatti: *“La purezza massima ottenibile separando i rifiuti di plastica mista è di circa il 94-95%. Il materiale riciclato di alta qualità dovrebbe avere almeno una purezza del 98% per essere utilizzato come input nei processi di produzione.”*⁷

Al fine di raggiungere un elevato livello di purezza, vengono utilizzate diverse tecnologie di separazione, quali sistemi a correnti parassite⁸ per la separazione dei metalli non ferrosi, magneti permanenti per l'estrazione di parti ferromagnetiche, sistemi pneumatici e macchine automatiche dotate di sensori ottici e analizzatori dello spettro visivo del vicino infrarosso (NIR).

Triturazione: il passaggio successivo è la triturazione, finalizzata a ridurre le dimensioni del materiale e aumentarne la densità. Consiste nell'utilizzo di macchine a lame rotanti che triturano i manufatti in plastica, trasformandoli in scaglie.

⁷ SHEN, Li; WORRELL, Ernst. Plastic recycling. *Handbook of Recycling: State-of-the-Art for Practitioners, Analysts, and Scientists*. Amsterdam: Elsevier, 2014. p. 179–190.

⁸ Dispositivi che separano i metalli non ferrosi dai rifiuti tramite campi magnetici variabili che generano correnti indotte nei metalli. Queste correnti creano una forza repulsiva che allontana i metalli dal flusso di materiali.

Lavaggio: la terza fase consiste nel lavaggio del materiale triturato; anche qui c'è una distinzione tra rifiuti pre-consumo e rifiuti post-consumo. Infatti, i primi possono essere processati anche senza essere lavati, in quanto in genere non contaminati, mentre i rifiuti post-consumo, usualmente più inquinati, sono sottoposti a lavaggio utilizzando acqua ad una temperatura massima di 60°. Successivamente l'acqua utilizzata viene recuperata per processi interni e la plastica viene essiccata, per prepararla all'ultima fase.

Rilavorazione: l'ultima fase consiste nella rilavorazione vera e propria dei materiali selezionati e tritati, tramite un processo di agglomerazione o estrusione. Con queste tecniche è possibile ottenere pellets che, in base al prodotto che si intende realizzare, vengono processati con diversi metodi, tra cui lo stampaggio a iniezione, che consiste nel pressare il materiale fuso in uno stampo, o lo stampaggio ad aria, che sfrutta l'aria compressa per dare la forma desiderata al prodotto.

L'aspetto più critico del riciclo meccanico, caratterizzato da impegni di capitale relativamente contenuti e basso impatto ambientale, consiste nella progressiva perdita di qualità fisiche e meccaniche del materiale, dovuta agli stress meccanici e termici cui esso viene sottoposto nel ciclo trattamento finalizzato al recupero. Infatti, nel riciclo meccanico le catene polimeriche originarie tendono a scomporsi con conseguente decadimento delle caratteristiche iniziali di resistenza, elasticità e stabilità chimica, che consente di impiegare i materiali riciclati per la produzione dei manufatti di partenza solo parzialmente, come integrazione delle materie prime vergini, mentre l'utilizzo integrale per prodotti di qualità inferiore non trova di solito limitazioni (si parla in questo caso di processi di *downcycling*). Un altro limite del riciclo meccanico consiste nell'impossibilità di applicazione nel caso di materiali plastici compositi, cioè costituiti da un accoppiamento di polimeri diversi (ad es. materiali multistrato) e in quello di plastiche eterogenee (rifiuti plastici di matrici polimeriche diverse) o fortemente contaminate da frazioni non plastiche.

2.1.2 Il riciclo chimico

In tutti i casi in cui il riciclo meccanico risulta impraticabile una valida alternativa è rappresentata dal riciclo chimico, detto anche riciclo "terziario", che ha l'obiettivo di ottenere, dai materiali di partenza, combustibili liquidi o gassosi o materie prime per l'industria chimica perfettamente equivalenti a quelle naturali, dalle quali è possibile ricavare nuovi polimeri che alimentano l'industria dei manufatti in plastica.

In base alla tipologia di plastica da processare, ci sono diverse metodologie per riciclarla chimicamente. Le tecniche più diffuse e attualmente in forte espansione sono la pirolisi e la gassificazione.⁹

La pirolisi consiste in una decomposizione termica della struttura molecolare delle plastiche, che consente di produrre olio di pirolisi, da utilizzare come materia prima (*feedstock*) in sostituzione dei combustibili fossili per produrre nuova plastica. La gassificazione è invece un processo termochimico che converte la plastica in *syngas*, un gas che può essere utilizzato per la produzione di carburanti sintetici come il metanolo o può essere trasformato direttamente in monomeri plastici.

Un'altra forma di riciclo chimico è il processo di depolimerizzazione, che consiste nell'utilizzo di idonei solventi per depolimerizzare la plastica in monomeri che possono poi essere nuovamente polimerizzati per ottenere polimeri vergini. Un limite della depolimerizzazione consiste nel fatto che sono richieste materie di partenza di elevate purezza.

In generale, rispetto al riciclo meccanico, dal punto di vista economico il riciclo chimico presenta maggiori costi di investimento, maggior impatto ambientale e maggiori costi energetici.

2.2 Prospettive economiche del riciclo: scenari futuri per la transizione verso un'economia circolare

A livello mondiale, secondo uno studio svolto dalla società McKinsey&Company, la quantità di rifiuti in plastica globalmente prodotti potrebbe raggiungere i 460 milioni di tonnellate all'anno nel 2030 e il 50% di questo volume potrebbe essere riutilizzato, a fronte del 12% del 2018, generando, nell'ipotesi che si abbia un prezzo del petrolio di 75 \$ al barile, maggiori profitti per 60 miliardi di dollari USA per il settore petrolchimico e della produzione di materie plastiche.¹⁰

Se si osserva questo potenziale di crescita economica dal punto di vista tecnologico, emerge che le tecnologie in grado di generare i margini maggiori sarebbero il riciclo chimico (pirolisi) e quello meccanico, mentre dal punto di vista geografico il potenziale maggiore è concentrato nelle aree asiatiche (Cina in primis), in cui si registrano elevati livelli di consumo e produzione di plastiche e che, dal punto di vista dell'organizzazione dei servizi di raccolta e gestione dei rifiuti, sono in fase evolutiva rispetto società occidentali e presentano maggiori tassi di crescita, come evidenziato dalla figura che segue (figura 4).

⁹ SIDOTI, MARTINA. Produzione di energia elettrica da pirolisi e gassificazione di biomassa. 2012.

¹⁰ MCKINSEY & COMPANY. *How plastics waste recycling could transform the chemical industry*. 2018.

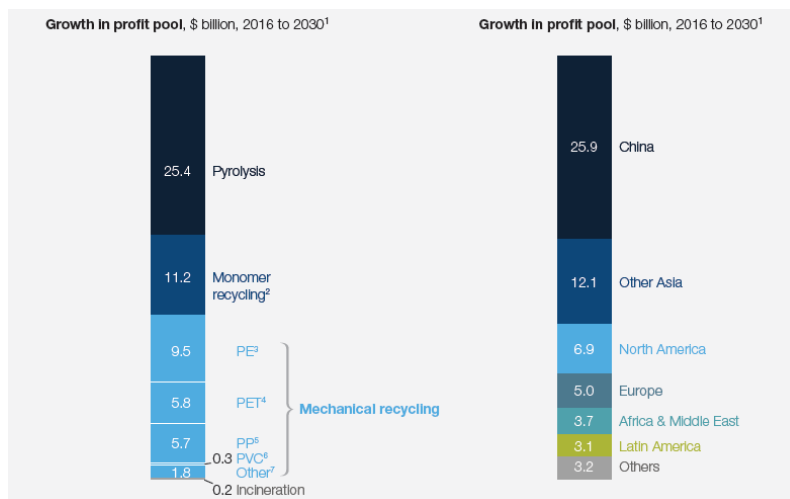


Figura 4: How plastics-waste recycling could transform the chemical industry, McKinsey&Company (2018)

Nell'ipotesi di riutilizzo del 50% dei rifiuti prodotti, le previsioni riportate nella figura 4 mostrano come la pirolisi potrebbe portare un aumento nei profitti di 25,4 miliardi di dollari USA nel periodo dal 2016 al 2030 e come nello stesso periodo la Cina potrebbe ottenere un aumento nei profitti di 25,9 miliardi di dollari USA.

Per altro verso, i risultati prospettati al 2030 dall'analisi dei possibili sviluppi del mercato richiederebbero investimenti su base annua tra i 15 e i 20 miliardi di dollari USA. Una proiezione al 2050 (figura 5) evidenzia un contributo della plastica circolare nel fabbisogno di materie prime per l'industria mondiale della plastica pari a circa il 60% della domanda totale, sempre nell'ipotesi di un prezzo del petrolio di 75 dollari al barile, con un corrispondente calo del 30% della richiesta di petrolio rispetto a condizioni ordinarie di produzione.

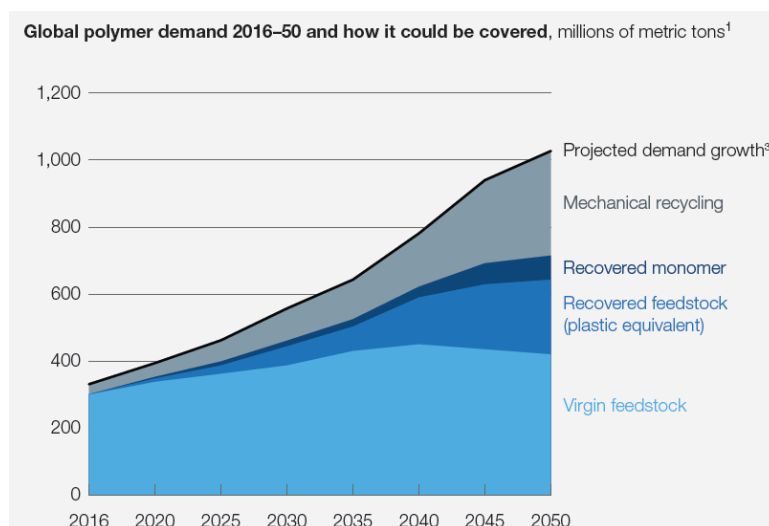


Figura 5: How plastics-waste recycling could transform the chemical industry, McKinsey&Company (2018)

Secondo lo studio citato la realizzazione dello scenario previsto sarebbe subordinata a tre condizioni essenziali: 1) gli operatori della filiera delle materie plastiche devono collaborare con i

soggetti utilizzatori e quelli istituzionali per incentivare modalità di progettazione dei prodotti che favoriscano il riciclo e impongano un contenuto minimo di materie circolari; 2) l'industria della plastica deve essere coinvolta nei processi di miglioramento delle tecnologie di gestione dei rifiuti che potrebbero ottimizzare le fasi di raccolta, selezione e raffinazione dei rifiuti in modo da renderli più idonei ai processi di riciclo; 3) i produttori di materie plastiche devono sostenere lo sviluppo di tecnologie e la realizzazione di infrastrutture per il riciclo che consentano la reintroduzione dei rifiuti nella catena del valore delle materie prime polimeriche. A ciò si aggiungono le strategie gestionali di integrazione verticale o orizzontale delle imprese petrolchimiche e dei polimeri vergini che possono, attraverso start-up o acquisizioni, ampliare la propria offerta con materie prime ottenute da materiali circolari, gestendo direttamente i cicli di recupero dei rifiuti.

2.3 La value chain del riciclo: ottimizzazione della circolarità

La catena del valore (*value chain*) è un modello di analisi, proposto dall'economista statunitense Porter, che consente di individuare le attività strategicamente rilevanti di un'azienda o di un processo produttivo con lo scopo di facilitare l'intervento sulle principali fonti di costo e marginalità dell'attività d'impresa. Anche nel caso del ciclo di produzione, consumo e riutilizzo delle plastiche il modello può trovare un'efficace applicazione per la valutazione delle criticità del sistema circolare e dei principali ostacoli e delle condizioni favorevoli allo sviluppo delle iniziative economiche finalizzate al recupero dei materiali contenuti nei prodotti a fine vita.

In una recente ricerca di Van Der Vegt et al. (2022), in tal senso, gli autori hanno approfondito, con riferimento ad un'area geografica europea comprendente Olanda, Regno Unito e Germania, l'analisi dei fattori che possono influenzare, in senso positivo o negativo, l'implementazione di pratiche circolari tese ad incrementare il riutilizzo dei rifiuti in plastica post-consumo attraverso il riciclo meccanico.

Dallo studio emerge una rappresentazione della catena del valore in cui si riconoscono tre ambiti funzionali, ai quali afferiscono soggetti distinti (produttori di manufatti, consumatori e operatori del riciclo), tra i quali sono distribuite le fasi/attività elementari della circolarità: approvvigionamento, produzione, vendita, consumo, raccolta rifiuti, selezione, rigenerazione, come osservabile nella figura che segue (figura 6).

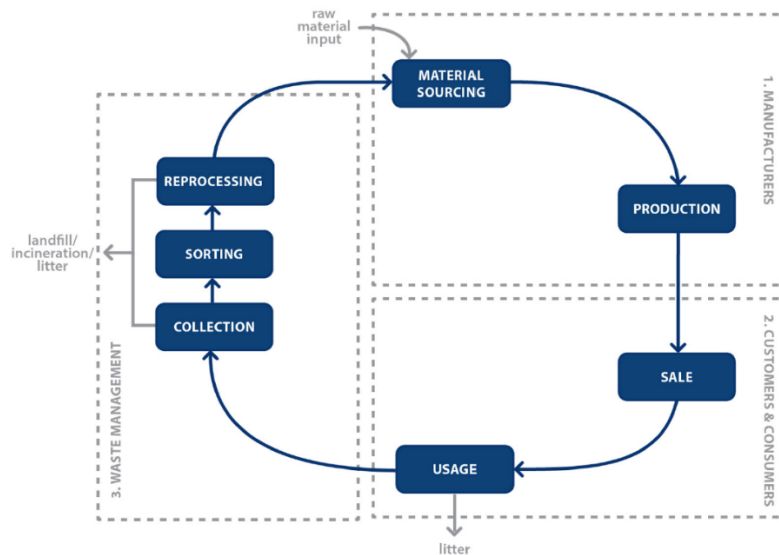


Figura 6: Value chain della plastica. Van Der Vegt et al. (2022)

Nel sistema così rappresentato si possono stabilire collegamenti tra i fattori limitanti le iniziative di riciclo e quelli che, al contrario, le possono indurre, stabilendo così un quadro di correlazioni tra fattori e fasi della catena del valore utile per determinare i requisiti minimi per l'attivazione di processi imprenditoriali di investimento e crescita del settore del recupero. Dall'esame dettagliato delle relazioni tra fattori positivi e negativi, variamente classificabili come normativi, economici, tecnici, sistemici, organizzativi e culturali, e le fasi della *value chain*, si ricavano otto requisiti essenziali per il business circolare:

- *Progettazione dei manufatti finalizzata al riciclo delle parti componenti*: questo requisito è fondamentale per agevolare le operazioni di recupero dei materiali plastici incorporati nei prodotti, sia in fase di separazione per tipologia polimerica, sia in fase di lavorazione e rigenerazione, con l'obiettivo di migliorare la qualità delle materie prime secondarie.
- *Ottimizzazione dei processi di raccolta, selezione e rilavorazione dei rifiuti in plastica*: attraverso l'utilizzo delle migliori tecnologie, al fine di garantire flussi stabili di materie secondarie di qualità elevata e costante, oltre che costi contenuti.
- *Standardizzazione delle caratteristiche dei processi di riciclo e delle materie prime recuperate*: si riflette in riduzioni di costi intermedi e finali, minore incertezza per gli investitori, semplificazione della gestione degli approvvigionamenti, miglioramento della qualità dei prodotti contenenti materiali riciclati;
- *Informazioni su disponibilità e caratteristiche dei rifiuti in plastica e delle materie prime riciclate*: la conoscenza dei volumi, della localizzazione e delle caratteristiche tecniche e qualitative dei rifiuti e delle materie prime secondarie, anche attraverso

sistemi di tracciabilità ed etichettatura adeguati, consentirebbe alle imprese di pianificare la produzione e regolare gli impianti industriali in maniera più efficiente.

- *Consapevolezza delle possibilità di riciclo*: la definizione e diffusione di *best practices* industriali e di casi pilota può contribuire a eliminare la diffidenza verso l'utilizzo di materie riciclate e quindi ad aumentare la propensione all'investimento in processi circolari.
- *Informazione ed educazione ambientale*: è necessaria un'adeguata formazione degli attori delle *value chain*, in termini di conoscenze tecniche, indicazioni operative, informazioni relative alle corrette modalità di raccolta, consapevolezza sui benefici del recupero.
- *Cooperazione tra gli attori della value chain*: un'interazione efficace tra i soggetti coinvolti nelle diverse aree operative crea i presupposti per una convergenza di interessi e un miglioramento dell'efficienza globale del sistema circolare.
- *Interventi legislativi a vari livelli*: spesso si rivelano un elemento indispensabile per attivare i circuiti virtuosi del recupero e le iniziative imprenditoriali con misure dirette a sovvenzionare le iniziative d'investimento, a ridurre il carico di tasse e contributi gravanti sugli operatori economici del settore, a imporre l'utilizzo di quote minime materiali riciclati nei nuovi prodotti e a promuovere l'interesse dei consumatori per favorire l'acquisto di prodotti che contengono materiali riciclati.

L'analisi delle condizioni che determinano le dinamiche e i rapporti di forza della catena del valore del recupero dei materiali in plastica nella sua concreta articolazione organizzativa assume un'importanza particolare in quanto rivela, come segnalato da ricerche svolte in tal senso per il ciclo di vita dei contenitori per bevande in PET nel Regno Unito, l'esistenza di attori interni ed esterni alla filiera industriale distribuiti a monte (*upstream*: dalla produzione al consumo) e a valle (*downstream*: dal consumo alla raccolta dei rifiuti e alla rigenerazione), tra i quali si sviluppano interazioni anche complesse, fondamentali per comprendere e indirizzare l'evoluzione del sistema¹¹. Gli *stakeholders* (intesi come soggetti singoli o raggruppati coinvolti nella *value chain*, portatori di interessi e in grado di influire o essere influenzati dalle dinamiche del sistema) interni ed esterni (figura 7) di maggior peso sono rappresentati, da un lato, dai portatori di interessi economici, come l'industria petrolchimica con i suoi ingenti investimenti impiantistici e infrastrutturali, realizzati con il supporto di istituzioni finanziarie, cui si aggiungono i produttori di manufatti in plastica e i proprietari di marchi dominanti e, dall'altro, dai soggetti istituzionali che legiferano e che possono modificare le condizioni di produzione ma

¹¹ GERASSIMIDOU, Spyridoula, et al. Unpacking the complexity of the UK plastic packaging value chain: A stakeholder perspective. *Sustainable Production and Consumption*, 2022, 30: 657-673.

che a loro volta sono influenzati, nelle proprie scelte politiche, dalla capacità di condizionamento (*lobbying*) dei portatori di rilevanti interessi economici, oltre che dalle istituzioni scientifiche e dalle organizzazioni promotrici di innovazione culturale.

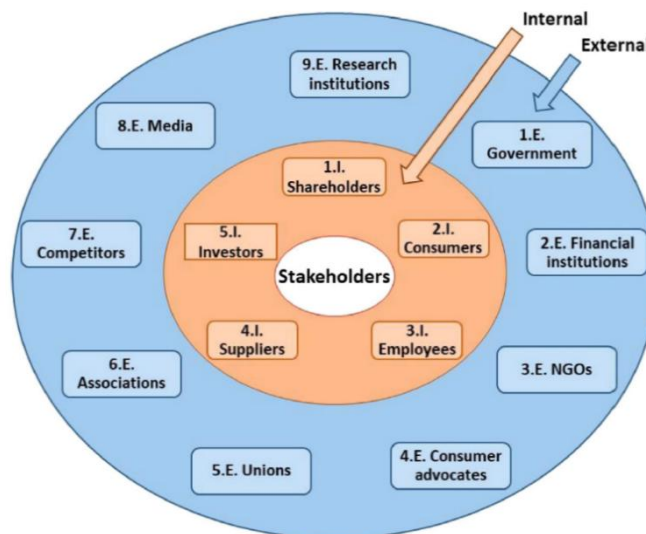


Figura 7: Mappa degli stakeholders, Gerassimidout et al. (2024)

Nella catena produzione-consumo, i consumatori, con le loro scelte, possono orientare dal basso le vendite di prodotti verso articoli a minore impatto ambientale favorendo la circolarità, guidati da associazioni senza fini di lucro preordinate alla salvaguardia dell'ambiente o dei diritti degli acquirenti finali al dettaglio. D'altra parte, nell'ambito *downstream* della catena, si osserva un'inversione di ruoli dal momento che i produttori di imballaggi in plastica figurano come acquirenti dei materiali riciclati in uscita dagli impianti di rigenerazione, gestiti da imprenditori del riciclo portatori di interessi in certa misura contrapposti a quelli degli *stakeholders* dell'industria petrolchimica, soprattutto in presenza di prezzi di mercato delle materie prime petrolifere inferiori e pari a quelli delle materie prime riciclate. È evidente che l'intervento degli attori istituzionali esterni, soprattutto governativi e quelli impegnati nelle attività di comunicazione e formazione, in questi casi rappresenta un elemento chiave per attivare i processi di investimento e promozione della circolarità, anche considerando che una maggiore disponibilità di rifiuti in plastica di qualità elevata ridurrebbe i costi di approvvigionamento per l'industria del riciclo ampliandone il mercato e le possibilità di profitto. Di particolare interesse si sono dimostrati gli interventi degli attori governativi della *value chain* tesi a implementare logiche di responsabilizzazione dei produttori di manufatti in plastica (in particolare di imballaggi) sull'effettivo recupero dei materiali al termine del relativo utilizzo: si tratta del concetto di Responsabilità Estesa dei Produttori (EPR: *Extended Producer Responsibility*) che impone ai produttori e agli utilizzatori di beni di consumo in plastica di garantirne il recupero a fine vita, organizzando

l'intero sistema di raccolta e riutilizzo.¹² Nella maggior parte dei casi, è proprio la capacità di elaborare efficaci strategie di intervento da parte degli *stakeholder* istituzionali che può generare le opportunità imprenditoriali nel settore della gestione dei rifiuti per lo sviluppo della circolarità, vincendo le inerzie presenti nelle fasi a monte del ciclo del valore, in cui hanno un peso determinante l'industria petrolchimica e quella dei produttori e fornitori di materie prime vergini.

2.4 Soluzioni tecnologiche per la conversione dei rifiuti in plastica in risorse per i processi industriali

2.4.1 Fattori economici critici e misure abilitanti per l'efficacia del riciclo

Una delle determinanti più importanti per l'affermazione di un'economia circolare, soprattutto nel mercato della plastica, è lo sviluppo tecnologico. In particolare, l'elaborazione e l'applicazione di processi che consentano di trasformare i rifiuti in risorse per la creazione di nuovi prodotti, con un consumo relativamente basso di energia e risorse.

Il punto di partenza per analizzare le soluzioni tecnologiche per il riciclo e valutarne l'efficacia è quello di studiare il ciclo di vita dei polimeri, sulla base del loro utilizzo specifico. A questo proposito risulta rilevante l'interpretazione grafica fornita da uno studio realizzato da Mangold et al. (2022) (figura 8).

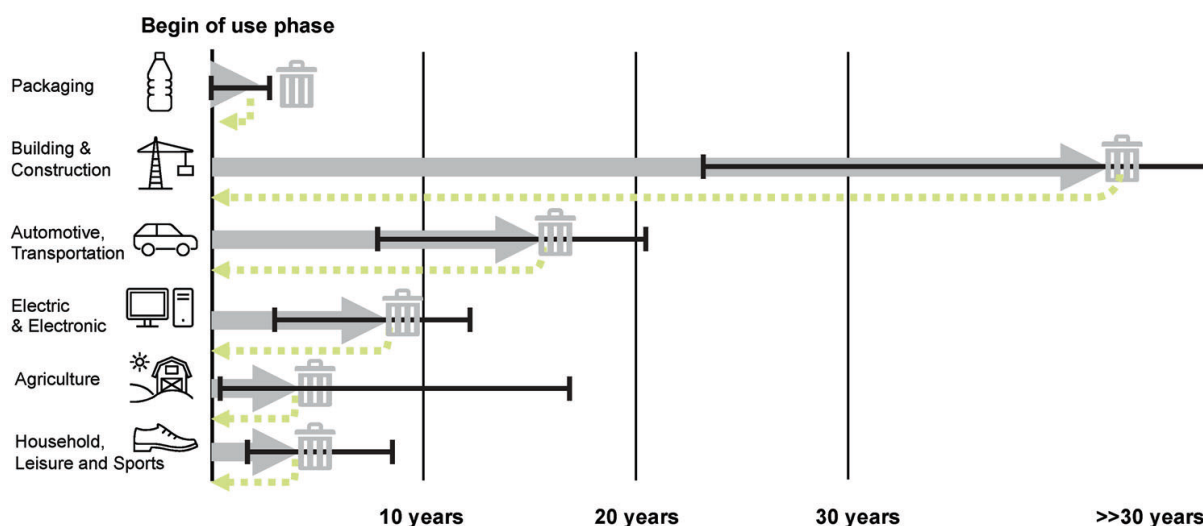


Figura 8: Ciclo di vita dei polimeri plastici. *Macromol. Chem. Phys.* (2022)

¹² GERASSIMIDOU, Spyridoula, et al. Unpacking the complexity of the UK plastic packaging value chain: A stakeholder perspective. *Sustainable Production and Consumption*, 2022, 30: 657-673.

Dall'analisi della figura 8 emerge come, a causa delle loro proprietà specifiche, i diversi polimeri differiscono notevolmente per la durata del loro ciclo di vita. Infatti, i polimeri utilizzati per il *packaging* (come il PET), dopo circa un anno vengono smaltiti come rifiuti, incrementando le possibilità di riutilizzo, classificandosi come materia prima per le imprese che si occupano di riciclo. Al contrario, i polimeri utilizzati nell'ambito delle costruzioni e dell'edilizia (come il PVC) impiegano più di trent'anni per giungere al termine del loro ciclo di vita ed essere classificati come rifiuti.

Queste differenze influiscono nell'elaborazione dei processi industriali circolari, soprattutto per quanto riguarda il redesign dei materiali utilizzati. Infatti, la disponibilità di rifiuti è sbilanciata verso i materiali con cicli di vita più brevi, rendendo difficoltosa la sostituzione effettiva dei materiali con cicli di vita più lunghi, che richiederebbe inevitabilmente più tempo.

D'altronde la disponibilità di risorse è un fattore chiave per il ripensamento della catena del valore in chiave circolare, insieme al prezzo e alla qualità.

Questi fattori sono rilevanti per un'altra questione di fondamentale importanza: la concorrenza tra le materie prime vergini e le materie prime riciclate.

Per poter studiare le dinamiche che caratterizzano questa competizione, lo studio precedentemente citato evidenzia le differenze tra le catene del valore e la struttura dei costi per le due tipologie di materiali, come rappresentato nella figura che segue (figura 9).

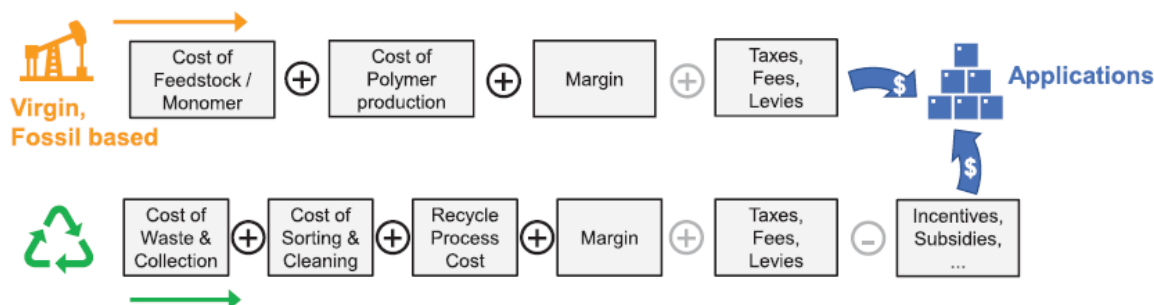


Figura 9: Struttura dei costi delle materie prime vergini e delle materie prime riciclate. *Macromol. Chem. Phys.* (2022)

In particolare, emerge come il costo dei monomeri di origine fossile sia sostituito dal costo della raccolta, della selezione e della pulizia per le imprese che si occupano del riciclo. Allo stesso modo il costo della produzione tramite materie vergini corrisponde al costo del processo di riciclo nella struttura dei costi dell'economia circolare.

A causa della posizione di mercato favorevole e delle economie di scala, le imprese che producono plastica di origine fossile affrontano generalmente costi inferiori, anche considerando che la produzione di plastica riciclata di qualità ha un forte impatto sui costi di selezione e pulizia del materiale raccolto.

Per poter affrontare queste disparità è necessario intervenire nei seguenti aspetti: 1) introducendo misure regolatorie come sussidi per i materiali riciclati o sanzioni per l'utilizzo di materie prime vergini, per colmare le differenze nelle strutture di costi; 2) istituendo sistemi di deposito e restituzione dei prodotti alla fine del loro ciclo di vita, per risolvere i problemi di disponibilità; 3) i processi di riciclo devono essere in grado di preservare, o migliorare, le prestazioni del materiale, per poter essere riutilizzati in maniera efficiente.

2.4.2 Processi innovativi per il recupero: dal riciclo meccanico al riciclo chimico, le opportunità del settore alimentare

Come accennato nel paragrafo 2.1, i possibili processi di riciclo dei materiali plastici consistono nel riciclo meccanico e nel riciclo chimico. Si è già evidenziato che il riciclo meccanico mantiene sostanzialmente inalterata la struttura polimerica del materiale riciclato e presenta notevoli vantaggi tecnici per la semplicità del ciclo produttivo, che sostanzialmente ricalca quello della produzione di materie prime vergini per l'industria dei manufatti in plastica, già largamente consolidato e affidabile oltre che applicato in impianti di potenzialità elevata, fatta eccezione per alcuni fasi aggiuntive di pretrattamento da realizzare a monte, essenzialmente finalizzate alla riduzione volumetrica e alla eliminazione delle impurità tipicamente presenti nei flussi di rifiuti post-consumo. Le fasi finali del processo sono normalmente quelle della fusione e della estrusione per la produzione di granuli pronti per l'utilizzo nei cicli industriali. D'altra parte, il riciclo meccanico presenta notevoli inconvenienti tecnici che ne limitano il campo di applicazione soprattutto per la produzione di componenti e beni caratterizzati da qualità fisico-chimiche elevate quali la resistenza meccanica, la durabilità, la stabilità della colorazione, l'assenza di variazioni della composizione chimica e di dispersioni nell'ambiente di microcomponenti e particelle solide.¹³ E in effetti queste condizioni possono essere facilmente compromesse, nel riciclo meccanico, da diversi fattori:

- il naturale invecchiamento delle materie plastiche durante il loro primo ciclo di vita (*aging*), dovuto a stress meccanici, all'ossidazione e all'esposizione ai raggi UV, che risulta accelerato nei cicli di vita successivi;
- lo stress termico subito nelle fasi di fusione ed estrusione, che indebolisce le catene polimeriche;
- la presenza all'origine di additivi chimici e sostanze stabilizzanti a volte non compatibili con il riutilizzo in cicli produttivi diversi e comunque non più efficaci perché ormai esausti;

¹³ MANGOLD, Hannah; VON VACANO, Bernhard. The frontier of plastics recycling: rethinking waste as a resource for high-value applications. *Macromolecular Chemistry and Physics*, 2022, 223.

- la contaminazione dovuta alla presenza di materiali eterogenei nei flussi di rifiuti e a volte di sostanze pericolose che si trasferiscono nelle materie prime riciclate.

A tutte queste limitazioni si aggiunge un inconveniente particolarmente critico relativo alla utilizzabilità del riciclo meccanico per la produzione di materiali riciclati destinati a confluire in nuovi imballaggi per prodotti alimentari. Questa applicazione rappresenta, dal punto di vista imprenditoriale, una grande opportunità in quanto le politiche ambientali a livello globale fissano quote minime di utilizzo di plastiche riciclate nei prodotti immessi nel mercato per il consumo finale: ad esempio, l'Unione Europea ha stabilito che entro il 1° gennaio 2025 le bottiglie in PET per bevande immesse al consumo devono contenere almeno il 25% di plastica riciclata (Direttiva 904/2019). Tenendo conto dell'incidenza degli imballaggi per prodotti alimentari (cibi e bevande) rispetto al volume totale di imballaggi prodotti, pari a circa il 75%, e del valore della produzione complessiva mondiale (222 mld di dollari USA nel 2024 e stima di 350 mld nel 2034)¹⁴, si comprende bene come questo settore sia strategico per l'orientamento degli investimenti nella catena del valore dell'economia circolare.

Food	52%
Bevande	22,70%
Shopper	5,80%
Prodotti chimici (1)	5,50%
Cosmetica e farmaceutica	3,60%
Altro non food (2)	9,90%
Totale	100%
(1) Lubrificanti, colori, vernici e chimici vari	
(2) Elettromeccanica, macchinari industria tessile, elettronica ecc.	

Tab 1: Ripartizione della produzione di imballaggi in plastica. Istituto Italiano Imballaggi (2022)

Rispetto a questa interessante prospettiva il riciclo meccanico si presenta del tutto inadeguato in quanto la qualità dei materiali riciclati non è generalmente compatibile con le rigide norme vigenti nel campo alimentare che impongono il raggiungimento del cosiddetto *food grade* per i componenti riciclati degli imballaggi a contatto con i prodotti alimentari, vale a dire materiali certificati che garantiscano l'assenza di sostanze contaminanti.

Il superamento delle limitazioni intrinseche del riciclo meccanico implica, dal punto di vista tecnologico, l'adozione di processi di recupero differenti, basati principalmente su due categorie impiantistiche:

- 1) sistemi di riciclo basati su solventi;

¹⁴ [Rapporto sul mercato degli imballaggi in plastica per alimenti e bevande – 2034](#)

2) sistemi di riciclo chimico in senso stretto.

La prima opzione presenta un'analogia col riciclo meccanico solo in quanto la struttura molecolare polimerica dei materiali plastici viene conservata. In pratica, il processo di riciclo con solventi prevede la separazione selettiva di polimeri diversi da quello "obiettivo" del recupero e dalle altre sostanze chimiche inquinanti (ad es. additivi, antiossidanti, ecc.), mediante l'utilizzo di un solvente liquido che agisce esclusivamente rispetto al polimero di interesse. Al termine della dissoluzione le sostanze indesiderate possono essere separate meccanicamente tramite filtrazione del liquido, e da quest'ultimo il polimero da recuperare viene estratto tramite processi fisici di precipitazione di particelle solide e filtrazione. I polimeri riciclati attraverso questo processo presentano caratteristiche abbastanza vicine a quelli di partenza, anche se in alcuni casi è stata osservata sperimentalmente una riduzione di peso molecolare. Gli svantaggi della tecnica appena descritta sono rappresentati dagli elevati costi energetici del processo di recupero del solvente che deve essere impiegato in più cicli di separazione, oltre che dal rischio di inquinamento del polimero riciclato con residui di solvente. Oltretutto, il bilancio ambientale per questo processo presenta un'elevata impronta di carbonio (emissioni di CO₂), ragion per cui la scelta di tale soluzione tecnologica per la produzione di materiali riciclati di qualità andrebbe attentamente esaminata anche sotto questo profilo.

Nel riciclo chimico propriamente detto, la struttura molecolare dei polimeri viene completamente disgregata. Il processo richiede un assorbimento energetico elevato ma rappresenta, soprattutto per alcuni casi di rifiuti fortemente eterogenei (come quelli che vengono normalmente destinati al recupero energetico in impianti di combustione) e quando è richiesta una elevatissima qualità del materiale riciclato, l'unica valida alternativa al riciclo meccanico e a quello basato sulla dissoluzione chimica.

In generale, è possibile distinguere due tipi di processi di riciclo chimico:

- *ri-monomerizzazione*: in cui a partire da specifiche plastiche polimeriche "inquinata" si ottengono i monomeri costituenti elementari, successivamente sottoposti ad un trattamento per la ri-polimerizzazione e quindi la ricostituzione delle medesime plastiche "purificate". Applicazioni industriali sono state in questo senso sviluppate per alcuni polimeri largamente diffusi come il PET, il poliuretano e le poliammidi (nylon);
- *conversione ad alta temperatura di plastiche miste "inquinata"*: tramite le due forme tipiche della pirolisi e della gassificazione, in cui si ottiene una miscela di frammenti molecolari di minori dimensioni rispetto alle catene polimeriche. Mentre il risultato della pirolisi è prevalentemente un liquido (olio di pirolisi) destinato a essere reimmesso nel ciclo di produzione degli idrocarburi grezzi (raffinerie), nella gassificazione il risultato del processo è un gas destinato all'utilizzo come gas combustibile. In entrambi i

casi i prodotti del riciclo devono essere sottoposti a trattamenti di depurazione per l'eliminazione di componenti indesiderati.

3 - I processi decisionali per l'industria del riciclo: metodi di analisi tecnico-economica

3.1 Introduzione ai processi decisionali nell'industria del riciclo

I primi due capitoli sono stati incentrati sulla descrizione del modello circolare e sulla sua applicazione al contesto specifico del mercato dei materiali plastici, con la presentazione delle tecnologie principali e delle prospettive future.

Questo capitolo verterà sull'individuazione e l'analisi dei processi decisionali relativi ad iniziative d'investimento volte alla progettazione, alla realizzazione e alla gestione di impianti industriali di riciclo di rifiuti in plastica, nella forma più innovativa del riciclo chimico. Infatti, al fine di realizzare l'auspicata transizione verso modelli circolari, i soggetti interessati non possono prescindere da un'analisi al tempo stesso tecnica ed economica e - si dovrebbe opportunamente aggiungere - ambientale, al fine di stimare la fattibilità e la convenienza di un progetto. Le tecniche attualmente utilizzate per condurre questo tipo di analisi, ampiamente descritte in letteratura, sono denominate *Life Cycle Assessment* (LCA) e *Techno-Economic Analysis* (TEA). In particolare, il *Life Cycle Assessment* si concentra sulla valutazione degli impatti ambientali di un prodotto o servizio durante il suo intero ciclo di vita, tenendo conto di tutte le fasi e dell'insieme delle risorse che convergono nel processo produttivo, mentre mediante la *Techno-Economic Analysis* si esaminano gli aspetti legati all'impegno di risorse economiche, ai costi di gestione e alle condizioni di mercato (prezzi) per verificare l'opportunità economica degli investimenti previsti. Entrambi questi strumenti risultano particolarmente utili nella valutazione di progetti legati al riciclo chimico, che a differenza del riciclo meccanico necessita di investimenti in tecnologie emergenti, non ancora largamente diffuse nel mercato.

3.1.1. Il metodo Life Cycle Assessment (LCA)

Una definizione efficace del metodo LCA, proposta da Keller et al. (2022), è la seguente: “... una metodologia per la valutazione strutturata degli impatti ambientali diretti e indiretti di prodotti, processi o servizi durante tutto il loro ciclo di vita ...”

Il quadro metodologico dell'LCA è standardizzato a livello internazionale dalle norme ISO (International Standard Organization) 14040 e 14044; secondo tali norme il processo è articolato in quattro fasi:

- 1) definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione;
- 2) analisi dell'inventario del ciclo di vita, *Life Cycle Inventory* (LCI);
- 3) valutazione dell'impatto del ciclo di vita, *Life Cycle Impact Assessment* (LCIA);
- 4) interpretazione dei risultati.

Le singole fasi includono poi specifiche attività:

- *definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione*: la prima fase consiste nell'individuazione dello scopo dello studio, il quale comprende la definizione dei limiti del sistema e il riferimento quantitativo a cui vengono rapportati tutti i dati utilizzati, al fine di garantirne la comparabilità;
- *Life Cycle Inventory (LCI)*: questa fase consiste nella raccolta dei dati relativi ai flussi di materia e di energia. È importante osservare che i dati raccolti sono divisi a seconda che i flussi siano provenienti dall'interno del sistema in esame, quindi influenzati dalle decisioni strategiche, oppure generati dall'esterno del sistema e da quest'ultimo non condizionati;
- *Life Cycle Impact Assessment (LCIA)*: consiste nella stima dell'impatto ambientale del sistema di riferimento tramite categorie specifiche come il riscaldamento globale (emissioni di gas serra) o il consumo delle risorse fossili;
- *interpretazione dei risultati*: l'ultima fase prevede la valutazione dei risultati sulla base dell'obiettivo definito inizialmente, oltre alle considerazioni sull'affidabilità dei risultati e sugli eventuali limiti di applicabilità degli stessi.

Nel contesto del riciclo della plastica, questa metodologia presenta delle criticità legate all'eterogeneità dei dati disponibili e alla modellazione prospettica di tecnologie non ancora mature. Nonostante ciò, la procedura di analisi descritta resta uno strumento fondamentale per orientare la progettazione e la realizzazione di impianti ambientalmente sostenibili, fornendo una base per l'elaborazione di strategie circolari.

3.1.2. Il metodo Techno-Economic Analysis (TEA)

Sempre Keller et al. (2022) fornisce una definizione della *Techno-Economic Analysis* (TEA), identificandola come “... una componente essenziale della valutazione e dell'attuazione complessiva del progetto, in quanto fornisce informazioni commerciali e orientate al mercato per stabilire se un investimento tecnologico porta a un ritorno monetario, l'entità degli eventuali benefici e quando questi si concretizzeranno ...”

Risulta chiaro da questa definizione come, a differenza della LCA, che si concentra esclusivamente sugli aspetti ambientali, la TEA fornisca elementi di giudizio su variabili economiche, quali la redditività e la competitività dell'idea imprenditoriale.

Un limite all'applicazione della *Techno-Economic Analysis* è rappresentato dalla mancanza di una standardizzazione metodologica ufficiale, anche se possono essere individuate generalmente cinque fasi:

- 1) caratterizzazione tecnologica;
- 2) definizione dell'obiettivo e del perimetro di analisi;
- 3) selezione degli indicatori economici;
- 4) sviluppo dell'inventario tecnico-economico;
- 5) calcolo e interpretazione degli indicatori.

Di ciascuna fase si possono individuare le attività componenti.

Caratterizzazione tecnologica: consiste nella descrizione tecnica del processo produttivo da valutare, sia mediante la definizione delle dotazioni impiantistiche, delle materie prime e degli eventuali pretrattamenti necessari, sia tramite parametri che ne misurano il livello di maturità tecnologica (*Technology Readiness Level* o in acronimo TRL). Questa prima fase è particolarmente rilevante in quanto orienta i passi successivi e, in particolare, in base al grado di maturità tecnologica del processo (variabile dal livello di mera “possibilità teorica” a quello di “installazione in piena scala in esercizio”) vengono stabiliti gli obiettivi dello studio, scelti i metodi di valutazione economica più appropriati e le modalità di elaborazione dei dati di inventario.

Definizione dell'obiettivo e del perimetro di analisi: questa fase è analoga a quella della metodologia LCA: vengono definiti l'obiettivo dello studio, l'unità funzionale e i confini del progetto analizzato. Più specificamente, in questa fase vengono definiti gli obiettivi dell'analisi con riferimento al livello di maturità tecnologica del processo in esame: per processi nella fase sperimentale tipiche valutazioni riguardano l'avviamento o la prosecuzione di attività di ricerca o la convenienza ad implementare modifiche impiantistiche per processi esistenti; per gradi tecnologici di sviluppo superiori l'obiettivo può essere quello di valutare l'opportunità di realizzare impianti pilota o di confrontare processi alternativi fino ad arrivare alla valutazione della convenienza della realizzazione di impianti su scala industriale. In questa fase vengono anche individuati i riferimenti geografici per la realizzazione dell'unità produttiva, aspetto importante in quanto il contesto geografico influenza la predisposizione dell'inventario informativo su cui si basano le successive elaborazioni economiche (ad es. costi della manodopera, dell'energia, delle materie prime, ecc.). Altrettanto importanti sono, in questa fase, l'individuazione della potenzialità produttiva del processo da esaminare, i confini del ciclo produttivo dal punto di vista delle fasi coinvolte e la ricerca di sistemi *benchmark* già in uso, alternativi a quello in studio, per le valutazioni di tipo comparativo.

Selezione degli indicatori economici: si selezionano gli indicatori economici che verranno utilizzati per condurre l'analisi, che variano a seconda del tipo e del livello di maturità della

tecnologia in esame. Questa fase è di notevole interesse e sarà meglio analizzata in uno dei paragrafi seguenti.

Sviluppo dell'inventario tecnico-economico: questa fase può essere definita critica per il buon esito della valutazione di fattibilità economica e consiste nella raccolta di tutti i dati necessari per lo svolgimento dell'analisi. È evidente che la disponibilità di dati di partenza realistici e puntuali consente di ottenere risultati altrettanto validi in termini di affidabilità statistica e adeguatezza rispetto agli obiettivi decisionali.

Calcolo e studio degli indicatori: l'ultima fase consiste nel calcolo degli indicatori e nella loro valutazione, anche con il supporto di strumenti come *l'analisi di sensitività*, che consente di misurare l'effetto sugli indicatori di variazioni di fattori critici come le spese di investimento (CAPEX) o le spese di esercizio (OPEX).

Alla luce di questa descrizione, emerge con chiarezza la valenza della TEA come strumento decisionale per la gestione economica d'impresa rispetto alla LCA, che invece, con le opportune estensioni e nelle idonee varianti applicative (come nel caso dell'*Environmental Life Cycle Costing*) può trovare impiego nell'analisi dei costi "esterni" che si riversano sulla collettività, correlabili agli impatti ambientali del processo produttivo da realizzare. Tuttavia, per quanto riguarda l'applicazione di questa metodologia agli investimenti in impianti per il riciclo chimico, non possono essere sottaciute alcune problematiche, come la mancanza di linee guida internazionali unificate e la conseguente necessità di definire approcci rigorosi nella raccolta e nell'interpretazione dei dati.

Pur con queste limitazioni, la TEA resta uno strumento estremamente valido sia in fase esplorativa, per la valutazione di una nuova tecnologia, sia in fase avanzata, per supportare decisioni di investimento o la formulazione di piani di finanziamento. Nel prosieguo si approfondiscono alcuni concetti e aspetti salienti delle modalità applicative del metodo TEA innanzi sinteticamente descritte.

3.2. Technology readiness levels (TRLs)

Come accennato nel paragrafo precedente, la prima fase del metodo TEA consiste nella caratterizzazione tecnologica. La definizione tecnica del progetto è fondamentale per orientarsi tra le varie tecnologie che riguardano processi per il riciclo chimico, in modo da poter prendere decisioni in maniera coerente.

Il metodo TRLs è un sistema di misurazione sviluppato originariamente dalla NASA per valutare il grado di maturazione di una tecnologia, secondo il quale si distinguono in totale nove livelli di maturità tecnologica, ciascuno dei quali rappresenta uno stadio di avanzamento nello sviluppo tecnologico.

L'analisi di un progetto con un TRL più basso si pone tipicamente come obiettivo la valutazione di investimenti nelle fasi di ricerca e sviluppo, mentre l'analisi di un progetto con un TRL più alto si concentra sulla valutazione di investimenti per l'applicazione della tecnologia in esame o la sua diffusione su scala industriale.

In particolare, i livelli TRL che vanno da 1 a 3 si riferiscono a fasi preliminari in cui la tecnologia è allo stadio embrionale e l'idea progettuale viene formulata nei suoi termini tecnici più precisi e testata in laboratorio; i livelli da 4 a 6 riguardano la realizzazione pratica dell'idea con la valutazione degli investimenti per installazioni pilota e il confronto con le tecnologie esistenti e i livelli da 6 a 9 riguardano decisioni per la costruzione di impianti su larga scala o il relativo sviluppo tramite modifiche innovative e ottimizzazioni dei processi.

È importante notare che da quanto emerge in letteratura, i gradi di sviluppo tecnologico del processo da sottoporre a valutazione sono correlabili alle categorie di indicatori economici, ai metodi di verifica di convenienza e al tipo di dati e informazioni necessari per il corretto svolgimento dell'analisi, come riportato nella successiva tabella.

TRL	Livello di sviluppo	Indicatori	Metodi di calcolo	Base informativa
1-2	Fase di ricerca iniziale o intermedia	Indicatori qualitativi o semi-qualitativi basati su opinioni di esperti	- Analisi decisionale multicriterio (MCDA)	- Dati di mercato - Valutazioni di esperti
2	Fase di ricerca intermedia	Indicatori quantitativi di base correlati a bilanci di massa ed energia	- Relative gross profit	- Dati di mercato - Bilanci di massa stechiometrici - Bilanci di energia dei processi chimici
3	Fase di ricerca avanzata	Indicatori quantitativi che includono elementi di costo relativi a spese di capitale e di manodopera	- Relative profit - Specific profit	- Dati di mercato - Bilanci di massa sperimentali - Bilanci di energia da analisi termodinamiche semplici - Stima dei costi CAPEX - Calcolo dei costi OPEX
4	Fase di sviluppo iniziale del processo	Indicatori quantitativi consolidati che forniscono informazioni circa il risultato economico del progetto con riferimento alla pianificazione temporale	- Static profit - Static payback period - Static return on investment (ROI)	- Dati di mercato dettagliati - Bilanci di massa/energia empirici - Stima dei costi CAPEX - Calcolo dei costi OPEX
5-6	Fase di sviluppo intermedio o avanzato del processo	Indicatori quantitativi complessi che includono l'attualizzazione dei flussi monetari attraverso i tassi di interesse. In aggiunta, indicatori integrati che combinano dati tecnico-economici con dati ambientali	- Net present value - Dynamic payback period - Levelized cost of carbon abatement - Dynamic Return on Investment (ROI) - Internal rate of return (IRR)	- Dati di mercato dettagliati (incluse previsioni di prezzo) - Bilanci di massa/energia empirici - Calcolo dei costi CAPEX col metodo di trasformazione - Calcolo dei costi OPEX
7-8	Fase di implementazione su scala industriale	Indicatori quantitativi complessi basati su dati gestionali ricavati da analisi informatizzate (simulazioni) del processo e relativi alle condizioni note del contesto produttivo	- Net present value - Dynamic payback period - Levelized costs of carbon abatement - Economic simulations	- Dati di mercato dettagliati (incluse previsioni di prezzo) - Bilanci di massa/energia ricavati da simulazioni o dall'esercizio dell'impianto - Calcolo dei costi CAPEX col metodo di trasformazione - Calcolo dei costi OPEX - Dati di contesto
9	Fase di innovazione di processo	Valutazioni di convenienza economica basate su dati gestionali ricavati da casi di implementazione su scala industriale	Verifiche sui costi e calcolo di profitto	- Contabilità di esercizio dell'impianto esistente - Dati di mercato di dettaglio (incluse previsioni sui prezzi)

Tab 2: griglia di correlazione tra TRL, indicatori e inventario dati. Keller et al. (2022)

3.3. Indicatori economici per il riciclo chimico nel modello TEA

Dopo aver fornito una descrizione generale del metodo dell'analisi tecnico-economica, è ora possibile entrare nel dettaglio, analizzando gli indicatori economici più utili per la valutazione di progetti legati al riciclo chimico delle materie plastiche.

In un contesto complesso e dinamico come quello del riciclo chimico, l'utilizzo di indicatori economici standardizzati riveste fondamentale importanza in quanto consente di garantire la trasparenza e la confrontabilità dei risultati e implica una scelta oculata.

I seguenti sono i principali indicatori utilizzabili per il metodo di analisi in argomento:

- *multi-criteria decision analysis* (analisi multicriterio - MCDA)
- *relative gross profit* (utile lordo relativo)
- *relative profit* (utile relativo)
- *static profit* (utile statico)
- *net present value* (valore attuale netto - NPV)
- *dynamic payback period* (tempo di ritorno dinamico)
- *levelized cost of carbon abatement* (costo di riduzione delle emissioni di carbonio - LCCA).

3.3.1. Multi-Criteria decision analysis (MCDA)

Il metodo di valutazione multicriterio (MCDA), è un metodo qualitativo che consente di valutare un progetto tenendo in considerazione aspetti eterogenei, particolarmente utile per attribuire al progetto d'impresa un valore che comprenda criteri di tipo ambientale, economico, sociale e tecnologico in un unico indice. Nell'applicazione di questa metodologia al contesto del riciclo chimico, è possibile individuare tre fasi principali¹⁵:

- 1) *identificazione dei criteri significativi di valutazione*: in questa prima fase vengono scelti gli elementi di giudizio essenziali per l'esame del processo e a ciascun criterio viene assegnato un peso proporzionale alla sua rilevanza/criticità;
- 2) *valutazione quantitativa*: in questa fase a ciascun criterio viene assegnato un punteggio in funzione delle condizioni di contesto in cui si colloca il processo in valutazione;
- 3) *calcolo dell'indicatore aggregato*: Nell'ultima fase si ricava un indice aggregato come somma dei prodotti dei punteggi assegnati ai criteri per il relativo peso.

L'analisi multicriterio è uno strumento certamente adeguato nel confronto di alternative in una fase iniziale del processo decisionale in cui è necessario selezionare le ipotesi di investimento più favorevoli, poiché permette di ricondurre molteplici elementi di giudizio, relativamente

¹⁵ SERNA, J. et al. *Multi-criteria decision analysis for the selection of sustainable chemical process routes during early design stages*. Chemical Engineering Research and Design, 2016, 113, pp. 28–49.

semplici, ad un unico indice ponderato, il cui valore esprime le potenzialità della tecnologia considerata.

3.3.2. Relative gross profit

Il *relative gross profit* è un indicatore normalizzato, basato sul calcolo di flussi di cassa, utilizzato nella prima fase di valutazione di una nuova tecnologia per confronto con una tecnologia di riferimento (*benchmark*). Secondo Buchner et al. (2018), risulta più appropriato per tecnologie con TRL pari a 2, per il fatto che a tale livello non si dispone di una progettazione dettagliata del processo in esame e la valutazione viene effettuata sfruttando dati desunti dalla teoria delle reazioni chimiche su cui si fonda il ciclo produttivo.

La formula proposta da Buchner et al. (2018) per il calcolo del *relative gross profit* è la seguente:

$$P_{gr} = \frac{\Pi_p - (\Pi_{mat} + \Pi_{en})}{\Pi_{mat} + \Pi_{en}}$$

Dove:

- Π_p rappresenta il valore economico dei prodotti ottenuti
- Π_{mat} rappresenta il costo delle materie prime
- Π_{en} rappresenta il costo dell'energia necessaria

Questi valori sono ottenuti moltiplicando le quantità stimate per la realizzazione del processo in esame o del processo *benchmark*, in un tempo di riferimento, per i rispettivi prezzi di mercato.

Il risultato è un dato adimensionale che fornisce un'indicazione di efficienza e quindi informazioni di massima sulla remuneratività di un progetto, che si dimostra particolarmente utile nella comparazione tra una tecnologia emergente e un processo di riferimento.

Tuttavia, trattandosi di una stima semplificata, il *relative gross profit* risulta utile soltanto in fase di selezione delle tecnologie più promettenti, poiché non include alcuni parametri di rilievo come le spese di investimento (CAPEX) e i costi operativi indiretti.

3.3.3. Relative profit

Il *relative profit* è un indicatore adatto per valutare processi caratterizzati da un TRL pari a 3, dal momento che a partire da questo livello inizia lo sviluppo concettuale del progetto, rendendo disponibili ulteriori dati utili per la valutazione economica.

Diversamente dal *relative gross profit*, il quale include solo i costi variabili di materie prime ed energia, il *relative profit* considera anche le spese di investimento per immobilizzazioni (*capital expenditures*: CAPEX) e le spese di esercizio (*operational expenditures*: OPEX).

Secondo Buchner et al. (2018) l'indicatore normalizzato in esame può essere calcolato come:

$$P_{rel} = \frac{\Pi_p - \Pi_{op} - \frac{CapEx}{n * K}}{\Pi_{op} + \frac{CapEx}{n * K}}$$

Dove, con riferimento e all'unità di massa:

- Π_p rappresenta il valore economico dei prodotti ottenuti (ricavo specifico, €/t)
- Π_{op} rappresenta i costi operativi (OPEX, in €/t)
- $\frac{CapEx}{n * K}$ rappresenta, in €/t, una stima delle spese di investimento (CAPEX) divise per la vita utile del progetto (n) e la potenzialità produttiva (K) espressa in tonnellate di materiale lavorabile all'anno

Il risultato è un indicatore adimensionale più avanzato rispetto al *relative gross profit*, poiché tiene conto anche del peso degli investimenti iniziali. Nonostante ciò, è comunque considerato un indicatore utile nelle fasi preliminari di valutazione, dal momento che non fornisce alcuna indicazione sul profitto totale che potrebbe essere ottenuto tramite l'applicazione della tecnologia per il riciclo chimico in esame.

3.3.4. Static profit

A differenza del *relative gross profit* e del *relative profit*, lo *static profit* è un indicatore che fornisce una stima del profitto ottenibile tramite un investimento nella tecnologia per il riciclo chimico in esame.

Questo indicatore è adatto per l'analisi di processi con un TRL pari a 4, poiché a partire da questo livello c'è una conoscenza sufficiente del mercato della tecnologia in esame.

La formula proposta da Buchner et al. (2018) per il calcolo di questo indicatore è la seguente:

$$P_{stat} = nV \left(\Pi_p - \Pi_{op} - \frac{CapEx}{nV} \right)$$

Dove:

- P_{stat} è il valore in € del profitto statico atteso
- Π_p rappresenta il valore economico unitario dei prodotti ottenuti in €/t

- Π_{op} rappresenta i costi operativi unitari (OPEX) in €/t
- $\frac{CapEx}{nV}$ rappresenta, in €/t, una stima delle spese di investimento (CAPEX) divise per gli anni di vita utile del progetto (n) e il volume annuo di vendite del mercato di riferimento (V) espresso in tonnellate/anno

Lo *static profit* offre quindi una stima di profitto in valore assoluto, per la quale è necessaria una conoscenza dettagliata del mercato a cui la tecnologia in esame si riferisce, per poterne studiare il potenziale.

Tuttavia, lo *static profit* non risulta uno strumento completo di supporto alle decisioni di investimento, dal momento che i costi di investimento non sono attualizzati, non considerando svalutazioni dovute all'inflazione e offrendo una stima semplificata del profitto ottenibile.

3.3.5. Net present value (NPV)

Il *net present value* (NPV) è un indicatore finanziario più complesso, che misura il valore attualizzato dei flussi di cassa generati da un investimento nel tempo.

Il NPV è classificato come un indicatore dinamico, a differenza degli indicatori analizzati precedentemente, che rientrano nella categoria degli indicatori statici.

Un indicatore si definisce dinamico quando tiene conto del fattore temporale, considerando le svalutazioni del denaro causate dall'inflazione.

Per quanto riguarda l'applicazione del NPV al riciclo chimico, esso è adatto per la valutazione di progetti con un TRL pari a 5 o 6. Infatti, a partire dal TRL 5 la tecnologia ha raggiunto un livello di maturità tale da poter stimare uno scenario più completo, includendo anche il tasso di interesse e l'attualizzazione degli investimenti.

La formula proposta da Buchner et al. (2018) per il calcolo del Net Present Value è la seguente:

$$NPV = \sum_{t=0}^n \frac{V_t(\Pi_p - \Pi_{op})_t - CapEx_t}{(1+i)^t}$$

Dove:

- NPV è il valore attuale netto espresso in €
- t rappresenta l'anno dell'investimento, che può variare tra 0 e la vita utile del progetto (n)
- V_t rappresenta il volume di produzione al tempo t, in tonnellate/anno
- Π_p rappresenta il valore economico specifico dei prodotti ottenuti al tempo t, in €/t
- Π_{op} rappresenta i costi operativi specifici (OPEX) al tempo t, in €/t

- $CapEx_t$ rappresenta la quota di spese di investimento di competenza dell'anno t , in €/anno
- i rappresenta il tasso di interesse

Il *net present value* è quindi la somma di tutti i flussi di cassa attualizzati al tempo t ; pertanto, richiede stime accurate dei flussi futuri per l'intero periodo di investimento.

Il risultato finale viene interpretato come il valore netto creato o distrutto dall'investimento: nel caso in cui NPV sia positivo il progetto viene considerato redditizio; nel caso sia negativo il progetto non produce un valore economico tale da giustificare l'investimento.

3.3.6. Dynamic payback period

Il *dynamic payback period* è un indicatore finanziario, definito da Keller et al. (2022) come: “.... il periodo di tempo necessario per recuperare l'investimento iniziale in un impianto di riciclaggio chimico considerando il valore temporale del denaro”.

Da questa definizione emerge chiaramente il motivo per cui il *dynamic payback period* è classificato come un indicatore dinamico, dal momento che non considera soltanto la differenza tra costi e ricavi annui ma include l'attualizzazione dei flussi di cassa, rendendo l'analisi più efficace perché aderente alla realtà economico-finanziaria.

Risulta altresì chiara la stretta correlazione tra questo indicatore e il *net present value*, in quanto è il tempo minimo per cui la somma di tutti i flussi di cassa attualizzati (NPV) sia maggiore o uguale a zero.

La formula per il calcolo di questo indicatore è la seguente:

$$t_{payback,dyn} = t_{min} \text{ for } \left(\sum_{t=0}^n \frac{V_t(\Pi_p - \Pi_{op})_t - CapEx_t}{(1+i)^t} \geq 0 \right)$$

Che può essere riscritta come:

$$t_{payback,dyn} = t_{min} \text{ for } (NPV \geq 0)$$

Così come il *net present value*, questo indicatore si presta per la valutazione di tecnologie per il riciclo chimico con un TRL pari o superiore a 5 e consente, concretamente, di valutare la praticabilità economica di un progetto.

Infatti, un periodo più breve è considerato favorevole mentre un periodo più lungo può risultare in una minore attrattività economica.

3.3.7. Levelized cost of carbon abatement (LCCA)

Il *levelized costs of carbon abatement* si definisce come un indicatore integrato, poiché permette di valutare contemporaneamente aspetti economici e aspetti ambientali.

In particolare, l'LCCA prende in considerazione la riduzione delle emissioni di CO₂, condizione favorevole nel contrasto al cambiamento climatico.

Anche questo indicatore richiede stime affidabili dell'impatto economico e ambientale del progetto in esame, pertanto risulta appropriato per tecnologie con un TRL pari o superiore a 5.

La formula proposta da Keller et al. (2022) per il calcolo dell'LCCA è la seguente:

$$LCCA = \sum_{n=1}^t \frac{\sum_{k=1}^{10} (CF_{n,k} - CFR_{n,k})}{CA_n}$$

Dove:

- $CF_{n,k}$ rappresenta il cash flow annuale della tecnologia in esame, in €/anno
- $CFR_{n,k}$ rappresenta il cash flow annuale della tecnologia di riferimento, in €/anno
- CA_n rappresenta l'abbattimento annuale di emissioni di CO₂ in t/anno
- t rappresenta la vita utile del progetto, in anni

Il risultato è espresso in euro per tonnellata di CO₂ evitata e va interpretato considerando la tecnologia di riferimento (*benchmark*), che nel caso del riciclo chimico può essere la termovalorizzazione o il riciclo meccanico.

Se l'LCCA risulta positivo, allora la tecnologia in esame consente una riduzione delle emissioni ma a un costo più elevato; pertanto, risulta utile nel momento in cui bisogna valutare quanto si è disposti a pagare per ottenere un beneficio ambientale.

Il parametro può risultare invece negativo in due casi distinti: i) se il numeratore è negativo, allora la tecnologia analizzata non è vantaggiosa solo dal punto di vista ambientale ma anche dal punto di vista economico rispetto alla tecnologia di riferimento, consentendo di generare profitti e ridurre le emissioni contemporaneamente; ii) se il denominatore è negativo, allora le emissioni aumentano e l'indicatore viene considerato non significativo.

3.4. I dati tecnici ed economici per la valutazione di tecnologie di riciclo chimico

Come illustrato nei paragrafi precedenti, l'utilizzo di indicatori di prestazione economica del processo esaminato presuppone la conoscenza della struttura dei relativi costi, la cui affidabilità e precisione influenzano direttamente l'esito delle valutazioni di convenienza dell'investimento. Per questa ragione è importante svolgere le analisi di costo con la massima accuratezza,

ricorrendo ad approcci metodologici specifici, reperibili in letteratura, sufficientemente consolidati e sviluppati per applicazioni nel settore produttivo di interesse, che per il presente studio è quello dell'industria chimica. Utili indicazioni in questo senso sono offerte da Brennan (2020).

Buchner et al. (2018) propongono uno schema generale di analisi dei costi dei prodotti destinati alla vendita, basato su un'articolazione tra costi di produzione, suddivisi in costi di capitale e costi operativi, e spese generali. A loro volta, i costi di capitale di un progetto di investimento possono essere ripartiti in più voci, associate al capitale operativo, agli acquisti per impianti e macchinari direttamente riconducibili al processo (*Inside Battery Limit, IBL*) ovvero ad esso complementari come infrastrutture logistiche o centrali elettriche o antincendio (*Outside Battery Limit, OBL*), alle spese di progettazione e installazione, alla fase di start-up, ecc., come riportato nelle seguenti figure (figura 10, figura 11).

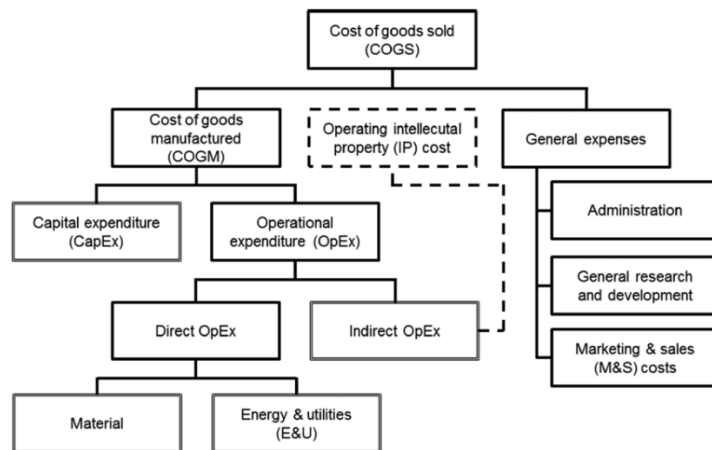


Figura 10: Struttura tipica dei costi di beni destinati al mercato. Buchner et al. (2018)

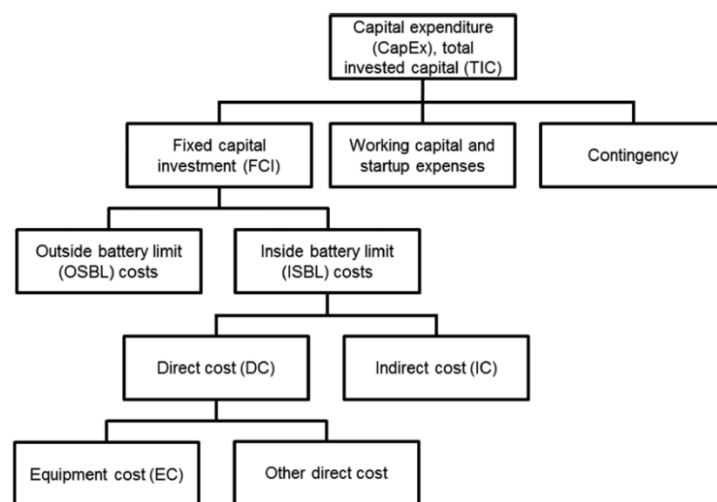


Figura 11: Articolazione dei costi di investimento (capitale totale investito). Buchner et al. (2018)

Per la classificazione dei costi operativi, generati dall'esercizio dell'attività produttiva, Brennan (2020) fornisce la seguente formula con riferimento al costo per unità di prodotto:

$$C = \sum R_i r_i + \sum E_j g_j + (Mm)/QU + (kl)/QU$$

in cui:

- C: costo di produzione specifico in €/t
- R: consumo specifico di materia prima in tonnellate per tonnellata di prodotto
- r: costo unitario della materia prima i-esima
- E: consumo della risorsa j-esima (ad es. MWh di elettricità per tonnellata di prodotto)
- g: costo unitario della risorsa j-esima in €/MWh
- M: numero di dipendenti per tonnellata di prodotto
- m: costo anno medio lordo di un dipendente in €/anno
- k: fattore di calcolo dei costi proporzionali al capitale fisso investito
- I: capitale fisso investito in €
- P: produzione effettiva annua in tonnellate
- Q: potenzialità produttiva annua in tonnellate
- U: fattore di utilizzo della capacità produttiva, pari a P/Q

Per un impianto progettato per una determinata capacità produttiva, la stessa espressione può servire per evidenziare la distinzione tra costi fissi, non dipendenti dalla quantità di prodotto realizzata, e costi variabili in funzione di quest'ultima:

$$\begin{array}{lcl} C(QU) & = & \sum (R_i r_i)(QU) + \sum (E_j g_j)(QU) + \frac{Mm}{\text{Personnel costs}} + \frac{kl}{\text{Capital-dependent costs}} \\ \text{Production cost} & & \text{Raw materials costs} \quad \text{Utilities costs} \end{array}$$

In cui ciascun termine è espresso in €/anno e i costi variabili sono rappresentati dai costi delle materie prime e di energia (*utilities*) impiegate per realizzare i prodotti, mentre il personale e i costi proporzionali al capitale sono da considerare fissi. A questo punto è altrettanto importante un'altra distinzione, secondo la quale vi sono costi unitari che variano in funzione della dimensione impiantistica o scala del sistema di produzione, in quanto risentono di economie dimensionali. Si tratta in generale dei costi di manodopera e di capitale, mentre i costi unitari delle materie prime e delle risorse energetiche tendono a rimanere stabili al variare della potenzialità produttiva, anche se in alcuni casi maggiori quantità nell'approvvigionamento consentono di ottenere prezzi di fornitura inferiori.

Come si è visto, la quarta fase del metodo TEA consiste nella costruzione di un inventario di dati tecnici ed economici utili per calcolare gli indici di redditività del processo produttivo da realizzare. Secondo Keller et al. (2022), le informazioni da raccogliere possono essere divise in due macrocategorie:

- 1) **dati tecnici e organizzativi di processo:** questi dati includono tutti gli aspetti qualitativi e quantitativi che riguardano il progetto in esame, che possono dare origine a ricavi o costi (come, ad esempio, le caratteristiche progettuali dell'impianto, le esigenze di approvvigionamento, di manodopera o di natura gestionale);
- 2) **dati economici o di mercato:** questi dati includono tutti gli aspetti legati al mercato di riferimento della tecnologia che caratterizza il processo in esame (come il costo orario della manodopera, quello dei materiali di consumo, il prezzo delle materie prime necessarie per realizzare il processo, il prezzo di vendita dei materiali prodotti, ecc.).

In questa fase di ricerca di dati e informazioni rileva il TRL della tecnologia in esame, dal momento che sono richiesti diversi tipi di dati per differenti gradi di sviluppo industriale del processo considerato, come è evidenziato nella tabella riportata in precedenza (Tab 2).

3.4.1. Dati tecnici e organizzativi di processo

Al fine di redigere correttamente un inventario tecnico-organizzativo del processo, è opportuno conoscere i vari tipi di dati che lo compongono e la metodologia per raccogliarli, tenendo sempre in considerazione il TRL della tecnologia di riciclo chimico che si intende analizzare.

Tipiche informazioni utili nella definizione del quadro informativo sono le seguenti, brevemente esaminate nel prosieguo:

- indicazioni qualitative fornite da esperti del settore;
- bilanci di massa ed energia dettagliati e costi associati;
- specifiche di progettazione e dimensionamento dell'impianto;
- ulteriori informazioni operative (ad es. esigenze di personale).

Le valutazioni qualitative rivestono un ruolo fondamentale nelle fasi iniziali di sviluppo del processo di riciclo, in particolare per tecnologie con un TRL pari a 1. Questo poiché ad un basso livello di maturità tecnologica non sono disponibili dati quantitativi dettagliati.

Le analisi qualitative si basano principalmente su interviste a esperti del settore applicativo di riferimento che, grazie alle conoscenze e alle esperienze pregresse, consentono di mettere in risalto criticità e punti di forza del processo proposto, come l'appropriatezza delle soluzioni individuate o la adattabilità o efficienza rispetto alla qualità e alle proprietà delle materie prime disponibili.

Pur non essendo paragonabili a stime basate su dati numerici, le analisi qualitative forniscono una prospettiva essenziale nella prima fase del processo decisionale, consentendo di definire le

priorità per la raccolta dei dati quantitativi necessari nelle fasi successive dell'analisi tecnico-economica.

I bilanci di massa ed energia consentono di quantificare i flussi di energia e di materia prima in entrate e il prodotto risultante dal processo di riciclo chimico in esame. Nel caso di tecnologie con un basso TRL, possono essere elaborati studiando la natura e le condizioni di svolgimento delle reazioni chimiche elementari coinvolte nel processo.

A livelli superiori di TRL le stime teoriche dovrebbero essere sostituite o integrate con dati reali provenienti da esperimenti di laboratorio o da impianti pilota in piccola scala. In ogni caso, dai bilanci si ottengono i dati quantitativi relativi al fabbisogno di materie prime (*feedstock*), di energia (elettrica, termica) e alla quantità di prodotto producibile nell'unità di tempo, informazioni dalle quali derivano le stime di una parte importante dei costi variabili.

I bilanci di massa ed energia devono essere accurati non solo dal punto di vista economico, ma anche dal punto di vista fisico: prima di utilizzarli nei processi decisionali è opportuno effettuare un “*sanity check*”¹⁶ che consiste nella verifica da parte di esperti che i bilanci non siano in conflitto con le leggi fisiche.

Le specifiche di progettazione del sistema di produzione comprendono la selezione e la configurazione dei principali componenti impiantistici. Oltre alla scelta dei componenti, al momento della progettazione avviene la pianificazione della capacità complessiva dell'impianto, la quale può essere determinata sulla base di scenari teorici o di applicazioni pratiche.

Questa fase consente di ottenere un ulteriore elemento per la stima dei costi in conto capitale (CAPEX), in modo da stimare in maniera più accurata gli investimenti richiesti, oltre a consentire di valutare la fattibilità tecnica del processo di riciclo chimico in esame.

Per completare un'analisi tecnico-economica per un impianto di riciclo chimico è necessario includere alcune importanti informazioni economiche aggiuntive, così da poter stimare con maggiore precisione i costi operativi dell'impianto in analisi (OPEX). Di tali dati aggiuntivi è possibile individuare due categorie: i costi operativi di produzione, ovvero i costi direttamente legati al trattamento della materia prima, e i costi operativi complementari, non direttamente attinenti alla produzione, ma comunque ad essa riconducibili secondariamente.

¹⁶ A. Zimmermann, J. Wunderlich, G. Buchner, L. Müller, K. Armstrong, S. Michailos, A. Marxen, H. Naims, *Techno-Economic Assessment & Life Cycle Assessment Guidelines for CO2 Utilization*, Co2chem Media and Publishing LTD, Sheffield, 2018.

Dalla tabella riportata di seguito (Tab 3), tratta da Peters et al. (2004), emerge come ciascuna delle due categorie sia composta da diverse voci di costo, per ciascuna delle quali è specificata una modalità di calcolo.

Categoria di costo	Sottocategoria di costo	Voce di costo	Modalità di calcolo
Costi operativi di produzione	Costi variabili di produzione	Costi di manodopera diretta	Metodo estimativo / metodo analogico
		Costi di gestione e controllo del processo	15% dei costi di manodopera diretta
		Costi di manutenzione	6% dei costi di investimento in immobilizzazioni fisse
		Materiali di consumo	15% dei costi di manutenzione
	Costi fissi	Tasse sui beni in proprietà	2% dei costi di immobilizzazioni fisse
		Assicurazioni	1% dei costi di immobilizzazioni fisse
	Spese generali della gestione operativa	Spese per la sicurezza sul lavoro, consulenze, missioni, ecc.	50% della somma dei costi di manodopera diretta e dei costi di gestione e controllo del processo
Costi operativi complementari non attinenti alla produzione		Costi amministrativi	25% dei costi di manodopera diretta

Tab 3: Costi operativi di produzione e costi operativi complementari. Peters et al. (2004)

Entrando nel merito, si possono analizzare separatamente le due categorie e le voci di costo che le compongono:

1) Costi operativi di produzione:

- *costi di manodopera diretta*: comprendono le retribuzioni corrisposte al personale adibito al processo di riciclo chimico in valutazione, per il cui calcolo è quindi necessario stimare il numero di lavoratori e il totale delle ore di impiego.

Per quanto concerne la stima delle ore è possibile utilizzare un metodo estimativo o un metodo analogico: con il metodo estimativo si calcolano le ore di manodopera necessarie per ciascuna fase del processo produttivo sulla base della descrizione dell'impianto e di dati empirici che esprimono esigenze tipiche di determinate installazioni e, di conseguenza, la dotazione di personale per lo svolgimento dell'intero ciclo operativo.

Il metodo analogico utilizza, invece, dati provenienti da impianti simili già realizzati; quindi, il fabbisogno di manodopera dell'impianto in esame viene calcolato ridimensionando i dati dell'impianto esistente in base al rapporto tra le capacità produttive. Il risultato può essere ulteriormente corretto per tener conto dell'effetto delle economie di scala mediante un fattore di elevazione a potenza compreso tra 0,2 e 0,25.

Dopo aver stimato le ore di manodopera necessarie tramite uno di questi due approcci, è possibile calcolare il costo di manodopera diretto annuo applicando i salari previsti dai contratti collettivi di lavoro del settore chimico;

- *costi di gestione e controllo del processo*: comprendono le spese legate alla gestione del processo produttivo, come il coordinamento del personale. Questa categoria di costo non riguarda direttamente il trattamento della materia prima; tuttavia, data la stretta correlazione dal punto di vista organizzativo con i costi di manodopera diretta, si suggerisce di stimare i costi di gestione e controllo del processo al 15% dei costi di manodopera diretta;
- *costi di manutenzione*: ne fanno parte i costi relativi agli interventi programmati e non programmati per la riparazione dei macchinari, al fine di garantire il corretto funzionamento del processo. Una stima preliminare affidabile prevede di stimare questi costi al 6% del capitale fisso investito;
- *costi per materiali di consumo*: comprendono i costi legati all'acquisto di tutti i materiali che non sono direttamente impiegati nella trasformazione chimica, come lubrificanti o reagenti chimici per test di laboratorio. Per stimare i costi annuali per questa categoria è possibile considerare il 15% dei costi di manutenzione;
- *tasse sui beni di proprietà*: le tasse sui beni variano a seconda del paese in cui è costruito l'impianto di riferimento; tuttavia, per valutazioni preliminari è possibile stimare questi costi al 2% del capitale fisso investito;
- *assicurazioni*: i costi assicurativi dipendono dalla tipologia di processo di riciclo chimico e dalla presenza di dispositivi di sicurezza nel sito produttivo. Nella letteratura tecnica viene adottata una stima pari all'1% del capitale fisso investito;
- *spese generali della gestione operativa*: comprendono i costi indirettamente collegati alle operazioni di riciclo chimico, come le spese per la sicurezza sul lavoro e la prevenzione degli incendi, la mensa e altri servizi di supporto per il personale. Dal momento che questi costi hanno una stretta correlazione con la presenza di manodopera, è possibile stimarli al 50% della somma tra i costi di manodopera diretta e i costi di gestione e controllo del processo.

2) Costi operativi complementari non attinenti alla produzione:

- *costi amministrativi*: comprendono i costi non attinenti al processo di produzione per lo svolgimento di attività organizzative, tra cui la gestione manageriale, le relazioni pubbliche e le funzioni finanziarie svolte dal personale amministrativo e dirigenziale.

La letteratura a riguardo suggerisce di stimare i costi amministrativi al 25% dei costi di manodopera diretta.

3.4.2 Dati economici o di mercato

I dati di questo tipo forniscono informazioni specifiche relative al contesto in cui la tecnologia di riciclo chimico in analisi viene applicata. I dati principali che compongono questa categoria sono i seguenti:

- tariffe di conferimento (*gate fees*) dei rifiuti da trattare all'impianto di riciclo
- prezzi delle forniture di processo
- prezzi dei prodotti finiti
- prezzi dei componenti dell'impianto
- costi della manodopera.

I dati di inventario costituiscono quindi un ponte tra l'analisi tecnica e la realtà economica del progetto, permettendo di costruire scenari finanziari realistici e comparabili per diverse soluzioni impiantistiche. Risulta pertanto opportuno approfondirne il significato.

Le tariffe di acquisizione (*gate fees*) dei rifiuti da sottoporre al processo di riciclo chimico corrispondono al corrispettivo che i produttori di rifiuti versano agli impianti di trattamento. Le tariffe variano a seconda del tipo di rifiuto e dell'area geografica di riferimento e possono assumere un valore positivo se il gestore dell'impianto riceve un pagamento per trattare il rifiuto, o un valore negativo, che invece segnala che il rifiuto possiede un valore commerciale positivo prima del trattamento, e questo avviene per flussi di materiale particolarmente puri come il polietilene o il polipropilene e in questo caso è l'impianto a sostenere un costo di approvvigionamento.

La stima delle *gate fees* è fondamentale per valutare le sostenibilità economica del processo, tenendo in considerazione la variabilità del prezzo delle materie prime, e può risultare utile raccogliere dati aggiuntivi attraverso interviste con esperti e operatori del settore per valutare se i produttori di rifiuti sono disposti a pagare una tariffa maggiore per un trattamento di riciclo chimico, in modo da poter applicare fattori di sovrapprezzo qualora siano necessari.

Con “forniture di processo” ci si riferisce a tutti i materiali necessari per il corretto svolgimento del processo di riciclo chimico diversi dai rifiuti, i quali sono considerati materie prime. Tra questi è possibile annoverare l'energia elettrica, i combustibili e i catalizzatori o altri reagenti e additivi chimici.

Questi elementi rappresentano una parte importante dei costi operativi e per ottenere una stima affidabile si può fare riferimento a banche dati nazionali e internazionali che riportano volumi di scambio e valore commerciale delle forniture di processo. In particolare, per quanto riguarda i prezzi dell'energia, è possibile consultare i rapporti periodicamente pubblicati dalla Commissione Europea.

I prodotti risultanti dal processo di riciclo chimico comprendono generalmente idrogeno, monomeri, gas di sintesi e idrocarburi complessi. La stima dei prezzi di vendita di questi prodotti è fondamentale per poter valutare la remuneratività del processo e secondo Buchner et al. (2018), per stimare correttamente i prezzi dei prodotti finiti è necessario seguire tre passaggi:

- *definizione del benchmark*: consiste nella individuazione dei prodotti che sul mercato sono in competizione con i prodotti risultanti dal processo di riciclo chimico. Generalmente ne fanno parte i prodotti chimici di origine fossile;
- *analisi dei prezzi del benchmark*: in questa fase avviene lo studio dei prezzi di vendita dei prodotti sostituti, a questo proposito è possibile consultare banche dati ufficiali come il PRODCOM¹⁷ a livello europeo;
- *stima del valore di mercato dei prodotti finiti*: nella fase finale si procede alla stima dei prodotti finali ottenuti tramite riciclo chimico, partendo dai prezzi dei benchmark e aggiustandoli sulla base di informazioni di mercato, come la disponibilità a pagare un sovrapprezzo per prodotti derivanti da processi sostenibili, come quelli del riciclo chimico.

I prezzi dei singoli componenti che compongono l'impianto comprendono il costo dei reattori, degli scambiatori di calore e dei nastri trasportatori, del *piping*, ecc., che possono essere ricavati da documentazione prodotta dagli operatori del settore, da fonti pubbliche e report aziendali. Tuttavia, al fine di ottenere una stima accurata è necessario considerare, oltre ai costi dei singoli componenti, il costo per l'assemblaggio e l'avviamento dell'impianto completo.

Per effettuare tale stima è possibile un duplice approccio, utilizzando il metodo estimativo o il metodo analogico (descritti nel paragrafo 3.4.5. per la stima dei costi di manodopera diretta).

Il metodo estimativo parte dalla stima del capitale fisso investito (*Fixed Capital Investment*, FCI), che comprende sia i costi diretti dei componenti fisici, sia i costi indiretti per la progettazione (*Inside Battery Limits*, IBL), che i costi relativi all'utilizzo di infrastrutture esterne come strade e linee ferroviarie (*Outside Battery Limits*, OBL). In particolare, i costi IBL vengono

¹⁷ Acronimo di PRODUCTION COMMUNAUTAIRE, è un database dell'Unione Europea che raccoglie e pubblica annualmente dati sulla produzione industriale dei Paesi membri. Per ciascun prodotto, fornisce informazioni su quantità prodotte, valori di produzione, e dati di commercio intra-UE ed extra-UE.

stimati tramite l'analisi dei progetti per la realizzazione dell'impianto e i costi OBL sono stimati con una percentuale che può variare tra il 5% e il 100% dei costi IBL a seconda del tipo di impianto.

Dopo aver stimato il capitale fisso investito, vengono considerati altri costi accessori, tra cui: i) i costi di localizzazione dell'impianto, che possono variare a seconda che si tratti di un'area da riqualificare o di una nuova costruzione; ii) le spese di avviamento, ovvero i costi per svolgere le attività per rendere operativo l'impianto, che possono variare tra l'1% e il 10% del FCI; iii) il capitale circolante, ovvero la quantità di denaro necessaria per coprire le esigenze operative iniziali (come materie prime e stipendi); iv) le spese per imprevisti, ovvero il capitale necessario per coprire eventuali spese dovute a ritardi o incidenti, che può essere stimato tra il 5% e il 15% del FCI.

Il metodo analogico è invece indicato per impianti con un TRL più elevato, a partire da 6, dal momento che per tecnologie con una maturità tale è possibile disporre di dati relativi a impianti simili già esistenti. In questo modo, come già illustrato precedentemente per la stima dei costi di manodopera diretta, è possibile adattare i dati relativi all'impianto di riferimento al nuovo impianto in analisi, basandosi sulle differenze dimensionali e di capacità produttiva dei due impianti, tenendo anche in considerazione le economie di scala.

Infine, i costi della manodopera fanno riferimento alla determinazione dei salari medi dei lavoratori nel mercato a cui si riferisce l'impianto in esame. Nel caso del riciclo chimico è possibile ottenere delle stime dei salari per i lavoratori nell'industria chimica consultando i contratti collettivi di lavoro, i cui testi sono diffusi da fonti ministeriali e dalle associazioni sindacali. Per quanto riguarda il contesto europeo, questi dati possono anche essere attinti direttamente dalla banca dati dall'EUROSTAT¹⁸.

¹⁸ L'ufficio statistico dell'Unione Europea, responsabile della raccolta, elaborazione e pubblicazione di dati statistici comparabili a livello europeo.

4 - Il riciclo chimico delle plastiche miste come alternativa al riciclo meccanico. Casi di studio.

4.1 Introduzione ai casi di studio

Al fine di comprendere meglio le potenzialità economiche ed ambientali del riciclo chimico, in questo capitolo vengono analizzati due casi di studio reali tratti dalla letteratura scientifica recente. Entrambi i casi di studio si concentrano sulla pirolisi che, come analizzato in precedenza (paragrafo 2.1.3), consente la trasformazione di plastiche eterogenee in olio di pirolisi, offrendo un'alternativa al riciclo meccanico.

Il primo caso riguarda un impianto pilota sviluppato negli Stati Uniti e modellato tramite l'applicativo di simulazione Aspen Plus® della Aspen Tech¹⁹, finalizzato allo studio di un processo di pirolisi liquida, per il quale si fornisce una valutazione di convenienza economica dell'attività di riciclo basata sul metodo TEA.

Il secondo caso di studio prende in esame un impianto belga realizzato con la tecnologia *Plast-Pyro*, che utilizza un reattore a metallo fuso come mezzo per trasferire calore in modo efficiente. L'obiettivo dell'analisi dei casi studio è quello di valutare la fattibilità tecnica ed economica di due approcci differenti al riciclo chimico, fornendo al tempo stesso un'applicazione pratica dei metodi di valutazione analizzati in precedenza, dimostrando come le analisi TEA ed LCA possano essere utilizzate per valutare concretamente le prestazioni economiche ed ambientali di impianti di riciclo chimico.

4.2 Caso studio 1: impianto di pirolisi liquida alimentato da plastiche miste (USA, 2023)

4.2.1 Contesto e composizione del feedstock

Il primo caso di studio è stato svolto nel 2023 da ricercatori della Michigan Technological University e si caratterizza per la composizione del *feedstock* (materie prime) in ingresso al processo di riciclo.

Infatti, sia i processi di riciclo meccanico che di riciclo chimico differenti dalla pirolisi richiedono tipicamente dei flussi omogenei di rifiuti selezionati e di elevata purezza, ragion per cui i centri di raccolta e prima lavorazione a monte nella filiera realizzano, ad esempio, balle di PET o HDPE non contaminate, con notevoli costi di approvvigionamento per le imprese del riciclo.

¹⁹ Un programma di simulazione di processo utilizzato dagli ingegneri chimici per progettare, analizzare e ottimizzare impianti industriali.

Il caso di studio analizza un impianto che si propone di aggirare questo problema: tramite un processo di pirolisi liquida è possibile utilizzare come *feedstock* balle di plastiche eterogenee post-consumo, identificate come *1-7 mixed plastic bale*, denominazione che deriva dalla coesistenza delle sette principali resine plastiche indicate dal codice SPI (*Society of the Plastics Industry*). La composizione media in peso del materiale, utilizzata da Kulas et al. (2023) per condurre l'analisi dell'impianto, è la seguente: il 40% è composto da PET, il 36% è composto da PP (polipropilene), il 15% è composto da PE (polietilene) e il restante 9% è composto da altri polimeri, alluminio e scarti.

Dal punto di vista economico, questa tipologia di *feedstock* è considerata vantaggiosa dal momento che ha un basso costo di mercato o, in alcuni casi, una *gate fee* negativa, dal momento che risulta problematica da gestire con tecnologie di riciclo tradizionali.

Al fine di preservare l'efficienza del processo e la qualità dei prodotti ottenuti, lo studio propone una fase di selezione preliminare per separare, dal flusso dei rifiuti da trattare, i materiali non desiderati prima dell'ingresso nel reattore di pirolisi. Questa scelta comporta inevitabilmente un aumento dei costi operativi, tuttavia permette di ottenere un olio di pirolisi di maggiore qualità e ridurre l'impatto ambientale complessivo del processo.

4.2.2 Descrizione del processo: dissoluzione, reattore di pirolisi e condensazione

Il processo analizzato da Kulas et al. (2023) è stato progettato e simulato tramite il software Aspen Plus®. La sequenza operativa include tre fasi principali, successive alla selezione preliminare delle balle di plastica mista: la dissoluzione, la pirolisi tramite un reattore e la condensazione (figura 12).

Gli output del processo sono tre: paraffina, la quale viene utilizzata come solvente nella fase di dissoluzione, olio di pirolisi, che rappresenta il prodotto principale del processo, e gas, che rappresenta il prodotto secondario.

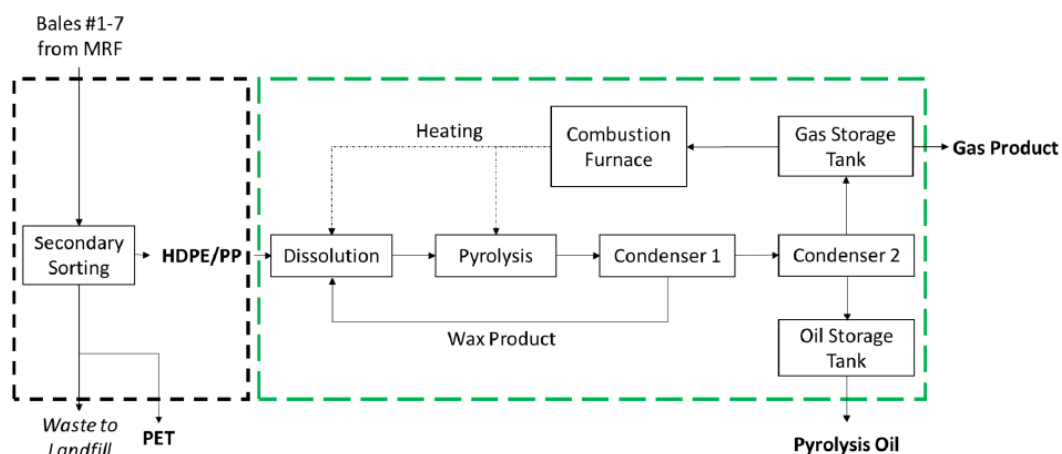


Figura 12: Sequenza operativa del processo di pirolisi liquida. Kulas et al. (2023)

Nella fase di dissoluzione, il materiale plastico selezionato viene trasferito in un serbatoio di dissoluzione, dove viene miscelato con la paraffina prodotta dal processo stesso, che agisce da solvente. In questo modo è possibile garantire un trasporto regolare e continuo verso il reattore di pirolisi, evitando shock termici. Gli autori dello studio hanno stimato un tempo di circa sei ore per il completamento della fase di dissoluzione.

Successivamente, la miscela fluida ottenuta dal processo di dissoluzione giunge al reattore di pirolisi che opera a 600°C, l'obiettivo operativo è quello di ottenere una resa di cera pari al 50% del peso del *feedstock*, in modo tale da mantenere in equilibrio il riciclo interno del solvente, in quanto con una produzione inferiore di paraffina sarebbe necessario l'utilizzo di un solvente esterno mentre con una resa superiore la produzione di olio di pirolisi non sarebbe massimizzata.

I prodotti della reazione sono vapori di composti alchenici, che passano attraverso un sistema di condensazione in due fasi: il primo condensatore opera a 135°C e consente il recupero della paraffina, il secondo condensatore opera a 25°C e consente di separare l'olio di pirolisi dal gas non condensabile, che viene riutilizzato per fornire calore all'intero processo

Questa configurazione consente di massimizzare l'efficienza del processo e di ottimizzare la resa dell'olio di pirolisi, riducendo al contempo la dipendenza da solventi e catalizzatori esterni. Il riciclo interno della paraffina rappresenta un elemento innovativo che distingue questo processo da altri sistemi di pirolisi presenti in letteratura.

4.2.3 Analisi tecnico-economica (TEA)

L'analisi tecnico-economico (TEA) è stata condotta con un modello di *Discounted Cash Flows* (DCF), attualizzando i flussi di cassa applicando un tasso di sconto del 20% su un orizzonte temporale di 20 anni. L'obiettivo dell'analisi è determinare il *Minimum Selling Price* (MSP) dell'olio di pirolisi, ovvero il prezzo minimo per cui il *Net Present Value* (NPV) dell'impianto sia pari a zero. Esso, quindi, rappresenta la soglia inferiore di remuneratività dell'investimento.

Assumendo una capacità operativa di 84.000 tonnellate/anno di HDPE e PP ottenuti dalla selezione preliminare del *feedstock*, il modello stima il capitale fisso investito (*Fixed Capital Investment*, FCI) includendo i costi dei serbatoi di dissoluzione, del reattore di pirolisi, dei condensatori e di tutte le attrezzature necessarie per il funzionamento dell'impianto.

Successivamente gli autori dello studio forniscono una stima dei costi operativi (OPEX), con una distinzione tra costi operativi fissi e costi operativi variabili.

I costi operativi fissi (*Fixed Costs of Production*), includono la manodopera (tre operatori per 50.000 \$/anno), la manutenzione, gli affitti, le assicurazioni e le tasse.

I costi operativi variabili (*Variable Operating Costs*), includono il costo del *feedstock* e dei servizi ausiliari. Relativamente al *feedstock*, il costo delle *1-7 mixed plastic bales* è pari a 20 \$/tonnellata, mentre la seconda selezione per isolare HDPE e PP ha un costo di 100 \$/tonnellata. Dal momento che i materiali selezionati rappresentano il 50% del peso delle balle di plastica mista, il costo unitario totale del *feedstock* è pari a 240 \$/tonnellata, che risulta vantaggioso rispetto all'acquisto diretto di plastiche pure dai centri di prima lavorazione, cui corrisponde una spesa di circa 400 \$/tonnellata. Le spese legate ai servizi ausiliari comprendono invece l'elettricità, l'acqua di raffreddamento e lo smaltimento degli scarti del processo.

Dallo studio emerge come il MSP per l'olio di pirolisi sia di 592 \$/tonnellata, leggermente superiore al prezzo della nafta fossile (561 \$/tonnellata), che rappresenta il prodotto alternativo sul mercato. Si nota come l'influenza principale sul MSP è ascrivibile al costo della materia prima, la quale rappresenta circa il 93% dell'MSP totale (553 \$ per tonnellata di olio). Altre spese significative sono rappresentate dal FCI (39 milioni di dollari), che si riflettono sul costo unitario di produzione in rapporto alle quantità prodotte, dai costi operativi unitari fissi (derivanti da una spesa annua di 3 milioni di dollari). L'incidenza costi legati ai servizi ausiliari è invece trascurabile, grazie al riutilizzo parziale del gas prodotto. Il gas di pirolisi che non viene utilizzato per l'autoconsumo energetico viene venduto, generando ricavi per circa 18,7 milioni di dollari l'anno corrispondenti ad un ricavo unitario di circa 450 \$/tonnellata. È possibile visualizzare i vari fattori di costi nella figura seguente (figura 13):

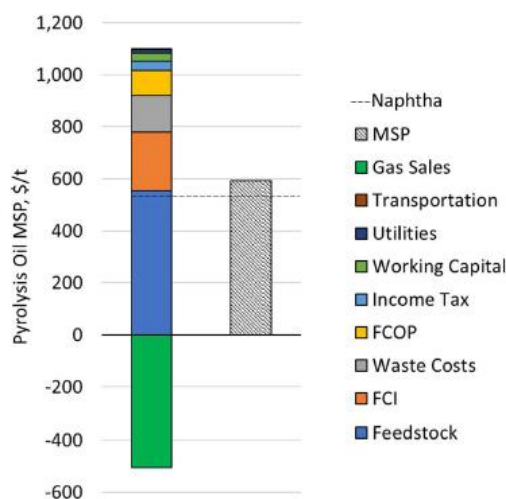


Figura 13: Suddivisione dei fattori di costo per il MSP dell'olio di pirolisi. Kulas et al. (2023)

I risultati presentati nella figura 13 sono influenzati da ipotesi specifiche a livello industriale, che devono essere considerate incerte a causa del basso TRL dell'impianto in esame. A questo proposito lo studio include anche un'analisi di sensitività, al fine di valutare l'impatto delle incertezze sui parametri economici chiave.

4.2.4 Analisi di sensitività

L'analisi di sensitività consiste nel modificare singolarmente i principali parametri di input entro un certo intervallo, così da analizzare in che modo varia il risultato economico, mantenendo costanti gli altri fattori.

Nel caso studio proposto da Kulas et al. (2023), l'indagine di sensitività è stata condotta calcolando il MSP dell'olio di pirolisi variando i parametri economici chiave in un intervallo che va dal -15% al +15%. È importante sottolineare come questo intervallo di variazione non rispecchia la vera variazione di ciascuna variabile dovuta all'incertezza, ma permette comunque di identificare le variabili la cui variazione influenza maggiormente il MSP dell'olio di pirolisi.

Lo studio è stato condotto prendendo in considerazione il prezzo di vendita del gas di pirolisi, i costi di trasporto, i costi dei servizi ausiliari, i costi operativi fissi (FCOP), i costi di smaltimento degli scarti, il capitale fisso investito (FCI), il tasso di sconto e il costo del *feedstock*.

I risultati dell'analisi sono rappresentati nella figura che segue (figura 14):

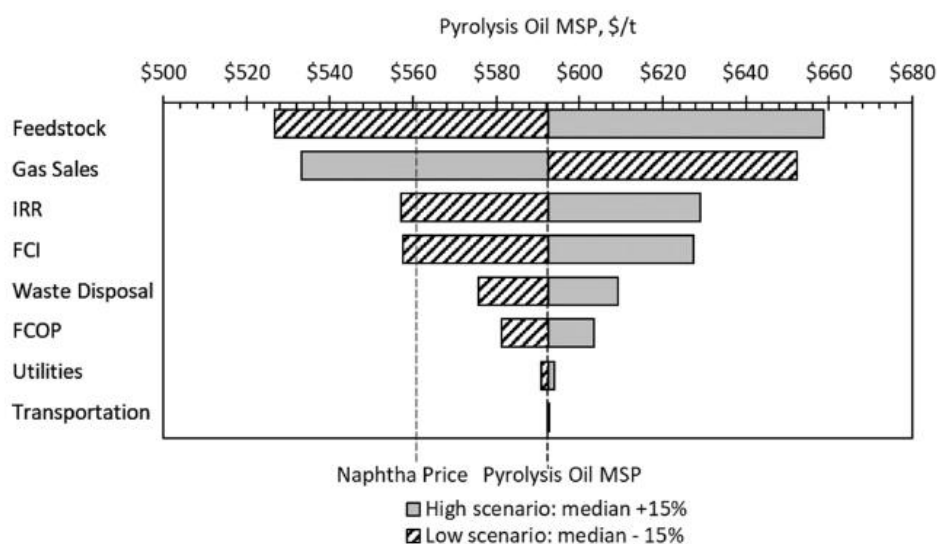


Figura 14: Analisi di sensitività per il MSP dell'olio di pirolisi. Kulas et al. (2023)

I risultati mostrano che la variabile che influenza maggiormente il MSP è il costo del *feedstock*; anche i prezzi di vendita del gas, il tasso di sconto e il capitale fisso investito esercitano un impatto rilevante, mentre il costo dei servizi ausiliari e i costi di trasporto hanno un effetto trascurabile.

In conclusione, emerge l'importanza della fase di approvvigionamento e della selezione del *feedstock*, dal momento che anche variazioni modeste nel costo delle materie prime possono influenzare la sostenibilità economica dell'investimento.

4.3 Caso studio 2: il processo PlastPyro con metallo fuso (Belgio, 2021)

4.3.1 Tecnologia impiegata e configurazione dell'impianto

Il secondo caso di studio è stato svolto da F. Riedewald et al. (2021) e analizza un impianto situato in Belgio che sfrutta la tecnologia innovativa *PlastPyro* basata su un sistema di pirolisi condotta per contatto diretto con metallo fuso, nello specifico zinco. L'impianto analizzato utilizza come *feedstock* balle di plastica mista (*Mixed Plastic Waste*, MPW), la cui composizione media considerata dai ricercatori comprende il 38,5% di polietilene (PE), il 22,5% di polipropilene, il 15,3% di polietilene tereftalato (PET) e il restante 24% di altri polimeri e scarti. La capacità operativa ammonta a 40.000 tonnellate/anno, con l'obiettivo di massimizzare la produzione di olio di pirolisi. Il funzionamento dell'impianto è illustrato nello schema seguente (figura 15):

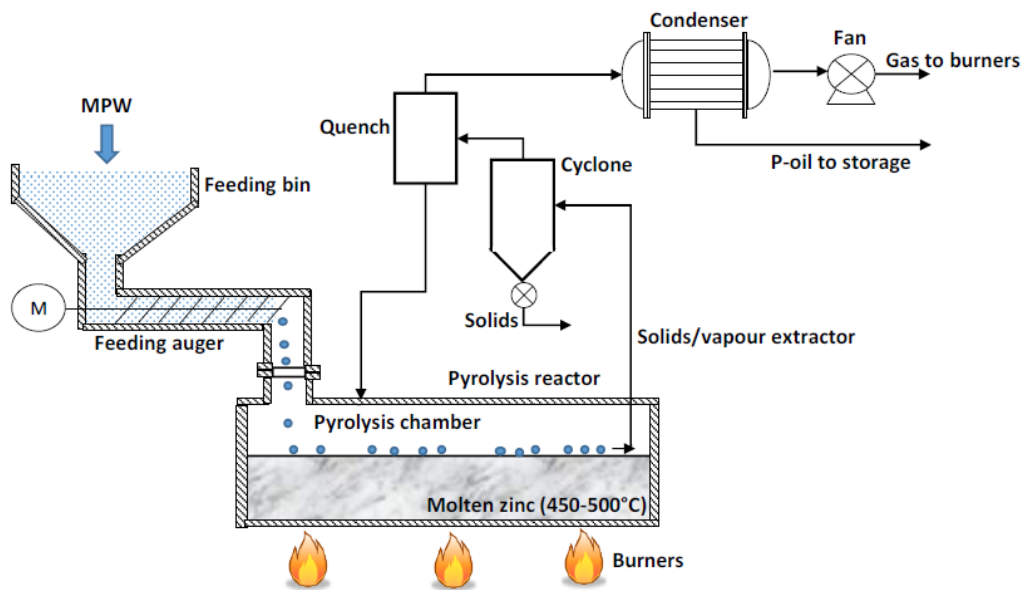


Figura 15: Funzionamento del processo PlastPyro. Riedewald et al. (2021)

Il materiale plastico alimenta il reattore di pirolisi, che consiste in una camera di reazione contenente zinco fuso a una temperatura di 450-500°C. In questo modo il *feedstock* si decompone in vapori e solidi, che vengono estratti simultaneamente mediante un sistema di aspirazione; successivamente vengono separati tramite un ciclone e i solidi vengono smaltiti mentre i vapori vengono trasformati in olio di pirolisi grazie a un condensatore. Una parte dei gas non

condensabili viene invece utilizzata per soddisfare il fabbisogno termico del processo o per produrre energia tramite combustione. Nella rappresentazione del processo in figura 14 è anche presente un raffreddatore (*quench*), che può essere implementato per separare la paraffina dai vapori, in modo da ritrasferirla nel reattore di pirolisi per convertirla in frazioni più leggere.

Lo zinco fuso non viene consumato durante il processo, garantisce un trasferimento di calore altamente uniforme e permette di trattare anche plastiche contaminate, ciò rende il processo ciclico ed efficiente.

4.3.2 Analisi economica dell'impianto

L'analisi di convenienza economica dell'impianto è stata condotta utilizzando indicatori economici quali il *Net Present Value* (NPV) e l'*Internal Rate of Return*²⁰ (IRR). Inoltre, sono state stimate le principali componenti di costo, ovvero le spese di investimento (CAPEX) e i costi operativi (OPEX).

Il capitale investito (CAPEX) per la costruzione dell'impianto è stato stimato in 20.190 milioni di euro, cifra che sale a 26,1 milioni di euro se si includono gli oneri finanziari legati al costo del capitale.

I costi dei componenti principali dell'impianto come il reattore e il condensatore sono stati raccolti tramite preventivi commerciali, mentre per le apparecchiature minori si è fatto riferimento a prezzi storici. Il reattore a zinco fuso è stato dimensionato per contenere 69 m³ di zinco, per un costo stimato di 740.520 euro.

Tra le altre voci di costo per la stima delle spese di capitale, rilevano i costi di gestione del progetto, approvvigionamento e messa in servizio che ammontano complessivamente al 15% del CAPEX e il costo per il magazzino di stoccaggio del *feedstock* che incide per 2,9 milioni di euro.

Inoltre, i ricercatori hanno sviluppato un piano di spesa del CAPEX distribuito su tre anni: il 20% nel primo anno per la preparazione e la pianificazione, il 50% nel secondo anno per l'acquisto delle apparecchiature principali e il 30% nel terzo anno per l'installazione e la messa in funzione dell'impianto.

Per quanto riguarda le spese operative (OPEX), sono stimate per un totale di 3,4 milioni di euro/anno. Una delle voci principali è rappresentata dai costi del personale, stimati per un totale di 29 operatori con un costo complessivo di 1,57 milioni di euro/anno. È rilevante il dato sul

²⁰ Inteso come il tasso di sconto al quale il Net Present Value (NPV) è pari a zero.

consumo di energia elettrica, che ammonta a 35.400 euro/anno e risulta particolarmente basso grazie all'autonomia energetica ottenuta mediante la combustione interna dei gas di pirolisi.

I ricavi dell'impianto sono stimati per 6,26 milioni di euro/anno, generati da due principali fonti di entrata: la vendita dell'olio di pirolisi (con un prezzo assunto di 210 euro/tonnellata) copre l'84,5% del totale e le *gate fees* (con un prezzo assunto di 25 euro/tonnellata) coprono il restante 15,5% del totale.

Sulla base di questi parametri lo studio calcola un *Net Present Value* (NPV) pari a 1,59 milioni di euro su un orizzonte temporale di 10 anni e un tasso interno di rendimento (IRR) pari al 20%. È importante sottolineare come l'intera analisi è stata condotta con un approccio volutamente conservativo, assumendo prezzi minimi per l'olio di pirolisi prodotto e *gate fees* minime, al fine di verificare la redditività dell'impianto anche in scenari di mercato sfavorevoli.

4.3.3 Analisi di sensitività

Anche lo studio condotto sulla tecnologia *PlastPyro* include un'analisi di sensitività economica al fine di individuare i parametri che influenzano maggiormente la redditività dell'impianto. In questo caso viene analizzata la sensibilità dell'*Internal Rate of Return* (IRR) a variazioni nei seguenti fattori economici: il prezzo di vendita dell'olio di pirolisi, le *gate fees*, i costi di investimento (CAPEX) e le spese operative (OPEX).

L'analisi ha evidenziato che il parametro più influente è il prezzo di vendita dell'olio di pirolisi; infatti, un aumento del prezzo da 210 a 227 euro/tonnellata comporta un incremento dell'IRR dal 20% al 37%; al contrario, una riduzione del prezzo ridurrebbe drasticamente la redditività dell'impianto.

Per quanto riguarda le *gate fees*, cioè i prezzi di conferimento all'impianto dei rifiuti da riciclare, un incremento da 25 a 40 euro/tonnellata comporterebbe un aumento dell'IRR dal 20% al 45%.

Anche i costi di investimento (CAPEX) e le spese operative (OPEX) hanno un impatto significativo sul tasso di rendimento interno: un aumento del CAPEX del 10% riduce l'IRR all'8% e un aumento del 20% dell'OPEX comporta una riduzione dell'IRR al 4%.

In sintesi, l'analisi di sensitività dimostra come il processo *PlastPyro* sia economicamente sostenibile, pur dipendendo fortemente da fattori esterni come il prezzo di mercato dell'olio di pirolisi.

4.4 Confronto tra i due impianti: implicazioni strategiche

Dal confronto tra i due casi di studio emergono i punti di forza e le criticità dei due impianti, rendendo possibile la comprensione delle condizioni che favoriscono la sostenibilità tecnico-economica del riciclo chimico tramite pirolisi.

L'impianto sviluppato negli Stati Uniti (Kulas et al., 2023) si basa su una pirolisi liquida con il riutilizzo interno della paraffina prodotta, mentre l'impianto belga (Riedewald et al., 2021) utilizza la tecnologia *PlastPyro*, che sfrutta lo zinco fuso per il trasferimento di calore.

Entrambi gli impianti impiegano balle di plastiche miste post-costumo come *feedstock*; tuttavia, l'impianto statunitense prevede una selezione preliminare interna, al fine di migliorare la qualità dell'olio di pirolisi, mentre la tecnologia del secondo impianto permette l'utilizzo di plastiche contaminate, consentito dall'impiego del metallo fuso in presenza di impurità.

Questa differenza è rilevante se si considera che il costo del *feedstock* rappresenta oltre il 90% del MSP dell'olio di pirolisi per l'impianto statunitense e risulta il parametro più influente dall'analisi di sensitività. Da questo punto di vista l'impianto belga risulta più flessibile, ma resta fortemente condizionato dal prezzo di mercato dell'olio di pirolisi.

L'analisi dei due casi conferma dunque l'importanza di valutare le variabili critiche del modello TEA, in particolare i costi operativi (OPEX), i costi di investimento (CAPEX) e il Net Present Value (NPV).

Dalla valutazione di tali variabili emerge infatti come entrambi i progetti risultino potenzialmente profittevoli, ma fortemente condizionati da due fattori attribuibili alle dinamiche di mercato (costo del *feedstock* e prezzo dell'olio di pirolisi). Pertanto, la scelta della tecnologia più remunerativa e la stessa fattibilità economica dipendono segnatamente dallo specifico contesto applicativo.

CONCLUSIONI

Il presente elaborato ha analizzato il ruolo del riciclo chimico dei rifiuti plastici all'interno del paradigma dell'economia circolare, con particolare attenzione alle tecnologie innovative di pirolisi e ai metodi di valutazione tecnico-economica (TEA: *Techno-Economic Analysis*) dei relativi processi industriali.

Dopo aver illustrato le finalità dell'economia circolare e i vantaggi rispetto al modello lineare, è stata descritta la crescente rilevanza del riutilizzo dei rifiuti plastici come risorse per l'industria chimica, in risposta alle sfide ambientali e normative poste dalla gestione dei rifiuti in plastica a livello europeo e globale.

Il nucleo della tesi è rappresentato dal terzo capitolo, in cui sono stati esaminati i principali metodi di valutazione ambientale e tecnico-economica degli investimenti in sistemi produttivi che realizzano processi chimico-fisici di riciclo di tipo continuo, tra cui il *Life Cycle Assessment* (LCA), la *Techno-Economic Analysis* (TEA) e una serie di indicatori economici (*Relative Gross Profit*, *Net Present Value*, *Levelized Cost of Carbon Abatement*, ecc.). È stato inoltre approfondito il tema dell'articolazione e della natura dei costi e dei ricavi di gestione di simili installazioni, distinguendo tra costi diretti, indiretti, fissi e variabili e considerando le modalità di calcolo di voci specifiche come i costi di acquisto di macchine e impianti, la manodopera, le spese generali e amministrative e la manutenzione, per comprendere la struttura economica dell'investimento e dell'esercizio che caratterizzano un impianto di riciclo chimico.

Nel quarto capitolo sono stati analizzati due casi di studio reali che applicano tecnologie di pirolisi su scala industriale: il primo basato su un processo modellato in Aspen Plus® per la produzione di olio per raffineria (*P-oil*) tramite pirolisi liquida (Kulas et al., 2023), e l'altro sul processo *PlastPyro* (Riedewald et al., 2021), che utilizza zinco fuso come mezzo di scambio termico. Questi esempi hanno permesso di esaminare applicazioni pratiche dei principi teorici di valutazione degli investimenti passati in rassegna e di evidenziare i punti di forza e le criticità delle diverse soluzioni tecnologiche.

In conclusione, il riciclo chimico basato su tecnologie di pirolisi rappresenta una promettente alternativa per la gestione dei rifiuti plastici non riciclabili meccanicamente, ma la sua diffusione su larga scala dipenderà dalla capacità di migliorarne l'efficienza economica, integrarlo nei sistemi produttivi esistenti e sostenerlo tramite politiche di incentivazione e interventi normativi adeguati. I metodi di valutazione tecnico-economica, se correttamente applicati, possono senza dubbio costituire un valido strumento di orientamento delle iniziative imprenditoriali in un contesto di transizione verso un modello di sviluppo industriale realmente circolare e sostenibile.

BIBLIOGRAFIA

- BRENNAN, D. *Process Industry Economics*. Amsterdam: Elsevier, 2020.
- BUCHNER, G.A. et al. Techno-economic assessment framework for the chemical industry—Based on technology readiness levels. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2018, 57, pp. 8502–8517.
- CDP. *Economia circolare: come cambia il modello di produzione e consumo*. Roma: Cassa Depositi e Prestiti, 2024.
- KELLER, Florian; VOSS, Raoul; LEE, Roh Pin. Overcoming challenges of life cycle assessment (LCA) & techno-economic assessment (TEA) for chemical recycling. Freiberg, Germany: Institute of Energy Process Engineering & Chemical Engineering, 2022.
- KIRCHHERR, J. et al. Barriers to the circular economy: Evidence from the European Union (EU). *Ecological Economics*, 2018, vol. 150, pp. 264–272.
- KULAS, Robert et al. Economic and environmental analysis of plastics pyrolysis after secondary sortation of mixed plastic waste. *Resources, Conservation and Recycling*, 2023.
- MANGOLD, Hannah; VON VACANO, Bernhard. The frontier of plastics recycling: rethinking waste as a resource for high-value applications. *Macromolecular Chemistry and Physics*, 2022, 223.
- PETERS, M.S.; TIMMERHAUS, K.D.; WEST, R.E. *Plant design and economics for chemical engineers*. Boston: McGraw-Hill, 2004.
- PHEIFER, A.G. Barriers and enablers to circular business models. 2017.
- PRESTON, F. *A global redesign? Shaping the circular economy*. London: Chatham House, 2012.
- RIEDEWALD, Frederik et al. Techno-economic and environmental evaluation of a plastic waste pyrolysis process. *Resources, Conservation and Recycling*, 2021.
- VAN DER VEGT, Malou et al. Understanding Business Requirements for Increasing the Uptake of Recycled Plastic: A Value Chain Perspective. *Recycling*, 2022, vol. 7, n. 4, p. 42.
- ZIMMERMANN, A. et al. *Techno-Economic Assessment & Life Cycle Assessment Guidelines for CO₂ Utilization*. Co2chem Media and Publishing LTD, Sheffield, 2018.

SITOGRAFIA

- Ellen MacArthur Foundation. *What is a circular economy?* <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/topics/circular-economy-introduction/overview>
- Ellen MacArthur Foundation. *Eliminate waste and pollution.* <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/eliminate-waste-and-pollution>
- Ellen MacArthur Foundation. *Regenerate nature.* <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/regenerate-nature>