



ECOMONDO
The green technology expo.

ITALIAN
EXHIBITION
GROUP
Providing the future

Lo studio è supportato da:



Riciclo chimico: potenzialità di sviluppo e proposte per far decollare il mercato



ECOMONDO
The green technology expo.

**ITALIAN
EXHIBITION
GROUP**
Providing the future

CON IL SUPPORTO DI



RESPONSABILI DI PROGETTO

Eugenio Sini
eugenio.sini@agici.it

Marco Carta
marco.carta@agici.it

RINGRAZIAMENTI

Si ringraziano A2A, Aquafil, Corepla, Montello, MyRechemicals (Gruppo Maire), Versalis (Gruppo Eni)

TEAM DI RICERCA

Eugenio Sini

Luigi Scavone

Pietro Montano

Alberto Bindi

Agenda

1.

Executive Summary

2.

Le tecnologie del riciclo chimico

3.

Lo stato degli investimenti

4.

Dentro gli investimenti

5.

Scenari di sviluppo per l'Italia

6.

Far partire le filiere

Executive Summary

01.

Le tecnologie del riciclo chimico

Il riciclo chimico è l'insieme delle operazioni volte al recupero di materie, sostanze e prodotti dai rifiuti attraverso processi chimici che ne modificano la loro struttura molecolare.

Il riciclo chimico si applica in particolare ai **rifiuti plastici** e attraverso la loro depolimerizzazione (chimica o termica) si ottengono monomeri che possono essere usati per costruire nuovi polimeri con caratteristiche paragonabili al vergine. Una seconda area di applicazione è quella dei **rifiuti indifferenziati** – o meglio del combustibile solido secondario (CSS) – che possono essere trattati termicamente per ottenere del gas di sintesi che può essere in seguito usato per produrre altri prodotti chimici.

Le famiglie di tecnologie che si applicano nel riciclo chimico sono principalmente tre:

1. Solvolisi: depolimerizzazione tramite solventi chimici quali glicoli, acqua o metanolo. Queste tecnologie hanno un livello di maturità medio-basso (TRL 3-8) e necessità di un feedstock senza impurità e di impianti per la purificazione dell'output che rendono ancora difficile un'applicazione commerciale su vasta scala.

2. Pirolisi: depolimerizzazione termica con controllo dell'ossigeno con cui si produce un olio che può essere successivamente trattato per produrre nuove polimeri. Il feedstock composto da poliolefine non deve contenere impurità (ad esempio PVC che potrebbe sviluppare cloro a danno del reattore) e laddove la reazione non sia particolarmente efficiente l'impianto deve prevedere tecnologie per l'upgrading dell'olio. La pirolisi ha un livello di maturità pre-commerciale alto (TRL 9) ed è pronta ad un salto di applicazione industriale.

3. Gassificazione: depolimerizzazione termica ad alta temperatura che parte da un feedstock misto come il CSS per produrre syngas contenente CO e H₂. Questo gas può essere successivamente trattato per produrre metanolo e idrogeno. La gassificazione ha un livello di maturità tecnologica alto (TRL 9) ed è pronta all'applicazione commerciale.

In combinazione con il riciclo meccanico, solvolisi e soprattutto pirolisi promettono un contributo al raggiungimento degli obiettivi europei di riciclo delle plastiche, valorizzando materiali che attualmente non vengono riciclati. La gassificazione invece, come tecnologia alternativa alla termovalorizzazione, può contribuire a ridurre le emissioni di CO₂ dell'industria dei rifiuti.

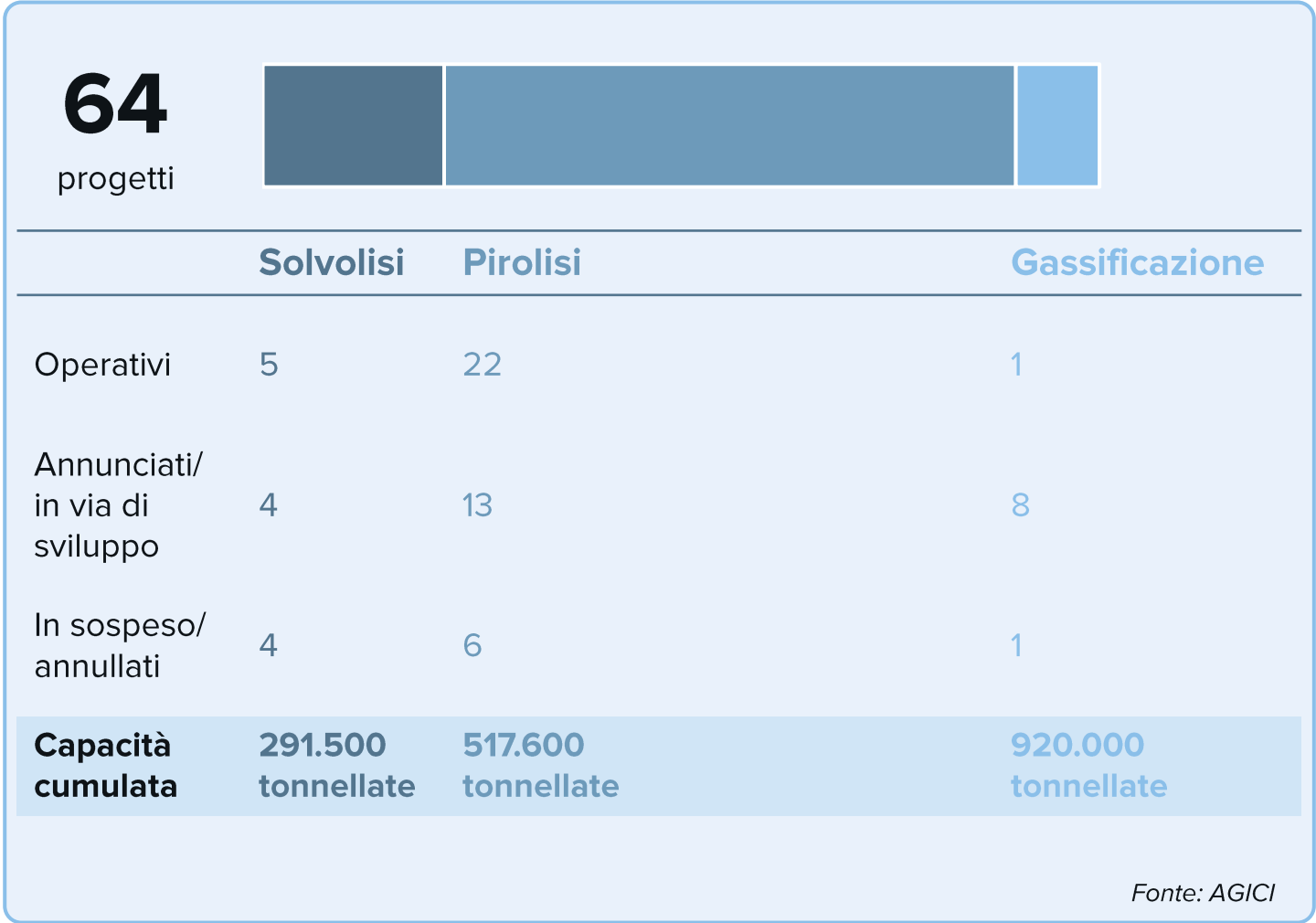
Lo stato degli investimenti

Attualmente si contano 64 progetti di investimento in Unione Europea nelle tre principali tecnologie di riciclo chimico. **Il 64% si concentrano su impianti di pirolisi**, il 20% in solvolisi e il restante 16% in gassificazione.

Il 17% dei progetti sono stati sospesi o dichiarati falliti, principalmente nel campo della solvolisi e della pirolisi. Un simile tasso di fallimento è imputabile all’immaturità delle tecnologie e al bisogno di un quadro istituzionale per far funzionare i mercati del materiale riciclato.

Tra i progetti attivi, la capacità dichiarata cumulata si concentra soprattutto nella gassificazione con progetti che complessivamente ammontano a 920.000 tonnellate (taglia media: 200 kt). Seguono gli **impianti di pirolisi per più di 500.000 tonnellate** (taglia media: 24 kt). Infine la capacità dichiarata degli impianti di solvolisi ammonta a più di 290.000 tonnellate (taglia media: 34 kt).

L'Italia è lo stato in cui si sta investendo di più con 12 progetti in tutte e tre le tecnologie, seguita da Germania (9 progetti attivi tra solvolisi e pirolisi) e Francia (7 progetti tra solvolisi e pirolisi).



Dentro gli investimenti

L'analisi dei business case si è concentrata sugli impianti di pirolisi e di gassificazione. **Sono tutte tecnologie capital-intensive che necessitano di condizioni di stabilità.** La redditività di queste strutture sarà garantita solo in due condizioni:

- se il mercato a valle sarà in grado di riconoscere una **premialità di prezzo** ai prodotti del processo di riciclo
- se il feedstock manterrà **prezzi bassi** o se, addirittura, sarà una **fonte di ricavo** in forma di gate-fee.

Per la **pirolisi** sono state analizzate due modalità di business:

- un impianto dotato di una linea di preparazione del feedstock,
- un impianto specializzato nella sola pirolisi.

Il primo affronta un importante rischio di performance, perché la sua redditività è dipendente dalla capacità di preparazione del feedstock. Se la produttività è bassa, l'impianto non è remunerativo, ma con alta produttività l'impianto è anche più redditizio di quello specializzato.

Il secondo impianto acquista feedstock standard sul mercato, trascurando il problema della sua preparazione, ma affrontando i rischi connessi con l'andamento del suo prezzo sul mercato: con prezzi troppo alti, l'impianto specializzato non è redditizio. In entrambi i business, è fondamentale che il prezzo dell'olio di pirolisi a valle superi i 900-1000 €/ton.

Nel caso della **gassificazione** oltre al prezzo del metanolo sostenibile, gioca un ruolo anche la gate fee per lo smaltimento del CSS. Con prezzi alti del metanolo (1.100 €/ton), la gate fee può anche essere di 84 €/ton, quindi con valori capaci di competere con le attuali strutture di termovalorizzazione che presentano gate fee ben superiori. Mentre può salire fino a 200 €/ton nel caso in cui il prezzo del metanolo arrivi fino a 908 €/ton.

Scenari di sviluppo per l'Italia

Per le due principali tecnologie, le prospettive di mercato sono potenzialmente positive. Infatti ci si può attendere un'alta domanda di prodotti riciclati guidata dalle politiche europee e una strutturale scarsità che spinge i prezzi verso l'alto.

Infatti, per quanto riguarda la pirolisi, prendendo a riferimento il target sul contenuto riciclato negli imballaggi da contatto alimentare, possiamo stimare 830 kt di domanda di olio al 2030 e 2,3 Mt nel 2040. Oggi in Italia, la quantità di poliolefine messe a disposizione negli scarti dei processi di selezione meccanica permetterebbe di generare tra 54 e 77 kt. Questa offerta può aumentare qualora il riciclo meccanico riesca ad intercettare ulteriori flussi oggi non sono valorizzati, ma si prospetta comunque una strutturale scarsità di olio di pirolisi sul mercato.

Per la gassificazione, in uno scenario di non competizione con termovalorizzatori e cementifici nazionali, basterebbe un solo impianto da ad assorbire i 256 kt di CSS che viene avviato all'estero e produrre quindi 115 kt di metanolo sostenibile. Considerando la domanda di metanolo per il bunkeraggio, in uno scenario in cui vi è un mix equilibrato di combustibili per ridurre l'intensità carbonica del 6% come previsto dai target UE, sarebbero necessarie 3,2 Mt di metanolo sostenibile. Anche in questo caso, si prospetta una scarsità strutturale del metanolo che potrebbe spingere i prezzi verso l'alto.

PIROLISI

Offerta

~500 kt
di plasmix



~140 kt
di poliolefine



~54-77 kt
di olio



4-500 kt
in Europa

Domanda

Target PWR 2030:
10% riciclato negli
imballaggi food-grade



665 kt
plastica riciclata
addizionale al 2030



830 kt
olio di pirolisi
necessario

GASSIFICAZIONE

Offerta

~1.600 kt
di CSS



~256 kt
di CSS inviato
all'estero



~115 kt
Metanolo producibile
in Italia

Domanda

**Target Fuel EU
Maritime 2030:**
-6% intensità
carbonica



25%
Peso del metanolo
in uno scenario
diversificato



3.200 kt
metanolo
necessario in
Europa

Far partire le filiere

Gli impianti di riciclo chimico presentano alti CAPEX e alti OPEX. Per assicurare il loro contributo al riciclo, sarebbe opportuno progettare i mercati del feedstock così come quelli dell'olio di pirolisi e metanolo in modo da garantire condizioni di stabilità. Per garantire condizioni di stabilità è necessaria la cooperazione tra i vari livelli della filiera nonché un'azione pubblica su almeno tre fronti:

Normativa

Definire metodi e standard

- Disporre un decreto End-of-waste per il feedstock di poliolefine da usare nella pirolisi per creare un mercato del feedstock
- Definire le metodologie del bilancio di massa per creare un mercato dell'olio di pirolisi
- Includere il gas di pirolisi all'interno dei combustibili dell'Allegato X del D.Lgs 152/2006
- Definire le metodologie per il calcolo della CO₂ abbattuta dei metanolo prevista nella RED III.

Pianificazione

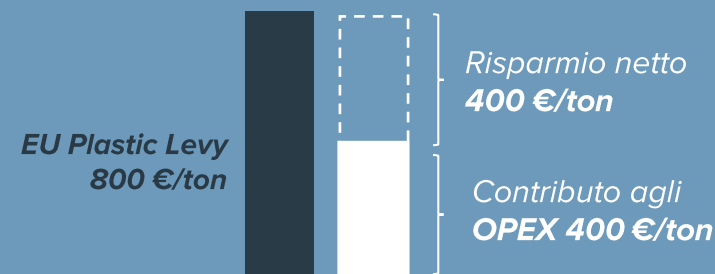
Evitare over-capacity strutturali

- Facilitare e guidare a livello centrale (piuttosto che regionale) le procedure autorizzative onde evitare che si creino situazioni di over-capacity rispetto al feedstock effettivamente disponibile e alla effettiva domanda di mercato a livello europeo

Incentivi

Ridurre il peso della plastic levy

- Valutare la creazione di un incentivo con contributo a copertura parziale degli OPEX, vincolato all'aumento del tasso di riciclo nazionale e capace di ridurre il peso della *plastic levy* sulla fiscalità generale



Le tecnologie del riciclo chimico

02.

Una definizione

Il riciclo chimico è l'insieme delle operazioni volte al recupero di materie, sostanze e prodotti dai rifiuti attraverso processi chimici che ne modificano la struttura molecolare.

Tra le varie tecnologie disponibili, quelle più sperimentate e applicate riguardano la **filiera delle plastiche** e dei **rifiuti indifferenziati**.

Nel caso dei rifiuti plastici, il riciclo chimico consente di scomporre i polimeri nelle loro unità fondamentali o in intermedi chimici riutilizzabili nella produzione di nuovi materiali, permettendo di trattare frazioni miste, contaminate o degradate, difficilmente valorizzabili con tecniche meccaniche tradizionali.

Tra i materiali plastici su cui si sta concentrando maggiormente l'attenzione degli operatori del riciclo chimico vi sono PET, poliolefine (PE, PP), poliammidi (es. Nylon 6) e altri polimeri tecnici.

Oltre alla plastica, alcune tecnologie di riciclo chimico permettono di trattare anche i combustibili derivati da rifiuti indifferenziati. Ciò permette di avere un'alternativa tecnologica alla termovalorizzazione delle frazioni indifferenziate.

Dal punto di vista ambientale, il riciclo chimico permettere di chiudere il ciclo dei materiali plastici, limitando lo smaltimento in discarica e riducendo il consumo di risorse fossili per la produzione delle plastiche vergini.

Perché il riciclo chimico?

Il riciclo chimico permetterebbe di recuperare la materia da frazioni di rifiuti che attualmente non sono riciclabili e sono destinate a recupero energetico o a smaltimento.

Ciò permetterebbe di raggiungere gli **obiettivi europei** in materia di rifiuti da imballaggi plastici.

NORMA	OBIETTIVO	TARGET 2025	TARGET 2030	TARGET 2040
Waste Framework Directive <i>Direttiva (UE) 2008/98/CE + aggiornata dalla direttiva (UE) 2025/1892</i>	Tasso di riciclo imballaggi in plastica	50%	55%	
Single Use Plastic Directive <i>Direttiva (UE) 2019/904</i>	Raccolta rifiuti di bottiglie monouso per bevande	77%	90%	
	Contenuto minimo di materiale riciclato nelle bottiglie per bevande	25% (PET)	30% (tutte le bottiglie)	
Packaging and Packaging Waste Regulation <i>Regolamento (UE) 2025/40</i>	Contenuto riciclato negli imballaggi di plastica	-	10% (non-PET food grade)	25% (non-PET food grade)
		-	30% (PET food grade)	50% (PET food grade)
		-	35% (altri imballaggi)	65% (altri imballaggi)

Le tecnologie del riciclo chimico

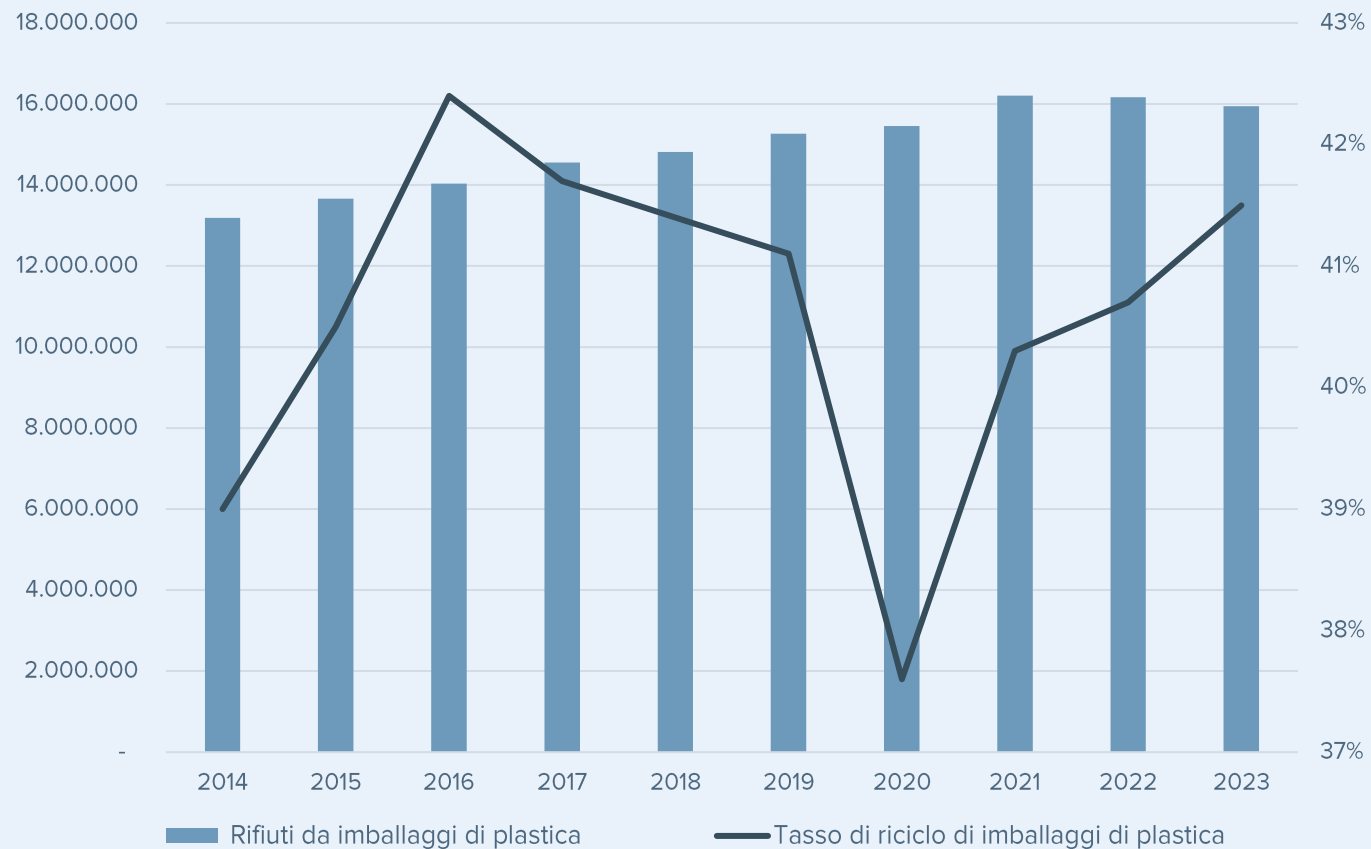
Perché il riciclo chimico?

L'attuale situazione del riciclo delle plastiche in Europa è lontana dal raggiungimento degli obiettivi comunitari. La quantità di rifiuti da imballaggi è in aumento, mentre la capacità di riciclaggio della materia supera appena il 41%.

Esiste quindi un importante margine di miglioramento che il riciclo chimico potrebbe contribuire a colmare.

Inoltre, il Consiglio Europeo con la cosiddetta Own Resources Decision ha stabilito introdotto una *plastic levy* che ogni Stato Membro deve pagare alla Commissione Europea per ogni tonnellata di plastica non riciclata. Poiché questa tassa ammonta ad 800 €/tonnellata, dal 2021 si è creata una forte domanda per aumentare in maniera sostanziale i tassi di riciclo.

Rifiuti da imballaggi plastici in UE: produzione e tasso di riciclo



Fonte: Eurostat

Tipi di depolimerizzazione

Il riciclo chimico è un nome sotto il quale si includono diverse tecnologie per la depolimerizzazione di rifiuti plastici. Ci sono tre principali famiglie di tecnologie:

- 1. Depolimerizzazione chimica:** i polimeri vengono scomposti in monomeri tramite l'uso di solventi (solvolisi). A seconda del tipo di solvente avremo processi di:
 - Glicolisi, in cui si usano glicoli come solventi
 - Idrolisi, in cui si usa l'acqua
 - Metanolisi, in cui si utilizza il metanolo.
- 2. Depolimerizzazione termica:** processo che consiste nel riscaldamento del polimero alle seguenti condizioni:
 - **Pirolisi**, riscalda il polimero a una temperatura tra i 400-600° in assenza di ossigeno
 - **Gassificazione**, riscalda il polimero a una temperatura tra i 700-1500° in presenza di una quantità controllata sia di ossigeno che di acqua.
- 3. Depolimerizzazione biologica:** i polimeri vengono scomposti tramite l'uso di enzimi biologici o dall'uso di batteri/funghi.

Depolimerizzazione chimica

Glicolisi

Idrolisi

Metanolisi

Depolimerizzazione termica

Pirolisi

Gassificazione

Depolimerizzazione biologica

Bio-enzimolisi

Biodegradazione
microbica

Le tecnologie del riciclo chimico

Quadro sinottico

DEPOLIMERIZZAZIONE	PROCESSO	INPUT	PRODOTTI INTERMEDI	OUTPUT FINALE	TRL
Chimica	Glicolisi	PET, PU	BHET	PET	3-6
		PU	Mix dioli	PU	
	Idrolisi	PET	MEG, PTA	PET	3-4
		PA6	Caprolattame	PA6	Commercial scale
	Metanolisi	PET	MEG, DMT	PET	6-8
Termica	Pirolisi	Misto poliolefine	Olio di pirolisi e gas combustibili	Biocarburanti o prodotti chimici verdi	9
	Gassificazione	CSS	Syngas (H ₂ + CO)	Metanolo, Idrogeno	9
Biologica	Enzimolisi	PET	MEG, PTA	PET	5

Solvolisi

Le tecnologie di **solvolisi** permettono di scomporre i polimeri plastici – attraverso l'uso di solventi – in monomeri da cui successivamente ricavare dei nuovi polimeri. Perciò, la solvolisi permette di trattare frazioni contaminate o miste, restituendo materie prime secondarie di elevata purezza.

Per questo, una delle principali applicazioni è con il **PET post-consumo** che oggi è difficile riportare alla condizione originaria di contatto con gli alimenti.

La solvolisi può essere condotta adoperando svariati tipi di solventi. Tra i processi più diffusi figurano **glicolisi**, **idrolisi** e **metanolisi**.

Nella **glicolisi**, il PET reagisce con glicole etilenico (EG) a 180-250 °C in presenza di catalizzatori, producendo principalmente bis (2-idrossietil) tereftalato (BHET). Il processo è relativamente semplice, ma richiede un'attenta rimozione delle impurità per evitare la degradazione del prodotto e la formazione di sottoprodotti.

L'**idrolisi** utilizza acqua, in condizioni neutre, acide o basiche, per scindere il PET in acido tereftalico (PTA) e EG. Le condizioni di reazione sono più spinte (fino a 250-300 °C e alte pressioni), con conseguenti esigenze impiantistiche più complesse e consumi energetici elevati.

La **metanolisi**, infine, prevede la reazione del PET con metanolo in fase liquida o supercritica per ottenere dimetiltereftalato (DMT) e EG. È una tecnologia matura ma richiede impianti a pressione e una gestione attenta dei solventi volatili.

La solvolisi può essere applicata anche ad altri tipi di polimeri, non necessariamente da imballaggi, quali il poliuretano (PU) o il Nylon 6 (PA6). In particolare quest'ultimo polimero è già riciclato a livello commerciale.

Dal punto di vista tecnico, i principali aspetti critici dei processi di solvolisi riguardano la **purificazione dei prodotti di reazione**, la **gestione dei catalizzatori** e la **compatibilità con rifiuti plastici eterogenei**. Allo stato attuale delle tecnologie che, in relazione al PET, hanno un livello di maturità misurabile tra i 3 e gli 8 TRL, gli impianti hanno bisogno di feedstock omogeneo e di sistemi di separazione a valle e di recupero dei solventi/catalizzatori. Ciò ha un impatto diretto sui costi di trattamento e, allo stato attuale, rende ancora troppo alti i costi della materia riciclata per le finalità di largo consumo del campo degli imballaggi.

Riciclo chimico e Nylon 6: tecnologie e barriere

Il Nylon 6 (PA6) è una fibra sintetica appartenente alla famiglia delle poliammidi, nota per la sua elevata resistenza meccanica, elasticità, durabilità e resistenza all'usura. Trova ampio impiego nell'industria tessile per la produzione di tappeti, tessuti tecnici e corde, nell'automotive per componenti strutturali e rivestimenti, nell'elettronica, in particolare per collettori e isolanti. La produzione mondiale di nylon 6 è stimata intorno a 8 milioni di tonnellate.

Il riciclo chimico del Nylon 6 avviene principalmente tramite idrolisi, un processo che consente di rompere i legami ammidici della poliammide e recuperare il monomero ϵ -caprolattame, che può poi essere purificato e ripolimerizzato per ottenere nuovo Nylon 6 con caratteristiche equivalenti a quelle del materiale vergine.

Il processo si articola in diverse fasi. In primo luogo, gli scarti e i rifiuti in Nylon 6 (fibre tessili, film, componenti stampati) vengono macinati e puliti. Successivamente, mediante idrolisi, il polimero reagisce con acqua o vapore ad alta temperatura (250-300 °C) e pressione elevata, in presenza di catalizzatori acidi o basici, scindendo la catena polimerica nei legami ammidici e liberando il caprolattame. Questo viene quindi purificato, eliminando sottoprodotti e impurità, per ottenere caprolattame di grado industriale, che viene infine ripolimerizzato in reattori convenzionali per formare nuovo Nylon 6.

Alcuni fattori tecnici influenzano la resa e la qualità del monomero, tra cui la purezza del materiale di partenza e l'integrazione tra la sezione di idrolisi e quella di polimerizzazione, essenziale per ridurre perdite e consumi energetici.

Tuttavia, vi sono ostacoli strutturali alla diffusione del riciclo chimico di questo polimero. La diversità di utilizzi rende difficile istituire una filiera di raccolta, rendendo complesso e costoso reperibile il materiale da riciclare. Inoltre, l'assenza di criteri di ecodesign nei prodotti a base di Nylon 6, quali tappeti, rende difficile il loro smontaggio e la separazione da altri materiali.

Anche gli ostacoli normativi rappresentano un limite significativo. A livello UE, non esiste un quadro normativo che ricomprenda la diversità degli usi di un materiale duttile e specifico come il Nylon 6. Chi opera nel riciclo delle poliammidi deve muoversi a cavallo tra sistemi EPR di diverse categorie merceologiche (reti, tessili) oppure nel libero mercato dei rifiuti speciali. Ciò impone la creazione di una logistica della raccolta ampia, che non può limitarsi ai confini nazionali e nemmeno europei, ma si estende a livello internazionale.

La scala internazionale pone ulteriori problematiche in materia di commercio di rifiuti, tra cui autorizzazioni al trasporto per rifiuti che, a seconda dell'ordinamento, possono essere classificati come rifiuti pericolosi, nonché differenze tra Paesi negli standard di qualità e nelle certificazioni richieste per il materiale rigenerato.

Pirolisi

La **pirolisi** è una delle principali tecnologie di **riciclo chimico delle plastiche post-consumo** non adatte al riciclo meccanico, in particolare per le frazioni miste a base di **poliolefine** (PE, PP).

Il processo si basa sulla **decomposizione termica in assenza di ossigeno**, con l'obiettivo di convertire la matrice polimerica in **olio di pirolisi**, gas e residui solidi carboniosi (char). La reazione può essere spinta verso una massimizzazione della resa di olio di pirolisi, oppure del gas.

Nella configurazione orientata alla **massimizzazione dell'olio di pirolisi** (che più interessa le finalità di questo studio) la reazione avviene tipicamente tra **400 e 550°C**, con tempi di residenza controllati e sistemi di condensazione progettati per recuperare la frazione liquida più pesante. L'olio prodotto presenta una composizione complessa, ricca di paraffine, olefine e aromatici leggeri, e può essere impiegato come **feedstock per la petrolchimica** o, previa raffinazione, come componente per carburanti o nuovi polimeri.

Dal punto di vista tecnico, i principali aspetti critici riguardano la **rimozione di contaminanti clorurati** (derivanti da PVC o additivi), la **gestione del residuo solido** e la **stabilità del prodotto liquido**, che tende a invecchiare per processi di polimerizzazione secondaria. Inoltre, la **purificazione dell'olio di pirolisi** è una fase determinante: il contenuto di ossigeno, azoto e zolfo deve essere ridotto per garantire la compatibilità con i processi di raffinazione convenzionali.

Il gas prodotto dalla reazione può essere usato per il recupero di calore (abbattendo significativamente i costi di approvvigionamento di altri combustibili fossili) o di elettricità, sebbene quest'ultima opzione, allo stato attuale, non sia contemplata dalla normativa nazionale.

La realizzazione di un impianto di pirolisi richiede un controllo elevato della qualità del feedstock dell'impianto, nonché un'attenta **integrazione tra sezione termochimica e sezione di upgrading**.

Gassificazione

La **gassificazione** rappresenta una tecnologia di **riciclo chimico termico** orientata alla **conversione dei rifiuti solidi in gas di sintesi (syngas)**, una miscela principalmente composta da monossido di carbonio (CO), idrogeno (H₂), anidride carbonica e idrocarburi leggeri. È particolarmente adatta al trattamento di **combustibile solido secondario (CSS) o altra frazione indifferenziata avente potere calorifico simile** proveniente da plastiche eterogenee, scarti tessili e frazioni non riciclabili, spesso integrato con **biomasse legnose**.

Il processo avviene in ambiente a **temperatura elevata (800-1.200°C)** e con **apporto controllato di ossigeno o vapore**, che permette una parziale ossidazione del materiale organico. La reazione genera un gas combustibile ad alto contenuto energetico, la cui composizione dipende dal tipo di gassificatore (letto fisso, fluido o a plasma) e dal rapporto aria/vapore. Dopo la gassificazione, il syngas grezzo necessita di una **profonda purificazione**: rimozione di polveri, catrami, composti solforati e clorurati, indispensabile per l'impiego in processi a valle. I reattori che lavorano a temperature superiori a 1200 permettono di produrre un syngas di migliore qualità, evitando la generazione di residui carboniosi e producendo invece un residuo granulato inerte che può facilmente trovare applicazione nel

processo di fabbricazione del cemento come materia prima.

Il **syngas depurato** può essere utilizzato in due principali direzioni: come **vettore energetico** (in turbine o motori per la generazione di elettricità e calore) oppure come **materia prima per la sintesi chimica**. Attraverso processi catalitici come la **sintesi del metanolo (CO + 2H₂ → CH₃OH)**, è possibile ottenere prodotti liquidi di valore strategico per l'industria chimica. Alternativamente, mediante **separazione e purificazione dell'idrogeno**, il syngas può diventare una fonte di **idrogeno ad alta purezza**, destinata a fuel cell o processi industriali. L'utilizzo del syngas come materia prima per la sintesi chimica rispetto all'uso come vettore energetico risparmia le emissioni connesse con la combustione del syngas.

Gli aspetti tecnici più critici riguardano la **gestione delle scorie e dei catrami**, l'**efficienza di conversione del carbonio**, e la **stabilità del bilancio termico**, data la natura eterogenea del feedstock. Un impianto di gassificazione ben progettato richiede un'attenta **integrazione tra sezione termica, trattamento del gas e unità di sintesi**, al fine di garantire continuità operativa e qualità costante del syngas.



Lo stato degli
investimenti

03.

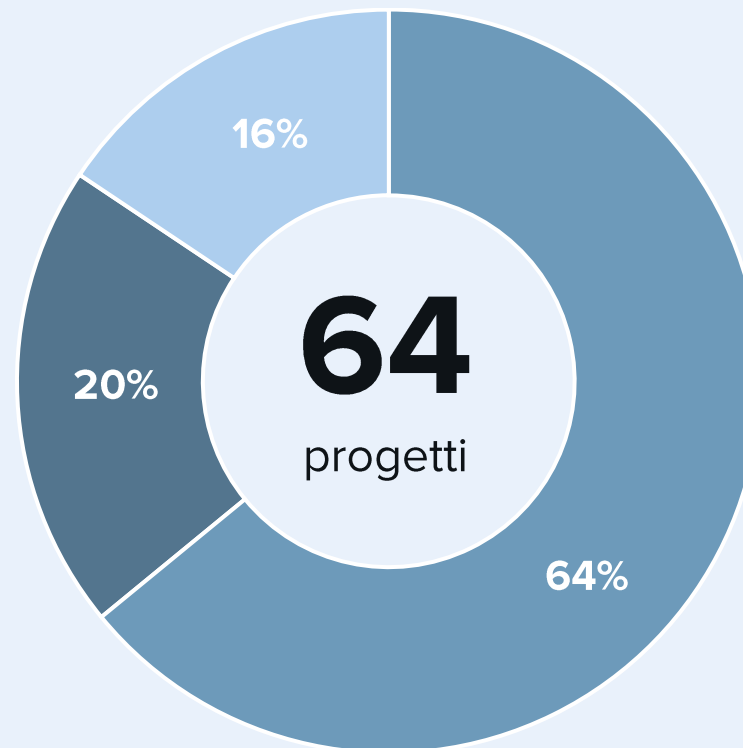
La capacità impiantistica europea

Negli ultimi anni, gli investimenti in tecnologie di riciclo chimico sono aumentati considerevolmente. In Europa si contano 64 progetti impiantistici annunciati tra il 2011 e il 2025.

Il merito è da cercare nella duplice azione della Commissione Europea che da un lato ha reso più stringente la normativa in materia di rifiuti e di riciclo degli imballaggi plastici stimolando una potenziale domanda, e da un altro ha finanziato direttamente la realizzazione di impianti pilota per far uscire la tecnologia dalla fase laboratoriale stimolando l'offerta.

La maggior parte degli impianti utilizzano tecnologie per la pirolisi (64%), il 20% adotta processi di solvolisi con differenti tipi di solventi. Il restante 16% degli investimenti sono impianti di gassificazione.

Numero di progetti annunciati per tecnologia



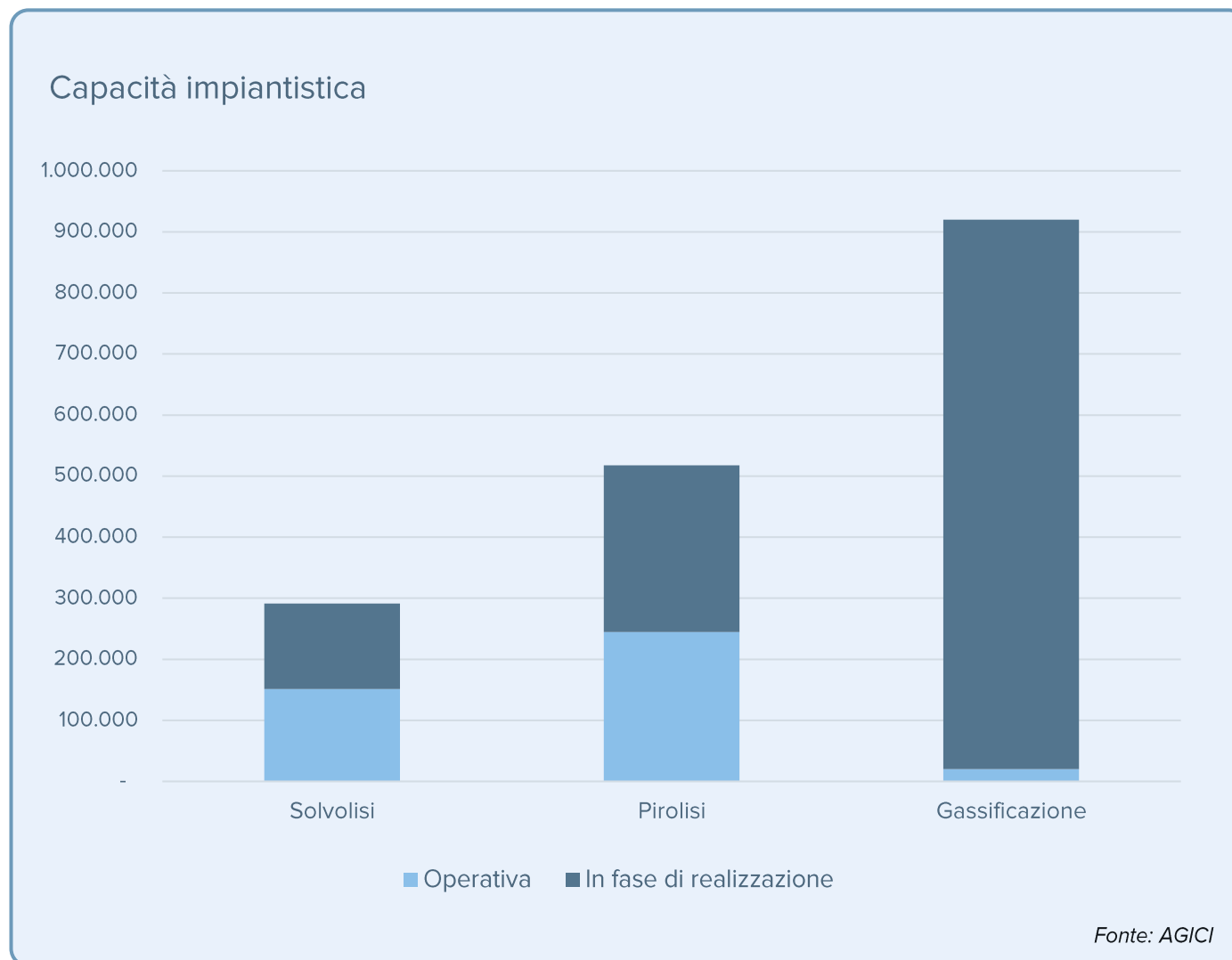
Fonte: AGICI

Capacità impiantistiche

Ad oggi sono operativi impianti di solvolisi per 151.500 tonnellate/anno, mentre con il completamento degli impianti attualmente in fase di realizzazione la capacità nei prossimi anni sarà raddoppiata.

Gli impianti di pirolisi operativi hanno una capacità complessiva di 244.600 tonnellate/anno e altre 273.000 tonnellate dovrebbero entrare in funzione nel prossimo futuro.

Gli impianti di gassificazione esistenti hanno una capacità di appena 20.000 tonnellate/anno, ma i progetti in fase autorizzativa porterebbero nel 2030 e nel 2032 capacità aggiuntiva per 700.000 tonnellate/anno.



La geografia degli impianti di solvolisi

13 N° progetti

5 ● Operativi

2 ● In via di sviluppo

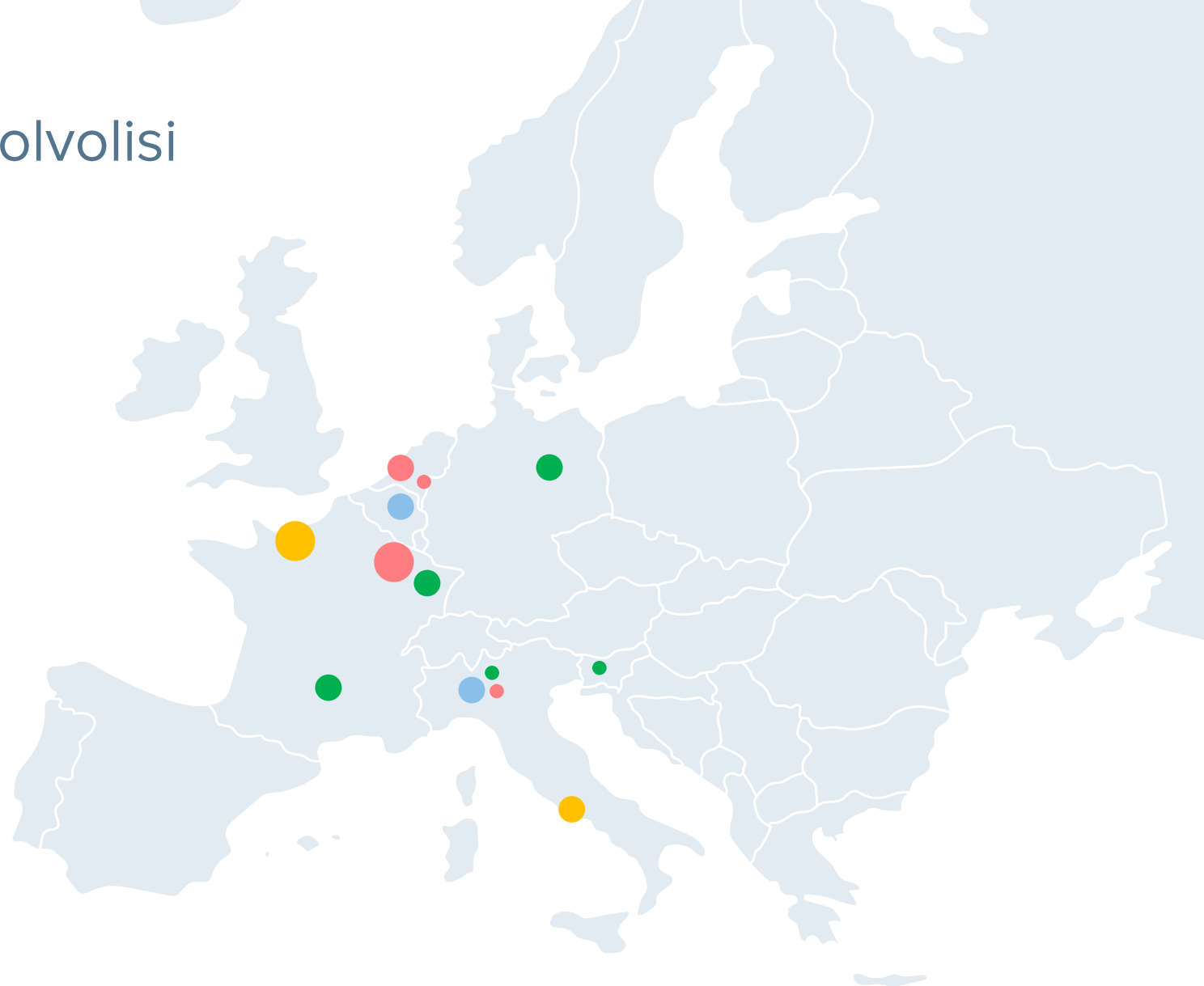
2 ● Annunciati

4 ● In sospeso / annullati

36 kt Taglia media

Paesi

Francia, Italia, Austria,
Germania, Belgio, Slovenia



Legenda

● > 50 kt

● 10 - 50 kt

● < 10 kt

Fonte: AGICI

La geografia degli impianti di pirolisi

41 N° progetti

22 ● Operativi

9 ● In via di sviluppo

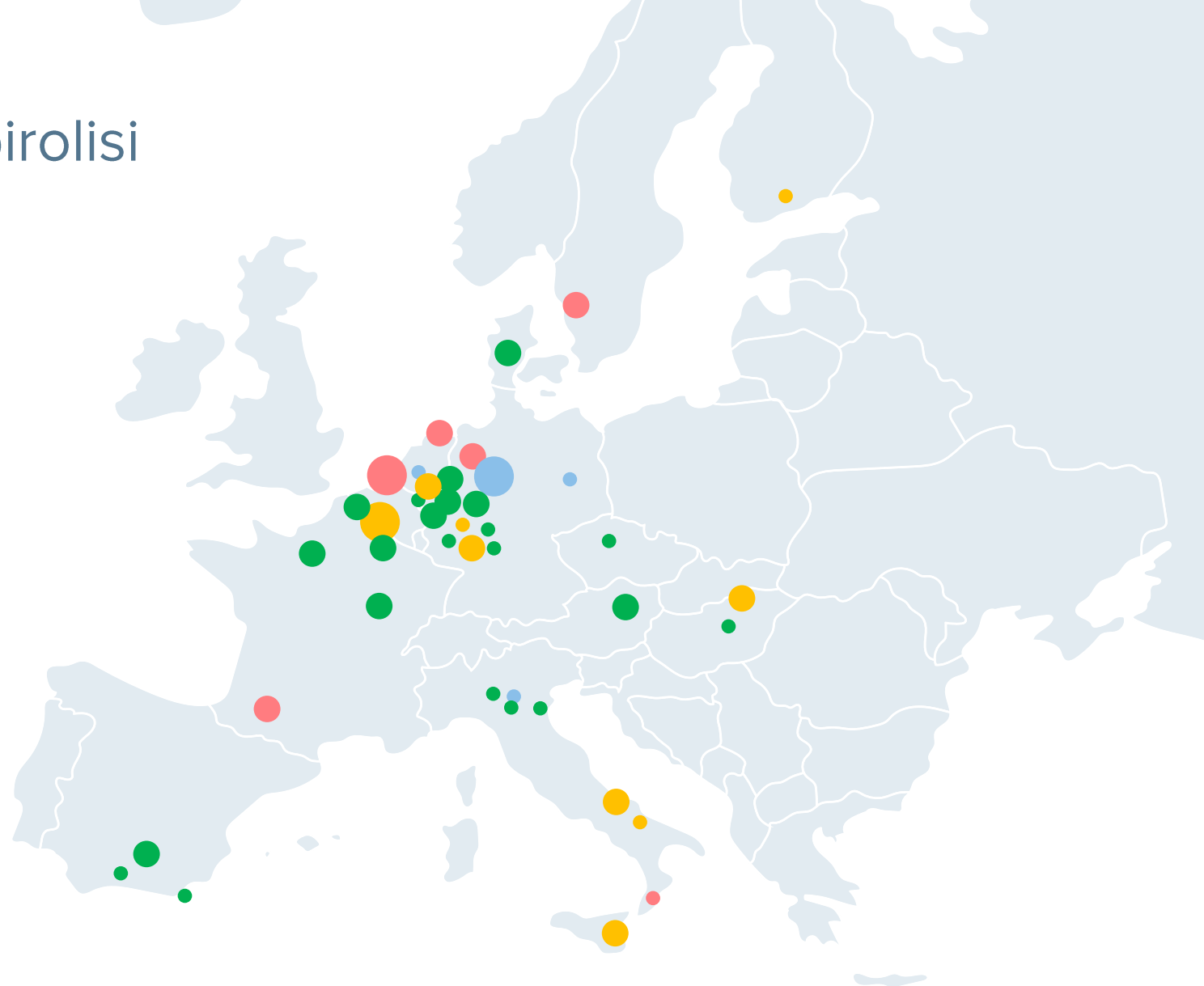
4 ● Annunciati

6 ● In sospeso / annullati

24 kt Taglia media

Paesi

Germania, Paesi Bassi, Italia,
Francia, Belgio, Spagna, Ungheria,
Finlandia, Danimarca, Svezia



Legenda

● > 50 kt

● 10 - 50 kt

● < 10 kt

Fonte: AGICI

La geografia degli impianti di gassificazione

10 N° progetti

1 ● Operativi

3 ● In via di sviluppo

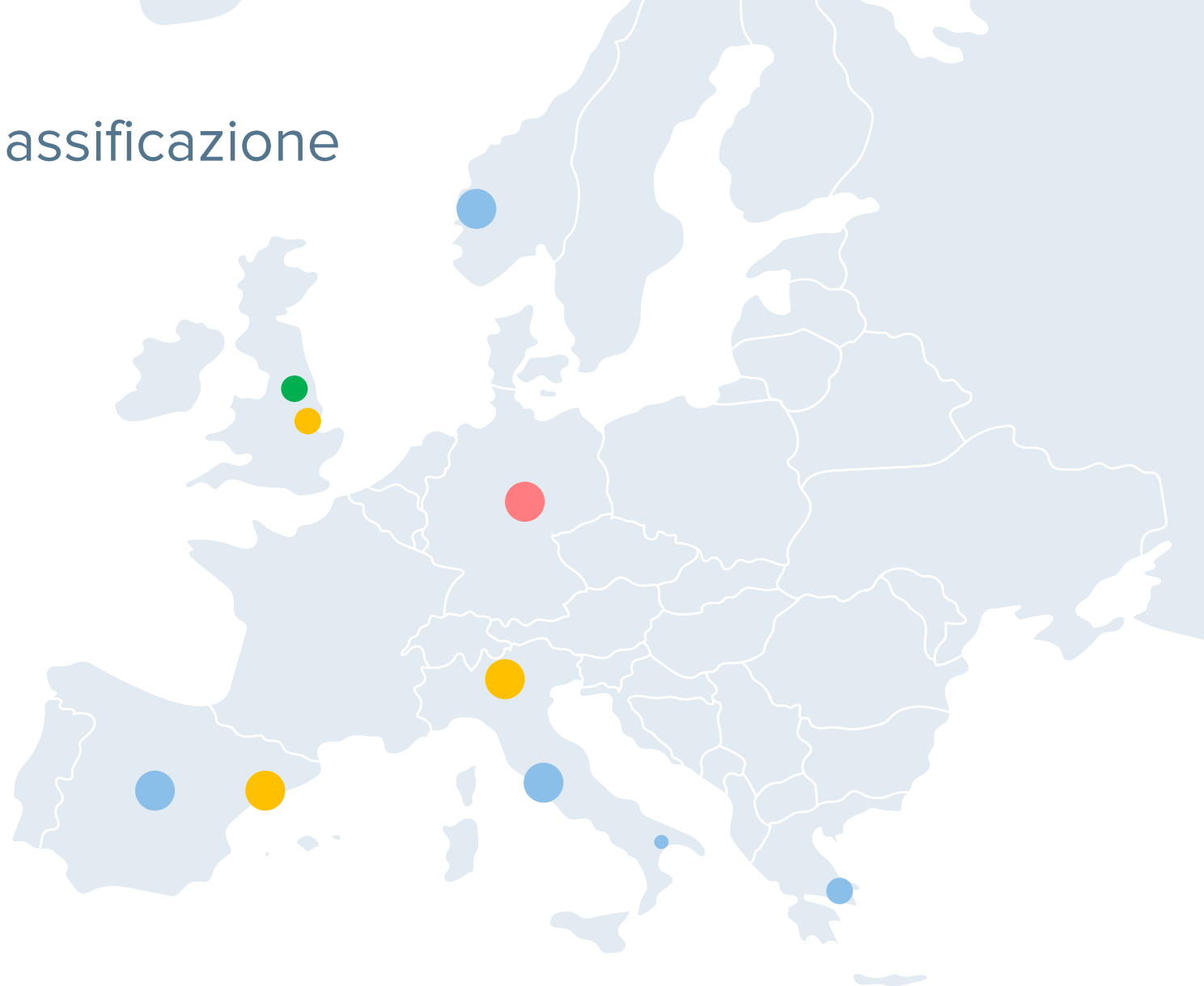
5 ● Annunciati

1 ● In sospeso / annullati

200 kt Taglia media

Paesi

Regno Unito, Italia, Germania,
Spagna, Grecia, Norvegia



Legenda

● > 50 kt

● 10 - 50 kt

● < 10 kt

Fonte: AGICI

Lo stato degli investimenti

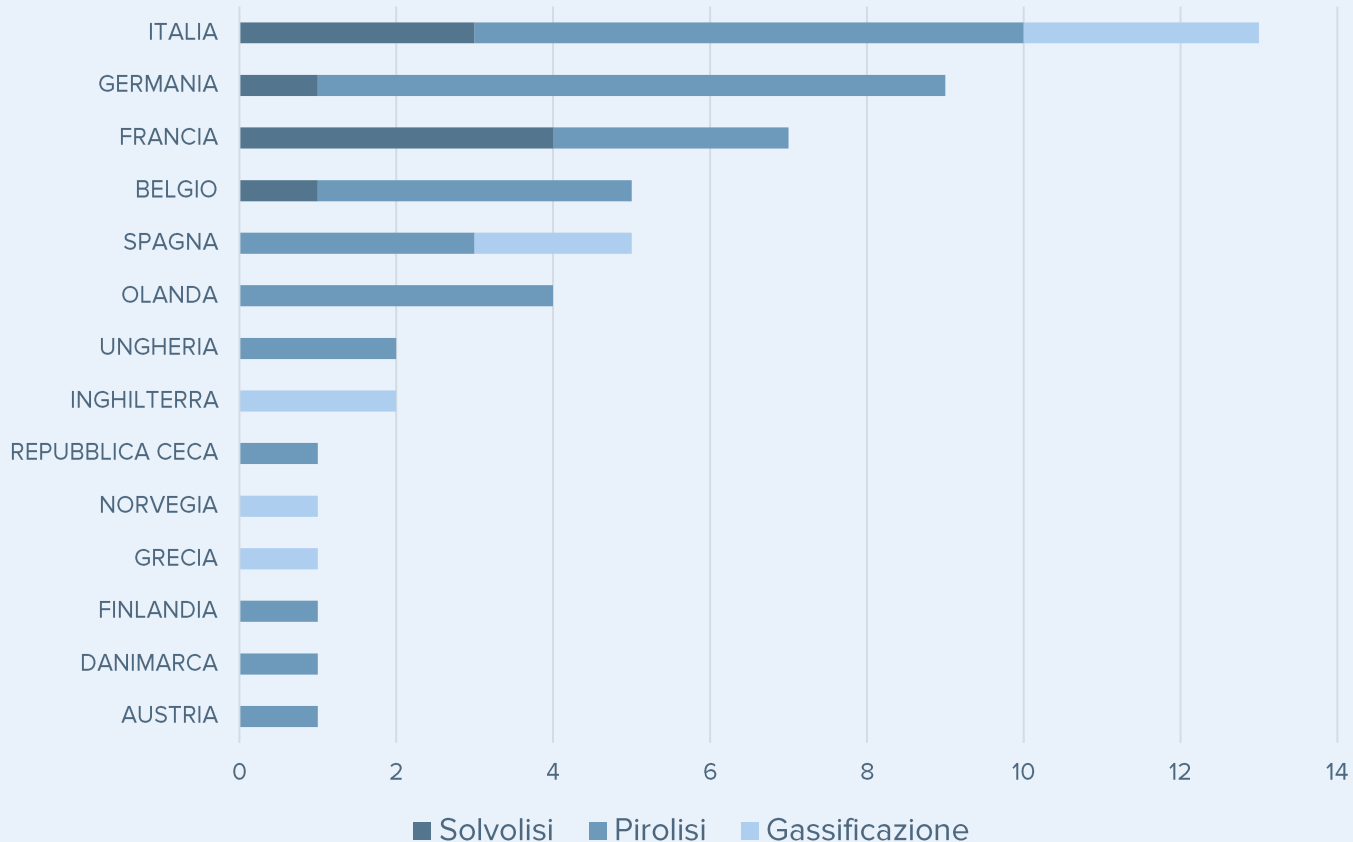
Geografie industriali

L'Italia è uno dei paesi che sta investendo maggiormente nel riciclo chimico, per altro diversificando tra le tre tecnologie.

Al netto dei progetti sospesi che si concentrano tra Olanda, Francia, Italia e Germania, i progetti ancora attivi (operativi o annunciati/in fase di realizzazione) si concentrano prevalentemente in Italia, Germania e Francia.

L'Italia quindi sta andando in continuità con gli investimenti fatti in passato nel riciclo meccanico che l'hanno spinta ai vertici dell'economia circolare nell'Unione Europea.

Progetti attivi per paese



Fonte: AGICI

Lo stato degli investimenti

Il ritmo di sviluppo

Lo sviluppo degli impianti di pirolisi sta seguendo un ritmo piuttosto rapido. Stando alle dichiarazioni degli operatori che hanno fatto investimenti impiantistici nel campo della pirolisi, la capacità sta aumentando seguendo una funzione esponenziale e raddoppiando ogni anno.

Il settore si trova quindi nel punto che i modelli di diffusione tecnologica (Abernathy & Utterback, 1978) definiscono fase di take-off, ovvero il punto di inflessione della curva di adozione in cui esplode la fase di crescita rapida della tecnologia.

Capacità installata cumulata nel tempo impianti di pirolisi



Fonte: AGICI

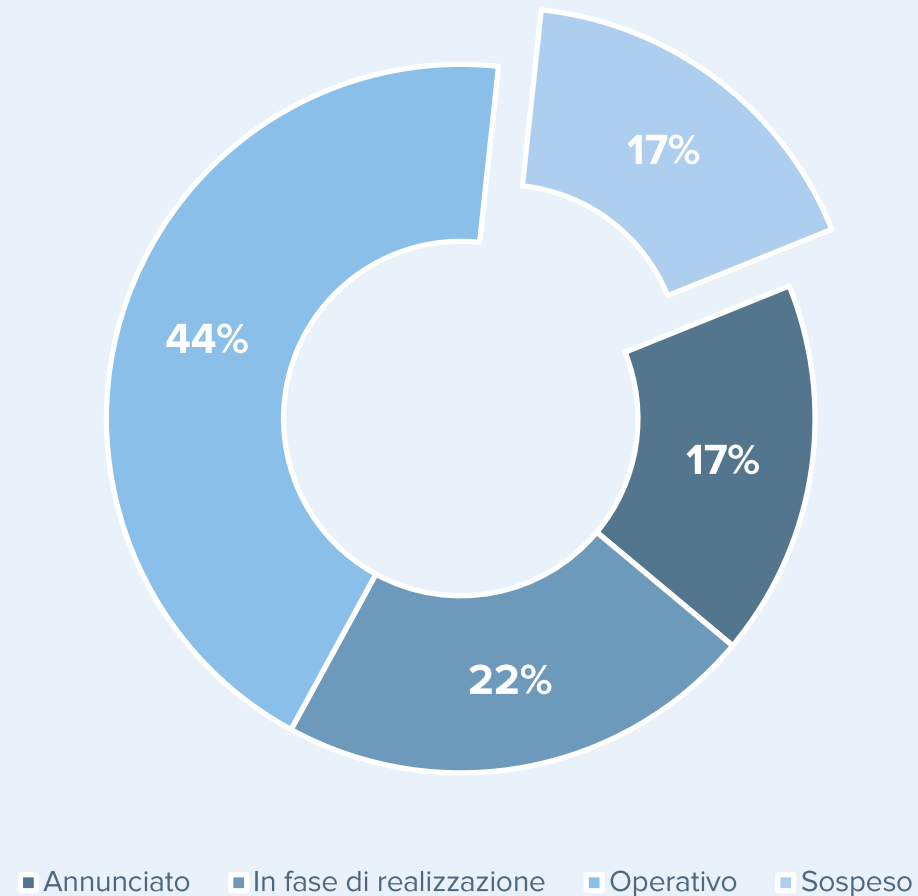
Lo stato degli investimenti

Se da un lato assistiamo ad un aumento e ad un'accelerazione degli investimenti, dall'altra si osservano anche diverse decisioni di sospendere o annullare interamente progetti impiantistici. Rispetto ai 64 progetti annunciati, il 17% è in sospeso o cancellato.

In una fase in cui i livelli di maturità tecnologia sono bassi, è fisiologico avere dei fallimenti. Ad esempio nella solvolisi, in cui le tecnologie presentano i TRL più bassi, il tasso di abbandono è del 30%.

Un secondo motivo ha a che fare con il quadro di mercato, che in una fase precommerciale come nel caso della pirolisi, deve essere definito per poter garantire un orizzonte di medio periodo che agevoli la crescita.

Stato dei progetti annunciati



Fonte: AGICI



Dentro gli
investimenti

04.

I business case di pirolisi e gassificazione

Per permettere al riciclo chimico di fare il salto di scala verso una dimensione propriamente industriale, occorre individuare quali fattori sono maggiormente rilevanti nei business case degli impianti.

Sono dunque stati costruiti due business case, relativi esclusivamente agli impianti a maggiore maturità tecnologica, ovvero pirolisi e gassificazione (TRL 9). I business case sono stati costruiti raccogliendo case studies degli impianti esistenti e dati tecnici dalla letteratura scientifica.

Nei business case considerati, si è ipotizzata una durata operativa degli impianti pari a 20 anni. In particolare, per l'impianto di gassificazione è stato previsto un periodo di costruzione di 5 anni, durante il quale non vengono generati ricavi,

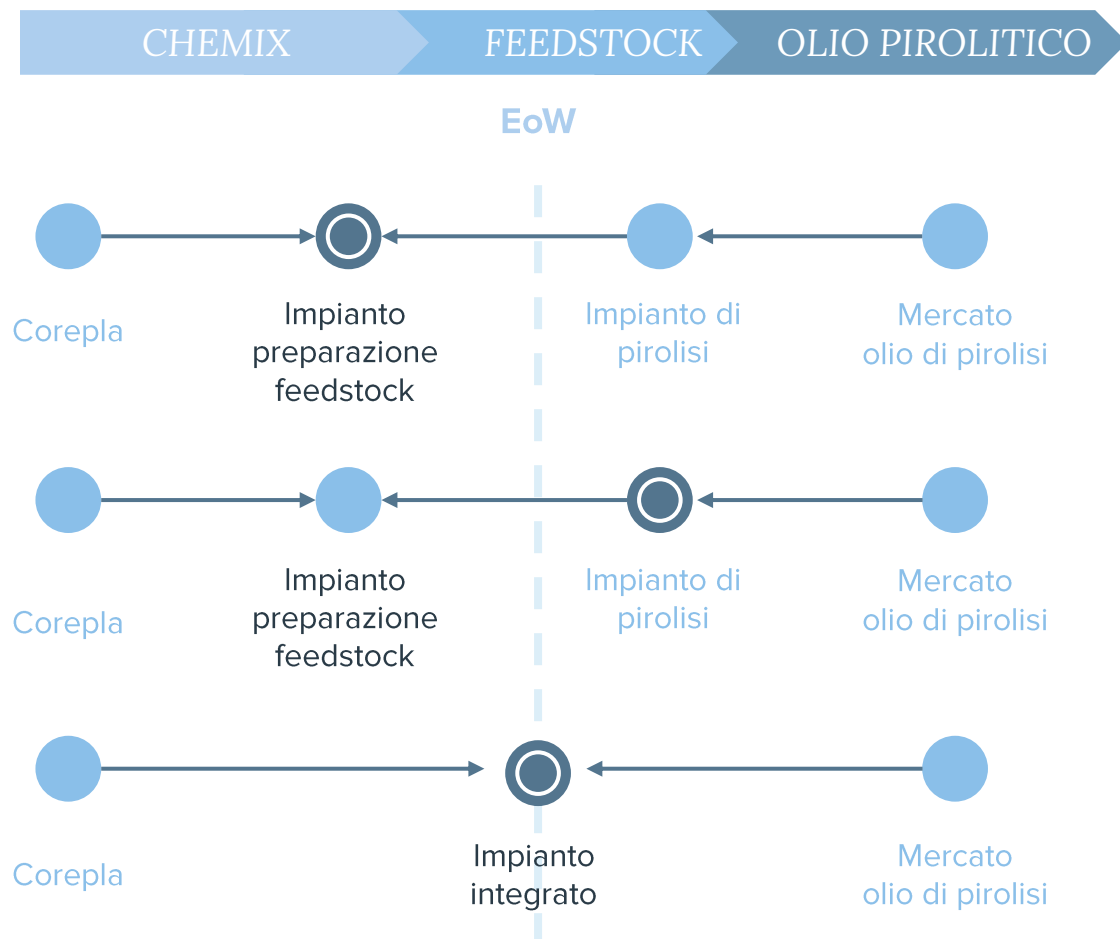
mentre per l'impianto di pirolisi il tempo di costruzione assunto è di 1 anno. È stato quindi possibile stimare i fattori di ricavo e la struttura dei costi per questi due tipi di impianti.

Per permettere la comparazione tra i case studies, sono stati usati dei parametri finanziari fissi.

Per facilitare il confronto e riuscire ad identificare le variabili più rilevanti per il successo del business case, sono stati ipotizzati flussi di cassa costanti in funzione di un prezzo stabile degli input e degli output di produzione.

Pirolisi: posizioni lungo la filiera

La filiera della pirolisi delle plastiche sta acquisendo una struttura a due livelli in funzione della cessazione della qualifica di rifiuti: da una parte l'attività di preparazione del feedstock e dall'altra il riciclo con la produzione di olio di pirolisi. Le aziende hanno tre possibili posizionamenti:



1. Imprese specializzate nella preparazione del feedstock

- Servizio di smaltimento del CHEMIX Corepla
- Vendita del feedstock EoW

2. Imprese specializzate nella produzione dell'olio di pirolisi

- Vendita dell'olio di pirolisi

3. Imprese integrate

- Servizio di smaltimento del CHEMIX Corepla
- Vendita dell'olio di pirolisi

Pirolisi: trade-off tra impianto specializzato e impianto integrato

Prendendo in esame solo i business dotati di impianti di pirolisi, la scelta di posizionamento lungo la filiera presenta alcuni trade-off.

Entrambi gli impianti hanno **CAPEX** molto alti. Indipendentemente dalle specifiche di ogni singola struttura, i valori unitari per tonnellata sono doppi rispetto alla tecnologia più capital-intensive nel settore rifiuti: la termovalorizzazione. Tuttavia l'impianto integrato presenta CAPEX più alti rispetto all'impianto specializzato in quanto si rende necessaria una linea che riceva il CHEMIX prodotto da Corepla e prepari un feedstock con specifici requisiti per poter essere immesso nell'impianto di pirolisi.

L'impianto integrato presenta **OPEX** più bassi poiché, sebbene affronti i costi operativi per la preparazione del feedstock, evita i costi connessi con l'acquisto del feedstock sul mercato. Viceversa, l'impianto specializzato ha, nel complesso, costi operativi più alti.

L'impianto integrato affronta **rischi di performance** più alti dell'impianto specializzato. I flussi di rifiuti in ingresso nella linea di preparazione hanno composizioni diverse in funzione delle abitudini di consumo e delle modalità di raccolta nelle varie geografie locali, la preparazione è soggetta ad una produttività variabile. La qualità del lavoro di preparazione del feedstock ha un impatto diretto sulla quantità e sulla qualità dell'olio di pirolisi ed incide quindi

sulla redditività dell'impianto e sulla capacità di rispettare eventuali accordi di vendita dell'olio di pirolisi. Invece i rischi di performance dell'impianto specializzato si limitano alla sola produzione dell'olio, dato che il feedstock in ingresso ha specifiche standard.

Il **rischio di mercato a monte** è alto per entrambi i modelli. Per l'impianto integrato il CHEMIX potrebbe non essere sempre una forma di ricavo, dato che il decollo del mercato del riciclo chimico potrebbe spingere alla competizione con un abbassamento della gate fee o addirittura trasformandosi in un costo qualora Corepla lo venda analogamente a quanto fa per altri polimeri. Per l'impianto specializzato sussiste un rischio connesso con l'approvvigionamento del feedstock, che può non essere conforme alle specifiche oppure avere un prezzo troppo alto, specialmente laddove il mercato sia piccolo e controllato da un numero limitato di operatori.

Esiste infine un **rischio di mercato a valle** per entrambi i modelli, connesso con il futuro andamento dei prezzi dell'olio di pirolisi e con la capacità dell'impresa di posizionarsi su un mercato internazionale costituito dai grandi gruppi industriali della chimica.

Pirolisi: impianto specializzato

È stato preso in considerazione un impianto capace di trattare 30.000 tonnellate/anno in ingresso. Supponendo una saturazione dell'85% e una produttività del 70%, l'impianto genera 17.850 tonnellate di olio.

In generale, l'impianto presenta CAPEX e OPEX alti e risulta quindi redditizio solo con condizioni operativi e di mercato stabili e particolarmente favorevoli.

Considerando il prezzo dell'olio di pirolisi, il progetto è redditizio solo con valori alti, superiori ai 1.143 €/ton. Poiché come sostituto fossile è stata presa a riferimento la nafta con un prezzo medio di 600 €/ton, significa che il mercato deve riconoscere all'olio di pirolisi un'importante premialità dovuta al suo valore ambientale. Ciò significa che l'impianto può funzionare solo se la normativa creerà un mercato capace di riconoscere un'alta premialità all'olio di pirolisi con un orizzonte di lungo periodo.

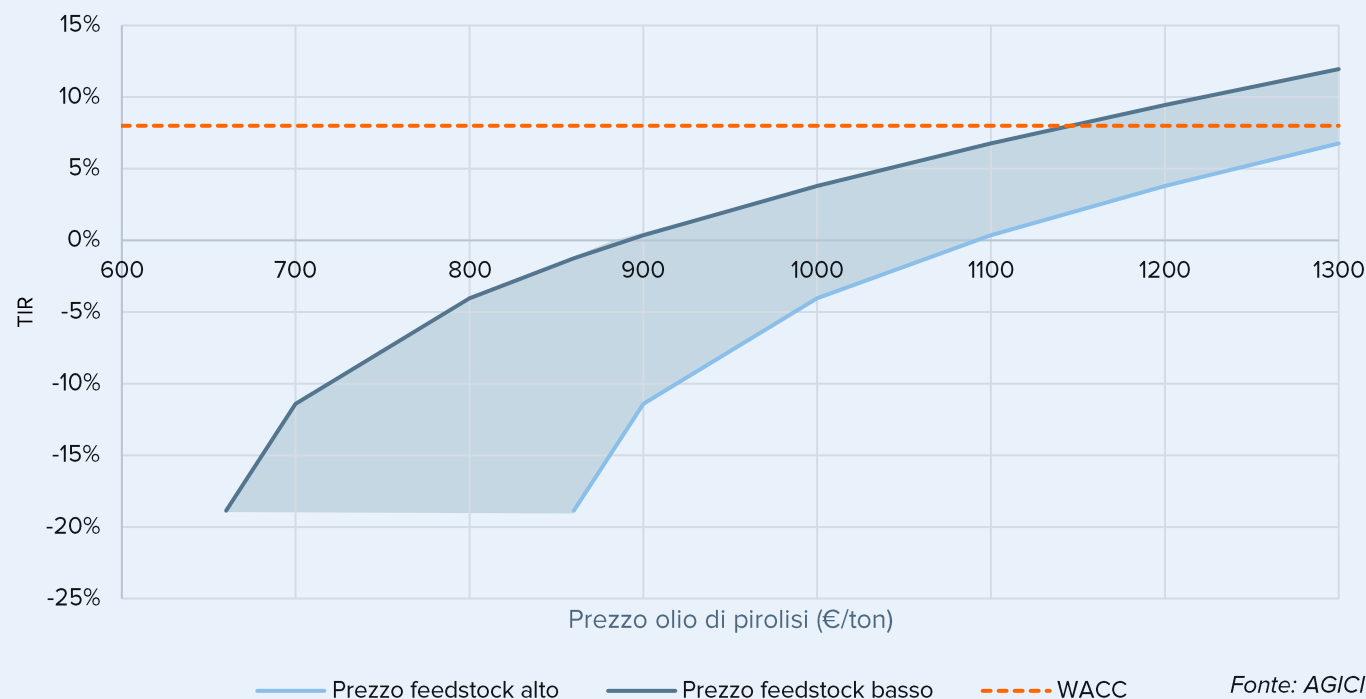
Per quanto riguarda i prezzi del feedstock, il progetto migliora la redditività con prezzi medio-bassi. Rispetto al range ipotizzato, il progetto è redditizio con valori compresi tra 250 €/ton e 359 €/ton.

Parametri fissi

Capacità	30.000 ton/anno
Saturazione	85%
Produttività	70%

Parametri variabili

Prezzi feedstock	250-390 €/ton
Prezzi olio	500-1300 €/ton



Pirolisi: impianto integrato

In maniera analoga all'impianto specializzato, anche per l'impianto integrato è stata presa in considerazione una struttura da 30.000 tonnellate in ingresso. Tuttavia la produttività dell'impianto dipende sia dai parametri della linea di preparazione del feedstock, sia dai parametri della sezione di pirolisi.

Data la varietà dei flussi di rifiuti in ingresso e la necessità di standardizzare il più possibile il feedstock prima di immetterlo nel reattore di pirolisi, i parametri di preparazione del feedstock sono cruciali per l'impianto. Per il business case è stato quindi considerato un intervallo di produttività compreso tra 60% e 80% a cui si aggiunge un parametro fisso al 70% del reattore di pirolisi.

Naturalmente con produttività più alte, migliora la redditività dell'impianto, mentre con una produttività del 60% l'impianto non riesce ad essere redditizio.

In generale con un alta redditività, l'impianto riesce ad essere redditizio anche con prezzi dell'olio di pirolisi superiori ai 900 €/ton.

Parametri fissi

Capacità **30.000** ton/anno

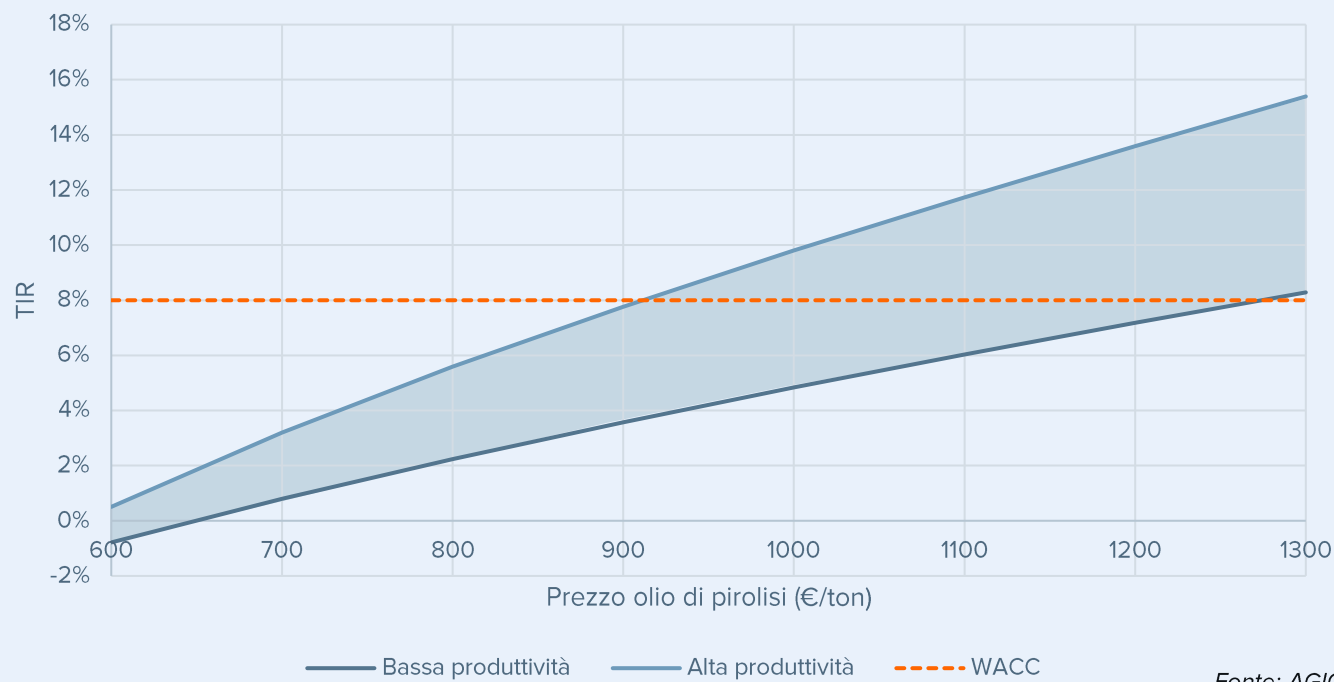
Saturazione **85%**

Produttività
pirolisi **70%**

Parametri variabili

Produttività
preparazione feedstock **60-80%**

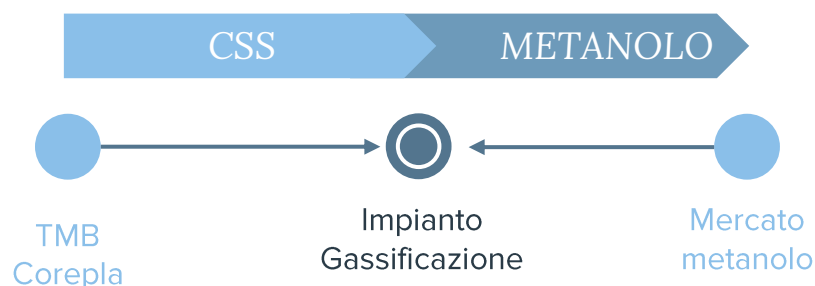
Prezzi olio **500-1300** €/ton



Fonte: AGICI

Gassificazione: posizione nella filiera e trade-off

La filiera della gassificazione è molto più semplice rispetto a quella della pirolisi, poiché l'impianto di gassificazione si inserirebbe in una filiera consolidata di preparazione del combustibile solido secondario (CSS) e sarebbe un impianto di chiusura del ciclo, analogo in questo aspetto ad altre tecnologie come la termovalorizzazione e l'incenerimento. Rispetto a queste tecnologie, la gassificazione emette meno CO₂ e rende possibile il sequestro della CO₂ residua.



Fonti di ricavo

- Servizio di smaltimento del CSS e altri residui
- Vendita del metanolo e dell'idrogeno

L'impianto di gassificazione ha CAPEX elevati. Rispetto ad un termovalorizzatore, i valori di CAPEX unitari sono doppi. Ciò impone di dover operare in condizioni di mercato stabili e non soggette a volatilità nel lungo periodo.

La preparazione del feedstock è importante ma non è così selettiva come nel caso della pirolisi. Infatti il vantaggio della gassificazione ad alta temperatura rispetto alla pirolisi è la possibilità di gestire anche materiali diversi da specifiche tipologie di plastiche, nonché di ridurre la quantità di catrami e scarti che possono trovare altra destinazione presso cementifici. È sufficiente quindi che il CSS o altri residui contenenti carbonio abbiano un determinato potere calorifico.

Una delle fonti di ricavo, oltre la vendita del prodotto finale, è la gate-fee che la filiera può pagare per lo smaltimento del CSS. Il valore della gate-fee è determinato dal mercato della termovalorizzazione in Italia e che è sostanzialmente stabile, anche in virtù del numero limitato di termovalorizzatori e dell'ampio ricorso alla discarica, ma che in uno scenario competitivo potrebbe avere delle oscillazioni importanti.

Un secondo rischio di mercato è a valle e riguarda il prezzo del metanolo sostenibile fondamentalmente legato al bunkeraggio ovvero al combustibile per la navigazione: un mercato internazionale in cui gli operatori iniziano a vedere gli impatti delle politiche di decarbonizzazione sui propri bilanci.

Dentro gli investimenti

Gassificazione

È stato considerato un impianto da 200 kt di capacità ed è stata ipotizzata una saturazione media dell'85%. La produttività del metanolo rispetto all'input di CSS è stata considerata al 48% mentre quella dell'idrogeno, come sottoprodotto del processo in questa configurazione impiantistica, è dello 0,4%.

In generale il TIR di progetti non è elevato e migliora in funzione del prezzo del metanolo. È stato considerato un intervallo tra i 500 €/ton e i 1200 €/ton. Alle condizioni imposte dal modello, l'impianto inizia ad essere redditizio con un valore superiore ai 908 €/ton.

Anche il valore della gate fee ha un importante impatto sulla redditività. Ipotizzando una competizione con le gate fee della termovalorizzazione, è stato considerato un range compreso tra 0 e 200 €/ton. L'impianto inizia ad essere redditizio sopra gli 84 €/ton.

Quindi in presenza di un prezzo alto del metanolo, l'impianto può facilmente competere con tecnologie come la termovalorizzazione.

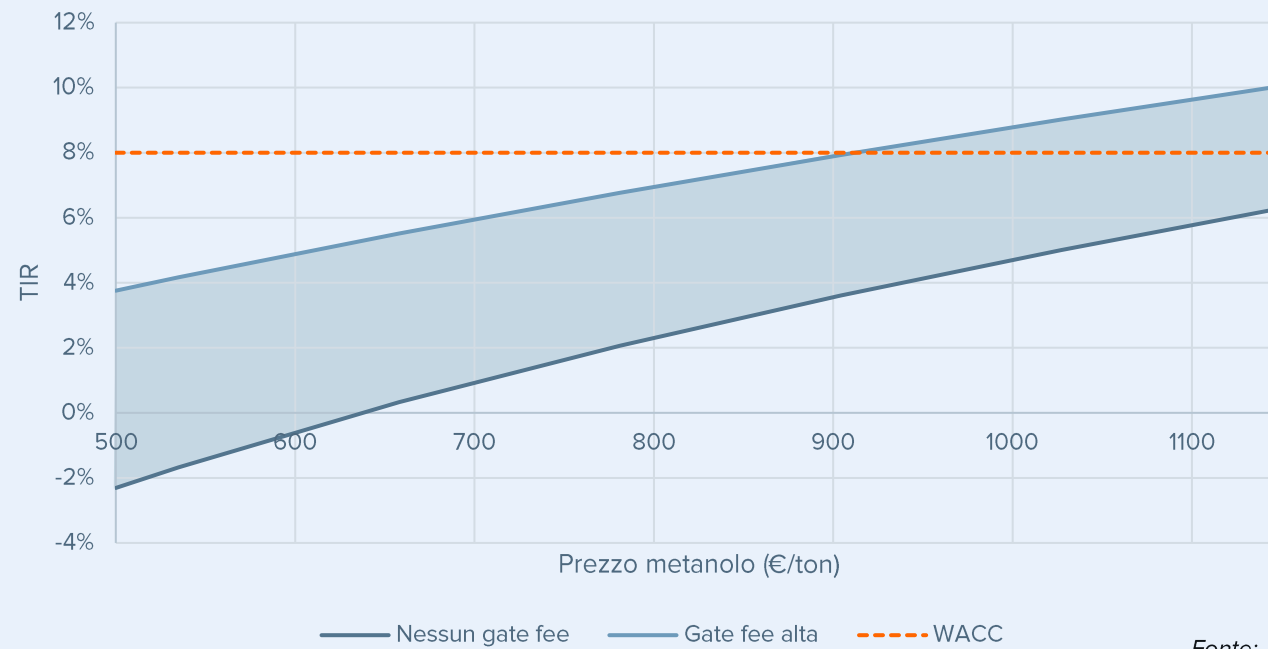
In prospettiva futura, qualora il settore rifiuti fosse soggetto all'ETS, un'ulteriore fonte di ricavo per l'impianto di gassificazione potrebbe essere la valorizzazione dei crediti ETS

Parametri fissi

Capacità	200.000 ton/anno
Saturazione	85%
Produttività	48%

Parametri variabili

Gate-fee	0-200 €/ton
Prezzi metanolo	500-1.200 €/ton



Fonte: AGICI



Scenari di
sviluppo
per l'Italia

05.

Le dimensioni del mercato

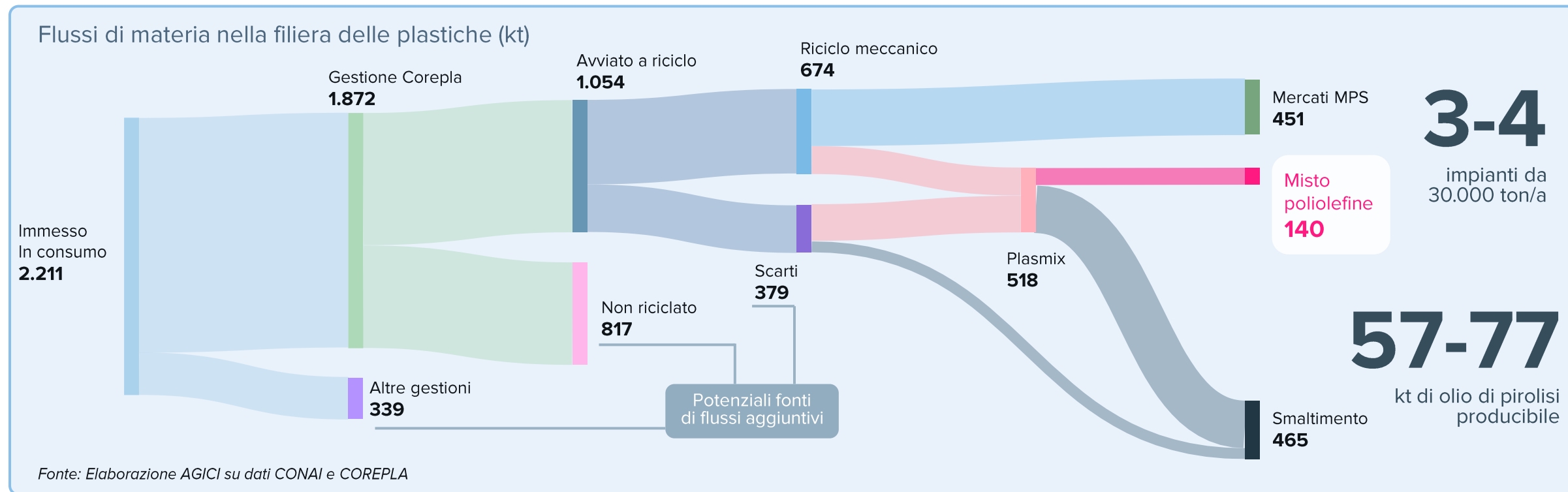
Le due tecnologie di riciclo chimico – pirolisi e gassificazione – usano feedstock differenti e devono essere integrate in punti differenti delle filiere di gestione dei rifiuti.

La pirolisi è l'ideale complemento della filiera di gestione dei rifiuti plastici. Mentre la gassificazione si candida ad essere una tecnologia di chiusura del ciclo, smaltendo combustibile solido secondario (CSS) senza passare da processi di combustione.

I possibili scenari per l'integrazione di queste tecnologie nelle due filiere sono funzionali alla disponibilità del feedstock a monte e dei mercati delle materie riciclate a valle.

Occorre quindi stimare la quantità di rifiuti disponibili per alimentare gli impianti di riciclo chimico, ipotizzare la domanda di prodotti da parte dell'industria chimica e valutare le conseguenze sui prezzi delle dinamiche domanda-offerta.

Dimensione del mercato del feedstock per pirolisi



Analizzando i dati riportati da CONAI e Corepla, la quantità di plasmix disponibile si attesta intorno alle 500 kt l'anno. Di queste, solo una parte rappresenta un misto poliolefinico che Corepla separa ulteriormente e rende disponibile, con il nome commerciale Chemix, per produrre feedstock per impianti di pirolisi. Rispetto ai flussi di Corepla, la disponibilità si attesta intorno alle 140 kt l'anno. Questa stima è conservativa poiché **si può teoricamente attingere dai flussi delle altre gestioni e**

del mercato, nonché dalla quota di imballaggi che oggi non è raccolta e avviata a riciclo e infine dagli scarti dei processi di riciclo stessi. Dal misto di poliolefine si può produrre feedstock da usare negli impianti di pirolisi compreso tra 80 kt e 110 kt a seconda del processo di selezione. Questo feedstock sarebbe sufficiente ad alimentare 3-4 impianti di taglia media (30 kt) e, con un tasso di trasformazione del 70%, potrebbero produrre tra 55 e 77 kt di olio di pirolisi.

Dimensione del mercato dell'olio di pirolisi

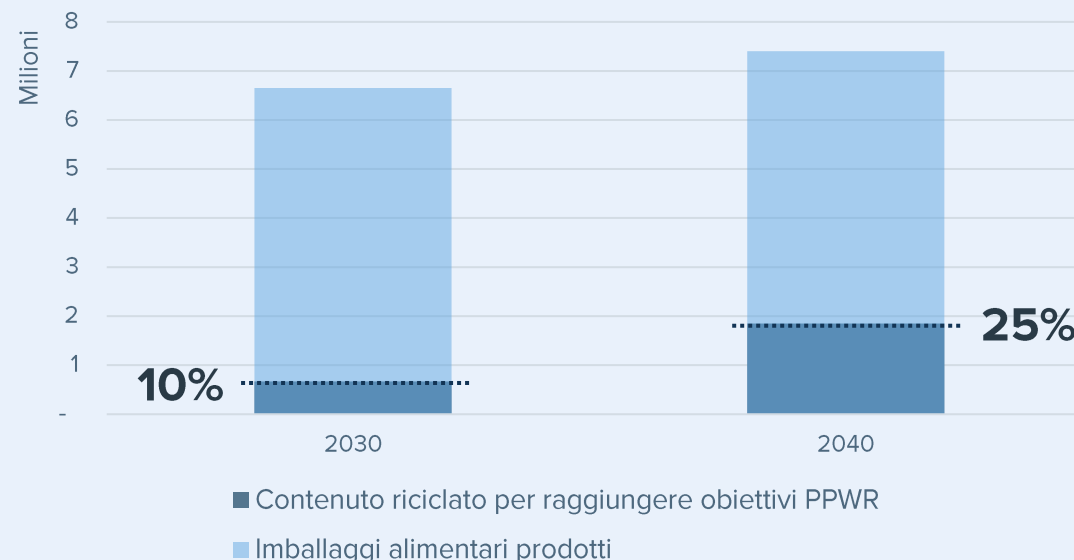
Il valore del mercato sarà determinato soprattutto dalla domanda di olio di pirolisi per la produzioni di nuovi polimeri quali PE e PP tra gli altri. Questa domanda è soprattutto guidata dagli obiettivi delle politiche europee. La Packaging and Packaging Waste Regulation fissa un contenuto di materia riciclata negli imballaggi a contatto alimentare che non siano PET del 10% nel 2030 e del 25% nel 2040.

Nel 2020, l'industria alimentare europea consumava 2,5 Mt di imballaggi flessibili in PE e PP mentre nel 2023 3,5 Mt di imballaggi rigidi (HDPE e PP) venivano usati per imballaggi domestici. Plastic Recyclers Europe stima una crescita per i prossimi anni del 2% annuo per il film e dello 0,2% annuo per gli imballaggi rigidi. Si può dunque stimare una domanda di imballaggi alimentari al 2030 di 6,6 Mt (composta da 3 Mt di film e 3,5 Mt di imballaggi rigidi) e di 7,4 Mt nel 2040.

Poiché, ad esclusione del PET, oggi il quantitativo di plastiche riciclate per imballaggi a contatto alimentare è prossimo allo zero, possiamo supporre che per raggiungere gli obiettivi PPWR, il riciclo chimico possa fornire interamente la plastica riciclata food-grade. In questo caso la domanda di plastica riciclata food-grade sarebbe di 665 kt nel 2030 e 1,8 Mt nel 2040 a cui corrispondono quantità di olio di pirolisi pari a 831 kt nel 2030 e 2,3 Mt nel 2040.

Queste stime sono conservative, in quanto si riferiscono al solo segmento degli imballaggi a contatto alimentare, ma il riciclo chimico potrebbe contribuire a raggiungere gli obiettivi della PPWR anche per gli altri tipi di imballaggi.

Domanda futura di contenuto riciclato negli imballaggi per alimenti (escluso PET) secondo gli obiettivi PPWR



Domanda potenziale di olio di pirolisi

830 kt
nel 2030

2.310 kt
nel 2040

Fonte: Elaborazione AGICI su dati Plastic Recyclers Europe

Incontro tra domanda e offerta per la pirolisi

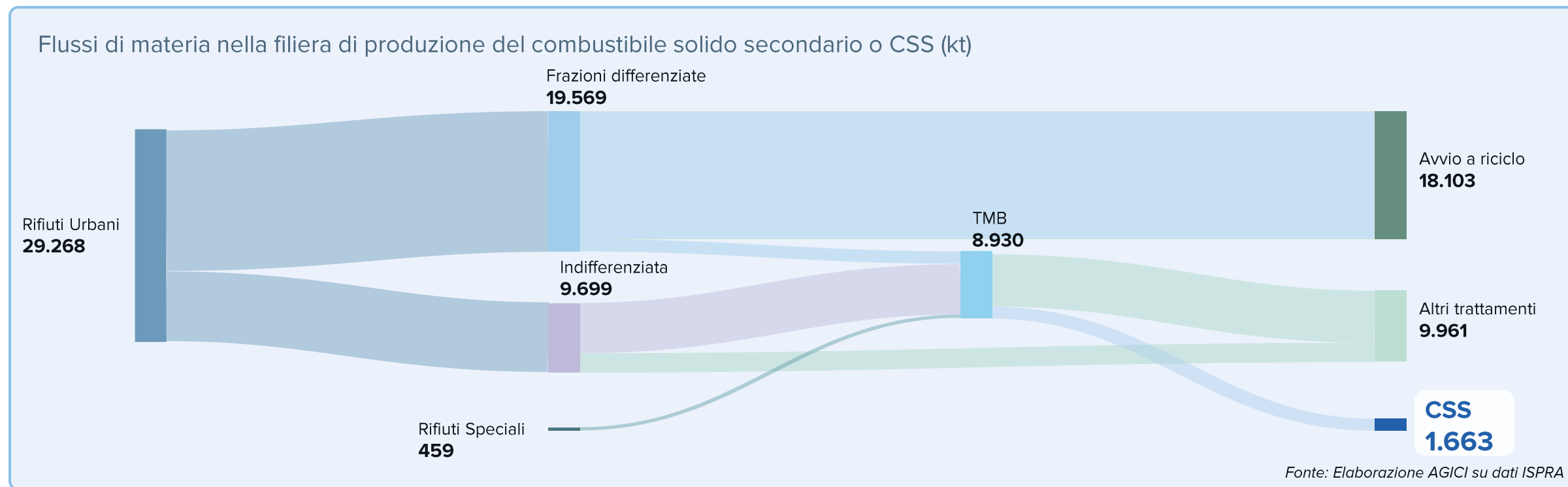
Considerando che nel 2022 l'Italia ha prodotto il 14% di tutti i rifiuti da imballaggi plastici d'Europa, preceduta solo da Francia (15%) e Germania (22%), se ipotizziamo un rapporto diretto tra quantità di rifiuti, disponibilità di feedstock e produzione di olio, possiamo fare una stima conservativa dell'offerta europea di olio di pirolisi compresa tra 400-550 kt.

L'offerta di olio sarà leggermente al di sotto della domanda stimata per il raggiungimento dei target PPWR 2030. Questo gap tra domanda imposta per legge e offerta, potrebbe determinare in un primo momento prezzi alti per l'olio di pirolisi. Ciò potrebbe spingere la filiera del riciclo ad aumentare la disponibilità di poliolefine per la produzione di feedstock in modo da aumentare la produzione di olio di pirolisi, ma al contempo la domanda progressiva di contenuto riciclato sarà destinata ad aumentare di oltre 3 volte negli anni '30 per raggiungere l'obiettivo PPWR al 2040. Non è detto tuttavia che l'offerta di olio di pirolisi possa aumentare allo stesso ritmo, poiché esiste un limite fisico alla disponibilità di poliolefine nei rifiuti plastici.

Ciò potrebbe condurre la filiera verso una scarsità strutturale di olio e quindi verso prezzi stabilmente alti, che realizzerebbero le previsioni più ottimistiche degli operatori degli impianti di pirolisi. Tuttavia, prezzi alti potrebbero rappresentare un costo per la filiera della chimica a valle – già fortemente sottoposta a pressioni dalla concorrenza internazionale e che sta dismettendo gli impianti di steam cracking in tutta Europa – che, verosimilmente, scaricherà i costi a valle sui prodotti finali, ovvero sul packaging.

Per evitare che le forze di mercato spingano a una competizione intra-filiera, scaricando a monte o a valle i costi per poter intercettare maggior valore, occorre guidare gli attori con una politica industriale europea che integri le industrie dei rifiuti e della chimica e stabilizzi gli scambi tra i vari livelli della filiera.

Disponibilità del feedstock per impianti di gassificazione



Gli impianti di gassificazione possono essere alimentati con il combustibile solido secondario (CSS) che può essere derivato dal trattamento dei rifiuti urbani indifferenziati, così come dai sovvalli dei processi di trattamento delle altre frazioni differenziate di rifiuti urbani, nonché da rifiuti industriali ad alto contenuto di carbonio. Secondo ISPRA, il trattamento meccanico-biologico dei rifiuti nel 2023 ha generato 1,6 milioni di tonnellate di CSS. Se da un lato, si può prevedere che la

quantità di rifiuti indifferenziati scenda nel lungo periodo per effetto delle politiche che seguono la gerarchia dei rifiuti, da un altro, **si potrebbero rendere disponibili milioni di tonnellate aggiuntive di feedstock**, sia attingendo alla quota di frazione secca dei rifiuti indifferenziati che continua ad essere incenerita in Italia e all'estero, sia attingendo ai rifiuti speciali quali pulper da cartiera, rifiuti dell'industria dei pellami, compensati dall'industria delle costruzioni.

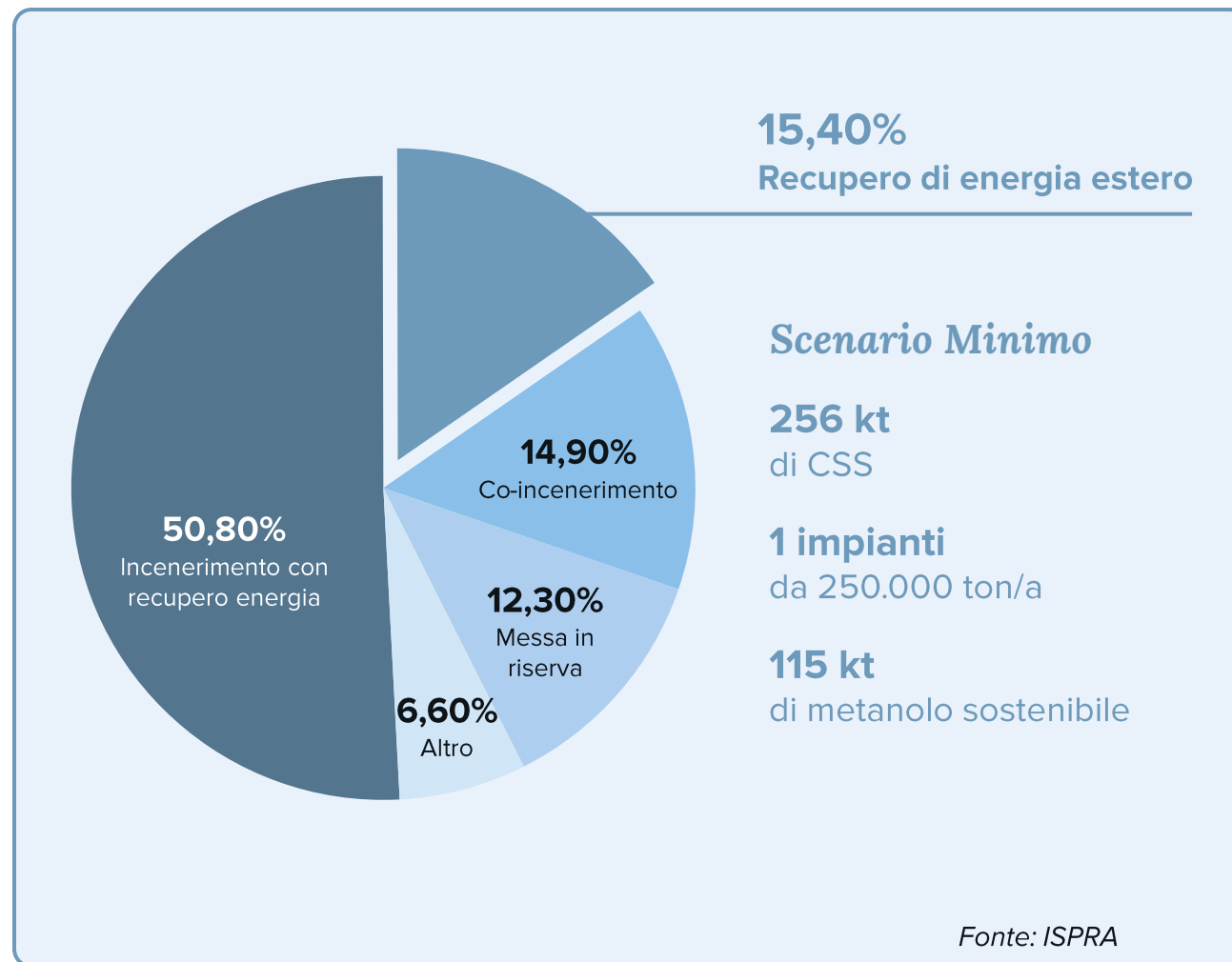
Disponibilità del feedstock per impianti di gassificazione

Attualmente il 50% del CSS prodotto in Italia viene avviato ai termovalorizzatori nazionali, un altro 15% viene avviato a recupero energetico all'estero, mentre il 14% viene mandato a co-incenerimento presso cementifici nazionali.

In uno scenario di complementarità tra termovalorizzatori/cementifici e impianti di gassificazione, potremmo considerare come potenziale feedstock la quota di CSS che oggi viene spedita all'estero, ammontante a 256 kt. Con questo potenziale, possiamo ipotizzare che in Italia ci sia spazio per un impianto di grande taglia o per due impianti, qualora si riuscisse a rendere disponibili le 241 kt aggiuntive di frazione secca non qualificata come CSS che oggi vengono avviate a termovalorizzazione all'estero.

Dalle 256 kt di CSS si possono produrre fino a 115 kt di metanolo sostenibile. Questa cifra è destinata ad aumentare qualora si rendesse disponibile maggiore feedstock in termini assoluti. Oppure qualora l'impianto di gassificazione andasse in competizione con la termovalorizzazione, sottraendole flussi o sostituendosi ad essa per progressiva obsolescenza degli impianti più vecchi.

Nel caso di uno scenario competitivo e poiché si tratta di tecnologie di chiusura del ciclo, sarebbe opportuno l'intervento dello Stato come pianificatore al fine di evitare inefficienze nell'allocazione dei flussi.



Scenari di sviluppo in Italia

Dimensione del mercato del metanolo

Una delle possibili applicazioni del metanolo prodotto da gassificazione, è nel settore della navigazione. Secondo i target Fuel EU Maritime, che sono parte del pacchetto Fit for 55, nel 2030 il settore marittimo dovrà ridurre la propria intensità carbonica del 6% rispetto al 2020. Secondo l’EU-MRV, nel 2021, in Europa si sono consumati 41 Mt di combustibile con un intensità di carbonio di 91,16 gCO₂e/MJ. Per ridurre l’intensità media di questa quantità di combustibile fossile si può fare ricorso a un mix di diversi combustibili con differenti livelli di intensità di carbonio.

Abbiamo assunto uno scenario dove vi sia grande diversificazione tra i combustibili e, a queste condizioni, la quantità di metanolo sostenibile necessaria a raggiungere il target di intensità carbonica del 2030 ammonta a circa 3,2 Mt.

Considerando che i target europei prevedono un percorso di riduzione progressiva dell’intensità carbonica ogni 5 anni, fino ad arrivare a una riduzione dell’80% nel 2050, possiamo ragionevolmente attenderci che il mercato del metanolo sostenibile sarà destinato a crescere, specialmente se si considera preferibile il metanolo all’ammonica (che presenta rischi connessi con la tossicità) e all’HVO che ha un limite strutturale alla crescita del mercato.

Poiché l’offerta di metanolo generabile in Italia in funzione della quantità di CSS facilmente disponibile sul mercato (115 kt) è di un ordine di grandezza inferiore rispetto alla domanda del settore della navigazione (3.200 kt), nel futuro ci si può aspettare una strutturale scarsità di metanolo che spingerà verso l’alto i prezzi a vantaggio del dispiegamento della filiera di produzione di metanolo sostenibile.

Combustibile	GNL	HFO (Heavy Fuel Oil)	HVO (Hydrotreated Vegetable Oil)	Metanolo	Ammoniaca
Scenario Mix 2030	10%	20%	35%	25%	10%
Intensità di carbonio (gCO ₂ e/MJ)	110	97	20	10	5
Quantità 2030 (Mt)	3,41	8,2	14,35	3,2	9,11
Fonte: AGICI					



Far partire
le filiere

06.

Evitare i meccanismi di lock-in

Il cambiamento tecnologico, specialmente se incluso all'interno di un'industria consolidata, rischia di scontrarsi con meccanismi di lock-in o effetto di blocco. Esso si verifica quando un sistema economico o tecnologico rimane vincolato a una determinata traiettoria di sviluppo, nonostante l'esistenza di alternative potenzialmente più efficienti o sostenibili. Tale rigidità può derivare da elevati costi di transizione, infrastrutture già consolidate e reti di competenze, che rendono oneroso o rischioso il cambiamento.

Per rompere la dipendenza dalle soluzioni mature e meno sostenibili, occorre uno sforzo aggiuntivo almeno da due fronti:

1. La cooperazione tra tutti gli attori della filiera
2. La creazione di un quadro normativo che supporti la transizione tecnologica, laddove questa permette di raggiungere gli obiettivi di politica pubblica.

Ciò significa che, adottando una logica di filiera, gli attori a monte e a valle cooperano per la creazione di valore piuttosto che competere per sottrarre valore a discapito delle altre porzioni di filiera. Questo può essere fatto solo con un ruolo di garanzia del potere pubblico che deve delineare una politica industriale chiara e di lungo periodo a cui possano allinearsi tutti gli attori economici.

Per ciascuna delle tecnologie analizzate, i nodi da sciogliere sono: la disponibilità di feedstock, l'impiantistica e la dimensione dei mercati a valle.

Solvolisi: i nodi da sciogliere

Le tecnologie di glicolisi, idrolisi e metanolisi hanno livelli di maturità ancora bassi, ad eccezione del riciclo del PA6 che ha già scala commerciale. Prima di poter costruire una filiera, queste tecnologie devono ancora dar prova di poter raggiungere almeno un TRL di 9 e poter confrontarsi con condizioni operative reali.

Esiste uno spazio per lo sviluppo, sia per quanto riguarda i polimeri che devono raggiungere qualità food-grade, sia per polimeri che oggi sono nicchie trascurate nel flusso di materia, quali PMMA e PU.

Feedstock

Filiere da creare

- Gli impianti richiedono un feedstock in ingresso di alta qualità, con selezioni spinte dei materiali o raccolte selettive.
- Per polimeri che non sono usati per gli imballaggi come nel caso del PU e del PA6 è necessario costruire una logistica per la raccolta.

Impianti

Ancora sfide tecnologiche

Ad eccezione del riciclo del PA6, che ha raggiunto una maturità commerciale, gli impianti di solvolisi presentano problemi di contaminazione del prodotto e la necessità di installare sistemi di purificazione dei monomeri. Inoltre sono necessari anche sistemi di recupero dei catalizzatori e dei solventi che presentano CAPEX molto elevati.

Mercati

Incertezze sul valore del riciclato

La domanda di riciclo di PET *food grade* è alta e guidata dalla policy. Ma agli attuali livelli di costo, il riciclo chimico del PET non può competere con il PET vergine senza il sostegno della normativa. Per gli altri polimeri, in assenza di sostegno, i ricavi per gli impianti derivano esclusivamente dal «green premium» che il mercato è disposto a pagare.

Pirolisi: i nodi da sciogliere

Nella simulazione del business case, l'impresa integrata riesce a essere più redditizia dell'impresa specializzata perché è capace di intercettare maggior valore dalla filiera.

Tuttavia il modello integrato presenta CAPEX e OPEX più alti e maggiori fattori di rischio dovuti alla somma delle complessità tipiche sia dell'industria dei rifiuti

(aspetti autorizzativi, tecnologici, EoW) sia dell'industria chimica (aspetti normativi, qualità e commercializzazione dei prodotti).

La filiera non integrata permette di ridurre il rischio d'impresa, ma è un modello che può funzionare esclusivamente se le due parti crescono insieme piuttosto che una a discapito dell'altra.

Feedstock

Qualità e non-competizione

- La disponibilità di Chemix di Corepla su tutto il territorio italiano permette una produzione stabile di flussi per la preparazione del feedstock
- La standardizzazione della qualità del feedstock è cruciale per lo sviluppo
- Esiste un limite fisico alla crescita del feedstock, salvo introdurre sistemi di riciclo meccanico sempre più efficienti
- La competizione per un feedstock scarso aumenta i rischi per la filiera

Impianti

Stabilità e dimensionamento

- Gli impianti presentano CAPEX molto alti, specialmente dove sono presenti strutture di pre-trattamento del feedstock o di purificazione dell'olio
- Considerando gli alti CAPEX, questi impianti devono beneficiare di condizioni stabili per poter operare
- È importante che gli impianti non competano per i flussi di feedstock e che quindi siano dimensionati in funzione dell'effettiva disponibilità

Mercati

Qualità e prezzi stabilmente alti

- L'olio di pirolisi è la principale fonte di ricavo dell'impianto
- Allo stato attuale dell'industria è importante che il mercato mantenga stabilmente prezzi alti
- Stante l'offerta strutturalmente scarsa, la domanda policy-driven può spingere i prezzi verso l'alto nel lungo periodo
- L'olio di pirolisi deve raggiungere alti standard qualitativi

Pirolisi: raccomandazioni

Per lanciare la filiera della pirolisi delle plastiche, lo Stato deve avere un ruolo di guida, scrivendo una politica industriale coerente e studiando interventi per sostenere la filiera.

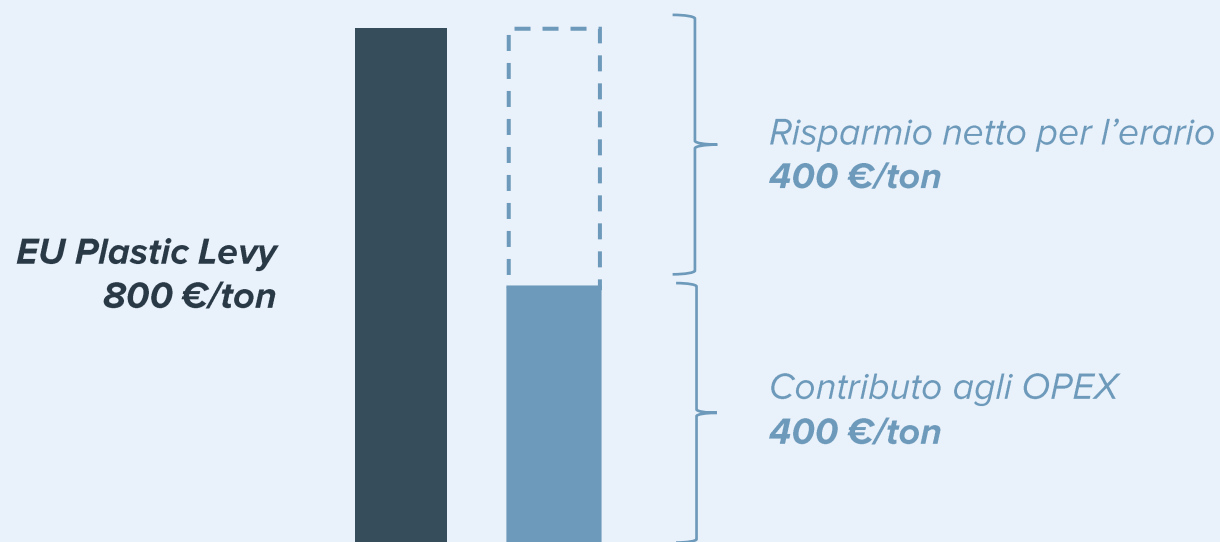
Esistono alcune aree d'azione che possono facilitare il dispiegamento delle forze di mercato in maniera ordinata e permettendo di raggiungere gli obiettivi di riciclo:

1. Definire le metodologie di calcolo del bilancio di massa in sede Europea per poter dare avvio a un mercato dell'olio pirolitico.
2. Disporre un decreto europeo EoW sul feedstock di poliolefine per impianti di pirolisi.
3. Includere il gas di pirolisi all'interno dei combustibili dall'Allegato X del D. Lgs 152/2006 per facilitarne la valorizzazione energetica.
4. Guidare le procedure autorizzative onde evitare la possibilità di un overcapacity rispetto al feedstock effettivamente disponibile.
5. Sostenere gli impianti con un contributo sugli OPEX o sull'output finalizzato ad aumentare il tasso di riciclo delle plastiche e capace di ridurre l'importo della cosiddetta *plastic levy* europea.

La stabilità delle condizioni di mercato è essenziale per impianti capital-intensive con output innovativi dai mercati incerti.

Qualsiasi risorsa investita dall'Italia per aumentare il riciclo delle plastiche (sia con forme di riciclo meccanico che chimico), permetterebbe di ridurre il peso della *plastic levy* di 800 € per ogni tonnellata di plastica non riciclata.

Allo stesso tempo, un contributo anche contenuto migliorerebbe notevolmente la redditività degli impianti permettendo alla filiera di svilupparsi nel medio periodo senza gravare sull'erario ma anzi contribuendo a ridurre il peso della *plastic levy* sulla fiscalità generale.



Gassificazione: i nodi da sciogliere

La gassificazione si candida a essere una tecnologia di chiusura del ciclo. Entra quindi in competizione con le attuali tecnologie di termovalorizzazione rispetto alle quali presentano costi più alti ma emissioni di CO₂ nettamente inferiori. Il dispiegamento della gassificazione deve essere quindi attentamente valutato in maniera analoga a quanto avviene per gli altri impianti di chiusura del ciclo.

In Italia le decisioni di investimento per questo tipo di impianti sono pianificate dalle autorità regionali, che dovrebbero tuttavia fare i conti con questioni nazionali (la disponibilità del CSS) e internazionali (il mercato del metanolo).

Feedstock

Disponibilità potenzialmente ampia

Sebbene la quantità di CSS avviato all'estero sia limitata, la disponibilità potenziale di feedstock per la gassificazione è molto più ampia, attingendo a rifiuti speciali e ad altre frazioni di rifiuti indifferenziati.

Sebbene ci sia spazio per la coesistenza di gassificazione, termovalorizzazione e discarica, esiste comunque il rischio di una competizione per i flussi di feedstock

Impianti

Stabilità e pianificazione

Sia i termovalorizzatori sia gli impianti di gassificazione sono strutture con alti CAPEX e orizzonti di investimento ventennali che necessitano di stabilità dei flussi.

Per evitare che la competizione spinga le gate fee a livelli insostenibili, occorre pianificare gli impianti di gassificazione in geografie e con dimensioni appropriate ai flussi di CSS attesi.

Mercati

Prezzi strutturalmente alti

La domanda di metanolo sostenibile può spingere i prezzi a essere strutturalmente alti a beneficio della fattibilità e della stabilità economica della gassificazione.

Gassificazione: raccomandazioni

Una tecnologia come la gassificazione dei rifiuti indifferenziati necessita di pianificazione impiantistica e di stabilità nelle condizioni operative dell'impianto.

Da questo punto di vista il ruolo dell'autorità pubblica è cruciale, sia in fase di pianificazione e autorizzazione, sia nel determinare e favorire le condizioni di mercato con cui questi impianti possono operare.

In fase di pianificazione, sarebbe importante includere la tecnologia della gassificazione all'interno del piano nazionale di gestione dei rifiuti. Centralizzare il processo di pianificazione invece che lasciarlo alle Regioni permetterebbe di evitare una sovrapposizione tra impianti a una competizione per i flussi di CSS, nonché una velocizzazione del permitting per impianti strategici.

Per quanto concerne la **creazione di condizioni del mercato del metanolo sostenibile** che favoriscano questa tecnologia, un primo aspetto da risolvere è il recepimento della Renewable Energy Directive (RED III). Infatti, in base al meccanismo di calcolo per la computazione della quantità di CO₂ abbattuta, la dimensione del mercato del metanolo può cambiare sensibilmente.

Un altro aspetto che può certamente favorire il dispiegamento della gassificazione è la **futura inclusione della termovalorizzazione all'interno dell'ETS**. L'aumento dei costi, che si tradurrebbe in gate fee più elevate, potrebbe spingere le preferenze verso processi a minori emissioni come la gassificazione. Attualmente l'estensione dell'ETS al WTE resta una proposta che la Commissione Europea si riserva di considerare in futuro.

Bibliografia

07.

Bibliografia

Afzal, S. (2023). *Techno-economic analysis and life cycle assessment of mixed plastic waste gasification for production of methanol and hydrogen*. **Green Chemistry**, 25(15), 1234–1250. <https://doi.org/10.1039/d3gc00679d>

Abernathy, W. J., & Utterback, J. M. (1978). *Patterns of industrial innovation*. **Technology Review**, 80(7), 40–47.

Cafiero, L. M., DeAngelis, D., Tuccinardi, L., & Tuff, R. (2025). *Current state of chemical recycling of plastic waste: A focus on the Italian experience*. **Sustainability**, 17(3), 1293. <https://doi.org/10.3390/su17031293>

Caro, D., Albizzati, P. F., Cristóbal Garcia, J., Saputra Lase, I., Garcia-Gutierrez, P., Juchtmans, R., Garbarino, E., Blengini, G., Manfredi, S., De Meester, S., & Tonini, D. (2023). *Towards a better definition and calculation of recycling*. **JRC Technical Report**. <https://doi.org/10.2760/636900>

Crîstiu, D., d'Amore, F., & Bezzo, F. (2023). *Economic and environmental optimisation of mixed plastic waste supply chains in Northern Italy comparing incineration and pyrolysis technologies*. **Computers & Chemical Engineering**, 178, 108503. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2023.108503>

Damayanti, D., & Wu, H.-S. (2021). *Strategic possibility routes of recycled PET*. **Polymers**, 13(9), 1475. <https://doi.org/10.3390/polym13091475>

DesVeaux, J., et al. (2024). *Mixed polyester recycling can enable a circular plastic economy with environmental benefits*. **One Earth**, 7(11), 2007–2020. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2024.11.007>

Garcia-Gutierrez, P., Amadei, A. M., Klenert, D., Nessi, S., Tonini, D., Tosches, D., Ardente, F., & Saveyn, H. (2023). *Environmental and economic assessment of plastic waste recycling*. **JRC Technical Report**. Publications Office of the European Union.

Harscoet, E., Chouvinc, S., Faugeras, A.-C., & Ammenti, F. (2022). *Chemical and physico-chemical recycling of plastic waste*. **Deloitte Report**.

Jiang, X., & Bateer, B. (2025). *A systematic review of plastic recycling: Technology, environmental impact and economic evaluation*. **Waste Management & Research**. <https://doi.org/10.1177/0734242X241310658>

Klotz, M., et al. (2024). *The role of chemical and solvent-based recycling within a sustainable circular economy for plastics*. **Science of the Total Environment**, 903, 167586. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167586>

Klüh, D., et al. (2024). *Comparative techno-economic assessment of methanol production via directly and indirectly electrified biomass gasification routes*. **Energy Conversion and Management**, 306, 118649. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.118649>

Koritár, M., Križan, M., & Haydary, J. (2025). *Techno-economic evaluation of incineration, gasification, and pyrolysis of refuse derived fuel*. **Sustainable Chemistry and Technology**, 6, 130066. <https://doi.org/10.69997/sct.130066>

Bibliografia

Lase, I. S., et al. (2023). *How much can chemical recycling contribute to plastic waste recycling in Europe? An assessment using material flow analysis modeling*. **Resources, Conservation & Recycling**, 198, 106916. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.106916>

Lubongo, C., et al. (2022). *Economic feasibility of plastic waste conversion to fuel using pyrolysis*. **Sustainable Chemistry and Pharmacy**, 29, 100683. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2022.100683>

Plastics Recyclers Europe (2024). *HDPE & PP rigids market in Europe. State of Play. Production, collection & recycling data 2023*.

Plastics Recyclers Europe (2024). *2023 flexible films market in Europa. State of Play. Production, collection & recycling data*.

Rahman, M. H., et al. (2023). *Pyrolysis of waste plastics into fuels and chemicals: A review*. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 179, 113799. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113799>

Reurmerman, P., Vos, J., & Lammens, T. (2022). *White paper: Fast pyrolysis bio-oil (FPBO)*.

Riedewald, F., Patel, Y., Wilson, E., Santos, S., & Sousa-Gallagher, M. (2021). *Economic assessment of a 40,000 t/y mixed plastic waste pyrolysis plant using*

direct heat treatment with molten metal: A case study of a plant located in Belgium. **Waste Management**, 120, 370–382. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.10.039>

Shah, A., et al. (2023). *A review on gasification and pyrolysis of waste plastics*. **Frontiers in Chemistry**, 10, 960894. <https://doi.org/10.3389/fchem.2022.960894>

Solis, M., & Silveira, S. (2020). *Technologies for chemical recycling of household plastics – A technical review and TRL assessment*. **Waste Management**, 105, 128-138. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.01.038>

SYSTEMIQ. (2022). *ReShaping plastics: Pathways to a circular, climate neutral plastics system in Europe*. SYSTEMIQ Report.

Tian, Y., Han, M., Gu, D., Bi, Z., Gu, N., Hu, T., Li, G., Zhang, N., & Lu, J. (2024). *PVC dechlorination for facilitating plastic chemical recycling: A systematic literature review of technical advances, modeling and assessment*. **Sustainability**, 16(19), 8331. <https://doi.org/10.3390/su16198331>

Tomić, T., Slatina, I., & Schneider, D. R. (2023). *Techno-economic review of pyrolysis and gasification plants for thermochemical recovery of plastic waste and economic viability assessment of small-scale implementation*. **Clean Technologies and Environmental Policy**, 25, 1849-1868. <https://doi.org/10.1007/s10098-023-02648-3>

Bibliografia

Voss, R., Lee, R. P., & Fröhling, M. (2022). *Chemical recycling of plastic waste: Comparative evaluation of environmental and economic performances of gasification- and incineration-based treatment for lightweight packaging waste*. **Circular Economy and Sustainability**, 2, 1369-1398.

<https://doi.org/10.1007/s43615-021-00145-7>

Voss, R., et al. (2021). *Global warming potential and economic performance of gasification-based chemical recycling and incineration pathways for residual municipal solid waste treatment in Germany*. **Waste Management**, 135, 283-293. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.07.040>

Wieczorek, K., Bukowski, P., Stawiński, K., & Ryłko, I. (2024). *Recycling of polyurethane foams via glycolysis: A review*. **Materials**, 17(18), 4617. <https://doi.org/10.3390/ma17184617>

Yu, K. (2025). *An environmental and economic study on the chemical recycling of plastic composites using an engineering constitutive model*. **Journal of Environmental Management**, 368, 125271. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.125271>



ECOMONDO
The green technology expo.

**ITALIAN
EXHIBITION
GROUP**
Providing the future

Lo studio è supportato da:



AGICI è una società di ricerca e consulenza specializzata nel settore dell'energia, dell'ambiente e delle infrastrutture. Collabora con imprese, associazioni, amministrazioni pubbliche e istituzioni per realizzare politiche di sviluppo capaci di creare valore. L'approccio operativo e il rigore metodologico, supportati da un solido background teorico, assicurano un'elevata flessibilità che garantisce la personalizzazione delle soluzioni. La conoscenza della realtà imprenditoriale, la pluriennale esperienza nei settori di riferimento e una vasta rete di relazioni nazionali e internazionali completano il profilo distintivo di AGICI.

RESPONSABILI DI PROGETTO

Eugenio Sini
eugenio.sini@agici.it

Marco Carta
marco.carta@agici.it