POLITECNICO DI TORINO

Ingegneria Energetica e Nucleare

Tesi di Laurea Magistrale

Analisi exergetica del sistema di gestione dei rifiuti plastici da imballaggio e di riciclo del PET in Piemonte



Relatori:

Prof. Vittorio Verda

Ing. Sofia Russo

Candidato

Pilotto Alessandro 259633

Sommario

Elenco delle figure	5
Elenco delle tabelle	6
Obiettivi	7
1. Introduzione	8
1.1. Produzione della plastica	8
1.2. Plastica come materiale da imballaggio	9
1.2.1. I materiali	10
1.2.2. Polimeri riciclati	11
2. Polimeri	12
2.1. Polimerizzazione	13
2.1.1. Polimerizzazione a catena	14
2.1.2. Policondensazione	14
2.2. Produzione di PET vergine	15
2.2.1. Policondensazione basata su DMT	15
2.2.2. Policondensazione basata su TPA	16
2.2.3. Policondensazione batch basata su DMT	16
2.3. Il riciclo della plastica	17
2.3.1. Riciclo chimico	18
2.3.2. Riciclo meccanico	18
3. La raccolta differenziata dei rifiuti urbani	20
3.1. La raccolta differenziata in Piemonte	21
3.2. Centri di selezione secondari COREPLA	22
3.2.1. La selezione	23
3.3. Ecocompattatori CORIPET	24
4. Exergia	26
4.1. Le forme di exergia	29
4.2. Analisi exergetica – valutazione dell'utilizzo di risorse	31
4.2.1. Calcolo dell'exergia totale cumulata per kg di prodotto	33
5. Caso studio: la gestione dei rifiuti plastici in Piemonte	35
5.1. Introduzione	35
5.2. Il percorso della plastica post-consumo in Piemonte	38
5.2.1. Dal Consorzio al Centro di Selezione	39
5.2.2. Dal Centro di Selezione all'impianto di riciclo	43
5.2.3. L'impianto di riciclo	47

6. I flussi di exergia	50
6.1. Produzione di granulo V-PET – $ExV-PET$	50
6.2.Produzione di granulo R-PET – ExR – PET	53
6.2.1. Trasporto materiale — Extr1, Extr2	53
6.2.2. Centro di Selezione Secondario — Exel, CSS, Excomb, CSS	55
6.2.3. Recupero di materia — Excomb, RIC, Exacqua, RIC	56
6.3. Produzione bottiglia in PET $-Exbottiglia$	58
6.4. Produzione fibra in PET $-Exfibra$	60
6.5. Recupero energetico — Exrec	60
7. Exergia totale cumulata per kg di prodotto	63
8. Risultati	66
8.1. Influenza del numero di cicli di utilizzo sull'exergia dei prodotti	66
8.2. Exergia cumulata – modello reale	68
8.2.1. Scenario 1: Stato attuale	71
8.2.2. Scenario 2	75
8.2.3. Exergia cumulata in funzione di η	79
9. Conclusioni	83
Bibliografia	85
Ringraziamenti	87

Elenco delle figure

Figura 1. Life cycle dei materiali plastici: (a) circuito aperto con recupero energetico, (b) in un sistema co	n
riciclo totale delle plastiche di scarto. [1]	8
Figura 2. Simboli per i polimeri plastici da imballaggio	11
Figura 3. Schema di produzione dei polimeri. [5]	13
Figura 4. Struttura molecolare PET. [7]	
Figura 5. Catena di produzione dei polimeri ed opzioni di riciclo. [8][8]	17
Figura 6. Selezione e separazione in un CSS. [13]	
Figura 7. Modello Bottle to Bottle	24
Figura 8. Ciclo di vita semplificato di un bene materiale o immateriale generico. [27]	32
Figura 9. Livelli delle trasformazioni energetiche. [28]	
Figura 10. Esempio di un generico diagramma di Grassmann. [28][28]	33
Figura 11. Confronto tra dati reali e obiettivi PPRR 2009 su Rifiuti Totali e crescita della raccolta	
differenziata. [21]	36
Figura 12. Raccolta differenziata reale rispetto agli Obiettivi PPRR 2009. [21]	36
Figura 13. Rifiuti totali nel periodo 2013-2019 e suddivisi per ATO. [22]	36
Figura 14. Confronto Raccolta differenziata di ogni ATO con Obiettivo PRR 2016. [22]	36
Figura 15. Raccolta della plastica mono e multimateriale. (Elaborato dall'autore)	38
Figura 16. Rifiuti da imballaggio plastica	39
Figura 17. Percorso della plastica in Regione Piemonte – CSS Cavaglià. (Elaborato dall'autore)	48
Figura 18. Percorso della plastica in Regione Piemonte – CSS Beinasco. (Elaborato dall'autore)	49
Figura 19. Diagramma di flusso per la produzione di V-PET. (Elaborato dall'autore sulle ref. [2] [34])	50
Figura 20. Incidenza delle fasi di produzione di 1 kg di PET sul consumo totale di energia primaria. [34]	51
Figura 21. Diagramma di flusso per la produzione di R-PET. (Elaborato dall'autore)	53
Figura 22. Schema tipo di un motore cogenerativo	57
Figura 23. Dal granulo di PET alla bottiglia	59
Figura 24. Alcune delle diverse forme e colorazioni degli st preforme	59
Figura 25. Exergia totale cumulata per kg di prodotto in funzione del processo di produzione adottato	65
Figura 26. Influenza del numero di cicli di utilizzo sull'exergia per la produzione di bottiglie in PET	67
Figura 27. Influenza del numero di cicli di utilizzo sull'exergia per la produzione di fibra per tessuti in PET.	67
Figura 28. Schema di produzione del PET - modello di calcolo reale. (Elaborato dall'autore)	69
Figura 29. Exergia cumulata – Scenario 1 - CASO 1	
Figura 30. Exergia cumulata in funzione della quantità di bottiglie riciclate – Scenario 1 - CASO 1	73
Figura 31. Exergia cumulata – Scenario 1 - CASO 2	74
Figura 32. Exergia cumulata in funzione della quantità di bottiglie riciclate – Scenario 1 - CASO 2	75
Figura 33. Exergia cumulata – Scenario 2 - CASO 1	76
Figura 34.Exergia cumulata in funzione della quantità di bottiglie riciclate – Scenario 2 - CASO 1	77
Figura 35. Exergia cumulata – Scenario 2 - CASO 2	78
Figura 36. Exergia cumulata in funzione della quantità di bottiglie riciclate – Scenario 2 - CASO 2	78
Figura 37. Exergia cumulata in funzione di η - CASO 1	80
Figura 38. Exergia cumulata in funzione di η - CASO 2	82

Elenco delle tabelle

Tabella 1. Metodo di polimerizzazione per ciascun polimero. [5][5]	14
Tabella 2. Emissioni e consumi dei processi di produzione del PET. [5][5]	17
Tabella 3. Raccolta differenziata in Italia. [3]	
Tabella 4. Raccolta differenziata nelle province piemontesi. [3]	21
Tabella 5. Plastica riciclata in Piemonte. [11]	21
Tabella 6. Materiale in ingresso nei centri di selezione secondari	23
Tabella 7. Confronto tra analisi energetica ed exergetica. [18]	27
[15] Tabella 8. Exergia chimica molare standard in condizioni di riferimento di alcune sostanze.	30
Tabella 9. Valori tipici di coefficienti empirici per combustibili industriali. [25][25]	31
Tabella 10. Confronto tra i metodi per la valutazione dell'utilizzo di risorse. [28]	33
Tabella 11. Obiettivi Piani Regionali Piemonte. [29] [30]	35
Tabella 12. Incidenza della singola frazione merceologica sulla raccolta multimateriale. [30]	37
Tabella 13. Centri di raccolta in esercizio nel 2013	39
Tabella 14. Fornitura CSS in Piemonte	42
Tabella 15. Distanza media dai CSS in Piemonte	43
Tabella 16. Specifiche tecniche prodotti COREPLA. [32]	44
Tabella 17. Indice di Purezza e di Recupero del PET	45
Tabella 18. Distanza tra CSS ed impianto di riciclo	46
Tabella 19. Fonti di energia primaria per la produzione di 1 kg di PET. [34]	50
Tabella 20. Energia utile esterna al processo per la produzione di 1 kg di PET. [34]	51
Tabella 21. Flussi di materia ed exergia nei processi di produzione del PET. [2]	52
Tabella 22. Proprietà del gasolio. [37] [38]	
Tabella 23. Dimensioni e massa limite autotreni ed autoarticolati. [39]	54
Tabella 24. Exergia del combustibile per kg di materiale nel trasporto in Piemonte	55
Tabella 25. Consumo energia elettrica nel CSS	56
Tabella 26. Consumi di exergia nella lavorazione della bottiglia in PETPET	59
Tabella 27. Exergia per la lavorazione del granulo in PET in fibra	60
Tabella 28. Potere calorifico del PET	
Tabella 29. Exergia per la produzione di granulo V-PET	63
Tabella 30. Exergia per la produzione di granulo R-PET	64
Tahella 31 PFT in Regione Piemonte – calcolo n ner l'anno 2018	72

Obiettivi

Nell'ultimo secolo la crescita economica ha portato ad una diffusione in tutto il mondo di polimeri per un elevato numero di utilizzi. L'impatto di questi materiali in termini di inquinamento ambientale e consumo energetico è ormai noto alla comunità scientifica e vari sono i tentativi di trovare soluzioni alternative. La Tesi vuole affrontare in particolare le possibili soluzioni legate al riciclo meccanico delle bottiglie in PET (incolori, azzurrate e colorate), nel contesto del Piemonte.

L'efficienza di riciclo di questo prodotto è funzione del sistema di gestione dei rifiuti plastici da imballaggio presente sul territorio: si vuole quindi analizzare nel dettaglio il sistema di raccolta dei rifiuti della Regione Piemonte e di selezione del PET da inviare a riciclo meccanico.

Una volta determinati i processi di riciclo che portano alla produzione di granuli di PET riciclato (R-PET), le cui destinazioni d'uso più comuni sono l'utilizzo per la produzione di fibra per il settore tessile (ciclo *Bottle-to-Fibre*) oppure l'utilizzo per la produzione di bottiglie (ciclo *Bottle-to-Bottle*), è possibile svolgere un confronto in termini di utilizzo delle risorse tra la produzione di un prodotto finito a partire da materiale di riciclo e un prodotto composto da materiale vergine (V-PET). Per valutare l'utilizzo di risorse sarà svolta una analisi exergetica, la quale permette di calcolare una sommatoria dei contributi di exergia relativi a ciascuna fase del processo di raccolta, di selezione e di riciclo, includendo oltre a questi anche il contributo exergetico relativo all'utilizzo di combustibili fossili. La prospettiva di calcolo è infatti quella di un approccio "cradle-to-grave". Utilizzando questo metodo, è infatti possibile descrivere ciascuno dei processi descritti attraverso una comune unità di misura, arrivando così ad ottenere un valore di exergia totale cumulata per kg di prodotto finale.

In questa Tesi verrà quindi svolto questo calcolo, al fine di determinare l'exergia totale cumulata per kg di prodotto di quattro diversi prodotti:

- 1. Bottiglia V-PET
- 2. Bottiglia R-PET
- 3. Fibra V-PET
- 4. Fibra R-PET

Una volta determinato ciascuno di questi termini risulta necessario definire un modello che permetta di rappresentare al meglio il ciclo di vita dei prodotti in PET in precedenza definiti e la capacità di riciclo degli stessi da parte del sistema. Questo modello può essere rappresentato come funzione di quattro parametri, i quali contribuiscono a determinare il valore di exergia cumulata per kg di prodotto finale ottenuto dall'applicazione di questo modello. Questi quattro parametri sono:

- 1. $\eta = efficienza$ di raccolta, selezione e riciclo del materiale
- 2. β = percentuale di materiale riciclato destinato al percorso Bottle to Bottle
- 3. $\varphi = percentuale$ di materiale riciclato nella produzione di una bottiglia R PET
- 4. domanda mercato = percentuale di bottiglie prodotte su produzione totale PET

Facendo variare questi parametri sul modello ottenuto, è possibile confrontare i valori di exergia cumulata per kg di prodotto tra le varie soluzioni e definire così quantitativamente gli obiettivi che è necessario conseguire per ottenere una riduzione dei consumi. I risultati ottenuti permettono inoltre una valutazione complessiva dell'attuale sistema di gestione dei rifiuti e mettono in evidenza su quali aspetti qualitativi è necessario attuare importanti modifiche.

1. Introduzione

La plastica è quel materiale che è stato in grado di rivoluzionare la nostra vita diventando la soluzione di molti problemi grazie alla sua incredibile versatilità, facilità di lavorazione ed al suo basso costo. Le politiche dei paesi sviluppati da quando la ripresa e la prosperità economica del dopo guerra ne hanno favorito l'aumento delle quantità, in particolare rispetto ad oggetti multimateriale e materiali da imballaggio. Negli anni è stato quindi necessario sviluppare diversi polimeri, ciascuno con caratteristiche specifiche per l'ambito di applicazione richiesto. Tuttavia, il principale problema che l'enorme uso di questo prodotto ha generato riguarda l'impatto ambientale che ne deriva e lo smaltimento a fine vita: esso va quindi analizzato in funzione di ciascuno dei polimeri in oggetto. In questo senso risulta di fondamentale importanza riuscire a comprendere il reale impatto dal punto di vista energetico ed ambientale che il normale ciclo di produzione e scarto della plastica vergine ha e confrontarlo con possibili soluzioni alternative, quali ad esempio il riciclo delle plastiche per nuovi usi oppure il recupero dell'energia termica ricavabile dalla materia scartato.

I due casi alternativi presentano due possibili cicli di lavoro alternativi: dalla *Figura 1.* possiamo vedere che nel caso di recupero energetico (*Figura 1.a*) avremo bisogno di immettere sempre nella filiera nuovo materiale vergine, per cui possiamo parlare di un "circuito aperto". Al contrario nel caso di riciclo (*Figura 1.b*) si vuole avere un riutilizzo del materiale arrivato a fine vita, per cui avremo a che fare con un "circuito chiuso". Negli ultimi anni si è passato sempre più da un circuito aperto del primo tipo ad una integrazione maggiore tra le due soluzioni, inserendo, dove economicamente ed energeticamente sostenibile, sistemi che permettano il riciclo delle plastiche in modo da diminuire sempre più la richiesta di nuovo materiale vergine da immettere sul mercato. *[1]*



Figura 1. Life cycle dei materiali plastici: (a) circuito aperto con recupero energetico, (b) in un sistema con riciclo totale delle plastiche di scarto. [1]

1.1. Produzione della plastica

Per comprendere meglio il motivo per cui la plastica ha un così forte impatto sui consumi e sull'inquinamento è necessario analizzare il ciclo di produzione della plastica vergine e comprendere che cosa è necessario consumare per ottenere i prodotti plastici che tanto comfort hanno portato alla nostra vita.

Le principali materie da cui hanno origine le materie plastiche sono il petrolio greggio, il quale risulta essere una miscela complessa con migliaia di composti e che deve essere raffinata per poter essere utilizzata, i gasoli e gli idrocarburi leggeri. [2] La procedura per la produzione di questi materiali inizia quindi con una distillazione in una raffineria in modo da separare il petrolio greggio pesante dalle frazioni più leggere. Tra queste varie frazioni leggere possiamo trovare la nafta, che è il composto fondamentale per la produzione di materie plastiche. Da essa, attraverso un processo di *steam cracking*, si ottengono etilene (C_2H_4), propilene (C_3H_6), butadiene (C_4H_6), benzene (C_6H_6), toluene (C_7H_8) e xilene (C_8H_{10}), da cui si ottengono i vari composti polimerici. [2]

Il processo di produzione delle materie plastiche da qui in poi si diversifica in funzione delle caratteristiche tecniche dei polimeri che vogliamo ottenere (ad esempio possiamo distinguere tra polimeri termoplastici e termoindurenti). È però importante sottolineare lo stretto legame tra produzione di plastica ed estrazione di petrolio greggio, le cui riserve sappiamo essere limitate e ormai sempre più scarse. Diventa quindi di fondamentale importanza riuscire a pensare a delle soluzioni che permettano una riduzione importante della quota di nuove plastiche sul mercato, benché sia impossibile pensare di ottenere una totale conversione verso l'utilizzo di sole materie plastiche riciclate.

1.2. Plastica come materiale da imballaggio

Il Rapporto Rifiuti Urbani del 2019, edito da ISPRA, mostra come tra tutte le frazioni merceologiche la plastica (insieme al vetro, 89%) costituisca la maggior parte dei rifiuti da imballaggio (94% dei rifiuti plastici, che si traduce in un consumo medio per l'Italia di 22,7 $\frac{kg}{ab \cdot anno}$, nel caso del Piemonte è invece pari a 29,8 $\frac{kg}{ab \cdot anno}$). [3]

Ciò significa in buona sostanza che il vettore che monopolizza la produzione di plastica è quello relativo agli imballaggi, per cui la normativa ad essi relativa ha un impatto importante sui consumi.

Nello specifico, la definizione tecnica di imballaggio è "un prodotto, composto di materiali di qualsiasi natura, adibito a contenere determinate merci, dalle materie prime ai prodotti finiti, a proteggerle, a consentire loro la manipolazione e la loro consegna dal produttore al consumatore o all'utilizzatore, ad assicurare la loro presentazione, nonché gli articoli a perdere usati allo stesso scopo.[...] Essi possono avere poi funzioni di carattere comunicativo che hanno rafforzato gli elementi di messaggio e di significato contenuti nel packaging per differenziare i prodotti, attrarre e informare il consumatore e fidelizzare l'acquirente. Il terzo tipo di funzioni che ad oggi gli imballaggi devono essere in grado di offrire è legato a contenuti di servizio, il che significa realizzare imballaggi "funzionali", attivi e che aiutino l'utente finale fornendo informazioni sul prodotto e facilitando l'uso dell'imballaggio stesso e del suo contenuto, allungandone la vita utile." [4]

Se da un lato è ormai consolidata l'opinione che il packaging possa avere una funzione sociale ed economica fondamentale, legata ad esempio all'abbattimento delle percentuali di perdite di prodotti ambientali per deterioramento (si va dal 30-50% dei paesi in via di sviluppo al 3% dell'Europa), e che anche dal punto di vista ambientale un maggiore e migliore utilizzo degli stessi possa far diminuire di molto gli sprechi alimentari, è importante non dimenticare l'impatto ambientale che essi hanno, legato soprattutto al fatto di avere in genere una prima vita utile piuttosto breve. Da qui nasce l'esigenza di saper pensare ad una politica degli imballaggi che permetta una ottimizzazione del rapporto tra garanzia della funzionalità tecnica dell'imballaggio e

minimizzazione del consumo di risorse: in questo senso ogni soluzione passa attraverso sempre più importanti obiettivi di riciclo delle risorse e verso un sistema economico di tipo "circolare".

I rifiuti da imballaggio in materiale plastico sono certamente tra i più complessi da gestire, vista la varietà di soluzioni adottate dalle aziende: è da notare infatti che l'impatto ambientale connesso al packaging è dovuto per la maggior parte alla fase di progettazione dello stesso, Ciò comporta la necessità di promuovere azioni e competenze che incrementino la sostenibilità degli stessi.

1.2.1. I materiali

La scelta del materiale da utilizzare per l'imballaggio è cruciale per determinarne le prestazioni, le modalità produttive, l'aspetto e le possibilità di riciclo. La varietà di aspetti di cui il progettista deve tenere conto fa sì che egli abbia in mano un'importante scelta da compiere.

È quindi necessario conoscere le principali caratteristiche dei polimeri più utilizzati in commercio e le cui capacità di riciclo possono avere un impatto importante sull'ambiente [4]:

- 1. **PET (polietilene tereftalato)** = è una resina termoplastica ottenuta per policondensazione dall'acido tereftalico (C₈H₆O₄) e dal glicole etilenico (C₂H₆O₂). Coniuga un'ottima resistenza agli urti con delle buone proprietà meccaniche. È di fatto il polimero trasparente che conosciamo in particolare per l'utilizzo che se ne fa per la produzione di bottiglie per bevande, vaschette e contenitori vari. Presenta diverse caratteristiche tecniche interessanti, quali una buona resistenza meccanica e termica, che lo rendono una valida soluzione per gli imballaggi sia rigidi che flessibili.
- 2. **HDPE** (*polietilene ad alta densità*) = è una resina *termoplastica* che si ottiene dalla polimerizzazione dell'etilene. È un polimero con elevata resistenza meccanica, buona rigidità e contrasta efficacemente umidità ed agenti chimici. Viene tipicamente utilizzato come imballaggio per produrre flaconi, barattoli, contenitori rigidi per alimenti. Ha poi un utilizzo molto vario nella produzione di articoli relativi ad ogni settore.
- 3. **PVC** (*polivinilcloruro*) = è anch'essa una resina *termoplastica* ottenuta tramite polimerizzazione del cloruro di vinile. Ha una buona resistenza all'usura, agli agenti chimici, al fuoco ed alla degradazione. Può essere utilizzato per la produzione di semilavorati rigidi (PVC-U) o flessibili (PVC-P) nel caso vengano aggiunti dei plastificanti. Per quanto riguarda gli imballaggi, è molto usato nelle confezioni monoporzione, per la produzione di flaconi e bottiglie in cosmetica, ma ha anche una grande varietà di applicazioni nel mondo dell'edilizia, nonché in quello medico ed ospedaliero.
- 4. **LDPE** (polietilene a bassa densità) = è una resina termoplastica ottenuta dalla polimerizzazione dell'etilene come per l'HDPE. Essa ha però una struttura molecolare ramificata, tale da renderlo leggero, trasparente, duttile e flessibile. Ha inoltre una elevata impermeabilità all'acqua ed è un ottimo isolante elettrico. È usato principalmente per pellicole, sacchetti o per teli agricoli, ma anche come rivestimento per cavi, tubature flessibili ed imballaggi vari cui è richiesta una buona flessibilità ed una resistenza alle deformazioni.
- 5. **PP** (*polipropilene*) = è una resina *termoplastica* ottenuta per poliaddizione del propilene. Mostra buona resistenza termica, elevata rigidità, e funge da barriera al vapore acqueo ma non ai gas (è quindi inutilizzabile per bevande gasate). È un polimero molto versatile, quindi anche facilmente trasformabile. Di conseguenza i suoi utilizzi sono svariati: dagli articoli

- domestici ai giocattoli, per non parlare del settore medico e degli elettrodomestici. Come imballaggio è utilizzato per produrre vaschette e flaconi rigidi.
- 6. **PS** (*polistirolo*) = è una resina termoplastica ottenuto per poliaddizione dello stirene. È un materiale leggero, rigido, con buona brillantezza e trasparenza, ma è molto sensibile agli urti. A volte per evitare ciò gli vengono aggiunte delle gomme (HIPS) oppure viene trasformato in polistirene espanso (EPS). Viene utilizzato nel settore degli imballaggi per realizzare stoviglie monouso, articoli da ufficio, contenitori monoporzione ed espositori. L'EPS invece è usato come imballaggio protettivo e antiurto.
- 7. **ALTRE PLASTICHE** = in questa categoria rientrano tutti i polimeri il cui uso nella produzione di imballaggi è limitato. Alcuni esempi possono essere il poliuretano (PUR), poliammide (PA o nylon). Questi polimeri possono essere utilizzati per diversi tipi di imballaggi multistrato con svariate applicazioni.















Figura 2. Simboli per i polimeri plastici da imballaggio.

1.2.2. Polimeri riciclati

Ognuno di questi polimeri può essere riciclato ed avere un suo percorso di recupero [4]:

- r-PET = sono in particolare le bottiglie in PET ad essere soggette al riciclo in quanto più facilmente selezionabili. La suddivisione delle bottiglie avviene in tre flussi distinti: trasparenti, azzurrate, colorate. Nei primi due casi i flussi presentano caratteristiche meccaniche simili al polimero vergine, per cui possono essere utilizzati per produrre contenitori per alimenti e nuove bottiglie (tanto che alcune aziende in UE hanno posto come obiettivo il 50% di plastica riciclata nella produzione di bottiglie entro il 2030).
- 2. **r-HDPE** = è possibile avere un elevato grado di riciclabilità degli imballaggi in HDPE laddove non subentrino altri elementi che ne complicano il processo (i flaconi sono in larga parte riciclabili). Le sue proprietà meccaniche sono molto simili a quelle del polimero vergine.
- 3. **r-PVC** = è un imballaggio con difficili possibilità di riciclo efficiente in quanto viene raramente separato durante la fase di raccolta differenziata. Nel settore edile invece è riciclato con maggiore successo.
- 4. **r-LDPE** = mantiene le proprietà meccaniche del materiale primario, sebbene perda la trasparenza originale. Gli imballaggi in LDPE non sempre sono riciclabili in quanto questo polimero viene utilizzato in accoppiamento a diversi altri materiali.
- 5. **r-PP** = va separato per colore prima che inizi il processo di riciclo. Fatto ciò, è in grado di mantenere le caratteristiche fisiche del polimero originale. Anche in questo caso la riciclabilità del polimero è legata alla capacità di isolarlo dagli altri materiali.
- 6. **r-PS** = in generale gli imballaggi in PS risultano frammentati a causa degli stress meccanici in parti troppo piccole e leggere per essere selezionate e portate in un flusso omogeneo per il riciclo. Per quanto riguarda invece il riciclo degli EPS, sono spesso vaschette i cui residui di prodotto ne contaminano la possibilità di riciclo.

2. Polimeri

I polimeri sono un gruppo di prodotti chimici caratterizzati da principi di costruzione comuni. Sono rappresentabili come composti da macromolecole, ovvero molecole caratterizzate da una lunga catena e contenenti unità di piccole dimensioni che si ripetono identicamente lungo la catena. I polimeri possono essere classificati sulla base di diverse proprietà. In primo luogo, in funzione della loro natura. Possiamo quindi parlare di polimeri:

- Naturali, cioè presenti in natura.
- Artificiali, ovvero polimeri ottenuti dalla modifica chimica di alcuni polimeri naturali.
- Sintetici, ossia polimerizzati artificialmente.

Possono essere suddivisi in base al numero di monomeri che li compongono:

- Omopolimeri, ossia composti da un solo monomero in ripetizione.
- Copolimeri, ossia composti da diversi monomeri differenti.

I copolimeri a loro volta possono essere distinti in:

- *Copolimeri irregolari*: non presentano alcuna regolarità nella distribuzione dei due monomeri nel polimero.
- *Copolimeri a blocchi*: il copolimero è composto da blocchi di omopolimeri A alternati a blocchi di omopolimeri B.
- Copolimeri alternati: i monomeri A e B si alternano all'interno della composizione del polimero.

Possiamo intuire quanto la composizione e l'organizzazione dei differenti monomeri in un copolimero influenza fortemente le proprietà psico-fisiche. I polimeri possono infatti mostrare della proprietà molte diverse tra loro a seconda della distribuzione dei monomeri nella struttura. Esistono infatti polimeri:

- rigidi o flessibili,
- trasparenti, traslucidi o opachi,
- morbidi o duri,
- resistenti o degradabili,
- resistenti all'alta o alla bassa temperatura.

I polimeri sulla base delle loro proprietà termiche sono suddivisibili in quattro tipi:

- termoplastici,
- termoindurenti,
- gomme,
- elastomeri termoplastici.

2.1. Polimerizzazione

Per polimerizzazione si intende una reazione chimica che porta a formare una catena polimerica, ovvero una molecola con strutture uguali ripetute in sequenza. Questo meccanismo può essere distinto in:

- polimerizzazione a catena,
- polimerizzazione a stadi.

Nel primo caso si ha una reazione innescata da un *iniziatore* il quale somma su di sé ripetutamente le molecole di monomero andando a spostare il centro di reattività all'estremità della catena a mano a mano che questa cresce. Il processo di produzione della catena polimerica è composto da: *attivazione*, *propagazione* e terminazione (es. polietilene).

Invece, la polimerizzazione a stadi si ottiene tra specie chimiche con più estremità reattive, le quali sono in grado di unirsi ad altre formando lunghe catene polimeriche (un esempio è il nylon).

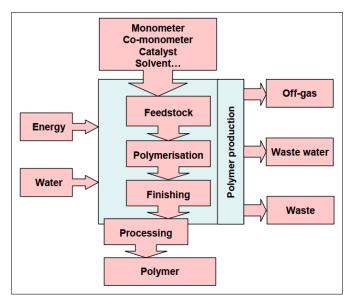


Figura 3. Schema di produzione dei polimeri. [5]

Il processo di produzione dei polimeri richiede per la sua efficacia una purezza massima per quanto riguarda le materie prime. È quindi necessario che tutte le impurità dovute al trasporto, alla degradazione del prodotto, all'ossigeno e ad altri fattori esterni vengano rimosse affinché il processo abbia inizio con una materia prima pura al 99,9999%. Ciò significa un importante costo in termini di dispendio energetico. [5]

In ambito industriale, la polimerizzazione può avvenire con processi di produzione differenti, a seconda delle fasi coinvolte nel processo:

- polimerizzazione in massa,
- polimerizzazione in soluzione,
- polimerizzazione in sospensione,
- polimerizzazione in emulsione,
- polimerizzazione in fase gassosa.

	PET	PE	PP	PVC	PS	PA
MASSA	Х	Х	Х		Х	Х
SOLUZIONE		Х				
SOSPENSIONE		Х	Х	Х	Х	
EMULSIONE				Х		
FASE GASSOSA		Х	Х			

La Tabella 1. mostra quali sono i processi utilizzati per produrre i principali polimeri in commercio:

Tabella 1. Metodo di polimerizzazione per ciascun polimero. [5]

2.1.1. Polimerizzazione a catena

La produzione dei polimeri può avvenire secondo processi diversi tra loro. I materiali ottenuti da una polimerizzazione a catena sono ottenuti tramite un processo che è distinguibile in tre parti:

• attivazione, in cui si crea un radicale libero reattivo partendo da un iniziatore esterno e questo radicale libero risulta in grado di unirsi al monomero. L'attivazione può avvenire attraverso l'omogeneizzazione dei componenti, l'emulsione degli stessi, oppure attraverso un miscuglio dei gas e dei liquidi. È la fase che più incide sulle tempistiche del processo di polimerizzazione. Questa fase può avvenire sia prima che il radicale primario ottenuto entri nel reattore che già al suo interno. Prendendo come esempio un monomero di etilene la reazione in questa fase sarebbe:

$$Ra^* + CH_2 = CH_2 \rightarrow RaCH_2CH_2^*$$

- propagazione, è l'effettivo processo di reazione chimica in cui si ottiene dal radicale primario
 il polimero. Si ottiene facendo reagire più monomeri successivamente ottenendo una catena
 molecolare che fa propagare la lunghezza della catena. In questa fase si possono fare
 ulteriori distinzioni sul processo applicato tra polimerizzazione, policondensazione e
 poliaddizione, dove nel primo caso si ha una produzione di una sottospecie molecolare
 chiamata condensato in aggiunta a quella del polimero.
- **terminazione**, in cui si arresta la propagazione del processo neutralizzando la reazione in modo da ottenere un polimero con una determinata purezza. Questo arresto può avvenire nel momento in cui si fa incontrare una catena polimerica in propagazione con un'altra catena polimerica nella stessa fase, le due catene quindi si uniscono per formare un polimero di dimensioni pari alla somma dei due tratti. La reazione che porta a compimento la terminazione sarà quindi:

$$Ra(CH_2)_m^* + (CH_2)_n^*Ra \rightarrow Ra(CH_2)_m(CH_2)_nRa$$

I polimeri di addizione sono per lo più prodotti tramite questa reazione a catena, anche se esistono soluzioni alternative quali la polimerizzazione ionica e la polimerizzazione di coordinazione. [6]

2.1.2. Policondensazione

La policondensazione è il secondo metodo più utilizzato per la produzione di polimeri. Si differenzia dalla reazione a catena in quanto nella produzione del polimero si hanno una serie di successive

reazioni di sintesi, dette reazioni di condensazione, e tra queste vengono rilasciate piccole molecole chiamate condensato (possono essere acqua acido cloridrico).

Nella policondensazione si ottengono vari tipi di polimeri che possono avere diversa articolazione all'interno della catena, ogni specie di molecola è in grado di reagire con un'altra per ottenere una molecola più grande. Le due molecole che vanno a comporre la struttura dovranno quindi disporsi in modo alternato così da ottenere una struttura molecolare a stadi. I reagenti devono avere almeno due gruppi funzionali, così che la catena del polimero possa allungarsi a entrambe le estremità. [6]

2.2. Produzione di PET vergine

Il polietilene tereftalato (PET) è un polimero appartenente alla classe delle resine termoplastiche e facente parte della famiglia dei poliesteri lineari aromatici. Può esistere in forma amorfa o cristallina e si distingue dalla colorazione (trasparente per il PET amorfo e bianco-opaco per il PET cristallino). Ha diverse applicazioni, le più diffuse tra le quali sono la produzione di bottiglie di acqua o bibite analcoliche e di fibre in PET. [5] [6]

$$\begin{bmatrix} O & O & O \\ \parallel & \parallel & \parallel \\ C & -C & -C & -(CH_2)_2 - O \end{bmatrix}_{n}$$

Figura 4. Formula di struttura del PET. [7]

La produzione del polimero grezzo può avvenire attraverso tecniche diverse:

- policondensazione continua basata sull'acido dimetilico tereftalico (DMT)
- policondensazione continua basata sull'acido tereftalico (TPA)
- policondensazione batch basata su DMT

Inoltre, negli anni si sono sviluppate tecniche per accrescere la massa molecolare del polimero grezzo. Le più diffuse sono:

- post-condensazione continua a stato solido
- post-condensazione batch a stato solido

La proprietà che maggiormente influenza le performance del PET è il peso molecolare, strettamente correlato alla viscosità intrinseca. Essa incide infatti sul punto di fusione, sulla cristallinità e sulla resistenza a trazione del prodotto. [6]

2.2.1. Policondensazione basata su DMT

Il processo di policondensazione che utilizza DMT ha inizio attraverso una reazione in cui dalle due molecole di estere metilico del DMT si ottiene un gruppo di glicole etilenico (GE) rilasciando metanolo. Questo processo di esterificazione ha inizio quando la temperatura raggiunge i 160 °C (ipotizziamo l'utilizzo di un rapporto molare tra glicole etilenico e DMT pari a 3,8 ad 1. È importante considerare inoltre che il DMT che non reagisce può avere un effetto nocivo sulla reazione in quanto può agire da terminazione della catena di polimerizzazione.

Nel momento in cui si verifica invece la presenza di un eccesso di glicole etilenico, questo viene rimosso ad una temperatura di circa 250 °C per distillazione. Si ha poi aggiunta di un composto a base fosforo per stabilizzare il processo ed è necessario procedere alla disattivazione dei

catalizzatori di manganese. Se ciò non avvenisse, si avrebbe una formazione di reazioni indesiderate che andrebbero a provocare un ingiallimento del prodotto finale con conseguente danno estetico importante.

A questo punto può iniziare il processo di policondensazione. L'eccesso di GE prodotto dalla reazione viene rimosso a vuoto in modo da ottenere il massimo peso molecolare possibile. La temperatura a cui avviene la reazione può variare indicativamente dai 285 ai 300 °C. Il polimero ottenuto da questa reazione sarà quindi un polimero fuso che necessita ancora di alcuni processi di lavorazione quali l'estrusione, il raffreddamento, il taglio ed infine il trasporto del materiale nei siti di stoccaggio. Il PET prodotto viene quindi messo sul mercato per le aziende produttrici in forma di granulo. [6]

2.2.2. Policondensazione basata su TPA

Una reazione per la produzione di granulo di PET alternativa a quella vista in precedenza si può ottenere tra glicole etilenico (GE) e acido tereftalico (PTA). Nella prima fase di questo processo si ha miscelazione di TPA e GE. Ciò significa che avrà luogo una reazione di esterificazione dei reagenti. Il prodotto di questa reazione viene quindi inviato a pre-policondensazione, a cui seguirà la policondensazione completa.

A questo punto si è quindi in grado di produrre il granulo di PET che è la base per qualsiasi lavorazione del materiale che si intenda fare. [6]

2.2.3. Policondensazione batch basata su DMT

Per processo di policondensazione in batch si intende un modello di produzione in cui, a differenza dei precedenti, risulta necessario uno spegnimento ciclico dell'impianto con conseguente scarico, ricarico e successiva riaccensione dell'impianto. È caratterizzato da due reazioni principali:

- processo di esterificazione (ovvero la reazione di preparazione di un estere a partire da un alcol ed un acido in presenza di un catalizzatore alcalino),
- processo di policondensazione.

Perché abbia inizio il processo di esterificazione è necessario far reagire DMT con glicole etilenico in eccesso. Una volta fatti reagire in un contenitore e portata la temperatura di reazione tra i 150 ed i 200 °C, ha inizio la reazione. Il metanolo formato viene accumulato in un serbatoio e può essere riutilizzato, mentre il glicole in eccesso evapora a temperature tra i 200 ed i 260 °C, condensa successivamente e viene rigenerato separatamente e raccolto in serbatoi d'accumulo.

Una volta raggiunta la temperatura finale del processo di esterificazione, che dipende dal tipo di PET, viene aggiunto il catalizzatore per produrre la policondensazione: essa si ottiene portando la temperatura tra i 260 ed i 310 °C e riducendo la pressione sotto i 5 mbar. Si ha quindi che l'eccesso di glicole etilenico viene fatto evaporare, condensare e successivamente viene rigenerato tramite un ciclo separato, mentre il processo di policondensazione termina una volta raggiunta la viscosità intrinseca μ , che varia in funzione del tipo di prodotto che si vuole ottenere. Il PET ottenuto viene quindi pressato, raffreddato, tagliato, essiccato e setacciato. Si ottiene così il granulo di PET, il cui utiizzo risulterà variare in funzione dell' utilizzo che verrà fatto del materiale.

La *Tabella 2.* raccoglie i dati di confronto relativi ai consumi, alle emissioni e alla generazione di materiale e acque di scarto per ciascuna delle possibili tecniche di produzione del granulo di PET.

	DMT process	TPA process	DMT-BPU process
Consumption data			
Total energy (MJ/t)	2513 - 7410	2087 - 4500 (18500 ¹)	5100 - 11942
Water (m³/t)	0.1 - 2.15	0.4 - 10	7.5 - 122
DMT/TPA (t/t)	1.02	0.825 - 0.87	1.01 - 1.04
EG (t/t)	0.35 - 0.38	0.32 - 0.355	0.338 - 0.380
Catalyst (g/t)	589 - 1150	270 - 615	332 - 1323
P-stabiliser (g/t)	70 - 140	0 - 100	40 - 150
Emissions to air			
Methanol (g/t)	up to 73		50.7 - 300
Acetaldehyde (g/t)	up to 60	up to 60	28.5 - 1750
EG (g/t)	up to 10	up to 10	8.8 - 73
HTM (g/t)	50 - 90		80 - 110
VOC (g/t)	70 – 800 70 – 120 using thermal oxidation	up to 1200 5 using catalytic oxidation (only point sources)	32.5 - 2160
Generation of waste			
Polymer waste (g/t)	400 - 5556	140 - 18000	up to 6000
Hazardous waste (g/t)	up to 0.45	up to 0.45	up to 800
Other waste (g/t)	10700 - 16000	2000 - 5000	12400 - 25000
Waste water			
COD (g/t)	8000 - 16000	2000 - 16000	3000 - 5210
Noise at the fence (dB)	up to 66	up to 68	up to 66
high viscosity PET for f	ood packaging		

Tabella 2. Emissioni e consumi dei processi di produzione del PET. [5]

2.3. Il riciclo della plastica

Il riciclo degli imballaggi in plastica è ormai diventato una pratica fondamentale nel processo di gestione dei rifiuti. Esso si basa su una complessa catena di attività che comprende generalmente tre fasi principali: raccolta differenziata, selezione dei diversi polimeri plastici ed infine riciclo dei prodotti. La plastica può essere soggetta a due tipologie principali di riciclo, ciascuno dei quali comporta diverse possibilità di riutilizzo del polimero termoplastico scartato. L'efficacia delle politiche di riciclo è strettamente legata ad una efficace ottimizzazione e sinergia delle tre fasi descritte.

I possibili metodi del riciclo della plastica sono il riciclo meccanico (primario e secondario) e riciclo chimico (terziario), quest'ultimo caratterizzato dal processo di depolimerizzazione.

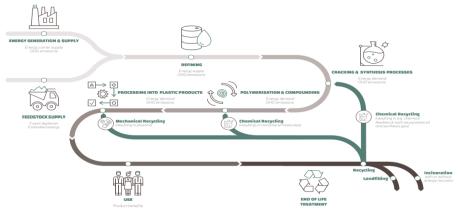


Figura 5. Catena di produzione dei polimeri ed opzioni di riciclo. [8]

2.3.1. Riciclo chimico

Il riciclo chimico si pone come obiettivo quello di convertire i rifiuti plastici in prodotti chimici a loro volta riutilizzabili per produrre nuove plastiche. È quindi certamente un'opzione più sostenibile per la gestione degli scarti rispetto al recupero energetico o al rilascio in discarica. La struttura chimica del polimero viene modificata e convertita tramite processi quali la gassificazione, la pirolisi, la solvolisi e la depolimerizzazione.

Le possibilità di espansione tecnologica in questo senso sono ancora ampie e certamente il riciclo chimico sarà in grado nei prossimi anni di permettere un riutilizzo di quantità importanti di materiale plastico misto che ad oggi è impossibile recuperare e che viene quindi destinato all'incenerimento. Di certo però c'è che nei processi di recupero in cui è possibile avere un riciclo di tipo meccanico, il riciclo chimico risulterà nei confronti di quest'ultimo sempre più complesso e costoso in termini sia di utilizzo delle risorse che economici.

Al momento è una soluzione che può avere una grande varietà di utilizzo. È possibile riciclare chimicamente i polimeri reticolati e i termoplastici non in grado di ottenere una qualità sufficiente attraverso il riciclo meccanico, spesso perché sono rifiuti plastici eterogenei: in questi casi è necessario che la catena polimerica venga ritrasformata attraverso processi chimici nel monomero plastico originale. A questo punto è possibile riutilizzare il monomero ottenuto come nuova materia prima per ottenere il polimero originale, al pari di un materiale vergine.

Il riciclo chimico può quindi risultare una tecnologia non alternativa al riciclo meccanico, ma che va invece ad affiancarlo occupandosi del recupero di materiali misti, multistrato o di polimeri complessi. [8] [9] [10]

2.3.2. Riciclo meccanico

Attualmente è invece il riciclo meccanico a risultare come la soluzione preferibile e di minore impatto energetico ed economico, in quanto implica requisiti minimi di lavorabilità del materiale. L'obiettivo del riciclo meccanico è quello di riutilizzare il materiale scartato senza modificare la struttura molecolare dei polimeri e sottoporlo ai processi di lavaggio, triturazione ed essiccamento. La qualità del prodotto ottenuto sarà quindi fortemente dipendente dalla qualità della selezione operata sul prodotto riciclato, per cui l'evoluzione tecnologica in questo senso non è più data dalla ricerca di nuove soluzioni in campo chimico, bensì dalla ricerca di ottimizzare i flussi dei prodotti ed i processi di selezione del materiale: l'obiettivo è quello di ottenere frazioni merceologiche che risultino sempre più pulite e con tassi di impurità ridotti.

Le tipologie di materiali maggiormente soggette a questo tipo di riutilizzo sono i polimeri termoplastici e termoindurenti. Questi materiali subiscono processi di macinazione e vengono rimessi in commercio come polimeri riciclati sotto forma di scaglie di piccole dimensioni. Non essendo ancora possibile però garantire una totale purezza del materiale riciclato a causa della presenza di altri polimeri plastici nel processo di selezione, la macinazione e rifusione delle plastiche scartate comporta un degrado della catena polimerica, per cui per garantire un prodotto con un'adeguata viscosità le aziende tendono ad utilizzare in produzione un miscuglio di plastica vergine e plastica riciclata. Questo processo, detto *blending*, risulta essere un buon compromesso tra le aziende produttrici e le indicazioni internazionali che richiedono una diminuzione dell'utilizzo di plastica vergine.

È possibile distinguere poi tra due tipologie di riciclo meccanico: *primario e secondario*. Questa distinzione è dovuta ad una diversa classificazione dello scarto da riciclare.

Per riciclo primario si intende uno scarto proveniente dal processo produttivo, per cui composto per lo più da plastica pulita e che non richiede particolari trattamenti specifici. È possibile quindi ottenere in questi casi dei prodotti di alta qualità e con un costo energetico ed economico minimo. Diversamente, il riciclo secondario è caratterizzato dal recupero degli elementi in plastica derivanti dalla raccolta differenziata dei rifiuti solidi urbani; da cui si deduce la presenza di una maggiore contaminazione degli scarti. Risulta quindi necessario sottoporre questi materiali a delle fasi aggiuntive di selezione e lavaggio al fine di poter ottenere un prodotto comunque riutilizzabile. Per i prodotti che presentano forma complessa e spessori minimi questo tipo di soluzione però non risulta adeguata.

Il rifiuto urbano plastico che non viene riciclato può però ancora essere utilizzato come combustibile per un termovalorizzatore: essendo un prodotto derivato dal petrolio, le plastiche risultano essere un ottimo combustibile e possono essere bruciate insieme ai rifiuti solidi urbani con produzione di energia termica. In questo modo la plastica non può più essere riutilizzata come prodotto, ma viene valorizzato il suo contenuto energetico, a differenza della consegna in discarica. La termovalorizzazione è dal punto di vista economico la soluzione più conveniente; mentre dal punto di vista ecologico negli impianti moderni risulta comunque possibile un efficace contenimento delle emissioni in atmosfera.

3. La raccolta differenziata dei rifiuti urbani

Nel 2018 la produzione nazionale di rifiuti urbani è risultata pari a 30,2 milioni di tonnellate (in crescita dal 2017). In particolare, è importante notare come negli ultimi anni il legame tra andamento del PIL nazionale e produzione di RU sia diventato più debole, tanto da poter dire che dal 2013 al 2018 a fronte di una crescita del PIL del 4,6%, la crescita della produzione di RU si è fermata al 2%. Andando ad analizzare la produzione pro capite di rifiuti urbani abbiamo una crescita percentuale del 2,2%, ottenendo così un valore medio nazionale per il 2018 di 499,7 $\frac{kg}{ab\cdot anno}$. [3] Da questi dati è possibile comprendere quanto importante possa essere riuscire a creare una valida filiera di riciclo dei rifiuti, in cui il primo step necessario è certamente la raccolta differenziata.

Per fare ciò è necessario descrivere una metodologia di calcolo per distinguere tra percentuale di raccolta differenziata e rifiuto urbano totale:

$$RU[t] = \left(\sum_{i} RD_{i}\right) + RU_{ind} + I \tag{3.1}$$

$$RD \ [\%] = \frac{\sum_{i} RD_{i} \ [t]}{RU \ [t]} * 100$$
 (3.2)

Da cui si intende che:

- \circ RU_{ind} = rifiuti urbani indifferenziati, rifiuti dallo spazzamento stradale ed altri rifiuti urbani non differenziati;
- I = ingombranti a smaltimento;
- \circ RD_i = frazioni organiche, rifiuti da imballaggio, ingombranti a recupero, rifiuti da costruzione e demolizione o della pulizia stradale, di origine tessile, da raccolta selettiva e RAEE.

Anno	Quantitativo raccolto (RD) [1000*t]		Percentuale RD (RD/RU) [%]				Pro capite RD [kg/ab*anno]					
	Nord	Centro	Sud	Italia	Nord	Centro	Sud	Italia	Nord	Centro	Sud	Italia
2014	7803,1	2700,2	2898,1	13401,4	56,7	40,8	31,3	45,2	281	223	139	220
2015	8043,4	2868,2	3109,3	14020,9	58,6	43,8	33,6	47,5	290	238	149	231
2016	9091,3	3214,3	3517,2	15822,8	64,2	48,6	37,6	52,6	328	266	169	261
2017	9236,7	3357,7	3830,8	16425,2	66,2	51,9	41,9	55,5	333	279	185	272
2018	9708,6	3562,0	4264,8	17,535,4	67,7	54,1	46,1	58,1	350	296	207	291

Tabella 3. Raccolta differenziata in Italia. [3]

Dei 17,5 milioni di tonnellate di raccolta differenziata nell'anno 2018, la frazione relativa alla plastica è pari solamente ad 1,368 milioni di tonnellate (7,8 % della raccolta differenziata totale di rifiuti urbani). Ciò significa che il quantitativo pro capite raccolto per il 2018 sarà di 22,7 $\frac{kg}{ab*anno}$. [3]

3.1. La raccolta differenziata in Piemonte

I dati relativi alla regione Piemonte per l'anno 2018 parlano di una produzione pro capite dei rifiuti urbani pari a $497.7 \ \frac{kg}{ab*anno'}$, in crescita rispetto al 2017 del 5,5 %. Sempre nel 2018 la regione Piemonte ha ottenuto una percentuale di raccolta differenziata pari al 61,3 % (penultima regione tra quelle del Nord in questa statistica, davanti solo alla Liguria). Andando ad analizzare il dato di ciascuna provincia, notiamo che ad incidere notevolmente su questo dato è la provincia di Torino, la quale presenta di gran lunga la maggior produzione di rifiuti urbani.

Provincia	Popolazione 2018	Produzione RU 2018	Raccolta diffe	renziata 2018
	[abitanti]	[tonnellate]	[tonnellate]	[%]
Torino	2259523	1101285	626291	56,9 %
Vercelli	170911	84054	54321	64,6 %
Novara	369018	177395	134229	75,7 %
Cuneo	587098	303532	203655	67,1 %
Asti	214638	97822	69061	70,6 %
Alessandria	421284	232978	124130	53,3 %
Biella	175585	84676	57164	67,5 %
Verbano-Cusio-Ossola	158349	86328	60386	70,0 %
Piemonte	4356406	2168070	1329236	61,3 %

Tabella 4. Raccolta differenziata nelle province piemontesi. [3]

Fatto salvo della necessità di una crescita importante a livello regionale degli interventi in favore di modelli più sostenibili ed efficaci per la raccolta differenziata, possiamo continuare la nostra analisi in riferimento all'incidenza percentuale che ogni frazione merceologica ha sulla raccolta differenziata totale.

Dei 305,12 $\frac{kg}{ab*anno}$ di rifiuti urbani differenziati, il 33,6 % è composto da rifiuti organici, il 21,3 da carta, il 12,7 % da vetro, mentre la plastica rappresenta solamente il 6,4 % di tutti i rifiuti urbani differenziati. Dal rapporto della Regione Piemonte del 2018 sui rifiuti solidi urbani si evidenzia la quantità di rifiuti plastici differenziati per ogni comune e consorzio della Regione.

	Alessandria	Asti	Biella	Cuneo	Novara	Torino	vco	Vercelli	Piemonte
Plastica [ton]	8908	246	5418	15217	11889	31536	6420	4858	84492
Plastica [% RT]	3,8	2,6	6,4	5,0	6,7	2,9	7,4	5,8	3,9
Plastica [% RD]	7,1	3.6	9,5	7,5	8,8	5,0	10,6	9,0	6,4

Tabella 5. Plastica riciclata in Piemonte. [11]

Nello specifico, il dato riferito al riciclo dei materiali plastici risulta in linea con le altre regioni del Nord Italia. Ad occuparsi della raccolta dei rifiuti solidi urbani in Piemonte sono 21 diversi consorzi, ognuno dei quali agisce su di una specifica area territoriale. Una volta portati i rifiuti nei centri di raccolta, questi vengono separati in flussi di materiale differenziato oppure di materiale destinato al recupero energetico o alla discarica nel caso di rifiuti indifferenziati.

Al fine di ottenere un riciclo efficace delle materie prime, il primo passo è certamente avere una raccolta differenziata ottimale. I principali flussi riciclabili al momento sono: carta e cartone, alluminio, plastica, vetro, rifiuti biodegradabili, RAEE, olio esausto e tessuti.

3.2. Centri di selezione secondari COREPLA

I rifiuti plastici differenziati raccolti nella prima fase e compattati per poter essere trasportati sono in realtà un insieme eterogeneo dei vari polimeri presenti sul mercato. È necessario quindi, prima di avviare il materiale alle aziende che si occupano della fase di riciclo, effettuare un processo di selezione e smistamento dei rifiuti plastici, in modo tale da separare tra loro i diversi polimeri ed ottenere così dei flussi di materiale plastico il più possibile omogenei.

Chi si occupa di questa fase, fondamentale per una efficace riuscita del processo di riciclo, sono i Centri di Selezione (CSS) di COREPLA (COnsorzio nazionale per la Raccolta, il Riciclo e il REcupero degli imballaggi in PLAstica). Il Consorzio gestisce la fase di selezione attraverso una rete di 33 impianti distribuiti su tutto il territorio nazionale. Per ottenere la qualifica di CSS è necessario rispettare una serie di specifiche tecniche riguardanti la gestione dei rifiuti di imballaggi in plastica.

È necessario che ciascuno di questi centri sia in grado quanto meno di selezionare e separare le seguenti tipologie di polimeri:

- contenitori per liquidi in PET incolore,
- contenitori per liquidi in PET azzurrato,
- contenitori per liquidi in PET colorato,
- contenitori per liquidi in PE,
- cassette in plastica,
- film d'imballaggio,
- imballaggi misti di polipropilene,
- imballaggi flessibili di plastica.

I sottoprodotti che è possibile ottenere dalla separazione degli altri prodotti sono:

- PLASMIX,
- PLASMIX FINE.

Al fine di incentivare una maggiore attenzione nella selezione, il Consorzio paga un corrispettivo alle aziende per ogni tonnellata di materiale processato, distinguendo però tra materiale avviabili a riciclo (meglio retribuiti) e materiali destinati al recupero energetico.

Attualmente in Piemonte sono presenti due impianti CSS riconosciuti da COREPLA: l'impianto di Beinasco in provincia di Torino, e l'impianto di Cavaglià, in provincia di Biella. Ipotizzando una suddivisione in questi due impianti su base territoriale dei rifiuti plastici raccolti in Piemonte, il materiale plastico in uscita dai centri di raccolta delle province di Alessandria, Biella, Vercelli, Novara e VCO saranno consegnati all'impianto di Cavaglià, mentre i rifiuti raccolti nelle province di Torino, Asti e Cuneo saranno destinati all'impianto di Beinasco.

In riferimento ai dati del 2018, le quantità di materiale piemontese in ingresso nei due centri sono quindi:

	Piemonte	Beinasco	Cavaglià
Raccolta differenziata [ton]	1328075	-	-
RD Plastica [ton]	84492	48870	35622
RD Plastica [% su totale]	6,36	3,68	2,68

Tabella 6. Materiale in ingresso nei centri di selezione secondari.

3.2.1. La selezione

Il processo di separazione di questi prodotti all'interno del CSS è caratterizzato da quattro fasi:

- 1) Il CSS riceve dai vari consorzi gli imballaggi di plastica provenienti dalla raccolta differenziata mono e multimateriale. Questi vengono quindi posti su di un nastro trasportatore ed avviati alla prima fase che è quella dell'apertura dei sacchi, in cui un macchinario lacera i sacchetti e rende uniforme il flusso di materiale in ingresso (da notare che il COREPLA nelle sue indicazioni tecniche non permette ai CSS di effettuare internamente all'azienda operazioni di pre-pulizia del materiale).
- 2) La seconda fase è invece detta di separazione meccanica (o smistamento diretto): il materiale sul nastro trasportatore entra infatti nel vaglio rotante in cui avviene una prima separazione in funzione della dimensione del rifiuto. Si tratta nello specifico di un cilindro rotante inclinato di grandi dimensioni e con fori di diametro crescente. In questo modo è possibile separare immediatamente il materiale di piccole dimensioni (d<65 mm) che diventerà quindi PLASMIX FINE, un sottoprodotto di plastica non selezionata e di piccole dimensioni. Il materiale di grosse dimensioni viene invece destinato immediatamente alla fase di separazione manuale. Le plastiche destinate al recupero vengono invece inviate al separatore balistico, ovvero un sistema di griglie basculanti e vibranti che permette di selezionare i prodotti in base alla loro forma: avviene quindi una separazione dei flussi tra le plastiche tridimensionali (contenitori) da quelle bidimensionali (film per imballaggi). I materiali tridimensionali vengono quindi inviati al windshifter in modo da separare a loro volta i materiali pesanti da quelli leggeri. Al fine di garantire una totale assenza di ferro o alluminio nel materiale riciclato, il materiale viene inviato ad un deferrizzatore, ovvero un macchinario che sfruttando le proprietà elettromagnetiche separa Ferro e Alluminio dalla plastica.
- 3) Le frazioni separate vengono a questo punto inviate alla fase successiva in cui, attraverso meccanismi di separazione ottica, dai 3 flussi iniziali (materiale bidimensionale, tridimensionale leggero e tridimensionale pesante) è possibile separare ciascuno dei polimeri e suddividerli per tipologia, forma e colore. Per fare ciò vengono utilizzati diversi scanner ottici ad elevata tecnologia che permettono di distinguere i materiali in base a specifiche caratteristiche e, tramite piccoli pistoni ad aria compressa, separare il materiale riconosciuto dal flusso principale. Esistono diverse tecnologie che caratterizzano questi scanner: a raggi laser, a raggi X, a identificazione ottica delle frazioni dei rifiuti, o a sensori infrarossi *Spectral Imaging based*, ovvero basati sull'unione dei metodi di riflessione spettrale e di elaborazione di immagini spettrali. Di tutte, l'ultima tecnologia è certamente la più interessante e moderna. Le impurità rimaste nei flussi sul nastro sono ulteriormente

- riconosciute e separate dai separatori ottici. L'utilizzo di sensori ottici per la rilevazione dei materiali riciclabili nei rifiuti può essere denominato anche "smistamento indiretto".
- 4) L'ultima fase è quella del controllo qualità, ovvero in cui avviene una separazione manuale a cura degli addetti. Essa è necessaria per correggere eventuali errori di separazione da parte delle macchine e garantire un elevato livello di purezza delle frazioni separate. COREPLA richiede a tutte le aziende consorziate di garantire la presenza di una fase di controllo manuale.

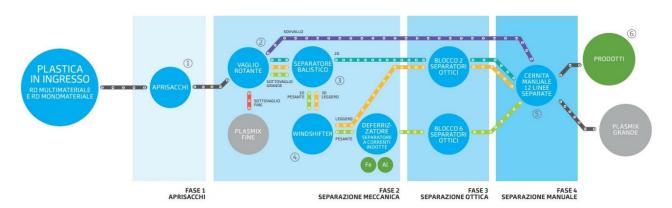


Figura 6. Selezione e separazione in un CSS. [13]

Una volta superata quest'ultima fase, il materiale viene pressato in balle di circa 1 m³ l'una e di composizione omogenea per essere inviato agli impianti specializzati che si occupano di recupero della materia prima. [12] [13]

3.3. Ecocompattatori CORIPET

Un'alternativa a questo modello di gestione è quella proposta da CORIPET, un consorzio formato da un insieme di produttori, *converter* e riciclatori di PET. L'obiettivo che il consorzio si pone è quello di lavorare in un'ottica di circular economy, ovvero di coinvolgere tutti gli attori che intervengono nel ciclo di produzione del PET al fine di garantire le migliori condizioni per il riciclo dello stesso, invece che concentrare la ricerca solo nell'ambito della selezione e recupero finale dei prodotti.

Il consorzio ha quindi sviluppato degli ecocompattatori il cui fine è quello di garantire un metodo di raccolta selettivo del materiale. Con ciò si intende non più una raccolta mista di tutti gli imballaggi plastici a cui deve seguire lo smistamento in una seconda fase, ma una separazione delle bottiglie in PET svolta già sul territorio dagli utenti (grazie ad alcuni meccanismi incentivanti come, ad esempio, un contributo economico) in modo da garantire un riciclo più omogeneo e con la possibilità quindi di destinarlo totalmente alla produzione di nuove bottiglie.



Figura 7. Modello Bottle to Bottle.

Si intende in questo modo sviluppare il modello "Bottle to Bottle", ovvero la riconversione totale delle bottiglie utilizzate in nuove bottiglie R-PET a loro volta riciclabili. Si può così ottenere un meccanismo circolare ed autosostenibile di produzione del PET.

Le criticità principali di questo modello sono attualmente rappresentate da una ridotta diffusione degli ecocompattatori sul territorio nazionale: in questo senso il Consorzio ha stilato un accordo con ANCI (Associazione Nazionale Comuni Italiani) affinchè queste strutture vengano installate in maniera capillare sul territorio. Ciò non è però sufficiente a garantire il successo di questa iniziativa: è necessario, infatti, che la popolazione comprenda l'utilità economica e sociale di questo progetto e sia informata in maniera precisa su quali sono i prodotti che è possibile inserire in un ecocompattatore.

4. Exergia

Per exergia di un sistema si intende il massimo lavoro ottenibile dall'interazione sistema-ambiente circostante: corrisponde infatti al lavoro che si renderebbe disponibile se il sistema studiato si portasse in condizioni meccaniche e chimiche di equilibrio con l'ambiente circostante, il quale viene considerato uniforme alle condizioni termodinamiche di riferimento T₀, p₀. L'utilizzo dell'exergia costituisce quindi uno strumento utile al raggiungimento di un uso più efficiente delle risorse energetiche. L'origine del termine exergia è attribuibile a Rant, che lo utilizzò per definire l'ammontare di lavoro che viene rilasciato. Il concetto è però associabile alla definizione di energia disponibile data da Gibbs. [15]

L'utilità di questo concetto è legata alla consapevolezza che il principio di conservazione dell'energia non consente di mettere in evidenza gli aspetti di confronto di utilizzo delle varie fonti energetiche. I bilanci di energia trattano infatti tutte le forme di energia come equivalenti e non differenziano tra le diverse forme di energia che attraversano i confini del sistema, per cui non forniscono alcuna informazione riguardo le perdite interne. [16]

Ogni volta che si intende disporre di un tipo di energia è quindi necessario riferirsi ad una interazione reciproca tra sistemi non in equilibrio tra loro: si può così ottenere dall'interazione il lavoro di cui necessitiamo fino a quando le trasformazioni in atto portano allo stato finale di equilibrio tra due sistemi. A questo punto non sarà più possibile ottenere lavoro dai due sistemi. [17]

Ai fini della classificazione delle forme di energia è importante affermare che la *qualità* dell'energia viene valutata in funzione della sua capacità di causare un cambiamento. È possibile fare una distinzione tra *exergia*, ovvero la componente potenzialmente convertibile in lavoro, ed *anergia*, ovvero la quota di energia non convertibile in lavoro. Tanto maggiore sarà la componente di energia potenzialmente convertibile, tanto più questa risulterà pregiata dal punto vista tecnico. L'obiettivo diventa, infatti, la conservazione dell'exergia e non più dell'energia. Di conseguenza possiamo ridefinire come segue i principi della termodinamica:

- 1. In ogni processo la somma dell'exergia e dell'anergia si mantiene costante.
- 2. Se un processo è reversibile l'exergia rimane costante: in un processo reale una parte di exergia è trasformata in anergia. L'anergia non può mai essere trasformata in exergia.

L'exergia, quindi, può essere conservata solo quando tutti i processi coinvolti tra il sistema e il suo ambiente sono reversibili; in tutti gli altri casi una certa quantità di exergia viene distrutta. Tutte le imperfezioni nei processi (perdite di energia, degradazione della qualità dell'energia o utilità) possono essere quantificate attraverso questa grandezza, come ad esempio perdita di lavoro all'albero o perdita di potenzialità nel produrre lavoro.

Cercando di riassumere il significato di exergia in un unico enunciato, si può dire che rappresenta la misura dell'abilità di un sistema di causare cambiamenti dovuta al suo non completo equilibrio stabile rispetto all'ambiente di riferimento. Da ciò possiamo trarre alcune considerazioni:

- 1. L'exergia di un sistema in completo equilibrio con il suo ambiente è nulla;
- 2. L'exergia non segue legge di conservazione alcuna;
- 3. Un sistema ha un'exergia proporzionale al livello di disequilibrio con il suo ambiente;
- 4. Qualsiasi perdita di qualità dell'energia porta ad un consumo di exergia.

Analisi Energetica	Analisi Exergetica
Non dipende dall'ambiente esterno ma solo dai flussi di materia ed energia coinvolti	Dipende dai flussi di materia ed energia coinvolti ma anche dall'ambiente esterno
L'energia è conservata per tutti i processi, considera solo il primo principio	L'exergia è conservata solo per i processi reversibili, considera primo e secondo principio
L'energia non è zero anche quando è in equilibrio con l'ambiente	L'exergia è nulla quando è in equilibrio con l'ambiente
Solo quantitativa	Quantitativa e qualitativa
L'energia non può essere né distrutta né prodotta: viene trasformata da una forma all'altra	In un processo reversibile l'exergia non può essere né distrutta né prodotta: in un processo reale può essere solo consumata (distrutta)
L'energia compare in diverse forme (cinetica, potenziale, lavoro, calore) ed è misurata in queste forme	L'exergia compare in diverse forme (cinetica, potenziale, lavoro, exergia termica) ed è misurata come lavoro o come abilità di produrre lavoro

Tabella 7. Confronto tra analisi energetica ed exergetica. [18]

Per comprendere meglio questa riformulazione è necessario partire dalla definizione di prima e seconda legge della Termodinamica, ovvero le leggi di conservazione dell'energia nei processi termici.

1. La prima legge della Termodinamica è caratterizzata da un bilancio energetico tra lavoro speso e calore scambiato da un sistema:

$$Q = \Delta U + W \tag{4.1}$$

dove Q rappresenta il calore, ΔU la variazione di energia interna, W il lavoro.

Applicando la formula di Gibbs possiamo evidenziare la relazione che esiste tra entalpia ed energia interna:

$$h = u + pv \tag{4.2}$$

dove h è l'entalpia, p la pressione e v il volume specifico.

È possibile però descrivere la prima legge in una forma ingegneristicamente più efficace, ovvero:

$$E_d = \Delta E_u + E_w \tag{4.3}$$

$$\Delta E_u = \Delta E_k + \Delta E_p + \Delta U \tag{4.4}$$

La formula 4.3 è una equazione di bilancio energetico in cui vengono descritte E_d come l'energia fornita al sistema, E_w come l'energia che esce dal sistema e ΔE_u come la crescita di energia del sistema. Quest'ultima quota comprende infatti la variazione di energia cinetica ΔE_k , di energia potenziale ΔE_p e di energia interna ΔU , come mostrato dalla 4.4.

Il bilancio energetico introdotto alla 4.3 può essere nuovamente espresso come:

$$\sum \dot{m}_d h_d + \sum \dot{Q}_d = \sum \dot{m}_W h_W + \sum \dot{Q}_W + N_i \tag{4.5}$$

dove \dot{m}_d , \dot{m}_w sono i flussi di materia in ingresso ed uscita dal sistema, h_d e h_w le relative entalpie specifiche, \dot{Q}_d e \dot{Q}_w i relativi flussi di calore, mentre N_i indica la potenza interna.

È interessante in questo caso sottolineare come il valore di entalpia specifica, che di fatto rappresenta un eccesso di entalpia rispetto ad uno stato di riferimento (vedi 4.7), nei processi chimici sia dato due componenti: un'entalpia fisica ed un'entalpia chimica:

$$h = h_f + h_{ch} \tag{4.6}$$

$$h = h(p, T) - h_0(p_0, T_0) (4.7)$$

Il contributo di entalpia chimica lo troviamo nei calcoli spesso utilizzato sotto forma di potere calorifico inferiore (PCI) o superiore (PCS).

Analizzando l'equazione 4.5 la prima legge della Termodinamica sembrerebbe quindi suggerire che sia possibile costruire un sistema reale che non abbia alcun tipo di restrizione sulla conversione dell'energia fornita: ciò è dovuto al fatto che la prima legge si concentra esclusivamente sull'aspetto quantitativo e non risponde invece alle problematiche relative all'identificazione e localizzazione delle perdite ed inefficienze.

2. La seconda legge della Termodinamica si va quindi ad aggiungere alla prima in modo da rendere più efficace questa descrizione. Essa permette infatti di determinare la direzione dei processi termodinamici in quanto parte dal presupposto che tutti i processi reali sono irreversibili. In questo caso si può quindi introdurre il concetto di entropia S per definire una quantità termodinamica che caratterizzi ciascun processo irreversibile: più alta è la generazione di entropia e minore risulterà essere la perfezione del sistema. Si afferma in questo caso il postulato per cui "l'entropia è una proprietà estensiva di un sistema. L'entropia di un sistema isolato non può decrescere". [16] Per quanto riguarda lo studio di un sistema non isolato è necessario considerare tutti i sistemi che partecipano al processo. In questo modo è possibile affermare che:

$$\Delta S_{sistema} + \Delta S_{ambiente} \ge 0$$
 (4.8)

La variazione infinitesima di entropia, applicabile nel caso di variazione di stato di sostanze senza cambiamenti di composizione, sarà data dall'*equazione di Gibbs*:

$$dS = \frac{dQ}{T} = \frac{dU + pdV}{T} \tag{4.9}$$

La generazione di entropia totale S_{tot} risulterà essere:

- > 0, per processi reali irreversibili,
- = 0, per processi ideali reversibili,
- < 0, per processi impossibili.

A questo punto è possibile notare che in una comparazione tra bilancio energetico e bilancio exergetico dello stesso sistema si evidenzia la perdita di capacità di compiere un lavoro a causa dell'irreversibilità di un ciclo rispetto al caso reversibile: l'exergia delle risorse fornite al sistema sarà infatti sempre maggiore rispetto all'exergia dei prodotti.

Il bilancio exergetico può essere definito come segue: [19]

$$Ex_F = Ex_P + \delta Ex_L + \delta Ex_D \tag{4.10}$$

dove Ex_F è l'exergia totale che guida il processo, Ex_P rappresenta l'exergia totale dei prodotti utili, δEx_l sono le perdite di exergia esterne mentre δEx_d sono le perdite interne di exergia risultante dall'irreversibilità interna del sistema.

È quindi possibile definire una efficienza exergetica che evidenzia la reale efficienza dei processi e della trasformazione delle risorse utilizzando un metodo indiretto. [19]

Viene quindi descritta come:

$$\eta_{ex} = \frac{Ex_P}{Ex_E} = 1 - \frac{\delta Ex_L}{Ex_E} - \frac{\delta Ex_D}{Ex_E}$$
(4.11)

Le perdite di exergia interna del sistema, ovvero le perdite dovute all'irreversibilità dei processi, possono essere calcolate utilizzando la legge di Gouy-Stodola: [1] [19] [20]

$$\delta E x_D = T_O * S_{irr} = T_O * \Delta S \tag{4.12}$$

4.1. Le forme di exergia

L'exergia totale di un sistema termodinamico può essere distinta in diverse tipologie: [1] [19][21]

- $exergia fisica Ex_f$ dovuta alla variazione di temperatura e pressione del sistema rispetto a quella dell'ambiente esterno; l'exergia fisica può essere distinta in:
 - exergia termica $Ex_{f,T}$: in relazione alle variazioni di temperatura, si calcola partendo da un generico stato di temperatura T e di pressione p considerando una trasformazione isobara alla pressione p, fino ad arrivare alla temperatura dell'ambiente T0;
 - exergia meccanica $Ex_{f,p}$: in relazione alle variazioni di pressione, si calcola considerando una trasformazione isoterma alla temperatura T0, fino ad arrivare alla pressione dell'ambiente p0;
- exergia chimica Ex_{ch} dovuta alla variazione della composizione chimica del sistema rispetto a quella dell'ambiente esterno. L'exergia chimica può essere ulteriormente distinta in:
 - exergia reattiva $Ex_{ch,R}$: associata alle reazioni chimiche;
 - exergia non reattiva $Ex_{ch,x}$: associata ad un processo non reattivo, come ad esempio una espansione, un miscelamento...;
- exergia cinetica Ex_{cin} dovuta alla velocità del sistema rispetto a quella dell'ambiente esterno;
- exergia potenziale Ex_{pt} dovuta alla quota relativa misurata tra il sistema e l'ambiente esterno.

Possiamo calcolare l'exergia totale di un sistema, in assenza di tensioni superficiali, campi magnetici o elettrici, attraverso la formula seguente: [22]

$$Ex_F = Ex_f + Ex_{ch} + Ex_{cin} + Ex_{pot} = m * [ex_f + ex_{ch} + ex_{cin} + ex_{pot}]$$
 (4.13)

Grazie all'introduzione dell'exergia come concetto, è possibile descrivere le equazioni dei flussi exergetici come segue:

Exergia fisica di un flusso di materia. È possibile calcolare il *j-esimo* flusso di exergia fisico Ex_i^{ph} come: [1] [19]

$$ex_f = h(p,T) - h_0(p_0,T_0) - T_0 * [s(p,T) - S_0(p_0,T_0)]$$
(4.14)

Al fine di rendere più efficace il calcolo dell'exergia fisica, è possibile scomporre questo contributo considerandolo come una somma di un contributo termico (a pressione costante) ed un contributo meccanico (a temperatura costante):

$$ex_{f,j} = \left[\left(h_j - h_{j,X} \right) - T_0 * \left(s_j - s_{j,X} \right) \right]_{p=cost} + \left[\left(h_j - h_{j,0} \right) - T_0 * \left(s_j - s_{j,0} \right) \right]_{T_0 = cost}$$
(4.15)

Per stato X del flusso *j-esimo* si intende alla pressione operativa p e alla temperatura di riferimento T_0 , mentre per generico stato *j-esimo* si intende a pressione e temperatura operativa. I termini $h_{j,0}$ e $s_{j,0}$ indicano invece entalpia ed entropia allo stato di riferimento (p_0, T_0) .

Exergia chimica di un flusso di materia. Rappresenta la massima quantità di lavoro ottenibile quando la sostanza considerata viene portata dallo stato in cui si trova in ambiente allo stato di equilibrio attraverso processi di trasmissione del calore e scambio di materia con l'ambiente. [21]

Per calcolare l'exergia chimica è indispensabile conoscere quindi non solo temperatura e pressione di riferimento, ma anche la sua composizione. Dato che si agisce su un ambiente fisico reale, è necessario modellizzare un ambiente di riferimento. Per fare ciò si possono utilizzare i valori standard tabulati di exergia alle condizioni di riferimento ($T_{rif} = 298,15~K$, $p_{rif} = 1,013~*10^5~Pa$). In questo modo si può arrivare a definire alcune sostanze di riferimento, la cui caratteristica essenziale è quella di essere in equilibrio con il resto dell'ambiente.

Nella *Tabella 7.* possiamo trovare alcuni valori standard di exergia chimica molare relativi ad alcune sostanze in condizioni atmosferiche di riferimento:

SOSTANZA	O ₂	N ₂	CO₂	CH ₄	H₂O	H ₂	С
stato	gas	gas	gas	gas	gas	gas	solido
$ex_k^0 \left[\frac{kJ}{mol} \right]$	3,97	0,72	19,89	836,51	9,50	236,09	410,26
Sostanza di riferimento in atmosfera	<i>O</i> ₂	N ₂	CO ₂	CH ₄	H ₂ O (gas)	H ₂ O (gas) O ₂	CO ₂ O ₂

Tabella 8. Exergia chimica molare standard in condizioni di riferimento di alcune sostanze. [15] [24]

L'exergia reattiva può essere calcolata come mostrato dall'equazione 4.15: [19] [23] [24]

$$ex_{ch,R} = \Delta G_f + \sum_{i} n_i * b_{ch,i}$$

$$(4.16)$$

dove ΔG_f è l'entalpia libera di formazione molare standard di Gibbs per la formazione di composti, n_i è il numero di moli dei singoli elementi per unità di composto, $b_{ch,i}$ è l'exergia chimica standard dell'elemento.

L'exergia chimica applicata nell'ottica di valutazione dell'utilizzo di risorse di un sistema è da intendersi come exergia del combustibile utilizzato. In questo senso, la sua valutazione è legata alle dinamiche che si sviluppano all'interno di un processo di combustione. In questi casi non si ha una singola forma di irreversibilità, in quanto durante una combustione non si verifica solo trasferimento di calore, ma anche dispersioni legate alle frizioni nei fluidi e alle miscele di sostanze che si formano in camera di combustione.

È quindi possibile definire l'exergia chimica di una sostanza combustibile come: [25]

$$ex_{ch} = -\Delta h_0 + T_0 * \Delta S_0 + RT_0 * \left(x_{O_2} * \ln \frac{p_{O_2,0}}{p_0} - \sum_k x_k * \ln \frac{p_{k,0}}{p_0} \right)$$
(4.17)

dove per k si intendono i prodotti di combustione, p_0 e T_0 le condizioni standard.

L'entropia di reazione ΔS_0 rimane però l'elemento più complesso da determinare. Gli studi compiuti da Szargut hanno raccolto una notevole mole di dati empirici e descritto il fattore empirico:

$$\beta = \frac{ex_{ch}}{PCI} = \frac{1,044 + 0,0160 * \frac{H}{C} - 0,3493 * \frac{O}{C} * (1 + 0,0531 * \frac{H}{C}) + 0,0493 * \frac{N}{C}}{1 - 0,4124 * \frac{O}{C}} [-] \quad (4.18)$$

come rapporto tra contributo di exergia chimica e PCI (o PCS). [2]

Questo tipo di approccio risulta quindi applicabile anche ai combustibili fossili in ambito industriale. La *Tabella 9.* Indica alcuni tra i coefficienti empirici β di uso comune:

Combustibile	β [–]		
Petrolio (e oli combustibili)	1,04 - 1,08		
Gas naturale	1,04 ± 0,5 %		
Carbone	1,05		
Biomassa legnosa	1,15 – 1,30		

Tabella 9. Valori tipici di coefficienti empirici per combustibili industriali. [25]

4.2. Analisi exergetica – valutazione dell'utilizzo di risorse

Dopo aver descritto il modo in cui è possibile calcolare le varie forme di exergia, diventa necessario pianificare ed analizzare con attenzione il consumo di energia in tutti i settori di interesse data l'esauribilità ed i potenziali effetti collaterali di un utilizzo imprudente delle risorse energetiche, sia da un punto di vista economico-sociale, sia da un punto di vista ambientale.

Se l'obiettivo della nostra analisi è centrato su questi aspetti, allora l'analisi exergetica si può proporre come strumento di valutazione ottimale in quanto consente [26]:

- di valutare l'impatto dell'utilizzo delle risorse energetiche sull'ambiente;
- di promuovere un utilizzo più efficiente di queste;
- di verificare luoghi/componenti/processi in cui si hanno perdite maggiori e consentirne una quantificazione;
- di valutare quanto miglioramento delle inefficienze possa implicare la riprogettazione di un sistema esistente;
- di distinguere la qualità delle risorse energetiche impiegate;
- uno sviluppo sostenibile, grazie ad un apporto più sostenibile delle risorse stesse.

L'analisi exergetica comporta nei fatti l'applicazione di un bilancio exergetico riferito ad un volume di controllo definito, in modo tale da tracciare e quantificarne le inefficienze. È quindi necessario

definire in una prima fase gli estremi del sistema che si intende prendere in considerazione in modo da poter adeguatamente descrivere i flussi in entrata ed uscita dello stesso.

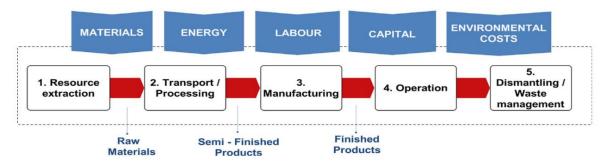


Figura 8. Ciclo di vita semplificato di un bene materiale o immateriale generico. [27]

Per compiere un'analisi exergetica è consigliabile seguire alcuni step:

- 1. definire un sistema univoco e selezionare il volume di controllo,
- 2. definire un'ambiente di riferimento appropriato, facendo attenzione a distinguere se l'ambiente è stazionario ed uniforme o meno,
- 3. calcolare la massa, i bilanci di energia ed entropia di un sistema durante un processo,
- 4. applicare il bilancio exergetico del sistema.

In questa tesi verrà utilizzato il calcolo exergetico in un'ottica di "valutazione dell'utilizzo globale delle risorse" (Global Resource Assessment) del processo di riciclo del PET. Per lo svolgimento di analisi in cui risulta necessario determinare l'impatto exergetico totale di un sistema complesso è necessario definire un modello che tenga conto di tutti i processi fino a raggiungere il livello della risorsa primaria estratta in natura. La letteratura scientifica offre in questo senso due possibili metodi per lo svolgimento di questa valutazione: il calcolo dell'exergia totale accumulata e l'LCA (Life Cycle Assessment). [28]

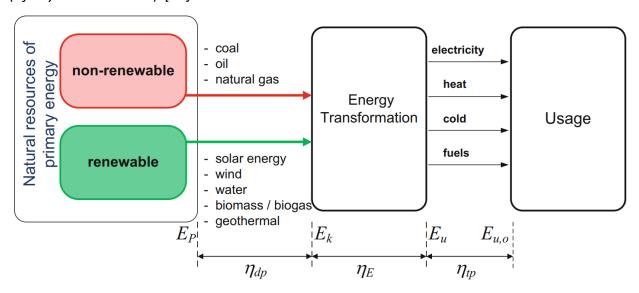


Figura 9. Livelli delle trasformazioni energetiche. [28]

Il calcolo dell'exergia totale accumulata (CEC) si pone come obiettivo quello di identificare l'impatto totale di un prodotto sull'ambiente utilizzando i dati sulle risorse naturali, le emissioni ed i processi in modo che il risultato finale possa essere espresso in un'unica unità di misura exergetica $\frac{MJ}{ka}$.

Il calcolo dell'LCA intende invece definire questi risultati in una grande varietà di modi. Ciò comporta come conseguenza che i risultati stessi possono variare notevolmente a seconda del metodo. Inoltre, la necessità di dover risalire per ogni processo che porta ad un processo finito alla totalità dei combustibili e minerali utilizzati per la produzione dello stesso comporta la necessità di compiere una quantità notevole di calcoli, in cui nuovamente la definizione del confine del sistema e dell'unità funzionale scelta può variare in funzione del singolo studio.

Visto e considerato le caratteristiche raccolte in *Tabella 10.*, per la Tesi qui svolta si è scelto di utilizzare il primo dei due approcci indicati, il CEC (*Cumulative Exergy Consumption*).

Caratteristica della metodologia	LCA	CEC
Valutazione dell'impatto ambientale di un prodotto nel suo intero ciclo di vita	✓	✓
Valutazione dell'impatto ambientale delle risorse utilizzate e conseguenze ambientali del rilascio di sostanze dannose		✓
Unità di misura di riferimento uniforme	×	✓
Confini del sistema definiti inequivocabilmente	×	✓

Tabella 10. Confronto tra i metodi per la valutazione dell'utilizzo di risorse. [28]

Prendendo ad esempio un sistema di riferimento quale quello descritto in *Figura 9.*, è possibile ottenere un diagramma che sia in grado di descrivere le perdite in funzione della sequenza dei processi di produzione. Questo tipo di diagramma viene detto "di Grassmann" e può essere considerato un adattamento del diagramma di Sankey, utilizzato in genere per i trasferimenti energetici in un impianto, all'ambito exergetico.

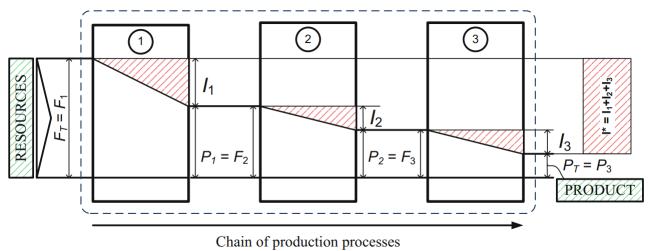


Figura 10. Esempio di un generico diagramma di Grassmann. [28]

4.2.1. Calcolo dell'exergia totale cumulata per kg di prodotto

Per exergia totale accumulata si intende il consumo exergetico totale che grava su tutte le fasi di produzione fino a giungere alle risorse primarie, tenendo conto dei contributi dovuti al trasporto, alla produzione di prodotti semifiniti fino ad arrivare al prodotto finale. [28]

È quindi possibile descrivere un bilancio exergetico che evidenzi i contributi dei singoli processi:

$$ex_{j}^{*} = \sum_{i} a_{i,j} * ex_{i}^{*} - \sum_{i} f_{u,j} * ex_{u}^{*} + ex_{j} \left[\frac{MJ}{kg} \right]$$
 (4.18)

dove per ex_j^* si intende l'indice di exergia cumulativa relativo ad un prodotto utile j, $a_{i,j}$ l'indice di consumo specifico di un prodotto i-esimo per unità di prodotto j-esimo, ex_i^* l'indice di exergia cumulativa relativa del prodotto i-esimo nel processo di produzione di j, $f_{u,j}$ l'indice di produzione specifica di un sottoprodotto u-esimo per unità di prodotto principale j, ex_u^* l'indice di consumo specifico di un sottoprodotto u-esimo per unità di j, mentre per ex_j si intende l'indice di consumo di exergia primaria del prodotto j-esimo.

Come si può evincere dalla *Formula 18.*, la presenza di processi di produzione di sottoprodotti comporta un numero addizionale di termini incogniti rispetto al numero di bilanci che si è in grado di scrivere per il sistema. Per eliminare queste variabili aggiuntive è possibile considerare i sottoprodotti come una quantità equivalente di prodotto principale, cosicchè il risparmio ottenuto dalla produzione dei sottoprodotti, moltiplicato per un fattore di sostituzione $z_{i,u} = \frac{f_{i,j}}{f_{u,j}} \left[\frac{kg_i}{kg_u}\right]$, venga sommato al contributo per la produzione del prodotto principale. [28]

Fatta questa considerazione, è ora possibile riscrivere la *Formula 18.* tenendo conto del fattore di sostituzione:

$$ex_{j}^{*} = \sum_{i} (a_{i,j} - f_{i,j}) * ex_{i}^{*} + ex_{j} \left[\frac{MJ}{kg} \right]$$
 (4.19)

È possibile notare come gli indici di consumo specifico $a_{i,j}$ rimangano invariati sia che si stia svolgendo una analisi exergetica come in questo caso, sia una analisi energetica.

L'equazione 4.19 permette quindi di definire il contributo exergetico dei singoli processi. Si può quindi affermare che l'exergia totale accumulata per la produzione di un prodotto finito è pari alla sommatoria di ciascuno di questi contributi che devono risalire fino alla fase di estrazione dalle materie prime. Si ottiene quindi l'equazione 4.20:

$$Ex_{tot} = \sum_{j=1}^{n} ex_j^* \left[\frac{MJ}{kg} \right]$$
 (4.20)

dove per n si intende il numero di processi totali necessari per raggiungere lo stato finale del prodotto.

5. Caso studio: la gestione dei rifiuti plastici in Piemonte

5.1. Introduzione

L'attuale modello di gestione dei rifiuti urbani italiano si afferma con la definizione dell'articolo 199 del decreto legislativo 152/2006 del 3 aprile 2006. La parte IV del suddetto decreto, al n. 152, definita "Norme in materia ambientale", costituisce infatti l'evoluzione di quei principi che già erano contenuti nella precedente normativa nazionale.

Con il decreto 22/1997, infatti, la competenza nella predisposizione dei Piani di gestione rifiuti viene posta in capo alle Regioni, ma è solo con il decreto 152/2006 che viene richiesto alle Regioni stesse di definire le misure necessarie per la riduzione della quantità, dei volumi e della pericolosità dei rifiuti, oltre che una ottimizzazione del servizio di raccolta e gestione dei rifiuti urbani.

La Regione Piemonte, che si era dotata di un *Piano Regionale per la gestione dei rifiuti* approvato con la legge regionale del 24 ottobre 2002 sulla base del decreto 22/1997, ha recepito le novità del decreto 152/2006 attraverso la delibera della Giunta Regionale del 28 settembre 2009, in cui viene disposta l'adozione della *Proposta di Piano Regionale di Gestione dei Rifiuti Urbani e dei Fanghi di depurazione 2009-2015, del relativo Rapporto Ambientale e della Sintesi non tecnica*. Tra gli obiettivi generali di questa proposta possiamo ritrovare in particolare i seguenti punti: [29]

- riduzione della produzione dei rifiuti
- recupero di materia dai rifiuti
- recupero energetico dai rifiuti
- uso sostenibile delle risorse ambientali
- riduzione del prelievo di risorse senza pregiudicare gli attuali livelli di qualità della vita.

La Proposta di Piano effettua quindi la stima della produzione dei rifiuti urbani al 2015 ponendo come obiettivo di riduzione quello di una produzione per abitante equivalente a quella rilevata nell'anno 2003, ovvero di circa 500 kg di rifiuti per abitante l'anno. Obiettivo di ulteriore interesse è quello relativo al raggiungimento di una quota di raccolta differenziata pari al 50 % entro il 2009, al 60 % entro il 2011 e al 65% entro la fine dell'anno 2012. Inoltre, la Proposta prevede la limitazione al ricorso allo smaltimento dei rifiuti solo nel caso in cui per essi non sia possibile la via del recupero né sotto forma di materia né sotto forma di energia. Nella *Tabella 11*. possiamo trovare indicati gli obiettivi del PPRR 2009 ed i relativi aggiornamenti di obiettivo presenti nel PRR 2016:

Tabella 11. Obiettivi Piani Regionali Piemonte. [29] [30]

PPRR 2009			PRR 2016				
2015	RT	< 500 kg/ab	✓	2020	RT	< 455 kg/ab	×
2009	RD	> 50 %	×	2020	RD (per ogni ATO*)	> 65 %	×
2011	RD	> 60 %	*	2020	RU	< 159 kg/ab	×
2012	RD	> 65 %	×	2020	TRR**	≥ 50 % _{in peso}	✓
2015	Riciclo plastica	≥ 26 %	✓	2020	Riciclo plastica	≥ 26 %	√

^{*=}Ambiti Territoriali Ottimali;

^{**=}Tasso Riciclaggio Rifiuti;

^{***=}Rifiuti Urbani Biodegradabili.

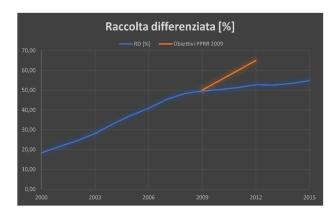


Figura 11. Confronto tra dati reali e obiettivi PPRR 2009 su Rifiuti Totali e crescita della raccolta differenziata. [21]

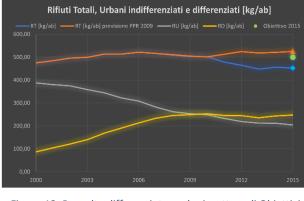


Figura 12. Raccolta differenziata reale rispetto agli Obiettivi PPRR 2009. [21]

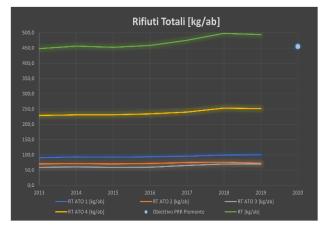


Figura 13. Rifiuti totali nel periodo 2013-2019 e suddivisi per ATO. [22]



Figura 14. Confronto Raccolta differenziata di ogni ATO con Obiettivo PRR 2016. [22]

Dalla *Figura 11.* e *Figura 12.* è possibile rendersi conto che gli obiettivi della Proposta di Piano Regionale dei Rifiuti in termini di riduzione della produzione di rifiuti pro-capite annua sono stati raggiunti con grande anticipo rispetto al 2015, mentre al contrario gli obiettivi di crescita della percentuale di raccolta differenziata sulla raccolta totale di rifiuti sono risultati essere troppo ottimistici. È evidente che a causare la riduzione della quantità di rifiuti pro-capite prodotti non siano state tanto le politiche su questo tema quanto la crisi economica: ciò è deducibile dal fatto che nel periodo 2009-2015, come evidenzia la *Figura 11.* la quota di rifiuti differenziati in termini di kg/ab annui rimanga sostanzialmente invariata. La crescita della percentuale di raccolta differenziata mostrata in *Figura 12.* è quindi dovuta più alla riduzione della quota di rifiuti totali che non ad una reale crescita della quantità totale di rifiuti differenziati per tipologia. Il periodo 2009-2015 è quindi contrassegnato da un generale rallentamento nella crescita della raccolta differenziata che aveva visto nel periodo 2000-2009 invece una crescita costante e rapida.

La PPRR del 2009 proponeva infine l'accorpamento degli otto Ambiti Territoriali (ATO) definiti dalla legge regionale 24/2002, al fine di raggiungere il numero di tre Ambiti Territoriali Ottimali, che con la legge regionale 7/2012 diventeranno 4, così ripartiti: **Ambito 1**, costituito dall'area includente tutti i comuni appartenenti al territorio della Provincia di Biella, Novara, Vercelli e Verbano-Cusio-Ossola; **Ambito 2**, costituito dall'area includente tutti i comuni appartenenti ai territori delle Province di Asti e Alessandria; **Ambito 3**, costituito dall'area includente tutti i comuni appartenenti al territorio della Provincia di Cuneo e **Ambito 4**, costituito dall'area includente tutti i comuni appartenenti al territorio della Provincia di Torino.

La distinzione nei 4 Ambiti Territoriali permette di confrontare a partire dal 2013 quali aree hanno avuto maggiori successi nel miglioramento della raccolta differenziata e quali invece sono rimaste più indietro. Dalla *Figura 13*. è possibile rilevare come il contributo in termini di rifiuti totali di ciascuna ATO rispetto al totale regionale rimane costante o con piccole variazioni, mentre dalla *Figura 14*. si evince come la crescita della raccolta differenziata sia stata molto diversa a seconda della ATO di interesse: la ATO 1, che già nel 2013 aveva una percentuale di raccolta differenziata molto superiore al resto della Regione, nel periodo 2013-2019 ha continuato e confermato il trend di crescita arrivando a superare il 73%; la ATO 3 passa invece dall'essere nel 2013 la peggiore a livello regionale (49,7%) allo sfiorare nel 2019 quota 70%, risultando così essere l'area con il miglioramento della raccolta differenziata più importante. Se per la ATO 1 e 3 è possibile apprezzare gli sforzi nel raggiungimento e superamento dell'Obiettivo 65% posto dal Piano Regionale, altrettanto non si può dire per le ATO 2 e 4, entrambe ancora ampiamente sotto l'Obiettivo: in particolare l'ATO 4 mostra una percentuale di raccolta differenziata ancora inferiori al 60% nel 2019 (58,05%).

La PPRR 2009 dispone inoltre i principali criteri organizzativi in riferimento alle modalità di conferimento e raccolta de rifiuti urbani distinguendo tra 8 possibili metodi distinti (poi confermati dal PRR 2016) [21] [22]:

- raccolta differenziata monomateriale,
- raccolta differenziata multimateriale,
- raccolta domiciliare,
- raccolta stradale,
- conferimento presso i centri di raccolta,
- conferimento presso mezzi e/o contenitori mobili di raccolta,
- raccolta a chiamata,
- raccolta separata.

Il raggiungimento dei migliori risultati quali-quantitativi è possibile facendo uso di metodi che prevedono la domiciliarizzazione delle opere di conferimento e raccolta, distinguendo tra frazione organica, frazione cartacea e rifiuti indifferenziati residuali. In questo senso, non è richiesta né dalla PPRR 2009 né dal PRR 2016 la raccolta separata degli imballaggi in plastica come intervento primario. Al contrario, viene indicata come possibile la raccolta congiunta di imballaggi plastici e metallici attraverso il sistema stradale o la raccolta domiciliare. Questo approccio alla raccolta differenziata della plastica ha avuto e continua ad avere un impatto importante non solo sulla catena del riciclo, che andremo ad analizzare in maniera approfondita nei prossimi capitoli, ma anche sulla possibilità di ottenere una migliore raccolta differenziata ed una maggiore consapevolezza dell'utente rispetto all'importanza della separazione delle diverse tipologie di rifiuto, anche plastiche.

È importante quindi tenere conto della ripartizione per singole frazioni merceologiche delle raccolte multimateriale in modo da conoscere la reale incidenza della frazione stessa:

Tipologia di raccolta	% vetro	% metallo	% plastica	% legno	% carta
Vetro/metallo	97,6	2,4	-	-	-
Vetro/plastica/metallo	79,9	5,6	14,5	-	-
Plastica/metallo	-	8	92	-	-
Altro multimateriale	-	-	9	54	37

Tabella 12. Incidenza della singola frazione merceologica sulla raccolta multimateriale. [30]

Tenendo conto della raccolta multimateriale, le frazioni merceologiche in cui questo metodo contribuisce maggiormente alla raccolta totale sono la plastica ed il vetro: prendendo come riferimento l'anno 2013, la raccolta pro-capite annua totale del vetro passa dai $25 \frac{kg}{ab*anno}$ (mono) ai $35 \frac{kg}{ab*anno}$ (mono + multi), mentre la plastica passa dai $14,3 \frac{kg}{ab*anno}$ (mono) ai $23,5 \frac{kg}{ab*anno}$ (mono + multi). La *Figura 15*. mostra il modo in cui la quantità di plastica pro-capite differenziata mono e multimateriale aumenta progressivamente negli anni (ad eccezione del 2009), mentre l'incidenza percentuale sulla raccolta differenziata totale rimane in buona parte costante. *[30]* Possiamo quindi dedurre da un lato che l'aumento di raccolta della plastica differenziata sia in linea con la crescita delle altre frazioni merceologiche, dall'altro che nella gestione della raccolta differenziata della plastica non siano state adottate specifiche politiche a livello regionale (ancora nel 2019 circa il 33% della plastica raccolta proviene dalla raccolta multimateriale) che abbiano prodotto risultati in termini di maggiore incidenza della raccolta di plastica sulla raccolta differenziata totale.

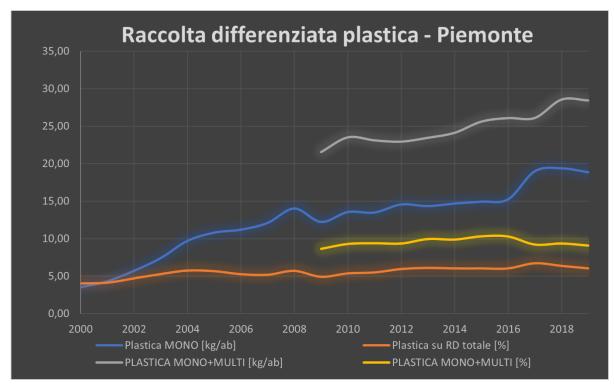


Figura 15. Raccolta della plastica mono e multimateriale in Piemonte. (Elaborato dall'autore)

5.2. Il percorso della plastica post-consumo in Piemonte

La gestione della raccolta differenziata si basa in primo luogo su di una presenza efficace sul territorio attraverso una copertura del servizio che col Piano Regionale di gestione dei rifiuti urbani e dei fanghi di depurazione è ormai totale, anche se caratterizzata dalle diverse modalità già indicate nel paragrafo precedente. Per garantire ciò, è quindi necessario che le strutture di servizio, quali Centri di Raccolta (CR), siano elementi di primaria importanza a supporto dei sistemi integrati di raccolta differenziata: la *Tabella 13.* mostra il numero di Centri di raccolta distribuiti in Regione al 2013, distinguendo tra Centri comunali ed intercomunali (ovvero aree presidiate in cui si ha attività di raccolta per raggruppamento di frazioni omogenee, ai fini del loro trasporto ad impianti di recupero, trattamento e/o smaltimento, di rifiuti urbani pericolosi, non pericolosi ed assimilati) e Centri semplificati (ovvero strutture con un allestimento idoneo esclusivamente per il conferimento di rifiuti urbani non pericolosi di provenienza domestica).

Provincia	Centri di raccolta comunali ed intercomunali	Centri di raccolta semplificati	
Alessandria	17	6	
Asti	11	0	
Biella	4	3	
Cuneo	52	1	
Novara	35	1	
Torino	93	8	
VCO	21	7	
Vercelli	15	5	
Totale	248	31	
Totale Piemonte	279		

Tabella 13. Centri di raccolta in esercizio nel 2013.

Grazie a questo sistema di gestione della raccolta differenziata è possibile effettuare una analisi merceologica dei rifiuti urbani che permetta di riconoscere qualitativamente e quantitativamente le singole frazioni merceologiche presenti sul totale: il sistema piemontese distingue tra 34 frazioni merceologiche e per ciascuna di queste è possibile conoscerne la presenza in termini percentuali nel rifiuto indifferenziato e confrontarla altresì con la quota raccolta in maniera differenziata. Il dato riferito all'anno 2012 (ultimo per il quale è disponibile questo dato dalla Regione) indica che il totale dei rifiuti plastici annui in Piemonte è pari a $279658 \frac{ton}{anno'}$; di questi solo $100360 \frac{ton}{anno'}$, ovvero il 36%, sono raccolte in maniera differenziata. Questo 36% contiene al suo interno sia la raccolta differenziata monomateriale (63729 $\frac{ton}{anno'}$, ovvero il 23% della plastica consumata) che la raccolta differenziata multimateriale (36631 $\frac{ton}{anno'}$, ovvero il 13% della plastica consumata). [29] [30]

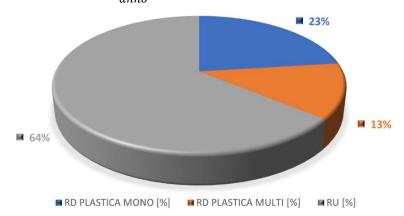


Figura 16. Rifiuti da imballaggio plastica.

5.2.1. Dal Consorzio al Centro di Selezione

La fase successiva alla fase di raccolta dei rifiuti da imballaggio plastico è quella della selezione e separazione dei diversi materiali plastici. Questa fase avviene all'interno dei Centri di Selezione COREPLA, il cui funzionamento è già stato descritto all'interno del capitolo 3.2.

In Piemonte sono attivi due Centri di Selezione: il primo a Beinasco, un comune alle porte di Torino, con una capacità operativa di circa 75000 ton/y ed il secondo nel comune di Cavaglià, in provincia di Biella, con una capacità operativa in questo caso di circa 45000 ton/y. L'impianto di Cavaglià si trova all'interno di un complesso che include un impianto ITS (Stazione di Trasferimento

Intelligente), una discarica controllata per il conferimento di rifiuti speciali non pericolosi ed un bioreattore per la produzione di energia elettrica. L'impianto di Beinasco, essendo anche ubicato in un'area appartenente alla Città Metropolitana di Torino, è invece separato da altri impianti che si occupano di gestione dei rifiuti.

Le informazioni che seguono sono state raccolte in parte tramite la documentazione presente sul sito del Consorzio COREPLA, in parte da interviste svolte con alcuni esperti del settore.

L'invio dei rifiuti plastici compattati ai Centri di Selezione è gestito da COREPLA attraverso delle convenzioni che possono essere stipulate con il singolo Comune o con il soggetto a cui il comune ha delegato la gestione dei rifiuti: in Piemonte sono 21 i Consorzi di Comuni che devono quindi accordarsi con COREPLA per il conferimento della plastica da selezionare. In questo caso la responsabilità di conferimento e qualità del materiale è a carico del Consorzio di Comuni, i quali hanno come obiettivo l'ottenimento del contributo CAC (Contributo Ambientale CONAI) per la differenziazione della plastica. Il contributo CAC corrisponde a 300 € per ogni tonnellata inviata al Centro di Selezione. La condizione per l'ottenimento di questo contributo è rappresentata da una percentuale di frazione estranea massima ammessa pari al 20%: se questo obiettivo non viene raggiunto il Consorzio perde totalmente il contributo. I sistemi di raccolta di rifiuti, come mostrato in precedenza, possono non essere in grado di garantire una raccolta differenziata della plastica con purezza all'80 %, in particolare nel caso di raccolta multimateriale: in questo caso ci si può rivolgere ad un Centro Comprensoriale (CC) in grado di compiere una prima separazione delle frazioni estranee più importanti, con relativi costi di trasporto dal CR al CC a carico dei Consorzi intercomunali. In questo modo il materiale può essere conferito al Centro di Selezione ed i Comuni possono ottenere il contributo CAC. I costi di conferimento (da CR a CSS nel caso standard, oppure da CC a CSS nei casi in cui questo passaggio è necessario e la distanza è maggiore di 25 km) della raccolta monomateriale sono invece a carico di COREPLA, la quale può anche riconoscere un corrispettivo al convenzionato che fa svolgere le opere di pressatura ad un CC (il corrispettivo non vale per le opere di prelavaggio invece).

Nel caso in cui il Consorzio debba rivolgersi ad un Centro Comprensoriale, ma questi non può consegnare ad un CSS nel raggio di 25 km da quest'ultimo, COREPLA organizza ogni 6 mesi circa delle aste online in cui i CC possono mettere a disposizione il materiale trattato. A queste aste possono partecipare i vari Centri di Selezione, i quali indicano sul portale da quali impianti vorrebbero ricevere i rifiuti da selezionare: non viene fatta alcuna offerta di tipo economico ma solamente espressa una preferenza, basata perlopiù sul criterio di prossimità dall'impianto (i costi di trasporto in questo caso sono a carico del Centro di Selezione) e sulla qualità della preselezione svolta dal CC. Una volta espresse queste preferenze da parte del CSS, interviene COREPLA: l'assegnazione dei CC all'asta viene svolta infatti sulla base dell'indice di performance del CSS. Questo indice viene calcolato da COREPLA sui dati degli impianti relativi all'anno precedente e serve ad indicare l'efficacia del processo di selezione dell'impianto CSS: più alto è l'indice, più efficace sarà l'impianto e di conseguenza otterrà il materiale dai Centri Comprensoriali selezionati. Nello specifico, COREPLA assegna il 60% dei rifiuti trattati dal CC in oggetto al CSS con indice di performance IP maggiore tra quelli che hanno espresso una preferenza per il suddetto CC, mentre il restante 40% viene assegnato al CSS che presenta il secondo indice di performance migliore. Tutti gli altri impianti non potranno invece ricevere materiale da questo CC, indipendentemente dalla distanza cui si trova. In questo senso è evidente l'intento di COREPLA di premiare i soggetti più meritevoli e di creare così un meccanismo incentivante per le aziende.

La raccolta multimateriale può anch'essa essere conferita ad un CSS, ma solo a fronte di un contratto specifico con l'impianto per la gestione delle operazioni di separazione delle frazioni diverse dalla plastica e la gestione degli scarti. Il modello più diffuso prevede però che queste operazioni di separazione per frazioni siano svolte da un CC, facendo quindi rientrare questo materiale nel totale messo all'asta da COREPLA: la suddivisione dei costi rimane pari a quella valida per il monomateriale. In tutti i casi descritti, le analisi qualitative verranno sempre svolte in ingresso al CSS da parte di società di analisi incaricate da COREPLA. [31]

L'analisi è fondamentale per i Consorzi in quanto determina, tra le altre cose, la percentuale di frazione estranea negli imballaggi e di conseguenza l'ottenimento o meno del contributo CAC: per questo motivo le analisi vengono sì svolte da queste società di analisi, il cui personale è presente 40 ore a settimana nel CSS per svolgere questi controlli in maniera continuativa; ma viene svolta anche una verifica incrociata da parte del Centro di Selezione terzo e del Consorzio o Centro Comprensoriale che ha fornito il lotto in oggetto.

Il sistema di gestione dei rifiuti qui analizzato mette in evidenza come nell'accordo tra CC e CSS per il conferimento della plastica avranno quindi peso il criterio di prossimità: ottenere infatti materiale da un CC nel raggio di 25 km presenta indubbiamente vantaggi economici importanti: è questo il caso del CSS di Beinasco. Esso si trova infatti all'interno della Città Metropolitana di Torino e può quindi ricevere il materiale principalmente dai CC presenti nel Torinese. Avendo però una capacità di trattamento superiore alla quantità di materiale anch'esso accede per la restante parte alle aste di COREPLA per l'aggiudicazione dei lotti. Diversa invece è la condizione dell'impianto di Cavaglià: esso può ricevere il materiale direttamente dai Comuni limitrofi più efficienti (che raggiungono l'obiettivo dell'80% senza dover usufruire del CC) ma questo contributo è limitato a singole realtà del Biellese e del Novarese. Per la restante parte, l'impianto è tenuto a partecipare alle aste di COREPLA, non avendo CC nel raggio di 25 km. Di conseguenza, la provenienza del materiale trattato a Cavaglià è molto più eterogenea e variabile di anno in anno: in questo caso, infatti, il criterio fondamentale non è più solo la distanza, ma anche l'indice di performance (che prevale sulla distanza nell'aggiudicazione del materiale). Questo meccanismo rende quindi difficile un'opera di tracciamento geografico del materiale coerente.

Ai fini dello studio qui svolto, possiamo compiere alcune assunzioni sulla base delle informazioni fin qui ottenute ed ipotizzare che tutta la plastica raccolta in Piemonte sia selezionata nei due impianti presenti in Regione: suddividendo quindi il materiale in funzione della provincia di provenienza possiamo assegnare interamente i lotti di plastica pressata di una provincia quando in essa si trova il CSS di riferimento, facendo quindi prevalere il criterio di prossimità (nel caso di Cavaglià si è fatta questa valutazione sia per la provincia di Biella che di Novara dato che l'impianto si trova al confine tra le due province). Per quanto riguarda le altre province, esse dovranno accedere al meccanismo delle aste: di conseguenza il materiale potrà essere assegnato soltanto al 60% per il primo candidato ed al 40 % per il secondo: questa suddivisione viene quindi rispettata dal modello qui utilizzato. Data la variabilità dell'indice di performance, il criterio su cui si basa l'assegnazione del 60% o del 40% a seconda della provincia in considerazione è nuovamente quello di prossimità.

Fatte queste opportune considerazioni, è possibile ottenere la *Tabella 14.,* che riassume adeguatamente la suddivisione del materiale qui ipotizzata. Questo modello sarà utilizzato per definire l'incidenza del costo del trasporto di materiale dai Consorzi ai Centri di Selezione Secondaria.

	Centri Comprensoriali		CSS di riferimento
Alessandria	3	60 %	
Asti	1	60 %	
Biella	1	100 %	
Cuneo	4	40 %	Cavaglià (BI)
Novara	2	100 %	
vco	1	60 %	
Vercelli	1	60 %	
Alessandria	3	40 %	
Asti	1	40 %	
Cuneo	4	60 %	Dainman (TO)
Torino	8	100 %	Beinasco (TO)
vco	1	40 %	
Vercelli	1	40 %	

Tabella 14. Fornitura CSS in Piemonte.

Al fine di conoscere il costo exergetico necessario a trasportare il materiale dalle abitazioni ai Consorzi e dai Consorzi al CSS di riferimento, come indicato in *Tabella 14.*, è necessario conoscere la distanza totale coperta dai mezzi di trasporto in questa fase di trasferimento del materiale. A questo punto sono state fatte alcune valutazioni in merito al calcolo di questi contributi:

- Il conferimento del materiale differenziato dalle abitazioni ai Centri di Raccolta avviene in aree localizzate, quindi con brevi distanze da coprire, e può variare molto in funzione del metodo di raccolta adottato dal singolo Consorzio
- Il Centro di Raccolta del Consorzio si trova all'interno del territorio che gestisce.
- Il Rapporto Rifiuti Urbani della Regione Piemonte [11] indica la quantità in tonnellate di plastica monomateriale raccolta ogni anno per ogni singolo Comune.
- Il trasporto del materiale pressato dai Centri di Raccolta e dai Centri Comprensoriali ai CSS avviene con un metodo uniforme.
- La suddivisione dei CSS vista in *Tabella 14*. si applica al calcolo di questo contributo.

È quindi possibile definire un'unica distanza media pesata tra i Comuni che hanno contribuito alla raccolta di plastica differenziata monomateriale ed il CSS che si occuperà dello smistamento della stessa, ipotizzando così un metodo di linearizzazione adeguato:

distanza media da CSS [km] =
$$\sum_{j=1}^{n} \frac{D_j * x_j}{100}$$
 (5.1)

$$D_j [km] = CSS - Comune_{j-esimo}$$
 (5.2)

$$x_j \, [\%] = \frac{M_j}{M_{tot}} * 100 \tag{5.3}$$

Applicando l'equazione (5.1) ai dati forniti dalla Regione Piemonte relativi al 2018 otteniamo che:

Distanza media da impianto Beinasco (TO)	36 km
Distanza media da impianto Cavaglià (BI)	72 km

Tabella 15. Distanza media dai CSS in Piemonte.

5.2.2. Dal Centro di Selezione all'impianto di riciclo

I Centri di Selezione procedono quindi alla separazione delle varie frazioni plastiche come indicato al capitolo 3.2.: in particolare, la nostra attenzione si concentrerà sulle frazioni di PET che possono essere avviate a riciclo. Il COREPLA definisce appunto quali devono essere le specifiche tecniche del prodotto venduto tramite le aste agli impianti di riciclo attraverso gli *Allegati A, B, C* emessi da COREPLA e che permettono di conoscere le tipologie di imballaggio presenti all'interno dei singoli flussi e le relative impurezze accettabili. [32]

Le tre categorie di PET descritte in *Tabella 16.* sono distinguibili in funzione della colorazione, la quale incide in maniera importante anche sul valore economico del prodotto da riciclare meccanicamente.

Uno dei principali problemi che gli impianti hanno nella fase di selezione è legato alle vaschette in PET: esse rappresentano infatti una tipologia di materiale che è da escludere dai tre prodotti descritti in Tabella 16., in quanto avrebbe un'incidenza negativa sulle proprietà fisica del prodotto finale riciclato. Allo stesso tempo, però, la sua composizione chimica è difficilmente distinguibile dalle altre bottiglie in PET da parte dei sensori ottici, e neanche il criterio dimensionale è sufficiente in quanto le vaschette in generale possono avere dimensioni molto varie tra loro ed inoltre nel caso in cui fossero state piegate da colui che le ha utilizzate, esse risulterebbero indistinguibile da una bottiglia qualsiasi. È quindi necessario che il personale dell'impianto nella fase di cernita manuale riesca a togliere la maggior parte delle vaschette dal materiale che viene mandata a pressatura. La gestione delle vaschette in PET rappresenta sicuramente, insieme ai poliaccoppiati, una delle principali tipologie di imballaggio non recuperabile e quindi una quota di risorsa non valorizzata: sono quindi allo studio diverse soluzioni il cui obiettivo è quello di creare una frazione ulteriore di vaschette in PET separata totalmente dalle altre tre tipologie ad oggi commercializzate da COREPLA. Ciò rappresenterebbe evidentemente un costo in termini di investimento sia per il CSS che per l'impianto che si occupa del riciclo in termini sia di acquisto di nuovi macchinari che di impegno di risorse: in questo senso è fondamentale ottimizzare i macchinari esistenti al fine di riuscire a separare efficacemente le vaschette dal resto dei materiali in PET senza bisogno di impegnare il personale: purtroppo ad oggi sembra non essere ancora disponibile una tecnologia adeguata.

- Le seguenti note sono in riferimento alla Tabella 14.: [32]
 - 1) Contenitori di volume < 0,5 L non costituiscono frazione estranea.
 - 2) Tra gli "altri manufatti" non sono considerati i tappi completi con collarini e le etichette.
 - 3) Contenitori di colorazione "limite", come quelli debolmente azzurrati costituiscono frazione conforme anche per il PET incolore.
 - 4) Contenitori di colorazione mista costituiscono frazione conforme.

	Contenitori di PET INCOLORE	Contenitori di PET AZZURRATO	Contenitori di PET COLORATO	
SIGLA COMMERCIALE	SELE-CTL/M	SELE-CTA/M	SELE-CTC/M	
COD. PRODOTTO	25010	26010	22010	
TIPOLOGIE ESCLUSE	 contenitori per bevande con depositi colorati (es. the freddo) contenitori opachi 	 contenitori per bevande con depositi colorati (es. the freddo) contenitori opachi 	-	
STATO FISICO	- contenitori per liquidi	- contenitori per liquidi	- contenitori per liquidi	
DIMENSIONI ACCETTABILI	- min = 0,5 l - max = 5,0 l *1)	- min = 0,5 l - max = 5,0 l *1)	- min = 0,5 l - max = 5,0 l *1)	
CARAT. OTTICHE	trasparenti incolori	trasparenti azzurrati	trasparenti colorati	
CONTENITORE DI PET INCOLORE – impurezza	-	max = 4,0 % *3)	max = 6,0 %	
CONTENITORE DI PET AZZURRATO - impurezza	max = 2,0 % *3)	-	max =6,0 %	
CONTENITORE DI PET COLORATO – impurezza	max = 0,7 %	max = 2,7 %	-	
CONTENITORE DI PET OPACO – impurezza	max = 0,7 %	max = 2,7 %	max = 4,0 %	
CONTENITORE DI PET (con etichetta coprente in plastica)	max = 1,0 %	max = 1,0 %	max = 2,0 %	
IMPURITÁ SOLIDE	- contenitori PVC <0,5 % - contenitori PE/PP <1,5 % - altri manufatti, altri materiali, polimeri e contenitori contaminati e opacizzati <2 % *2) - vaschette di PET <1 %	- contenitori PVC < 0,5 % - contenitori PE/PP < 1,5 % - altri manufatti, altri materiali, polimeri e contenitori contaminati e opacizzati < 1,5 % *2) - vaschette di PET < 1%	- contenitori PVC <0,5 % - contenitori PE/PP <2,0 % - altri manufatti, altri materiali, polimeri e contenitori contaminati e opacizzati <2,0 % *2) - vaschette di PET <1%	
IMPURITÁ LIQUIDE	max = 5,0% di cui: - olii alimentari < 5% - detergenti < 5% - alimentari < 5%. No a liquidi tossico/nocivi e olii minerali.	max = 5,0% di cui: - olii alimentari < 5% - detergenti < 5% - alimentari < 5%. No a liquidi tossico/nocivi e olii minerali.	max = 5,0% di cui: - olii alimentari < 5% - detergenti < 5% - alimentari < 5%. No a liquidi tossico/nocivi e olii minerali.	

Tabella 16. Specifiche tecniche prodotti COREPLA. [32]

Le specifiche indicate in *Tabella 16.* sono essenziali per la valutazione della qualità del prodotto inviato a riciclo meccanico. Le *Figure 17. e 18.* (consultabili al par. *5.2.3*) evidenziano come attualmente la maggior parte dei rifiuti in ingresso al CSS non abbia le caratteristiche per poter appartenere ad una delle frazioni riciclate: in questa categoria rientrano il 10 % di frazione estranea (composta principalmente da ferro ed alluminio), che viene separato per primo tramite un magnete e viene inviato ai relativi consorzi di riciclo (RICREA e CIAL), ed il 50 % di PLASMIX, ovvero della somma dei contributi di PLASMIX fine e del PLASMIX a termine linea. Per PLASMIX fine si intendono i rifiuti plastici di qualsiasi polimeri di dimensioni troppo piccole per essere avviati a riciclo (inferiori ai 5 cm), mentre il PLASMIX a termine linea rappresenta il totale dei rifiuti che attraversano l'impianto di selezione senza essere riconosciuti come appartenenti a nessuna delle frazioni avviate a riciclo: questo contributo è composto per la maggior parte da poliaccoppiati vari, vaschette in PET e da altri prodotti plastici che non presentano possibilità di riciclo. Il PLASMIX totale, non potendo essere avviato a riciclo, viene riutilizzato come combustibile ed inviato agli impianti per il recupero energetico. Possiamo quindi affermare che circa il 60 % del materiale in ingresso CSS non può essere soggetto a recupero di materia.

I prodotti che il CSS è in grado di selezionare sono 7 e sono indicati nelle *Figure 17. e 18.*: di questi, solamente il 42 % è rappresentato da PET selezionato (ovvero il 17% del totale in ingresso).

Al fine di ottenere una valutazione più precisa della capacità di recupero di un impianto CSS è possibile svolgere un'analisi di rendimento dei separatori ottici e dell'impianto nel suo complesso andando a calcolare gli Indici di Purezza IP e di Recupero IR:

$$IP_{A,X} = \frac{A}{X} \left[\frac{kg}{kg} \right] \tag{5.4}$$

$$IR_{A} = \frac{X * IP_{A,X}}{\sum_{i=1}^{n} X_{i} * IP_{A,X_{i}}} \left[\frac{kg}{kg} \right]$$
 (5.5)

dove per A si intende il peso del prodotto effettivamente presente nel campione analizzato e per X si intende il peso totale del campione analizzato.

L'IP rappresenta quindi la quantità reale di materiale selezionato nella totalità del campione, mentre l'IR mette a confronto la quantità di materiale realmente presente nel flusso con la somma di tutti i contributi di quello stesso materiale in uscita dall'impianto all'interno anche degli altri flussi. Gli studi svolti in questo campo forniscono i seguenti dati: [12]

	IP [%]	IR [%]	PRODOTTO PERSO [%]
PET INCOLORE	84	63,2	36,8
PET AZZURRATO	96	63,9	36,1
PET COLORATO	79	44	56

Tabella 17. Indice di Purezza e di Recupero del PET.

Il confronto tra Indice di Purezza e Indice di Recupero mette in evidenza come il problema della dispersione del materiale sia legato non tanto alla capacità dei sensori ottici di selezionare il prodotto corretto dove richiesto, quanto piuttosto al fatto che buona parte dello stesso supera i selettori senza essere riconosciuto e va quindi a far parte o delle impurezze di un altro prodotto o, più probabilmente, finisce nel PLASMIX a termine linea.

La commercializzazione dei contenitori in PET incolore, azzurrato e colorato è determinata da aste mensili organizzate da COREPLA nella quale vengono messi in vendita i lotti omogenei dei rifiuti di imballaggi selezionati. Per partecipare a queste aste è necessario ricevere un accreditamento da parte dello stesso Consorzio, il quale procede alla verifica dei requisiti tecnici, autorizzativi e documentali necessari. Il meccanismo dell'asta è basato sui rilanci rispetto ad un prezzo base d'asta che per il PET è sempre pari al 65% del prezzo medio di aggiudicazione dello stesso materiale durante l'asta precedente: ciò comporta una variabilità nel prezzo del lotto importante durante l'anno. Al termine si aggiudica il lotto chi ha offerto il corrispettivo maggiore rispetto al prezzo base, tenendo quindi conto solo della valutazione economica e nessun altro tipo di variazione rispetto alle Condizioni di contratto imposte da COREPLA stessa: dato che la presenza di impurezze minime di PET azzurrato o colorato in tutte le frazioni possono impedire una omogeneità estetica del materiale riciclato finale, la frazione incolore di PET risulta essere quella più ricercata sul mercato e di conseguenze quella dal maggiore costo, mentre le frazioni colorate e azzurrate hanno in genere un valore economico inferiore. Per dare una idea indicativa al lettore del valore di mercato si intende un prezzo medio di acquisto di un lotto di PET incolore pari a circa 100 €/ton. Da notare inoltre che per l'impianto il costo della materia prima rappresenta circa il 60 % del costo totale di trasformazione del PET.

Gli impianti che hanno diritto ad accedere al meccanismo delle aste, e quindi all'acquisto dei lotti, devono disporre di un impianto sul territorio dell'Unione Europea e devono occuparsi direttamente delle operazioni di riciclo (non sono accettati intermediari) al fine di ottenere una Materia Prima Secondaria conforme alle specifiche UNIPLAST UNI 10667 [33]. Risulta quindi complesso risalire sulla base di questo sistema ad un percorso circolare dei prodotti: dato che il trasporto dal CSS all'impianto con i relativi costi è a carico dell'acquirente, si può però nuovamente supporre che il principio di prossimità possa essere ancora determinante nella capacità di un'azienda di essere competitiva nell'aggiudicazione di un lotto.

Per la nostra analisi andremo quindi ad assegnare questi prodotti sulla base di questo principio, da cui si deduce la *Tabella 18*.:

CSS di provenienza	IMPIANTO di destinazione	DISTANZA (km)
Boingson (TO)	Albano Stura (CN)	74,4
Beinasco (TO)	Borgolavezzaro (NO)	138
Cavadià (DI)	Albano Stura (CN)	143
Cavaglià (BI)	Borgolavezzaro (NO)	70,8

Tabella 18. Distanza tra CSS ed impianto di riciclo.

5.2.3. L'impianto di riciclo

I lotti vengono quindi trasportati fino all'impianto di riciclo e qui gli viene assegnata in primis un codice per garantire la tracciabilità della bottiglia. In genere non vengono inviati immediatamente a riciclo ma vengono accumulati nei pressi dell'impianto in modo tale che l'azienda abbia sempre una scorta di materiale da trattare in funzione delle variazioni delle condizioni di mercato cui la plastica riciclata è sottoposta.

Gli impianti di Albano Stura e Borgolavezzaro effettuano un trattamento di riciclo meccanico della plastica in quanto, come già descritto al capitolo 2.3., esso risulta lo strumento di riciclo più adatto per questo tipo di polimero. Le balle pressate in PET vengono in primo luogo aperte e contestualmente si avviano operazioni di preselezione del materiale, con l'obiettivo di individuare gli oggetti visibilmente non pertinenti (potrebbe trattarsi di fil di ferro che tiene legato il lotto, qualche lattina residua o frammenti di etichette rotte). Successivamente il materiale entra nell'impianto e, dopo aver superato una prima calamita per accertarsi che non siano rimaste lattine o materiali simili nel flusso, viene inviato ad una fase di lavaggio in acqua calda (circa 70 °C) in cui vengono separate le etichette rimaste e si ha la prima fase di selezione: attraverso un lettore ottico vengono eliminate le bottiglie di colore non gradito nel flusso che si sta lavorando e le ultime bottiglie eventualmente rimaste non in PET. Infine, si ha un ultimo controllo visivo manuale prima della fase di macinatura.

A questo punto, il materiale risulta essere di una purezza sufficiente per essere a tutti gli effetti oggetto di riciclo. Le bottiglie vengono dunque macinate complete di tappi e collarini: dalla macinatura si ottengono quindi delle scaglie di due plastiche differenti (PET della bottiglia e HDPE di tappo e collarino). Tramite una fase di flottazione si ha la separazione dei due tipi di scaglia (l'HDPE galleggia). A causa di questi passaggi preventivi si ha indicativamente che circa il 30% del materiale acquistato dal CSS non viene realmente avviato a riciclo ma è scartato preventivamente.

L'ultima fase di cui si occupa l'impianto di riciclo riguarda l'essiccatura ed il successivo confezionamento nei sacconi del materiale. Per ogni sacco prodotto e venduto viene tenuto un campione che viene controllato in laboratorio ed in funzione della qualità del materiale riciclato esso assume un maggiore o minore valore economico all'atto della vendita.

L'impianto è in genere alimentato da un generatore autonomo a gas di tipo cogenerativo per la produzione di energia elettrica e termica per il fabbisogno dell'azienda.

Il consumo d'acqua è invece necessario per la fase di lavaggio, nonché quella di flottazione. L'azienda può però possedere un impianto di depurazione che permetta il recupero ed il riutilizzo delle acque al fine di abbatterne il consumo.

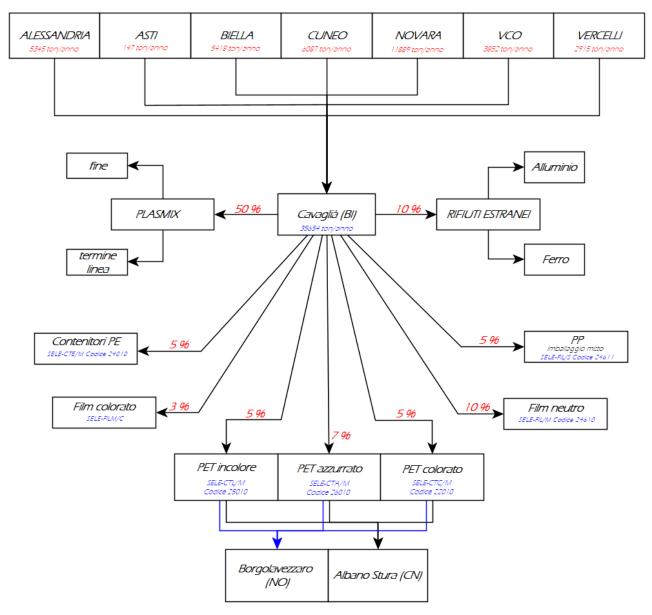


Figura 17. Percorso della plastica in Regione Piemonte – CSS Cavaglià. (Elaborato dall'autore)

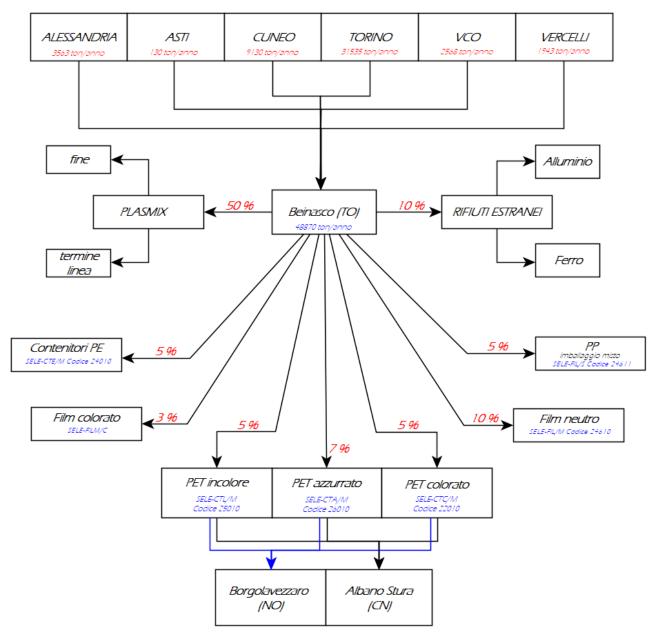


Figura 18. Percorso della plastica in Regione Piemonte – CSS Beinasco. (Elaborato dall'autore)

6. I flussi di exergia

L'obiettivo di questa tesi è riuscire a confrontare l'impatto exergetico del ciclo di produzione del PET vergine con il sistema di riciclo dello stesso materiale utilizzato attualmente in Piemonte. Per fare ciò è quindi necessario definire qualitativamente e quantitativamente i diagrammi di flusso che rappresentano i possibili processi di produzione di materia o alternativamente di energia dall'utilizzo di PET come combustibile.

6.1. Produzione di granulo V-PET – Ex_{V-PET}

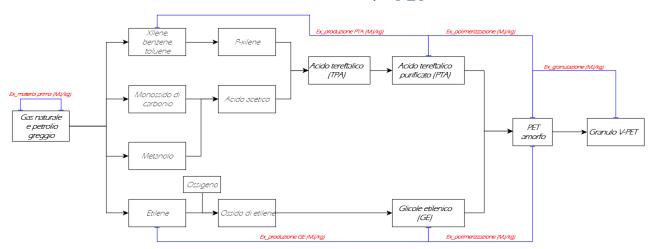


Figura 19. Diagramma di flusso per la produzione di V-PET. (Elaborato dall'autore sulle ref. [2] [34])

La *Figura 19.* rappresenta il diagramma per la produzione standard di polietilene tereftalato a partire da fonti fossili. L'ipotesi di calcolo assunta è che la produzione di PET sia data per il 100% dalla polimerizzazione tra PTA e GE, prendendo come riferimento l'*Eco-Profile per il PET* prodotto da Plastic Europe [34]. Per completezza di informazione, esistono report sulla produzione di PET basati sullo stato dell'arte negli Stati Uniti d'America in cui la produzione di PET è caratterizzata solo per l'85% dalla produzione di PTA, mentre il restante 15% si ottiene dalla reazione di DMT (prodotto tramite reazione di Metanolo e TPA) con GE. [35] [36]

Energia primaria Input	Massa totale Input [kg]	Materia prima Input [MJ]	Energia di combustibile Input [MJ]	Energia totale Input [MJ]
Carbone	0,081		1,66	1,66
Petrolio	1,028	32,41	14,66	47,07
Gas naturale	0,362	1,73	15,01	16,74
Lignite	0,101		1,08	1,08
Nucleare	$4,85 * 10^{-6}$		3,04	3,04
Biomassa			0,89	0,89
Idrico			0,45	0,45
Solare			0,05	0,05
Eolico			0,25	0,25
RINNOVABILI	0,0	0,0	1,6	1,6
NON RINNOVABILI	1,6	34,1	35,5	69,6
TOTALE	1,6	34,1	37,1	71,2

Tabella 19. Fonti di energia primaria per la produzione di 1 kg di PET. [34]

Energia utile in input per il processo di produzione del PET	[MJ/kg]
Elettricità	0,72
Vapore (calcolato come PCI del combustibile, con $\eta=90~\%$)	0,43
Combustibile per il riscaldamento dell'impianto	2,28
TOTALE	3,43

Tabella 20. Energia utile esterna al processo per la produzione di 1 kg di PET. [34]

La *Tabella 19.* mostra la quantità di energia primaria necessaria in input nel processo per la produzione di 1 kg di PET. In particolare, evidenzia il contributo di ciascuna fonte di energia primaria e fa distinzione tra energia presente in forma di materia prima oppure di combustibile per far funzionare il processo. Da questa *Tabella 19.* è di immediato riscontro quanto il contributo dell'energia prodotta dal consumo di petrolio sia come materia prima che come combustibile (66% del contributo totale) sia preponderante, mentre l'unico altro contributo rilevante riguarda l'utilizzo del gas naturale del processo di produzione (23%). Il contributo di energia da fonti non rinnovabili rappresenta quindi il 98% dell'energia totale necessaria. Questa informazione è importante per sottolineare il fatto che non solo la produzione di PET vergine tradizionale necessita di un consumo di materie prime importante, ma che queste hanno per la quasi totalità origine da fonti non rinnovabili.

Nel computo totale dell'Energia Primaria necessaria alla produzione di 1 kg di PET bisogna però considerare anche quei contributi che sono necessari per il funzionamento dell'impianto. Questi sono indicati in *Tabella 20.*, da cui si evidenzia la necessità di un consumo di energia elettrica, nonché di combustibile per la produzione interna di energia termica.

In *Figura 20.* è invece evidenziato come la produzione di p-xilene dallo xilene sia il processo energeticamente più dispendioso. Se teniamo conto del fatto che il p-xilene è un contributo in input per la produzione di PTA, possiamo unire queste due fasi di processo ed evidenziare così che la produzione di PTA incide per quasi il 70% sul consumo totale di energia. La polimerizzazione della molecola di PET a partire dal PTA e dal GE, al contrario, ha un'incidenza del 5%: questa può essere un'informazione interessante in quanto nel caso fossimo in grado di trovare soluzioni alternative e meno impattanti per la produzione di PTA e GE, sarebbe possibile ottenere lo stesso polimero con un abbattimento importante dei costi energetici primari.

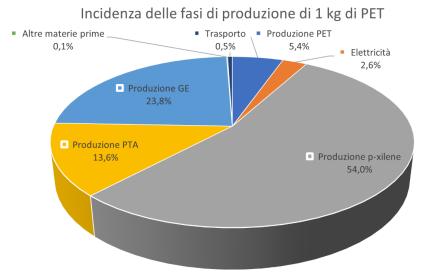


Figura 20. Incidenza delle fasi di produzione di 1 kg di PET sul consumo totale di energia primaria. [34]

Ciò che è stato utilizzato per l'ottenimento delle *Tabelle 19. e 20.* e per la *Figura 20.* è il modello di calcolo LCA (*"Life Cycle Assessment"*): si cerca quindi di risalire all'energia primaria totale senza una definizione chiara dei confini del sistema del modello, né viene messo in evidenza l'impatto in termini exergetici di ciascun processo che caratterizza la produzione del PET, ma ci si focalizza su quali sono le fonti da cui si ottiene il prodotto in oggetto.

La *Tabella 21*. mostra invece i risultati ottenuti dal modello di calcolo dell'exergia totale accumulata (*"Global Embodied Exergy"*). Come già evidenziato nel *Capitolo 4.2*. di questa Tesi, esso presenta una diversa impostazione di calcolo basata sull'analisi dei processi di produzione dei singoli componenti necessari all'ottenimento di 1 kg di granuli di PET vergine. La *Figura 19*. mostra i processi necessari al raggiungimento di questo obiettivo: per ciascuno di questi processi è quindi possibile descrivere il relativo flusso exergetico causato.

La *Tabella 21.* raccoglie i consumi di exergia per kg di PET amorfo, distinguendoli per tipologia, delle fasi che ne permettono la produzione. Per ottenere questo prodotto è infatti necessario che si compia un processo di polimerizzazione in cui i due reagenti siano il Glicole Etilenico e l'Acido Tereftalico Purificato. Il Glicole Etilenico a sua volta si ottiene dall'etilene, attraverso un processo di ossidazione dopo aver fatto reagire etilene e acqua, mentre l'Acido Tereftalico Purificato si ottiene dal p-xilene tramite una reazione di ossidazione catalitica. L'exergia di questa reazione ha la maggiore incidenza sul contributo totale. Nell'approccio utilizzato in questa sezione si vuole calcolare l'accumulo totale di exergia, per cui è importante tenere conto della somma dei processi che permettono, a partire delle materie prime, di ottenere etilene e p-xilene.

Fase del processo		$egin{aligned} \textit{Ratio} \ \left(kg_{prod} ight) \end{aligned}$	Consumo di exergia $\left[rac{MJ_{ex}}{kg_{pol}} ight]$		
·		$\left(\frac{1}{kg_{reag}}\right)$	Combustibile	Elettricità	Calore
Materia prima			25,2	-	-
Produzione GE	etilene / GE	0,63	5,71	0,43	0,9*
Produzione PTA	p-xilene / PTA	0,54	63,5	1,3	1,1*
Polimerizzazione	PTA / PET	0,85	2.5		
	GE / PET	0,33	3,5	-	

Tabella 21. Flussi di materia ed exergia nei processi di produzione del PET. [2]

Il PET amorfo necessita però di essere sottoposto ad un processo di cristallizzazione e successivamente di essiccazione e raffreddamento, al fine di ottenere PET cristallino in granuli. Questo processo è fondamentale poiché il basso livello di cristallizzazione del PET amorfo non permetterebbe al materiale di essere sottoposto al successivo processo di estrusione con una sufficiente qualità. La fase di cristallizzazione e successiva produzione di granuli rappresenta quindi l'ultimo processo di lavorazione necessario qualsiasi sia il prodotto finale che si intende ottenere. Per analizzare più nel dettaglio i processi di produzione dei prodotti in PET presenti sul mercato sarà quindi necessario distinguere in funzione del singolo prodotto e dei relativi processi cui viene sottoposto.

^{* =} vapore considerato alla condizione di saturazione a 16 atm.

La fase di cristallizzazione e produzione di granulo in PET presenta un consumo di exergia pari a: [5]

$$Ex_{gran} = 1,59 \frac{MJ}{kg} \tag{6.1}$$

6.2. Produzione di granulo R-PET $-Ex_{R-PET}$

Il percorso del PET post-consumo è caratterizzato da un primo processo di raccolta, seguito dalla fase di selezione del materiale per giungere all'effettiva fase di riciclo meccanico dello stesso. La *Figura 21*. mette in evidenza tutte le quote di exergia necessarie per compiere le fasi citate e giungere alla produzione di R-PET in scaglie. Come analizzato al *Capitolo 5.*, all'interno del CSS si ha la separazione dei vari flussi di PET; il percorso svolto dal materiale è tuttavia identico in quanto il trattamento di riciclo viene svolto dalle stesse aziende. La differenza in questo caso riguarda quindi il prodotto finale commercializzato, le cui caratteristiche tecniche variano in funzione della colorazione del materiale.

Il nostro obiettivo è quindi ora analizzare lo stato dell'arte in Piemonte e calcolare ciascuno di questi contributi di exergia, parametrandoli sul caso regionale.



Figura 21. Diagramma di flusso per la produzione di R-PET. (Elaborato dall'autore)

6.2.1. Trasporto materiale $-Ex_{tr1}$, Ex_{tr2}

Il sistema di trasporto scelto per la raccolta dei rifiuti urbani e per il trasferimento del materiale ai CSS e successivamente agli impianti di riciclo del PET è quello basato su gomma ed in particolare sull'utilizzo di mezzi quali autotreni o autoarticolati, i quali tipicamente consumano gasolio come carburante. Il consumo di carburante rappresenta l'exergia necessaria a compiere il processo di trasporto dei materiali.

Nel nostro caso, i mezzi presi in considerazione hanno una motorizzazione di tipo Diesel a quattro tempi ed utilizzano gasolio come combustibile. Il gasolio è una miscela di idrocarburi liquidi ottenuta dal petrolio greggio; non è quindi possibile definire in maniera assoluta una formula chimica che lo caratterizzi. Il suo principale utilizzo è appunto l'alimentazione di motori a combustione interna ad accensione spontanea, ovvero motori a ciclo Diesel.

Per definire l'exergia chimica di un combustibile, in questo caso del gasolio, va definito in primo luogo un fattore correttivo del suo PCI, detto fattore di Szargut. Questi viene calcolato utilizzando la *Formula 4.18*, considerando che dalla composizione del gasolio si può considerare che $\frac{H}{C}=1,80$, $\frac{O}{C}=0$, $\frac{N}{C}=0$ [40], si ottiene: $\beta=1,044+0,0160*\frac{H}{C}=1,0728$ [-]. In *Tabella 22.* è indicata quindi l'exergia chimica del gasolio.

$ extit{Densit}$ à $ ho$ $\left[rac{kg_{fuel}}{m^3} ight]$	Exergia chimica = $\beta * PCI\left[\frac{MJ}{kg_{fuel}}\right]$
835	45,8

Tabella 22. Proprietà del gasolio. [37] [38]

Il codice della strada descrive in maniera precisa i limiti e le caratteristiche che i mezzi di trasporto generalmente utilizzati per il trasporto di rifiuti devono avere per poter circolare sul territorio italiano.

È di nostro interesse definire in particolare le dimensioni volumetriche e la massa limite di ogni tipo di trasporto utilizzato:

	N° ASSI	LARGHEZZA MAX [m]	LUNGHEZZA MAX [m]	ALTEZZA MAX [m]	MASSA LIMITE COMPLESSIVA [ton]
AUTOTRENO	3	2,55	18,75		24
	4	2,55	18,75		40
	5 o più	2,55	18,75	4,00	44
	3	2,55	16,50		30
AUTOARTICOLATO	4	2,55	16,50		40
	5 o più	2,55	16,50		44

Tabella 23. Dimensioni e massa limite autotreni ed autoarticolati. [39]

Tenendo conto che il trasporto dei materiali avviene per mezzo di balle compresse delle dimensioni di circa 1 m³, che la densità del PET cristallino è pari a 1,35 $\frac{kg}{m^3}$ [7], si evince che il limite normativo più stringente non è quello volumetrico ma quello riguardante la massa limite. Ciò che viene imposto come massa limite è però il peso lordo del mezzo a pieno carico; per capire quindi quanta plastica e successivamente quanto PET è possibile trasportare per ogni singolo viaggio è necessario considerare il peso di un trattore stradale (circa 8 ton) ed il peso del bilico (tra le 5 e le 10 ton a seconda che si tratti di un autotreno o di un autoarticolato). Fatte queste considerazioni possiamo ipotizzare un carico massimo di 25 tonnellate per ogni viaggio effettuato (mediamente si hanno carichi da 20-22 tonnellate). Fatte queste considerazioni, è però importante tenere conto del contesto ambientale in cui il Centro di Selezione si trova: nel caso di Consorzi comunali che, avendo già un ottimo livello di raccolta differenziata consegnano direttamente il materiale al CSS senza passare dal Centro Comprensoriale, di conseguenza i mezzi utilizzati sono molto più piccoli ed il materiale non viene pressato. In questi casi il carico di materiale trasportato può aggirarsi intorno alla cifra di 3 tonnellate per viaggio. Come già analizzato, entrambi i CSS analizzati sono caratterizzati da un insieme di entrambe le modalità di trasporto: fatte le dovute valutazioni, possiamo quindi utilizzare un dato medio pari a $14 \; \frac{ton}{viaggio}$ come valido riferimento per i nostri calcoli.

Infine, l'Osservatorio sulle attività di autotrasporto ha elaborato gli indici di costo del carburante per chilometro: da questi indici si ricava che il consumo medio di carburante per i veicoli di massa complessiva pari o superiore a 26 tonnellate è da ritenersi pari a 2,8 $\frac{km}{litro}$, mentre per i veicoli tra le 3,5 tonnellate e le 7,5 tonnellate (utilizzati per il trasporto e la raccolta comunali) si ha un consumo medio pari a 4,9 $\frac{km}{litro}$ di gasolio. [40] Tenuto conto che il numero di trasporti effettuato dai Comuni è paragonabile al numero di trasporti effettuati con autotreni o autoarticolati, possiamo valutare come pari a 3,8 $\frac{km}{litro}$ un termine medio adeguato. Il trasporto dal CSS all'impianto di riciclo è invece svolto solamente per mezzo di autotreni o autoarticolati. Possiamo quindi affermare che in questa fase si ha un trasporto medio di 21 tonnellate per movimentazione ed un consumo pari a 2,8 $\frac{km}{litro}$.

Possiamo quindi ora determinare l'exergia del combustibile per il trasporto per ogni chilometro percorso e per ogni chilogrammo di materiale trasportato:

$$ex_{tr_{CSS}} = \frac{Ex_{gasolio} * \rho}{m_{lim} * c_{gas}} = \frac{45.8 * 0.835 * 10^3}{14 * 10^3 * 3.8} = 0.72 \frac{KJ}{km * kg_{mat}}$$
(6.2)

$$ex_{tr_{REC}} = \frac{Ex_{gasolio} * \rho}{m_{lim} * c_{gas}} = \frac{45.8 * 0.835 * 10^3}{21 * 10^3 * 2.9} = 0.63 \frac{KJ}{km * kg_{mat}}$$
(6.3)

Una volta determinati questi termini, è possibile conoscere l'exergia per unità di materiale trasportato richiamando i dati presenti in *Tabella 15.* e *Tabella 18.*, i quali forniscono i chilometri (medi nel caso della prima tabella e reali nel caso della seconda) da percorrere per effettuare le due fasi di trasporto del materiale avviato a riciclo. La formula utilizzata nel calcolo dei valori presenti in *Tabella 24.* sarà quindi:

$$Ex_{tr,CSS} = ex_{tr_{CSS}} * distanza \left[\frac{KJ}{kg_{mat}} \right] \quad (6.4) \quad Ex_{tr,REC} = ex_{tr_{REC}} * distanza \left[\frac{KJ}{kg_{mat}} \right] \quad (6.5)$$

	Percorso del materiale	Distanza [km]	$Ex_{tr}\left[\frac{KJ}{kg_{mat}}\right]$
Avvio a CSS	Abitazione - Beinasco (TO)	36	25,9
	Abitazione - Cavaglià (BI)	72	51,8
	Beinasco (TO) - Albano Stura (CN)	74,4	46,9
Trasporto da	Beinasco (TO) – Borgolavezzaro (NO)	138	86,9
CSS a impianto di riciclo	Cavaglià (BI) – Albano Stura (CN)	143	90,1
	Cavaglià (BI) - Borgolavezzaro (NO)	70,8	44,6

Tabella 24. Exergia del combustibile per kg di materiale nel trasporto in Piemonte.

6.2.2. Centro di Selezione Secondario — $Ex_{el,CSS}$, $Ex_{comb,CSS}$

L'analisi dei consumi all'interno di un Centro di Selezione Secondario deve essere svolta tenendo conto non solamente dei consumi relativi alla linea in cui avviene la selezione, ma di tutte le spese energetiche necessarie al completo funzionamento dell'impianto. In questo senso può essere utile seguire il percorso del prodotto all'interno dell'impianto, al fine di sommare tutti i contributi.

Una volta consegnati i lotti di materiale da parte dei Consorzi, questi vengono depositati all'esterno dell'impianto e movimentati attraverso l'utilizzo di carrelli elevatori elettrici. L'ingresso del materiale nell'impianto è gestito da un macchinario, detto "ragno", il quale per mezzo di una pinza fa una prima, grossolana movimentazione del materiale e successivamente sposta il materiale sul nastro trasportatore. Il ragno è gestito manualmente da un operatore e rimane in funzione per l'intero orario di lavoro dell'impianto: esso rappresenta quindi la quota principale di consumo di gasolio all'interno dell'impianto, a cui si aggiungono solamente i camion per la movimentazione interna che rappresentano una quota minoritaria.

I dati forniti dalle aziende del settore indicano in questo caso un consumo di exergia pari a:

$$Ex_{comb,CSS} = Ex_{gasolio} * \rho * \frac{c_{oil}}{m_{tot}} = 45.8 * 0.835 * 1.198 = 45.8 \frac{KJ}{kg_{mat}}$$
 (6.6)

Una volta posizionato il materiale sul nastro trasportatore questo viene movimentato attraverso tutte le fasi di selezione e separato opportunamente tramite vaglio rotante prima, poi il separatore balistico ed i windshifter, infine i separatori ottici. I nastri trasportatori in cui sono deviate le frazioni di materiale da avviare al recupero di materia vengono controllate dal personale addetto al termine della linea al fine di ridurre la percentuale di prodotti separati non correttamente.

Una volta raggiunto un volume adeguato alla chiusura di un lotto, il materiale viene inviato alla pressa dell'impianto: il suo ruolo è quello di comprimere il materiale e di avvolgerlo con sbarre di ferro per permetterne il trasporto. Una volta superata la fase di pressatura e chiusura, il lotto viene ispezionato visivamente e valutato in funzione delle sue dimensioni e del suo peso. Superata questa ultima fase viene numerato ed etichettato al fine di garantire la tracciabilità del materiale e successivamente stoccato. Per permettere questi spostamenti all'interno dell'impianto sono utilizzati sempre carrelli elevatori elettrici.

Tutti gli elementi presenti all'interno dell'impianto consumano energia elettrica, la quale può essere prodotta da un generatore interno all'azienda, da un impianto fotovoltaico, oppure acquistata dalla rete in funzione delle dimensioni del Centro di Selezione Secondario in oggetto. Anche in questo caso, grazie ai dati forniti dalle aziende è possibile definire la quantità di consumo elettrico per ogni kg di materiale trattato dall'impianto: è da sottolineare come questo dato possa variare in maniera importante in funzione della capacità di trattamento dell'impianto cui si riferisce: maggiore è la capacità, minore risulterà il consumo specifico per unità di materiale trattato.

$E_{el}\left[rac{KWh}{ton_{mat}} ight]$	$E_{el}\left[rac{MJ}{kg_{mat}} ight]$
45 – 65	0,2

Tabella 25. Consumo energia elettrica nel CSS.

Dato che il consumo exergetico ed energetico relativo all'energia elettrica corrispondono, possiamo affermare che: $Ex_{el,CSS} = E_{el} = 0.2 \, \frac{MJ}{kg_{mat}} \tag{6.7}$

6.2.3. Recupero di materia – $Ex_{comb,RIC}$, $Ex_{acqua,RIC}$

Il PET selezionato da parte dei Centri di Selezione Secondari viene trasportato verso gli impianti che si occupano di riciclo meccanico, con relativo impatto exergetico già calcolato nella *Tabella 24*.

Obiettivo dell'impianto di riciclo è quello di ottenere dai lotti di materiale pressato il prodotto finale definibile come R-PET in scaglie. Successivamente, questo materiale potrà essere sottoposto a pellettizzazione ed essere quindi lavorato come il granulo di PET vergine per ottenere bottiglie in R-PET (nel caso di un modello di riciclo *Bottle-to-Bottle*) o filato di fibra R-PET (riciclo *Bottle-to-fibre*).

L'exergia necessaria per la fase di pellettizzazione delle scaglie sarà pari a: [41]

$$Ex_{pellet} = 0.18 \frac{MJ}{kg_{PET}} \tag{6.8}$$

Gli impianti per il recupero di materia possiedono generalmente un impianto cogenerativo interno caratterizzato da un motore alternativo con ciclo Otto che utilizza come combustibile il gas naturale: in questo modo è possibile produrre internamente tutta l'energia elettrica necessaria al funzionamento dell'impianto e recuperare dall'energia di scarto il contributo termico necessario per la fase di essiccamento e per l'ottenimento dell'acqua calda necessaria nella fase di lavaggio del materiale.

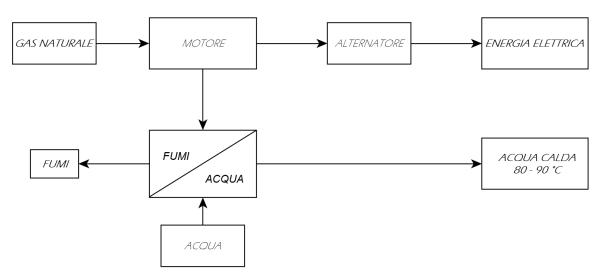


Figura 22. Schema tipo di un motore cogenerativo.

Al fine di garantire la produttività, l'impianto cogenerativo deve quindi produrre una quantità di energia elettrica pari a $E_{el,REC}=280~\frac{kWh}{ton_{mat}}\cong 1~\frac{MJ}{kg_{mat}}$. Questo consumo specifico può essere influenzato dalla capacità di trattamento e di riciclo dell'azienda cui si fa riferimento, ma rimane comunque un valore indicativo per un impianto in grado di trattare $30-50*10^3~\frac{ton}{anno}$ di materiale.

Per calcolare l'exergia totale accumulata da questo impianto è necessario ricordare come vi sia da determinare una efficienza $\eta_e=0.36$ per quanto riguarda la produzione di energia elettrica dal combustibile, ma anche una efficienza $\eta_{e,t}=0.94$ legata alla fase di estrazione e trasporto del combustibile utilizzato ed una efficienza $\eta_{d,c}=0.90$ legata alla distribuzione e alla consegna della corrente elettrica all'utente finale. [28]

Il contributo termico ottenuto grazie all'impianto di cogenerazione non presenta invece costi dal punto di vista exergetico aggiuntivi. Si può quindi ricavare l'exergia totale accumulata come:

$$Ex_{comb,RIC} = E_{el,REC} * \eta_e * \eta_{e,t} * \eta_{d,c} = 3,28 \left[\frac{MJ}{kg} \right]$$
 (6.9)

Il combustibile non è però l'unica risorsa utilizzata dell'impianto per il suo funzionamento. Affinchè sia possibile svolgere la fase di lavaggio del materiale, di separazione delle etichette ed infine di flottazione del prodotto macinato l'impianto necessita di una fornitura di acqua continua. La presenza in genere di un impianto di recupero delle acque permette di abbattere notevolmente la richiesta di fornitura di acqua esternamente all'impianto.

Sempre prendendo come riferimento un impianto di $30-50*10^3\frac{ton}{anno'}$ i dati in possesso indicano che si avrà un consumo di acqua pari a $\dot{V}=1*10^{-3}\left[\frac{m^3}{ka_{mat}}\right]$.

Una volta definita l'exergia chimica dell'acqua allo stato liquido come di valore pari a $ex_{ch_{acqua}} = 50 \left[\frac{\kappa_J}{kg_{acqua}} \right]$ [2], si può calcolare il consumo di exergia totale per unità di chilogrammo di acqua utilizzata come pari a:

$$Ex_{H_2O,RIC} = \rho * \dot{V} * ex_{ch_{acqua}} = 0.05 \left[\frac{MJ}{kg} \right]$$
 (6.10)

6.3. Produzione bottiglia in PET $-Ex_{bottiglia}$

Uno dei prodotti in PET più diffusi e che sarà oggetto di studio in questa Tesi sono le bottiglie in PET (incolori, colorate e azzurrate). Il PET è infatti la materia sintetica più adatta a questo utilizzo in quanto risulta compatibile al contatto con gli alimenti e le bevande e presenta inoltre un'ottima resistenza (importante, ad esempio, per la pressione generata internamente dalle bevande gasate), duttilità e modellabilità (in quanto materiale termoplastico) ed un'elevata stabilità chimica.

Per poter produrre una bottiglia è necessario che il granulo di PET sia trattato ad una temperatura tale da fondere il materiale in modo tale da poterlo modellare a piacimento: questo processo si chiama *estrusione*. Il granulo in PET viene infatti inserito nella tramoggia che alimenta l'estrusore, il cui funzionamento varia a seconda del modello considerato: [42]

- estrusori monovite, sono i più diffusi e sono caratterizzati da un singolo cilindro all'interno del quale si trova una vite senza fine. Il materiale in ingresso dalla tramoggia viene quindi fatto avanzare nel cilindro dalla rotazione della vite. Lungo il cilindro si trovano delle termocoppie e dei sensori che hanno il compito di innalzare la temperatura del materiale affinchè raggiunga il punto di fusione prima che la vite termini. Una volta fatto fuoriuscire il materiale dalla matrice posta alla fine del percorso, questo viene raffreddato dall'aria o da sistemi di acqua canalizzata. Questa fase è fondamentale in quanto l'uniformità del raffreddamento ha una grande incidenza sul prodotto finale,
- *estrusori di degassaggio,* presentano una variante della vite che permette di evitare la fase di essiccazione dei granuli in PET indicata precedentemente,
- estrusori a cascata, sono composti da due estrusori con viti di degassaggio. Il primo avrà
 quindi il compito di preparare il PET fuso, mentre il secondo omogeneizza il materiale fuso e
 lo porta alla pressione necessaria per la produzione del prodotto desiderato,
- *estrusori bivite,* presentano due viti all'interno di un solo estrusore. Ciò permette una maggiore rapidità nel completamento della fase di estrusione.

Successivamente, il PET estruso diventa il materiale in input di un macchinario che, grazie all'utilizzo di stampi composti in modi diversi, inserisce il materiale estruso negli interstizi rimasti tra lo stampo e la base del macchinario stesso in modo da ottenere la forma di un qualsiasi prodotto finito che si vuole ottenere. Nello specifico, per produrre una bottiglia si produce uno stampo particolare da cui si ottiene un prodotto chiamato *preforme* (sia essa incolore, azzurrata o colorata).

Il preforme permette infatti un trasporto della bottiglia stessa molto più semplice, in quanto la successiva (nonché ultima) fase di soffiaggio, in cui il preforme viene espanso fino a raggiungere le forme volute della bottiglia, avviene nello stabilimento stesso in cui si verifica l'imbottigliamento.

Il granulo di PET che in questo processo di lavorazione viene utilizzato in ingresso può avere origine sia dal processo di produzione di V-PET descritto nel *Capitolo 6.1.*, che dalla produzione di R-PET, la

quale verrà descritta successivamente al *Capitolo 6.2*.: questo processo di lavorazione per ottenere il prodotto finito è quindi necessario qualsiasi sia l'origine del PET.





Figura 23. Dal granulo di PET alla bottiglia.

Figura 24. Alcune delle diverse forme e colorazioni degli st preforme.

I consumi exergetici per unità di prodotto finale legati a ciascuno dei singoli processi possono essere caratterizzati da una certa varietà a seconda della struttura dell'impianto considerato e delle tipologie di macchinari utilizzati per compiere la lavorazione. Allo stesso modo la documentazione presente in letteratura sull'argomento fornisce pochi dati difficilmente verificabili, ma che possono comunque dare un'indicazione generica importante dell'incidenza di questi contributi.

I dati che si è scelto di utilizzare in questa Tesi sono dunque raccolti da articoli presenti in letteratura e risultano essere pari a: [41]

	$\left[rac{MJ}{kg} ight]$
Exestrusione	2,20
$Ex_{stampaggio\ a\ iniezione}$	10,00
$Ex_{soffiaggio}$	1,00

Tabella 26. Consumi di exergia nella lavorazione della bottiglia in PET.

Il contributo exergetico di queste tre fasi di lavorazione viene quindi calcolato, in coerenza con *l'equazione 4.20.*, come:

$$Ex_{bottiglia} = Ex_{estrusione} + Ex_{stampaggio\ a\ iniezione} + Ex_{soffiaggio} = 13,20\ \left[\frac{MJ}{kg}\right] \quad (6.11)$$

Oltre alla produzione di bottiglie, il granulo di PET può essere utilizzato per ottenere una vasta gamma di prodotti: la maggior parte di questi possono presentare forme molto varie. Ciò è possibile utilizzando un apposito stampo nella fase di stampaggio ad iniezione, da cui si ottiene in genere il prodotto già nel suo stato definitivo. L'impatto exergetico della produzione di questi prodotti può quindi essere associato a quello della bottiglia in quanto il processo di lavorazione risulta simile.

6.4. Produzione fibra in PET $-Ex_{fibra}$

Dal granulo in PET è possibile anche ottenere della fibra, utilizzata in genere nel campo dell'industria tessile per produrre tessuto sintetico. Anche in questo caso le proprietà fisiche del PET cristallino risultano particolarmente adatte per questo ambito di utilizzo. Il trasporto del prodotto dall'impianto di produzione (o riciclo) all'impianto di lavorazione per l'ottenimento del prodotto finale non presenta alcun tipo di limitazione: il granulo può infatti essere acquistato da un impianto che si trovi potenzialmente in tutta Europa. Il mercato libero in questo senso non permette una descrizione comune e indicativa del percorso del materiale in questa fase e del relativo contributo energetico di trasporto.

Il materiale giunto all'impianto di lavorazione deve affrontare diverse fasi di trattamento per poter arrivare alla fase di filatura per l'ottenimento della fibra. La prima fase risulta essere quella dell'essiccatura: questo trattamento è importante in quanto una eventuale umidità troppo elevata comporterebbe importanti difficoltà in quanto nel prodotto finale la quota di umidità dovrà necessariamente essere molto bassa.

Il granulo essiccato viene quindi inviato ad estrusione dove viene fuso e successivamente pompato verso un collettore di filatura. Al suo interno sono presenti diverse unità di filatura: qui il materiale fuso viene fatto passare attraverso un componente in metallo (*spinneret*) munito di ugelli con fori molto piccoli. Il materiale emerge quindi da questo passaggio sotto forma di lunghe fibre, che vengono solidificate per mezzo di raffreddamento in quanto escono dal macchinario e si ritrovano a temperatura ambiente. Sarà quindi la tipologia dello spinneret adottato a determinare la forma della sezione della fibra ottenuta. Ognuno dei fori va quindi a formare un singolo filamento di fibra in PET: la somma di tutti questi filamenti prodotti in contemporanea darà quindi origine al filato (*filament yarn*) utilizzato in campo tessile.

Dal punto di vista del calcolo dell'exergia consumata in questa fase di lavorazione del materiale è importante ricordare che può ricevere in input granulo in PET vergine o riciclato, oppure ancora una miscela dei due tipi. Ciò significa che i costi exergetici legati alla lavorazione qui descritti devono essere sostenuti per ciascun ciclo di utilizzo.

È possibile definire quindi l'indice di consumo di exergia per kg di fibra in PET come: [5] [43]

	$\left[\frac{MJ}{kg}\right]$	
$Ex_{essiccatura}$	0,50 [5]	
Ex _{estrusione}	6,50 _[5]	23,00 [39]
$Ex_{filatura}$	-	

Tabella 27. Exergia per la lavorazione del granulo in PET in fibra.

6.5. Recupero energetico — Ex_{rec}

I prodotti in PET che non vengono avviato a recupero di materia possono comunque essere utilizzati per la produzione di energia elettrica e/o termica: ciò può essere inteso come recupero energetico di parte dei consumi necessari per la produzione di nuovo materiale vergine.

Un impianto di termovalorizzazione può essere di tipo cogenerativo: ciò dipende dal contesto ambientale in cui l'impianto è inserita, dalla domanda di energia termica presente nell'area indicata e dalla disponibilità o meno di una rete di teleriscaldamento. In questo senso la valutazione riguardo la realizzazione di un impianto di questo tipo è molto complessa e deve tener conto non solo del fattore economico ma anche di quello ambientale e sociale, nonché di quale prospettiva futura per il territorio si vuole costruire.

Gli impianti sono composti da una camera di combustione in cui i rifiuti scartati vengono immessi e fungono da combustibile per la reazione: possiamo distinguere in questo caso tra processo di combustione tradizionale, processo di pirolisi e processo di gassificazione.

1) La *pirolisi* si differenzia del processo di combustione tradizionale in quanto può avvenire in assenza di ossigeno: si può infatti fornire calore al materiale che deve essere trattato, così da rompere i legami chimici ed ottenere una degradazione del materiale per dissociazione delle molecole in composti più semplici. È quindi fondamentale che non vi sia ossigeno in questo contesto, in quanto una reazione di ossidazione porterebbe all'ossidazione dei combustibili, ovvero la formazione di una molecola stabile. Un impianto di pirolisi è quindi in grado di verificare ciò e tiene inoltre conto della natura organica della materia prima di processo nella gestione delle dissociazioni delle molecole.

Ciò che si ottiene dalla pirolisi è una *frazione solida*, detta char, ed una *frazione volatile*, la quale può essere scissa in una *componente liquida*, ottenuta per condensazione della frazione volatile, ed una *componente gassosa*, detta anche gas di pirolisi: non si ha quindi formazione di diossine e le emissioni inquinanti risultano notevolmente contenute rispetto alla combustione tradizionale. *[44]* L'incidenza della componente liquida rispetto a quella gassosa varia in funzione della permanenza della sostanza organica nel reattore: maggiore sarà la permanenza, minore risulterà la quota liquida. Da questo presupposto si deduce che la pirolisi può avvenire in diverse modalità a seconda di come vengono gestiti i parametri, in particolare distinguendo tra:

- pirolisi lenta,
- pirolisi convenzionale,
- pirolisi veloce,
- pirolisi ultraveloce.
- La *gassificazione*, invece, è un processo di degradazione termochimica in cui, a differenza della pirolisi, la presenza di ossigeno in quantità inferiore a quella necessaria per avere una combustione permette la produzione di un gas di sintesi suddivisibile in due componenti: *char* (principalmente CH_4 e CO) e tar (principalmente residui carbonosi, idrocarburi catramosi e CO_2). Ciò è possibile grazie alle temperature molto più elevate rispetto al caso della pirolisi. Rimane poi una frazione minerale al termine del processo di gassificazione, che viene trattata in quanto materiale di scarto in questo processo. [45]

È importante sottolineare che il contributo di exergia chimica da ottenere in questo caso non rappresenta il valore riferito al combustibile in ingresso in un termovalorizzatore: esso è composto da una somma di varie frazioni diverse tra loro e con contributi exergetici diversi. Nel nostro caso, l'unico contributo di interesse è quello relativo ai rifiuti plastici in PET, in quanto il recupero

energetico che va preso in considerazione in questo caso è quello che si ottiene dalla combustione del solo PET.

L'analisi del prodotto in PET al termine del suo ciclo di utilizzo indica che il potere calorifico del materiale risulta essere pari a: [46]

$PCI\left[\frac{MJ}{kg}\right]$	$PCS\left[\frac{MJ}{kg}\right]$
21,1	23,0

Tabella 28. Potere calorifico del PET.

Per calcolare l'exergia chimica del PET avviato a recupero energetico è necessario a questo punto calcolare il fattore di Szargut β . Egli definì questo coefficiente per poter calcolare l'exergia chimica dei combustibili in funzione della loro composizione elementare (su base secca).

Risulta quindi da applicare la Formula 6.12: [47] [48]

$$\beta = \frac{1,044 + 0,016 * \left(\frac{H}{C}\right) - 0,3493 * \left(\frac{O}{C}\right) * \left[1 + 0,0531 * \left(\frac{H}{C}\right)\right] + 0,0493 * \left(\frac{N}{C}\right)}{1 - 0,4124 * \left(\frac{O}{C}\right)}$$
(6.12)

Possiamo quindi ricavare per il caso del PET scartato che: [46]

$$\beta_{PET} = \frac{1,044 + 0,016 * 0,064 - 0,3493 * 0,536 * [1 + 0,0531 * 0,064] + 0,0493 * 0,002}{1 - 0.4124 * 0.536} = 1,100$$
 (6.13)

L'exergia chimica del PET che si ottiene applicando la Formula di Szargut sarà quindi pari a:

$$Ex_{ch,PET} = \beta_{PET} * PCI_{PET} = 23,22 \left[\frac{MJ}{kg_{PET}} \right]$$
 (6.14)

Il dato ottenuto dall'equazione 6.14 non è sufficiente però a definire il contributo exergetico recuperato dal processo di combustione del PET. Per fare ciò ipotizziamo che il processo di combustione di riferimento avvenga per pirolisi: è necessario definire un valore di efficienza exergetica totale del processo. Nel caso qui descritto è possibile affermare che $\eta_{ex,pir}=61,53$. [49]

L' exergia recuperata grazie a questo processo risulterà quindi pari a:

$$Ex_{rec,PET} = \eta_{ex,pir} * Ex_{ch,PET} = 14,59 \left[\frac{MJ}{kg_{PET}} \right]$$
 (6.15)

7. Exergia totale cumulata per kg di prodotto

I dati ottenuti dall'analisi dei singoli flussi di exergia permettono una definizione completa dell'entità di consumo exergetico necessario alla produzione di PET vergine per la produzione di bottiglie (quindi conforme alla Normativa Europea sancita dalla Direttiva 2002/72/CE della Commissione Europea e dal successivo Regolamento n. 282/2008 del 27 marzo 2008 sempre della Commissione Europea per l'utilizzo alimentare) e per la produzione di tessuti sintetici in fibra di PET, e confrontarli con i consumi exergetici necessari per ottenere gli stessi prodotti finiti a partire dall'utilizzo di materiale esclusivamente riciclato. Si può inoltre definire l'impatto exergetico di un prodotto finale ottenuto da PET vergine ed avviato a recupero energetico a fine vita.

Per fare ciò, è necessario calcolare in maniera complessiva i contributi relativi a ciascuna fase di processo, in modo da poter successivamente analizzare l'indice di riciclo meccanico sul territorio e il confronto dello stesso con una produzione totale di PET, o ancora valutando diverse soluzioni di blending (ovvero la compresenza nella produzione di bottiglie sia di PET vergine che di PET riciclato).

I contributi totali relativi alla produzione di granulo di PET da polimero vergine e da polimero riciclato sono descritti rispettivamente dalle *equazioni 7.1 e 7.2*:

$$Ex_{V-PET_{gr}} = Ex_{mat_prima} + Ex_{GE} + Ex_{PTA} + Ex_{pol} + Ex_{gran} \left[\frac{MJ}{kg} \right]$$
 (7.1)

$$Ex_{R-PET_{gr}} = Ex_{tr,1} + Ex_{fuel,CSS} + Ex_{el,CSS} + Ex_{tr,2} + Ex_{comb,RIC} + Ex_{H_2O,RIC} + Ex_{pellet} \left[\frac{MJ}{kg} \right]$$
 (7.2)

I contributi indicati nelle *equazioni 7.1 e 7.2* definiscono ciascuna delle fasi di processo per giungere alla produzione del granulo di PET (vergine o riciclato). Raccogliendo i contributi descritti al *Capitolo 6.1.* si ottiene la *Tabella 29.*, che raccoglie questi dati e fornisce l'exergia totale accumulata per la produzione di 1 kg di granulo di PET vergine.

	$\left[rac{MJ}{kg} ight]$	
Ex_{mat_prima}	25,20	
Ex_{GE}	7,04	
Ex_{PTA}	65,90	
Ex_{pol}	3,50	
Ex_{gran}	1,59	
$Ex_{V-PET_{gr}}$	103,23	

Tabella 29. Exergia per la produzione di granulo V-PET.

Nel caso in cui questo materiale vergine sia destinato al recupero energetico l'exergia totale accumulata in questo caso risulterà pari a:

$$Ex_{V-PET_{rec}} = Ex_{V-PET_{gr}} - Ex_{rec,PET} = 88.94 \left[\frac{MJ}{kg} \right]$$
 (7.3)

I contributi relativi alla produzione di PET da materiale riciclato sono invece stati descritti e calcolati al *Capitolo 6.2.*: al fine di determinare un valore di $Ex_{R-PET_{ar}}$ che non sia funzione del percorso

seguito dal PET riciclato è necessario determinare un valore medio dell'exergia di trasporto del materiale sia nella fase di raccolta ed invio ai CSS, che nella fase di spostamento dal CSS all'impianto di riciclo. Questo valore medio deve tener conto del contesto ambientale in cui avviene l'analisi e del modello sviluppato nel *Capitolo 5.*: prendendo a riferimento i dati relativi alla Raccolta Differenziata nel 2018 e la relativa distribuzione nei CSS indicata nella *Tabella 12.*, è possibile calcolare i due contributi tramite una media pesata dei valori calcolati in *Tabella 23*.:

$$Ex_{tr,1} = 25.9 * \frac{57.8}{100} + 51.8 * \frac{42.2}{100} = 36.8 \left[\frac{KJ}{kg} \right]$$
 (7.4)

$$Ex_{tr,2} = \left(\frac{46.9 * 75}{100} + \frac{86.9 * 25}{100}\right) \cdot \frac{57.8}{100} + \left(\frac{44.6 * 75}{100} + \frac{90.1 * 25}{100}\right) \cdot \frac{42.2}{100} = 56.5 \left[\frac{KJ}{kg}\right]$$
 (7.5)

A questo punto è possibile definire l'exergia totale accumulata per la produzione di 1 kg di granulo di R-PET come:

	$\left[\frac{MJ}{kg}\right]$
Ex_{tr_1}	0,04
$Ex_{comb,CSS}$	0,04
$Ex_{el,CSS}$	0,20
Ex_{tr_2}	0,06
$Ex_{comb,RIC}$	3,28
$Ex_{H_2O,RIC}$	0,05
Ex_{pellet}	0,18
$Ex_{R-PET_{gr}}$	3,85

Tabella 30. Exergia per la produzione di granulo R-PET.

Possiamo quindi ora considerare la lavorazione dei granuli per la produzione di bottiglie. Essa è stata descritta al *Capitolo 6.3.* ed il consumo exergetico ad essa associato risulta pari a:

$$Ex_{lav,bot} = Ex_{estrusione} + Ex_{stampaggio\ a\ iniezione} + Ex_{soffiaggio} = 13,20 \left[\frac{MJ}{kg} \right]$$
 (7.6)

L'exergia totale cumulata per la produzione di 1 kg di bottiglie in PET (ovvero tra le 26 e le 27 bottiglie da 1,5 litri [12]) totalmente vergine o totalmente riciclato può quindi essere ricavata come:

$$Ex_{bot,V-PET} = Ex_{V-PET_{gr}} + Ex_{lav,bot} = 116,43 \left[\frac{MJ}{ka} \right]$$
 (7.7)

$$Ex_{bot,V-PET_{rec}} = Ex_{V-PET_{rec}} + Ex_{lav,bot} = 102,14 \left[\frac{MJ}{kg} \right]$$
 (7.8)

$$Ex_{bot,R-PET} = Ex_{R-PET_{gr}} + Ex_{lav,bot} = 17,05 \left[\frac{MJ}{kg} \right]$$
 (7.9)

La principale destinazione d'uso alternativa alla produzione di bottiglie per il PET è la produzione di fibre per la creazione di tessuti. In questo caso la lavorazione del granulo di PET è descritta al Capitolo 6.4. ed il consumo exergetico totale ad essa associato risulta pari a:

$$Ex_{lav,fib} = Ex_{essicatura} + Ex_{estrusione} + Ex_{filatura} = 23,00 \left[\frac{MJ}{kg} \right]$$
 (7.10)

L'exergia totale cumulata per la produzione di 1 kg di fibra in PET può quindi essere ricavata come:

$$Ex_{fib,V-PET} = Ex_{V-PET_{gr}} + Ex_{lav,fib} = 126,23 \left[\frac{MJ}{kg} \right]$$
 (7.11)

$$Ex_{fib,V-PET_{rec}} = Ex_{V-PET_{rec}} + Ex_{lav,fib} = 111,94 \left[\frac{MJ}{kg} \right]$$
 (7.12)

$$Ex_{fib,R-PET} = Ex_{R-PET_{gr}} + Ex_{lav,fib} = 26,85 \left[\frac{MJ}{kg} \right]$$
 (7.13)

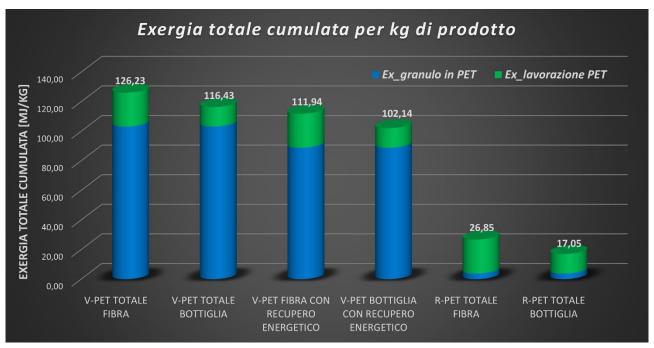


Figura 25. Exergia totale cumulata per kg di prodotto in funzione del processo di produzione adottato.

8. Risultati

8.1. Influenza del numero di cicli di utilizzo sull'exergia dei prodotti

Gli indici exergetici calcolati nel *Capitolo 7.* mettono in evidenza i costi necessari alla produzione di bottiglie o di fibre per un singolo ciclo di utilizzo. Per quanto riguarda i prodotti ottenuti da riciclo di materia o da recupero energetico, non è sufficiente considerare esclusivamente il processo necessario alla produzione di PET e alla successiva lavorazione dello stesso: è necessario invece considerare che il materiale riciclato ha origine dagli scarti di un ciclo di utilizzo precedente, per cui per sviluppare un calcolo omnicomprensivo bisogna calcolare una media dell'exergia cumulata in funzione del numero di cicli di utilizzo del materiale stesso.

L'approccio qui sviluppato concentra l'analisi sul percorso vissuto da una singola unità di materiale di riferimento giunta ad un *n-esimo* ciclo di utilizzo. I modelli che è possibile confrontare in quest'ottica sono quindi:

- V-PET= per ogni ciclo di utilizzo è necessario produrre il materiale totalmente da un processo di polimerizzazione. In questo caso non è considerato alcun tipo di recupero del materiale una volta concluso il ciclo di utilizzo;
- V PET con recupero energetico = per ogni ciclo di utilizzo il materiale deve essere
 prodotto totalmente tramite un processo di polimerizzazione. Al termine di ciascun ciclo di
 utilizzo il materiale viene inviato ad un impianto in cui è possibile ottenere recupero
 energetico. Il prodotto diventa quindi combustibile ed il relativo contenuto exergetico può
 essere considerato come un risparmio nella produzione del prodotto stesso per un
 successivo ciclo di utilizzo;
- R PET = una volta prodotto tramite polimerizzazione il materiale per un primo ciclo di utilizzo, si ottengono i successivi cicli per mezzo di un completo riciclo di materia. È quindi ipotizzato un contesto ideale in cui il prodotto finale per i cicli di utilizzo successivi al primo non tiene conto di possibili forme di blending: si tratta quindi di un prodotto 100 % riciclato. Inoltre, essendo questo approccio basato sull'analisi del percorso di vita vissuto da una singola unità di materiale di riferimento, non si tiene conto di eventuali flussi di materiale disperso e che quindi non viene avviato a riciclo. Questo aspetto verrà approfondito più avanti al Capitolo 8.2.

I prodotti finiti per i quali è possibile calcolare i 3 modelli descritti sono la bottiglia in PET (indipendentemente dal fatto che sia trasparente, azzurrata o colorata) e il filato in fibra di PET per la produzione di tessuti: di essi conosciamo infatti l'exergia totale cumulata per la produzione di 1 kg di prodotto sia esso prodotto *ex-novo*, tramite riciclo di materia oppure sia avviato a recupero energetico (*Figura 25*.).

L'equazione che permette di determinare la media dell'exergia cumulata fino all'*n-esimo* ciclo di utilizzo è la seguente:

$$Ex_{media_{mod,X}} = \frac{Ex_{V-PET,X} + (n-1) * Ex_{mod,X}}{n}$$
(8.1)

dove per n si intende il numero di cicli di utilizzo, per mod si intende uno dei tre modelli di produzione descritti in precedenza, per X si intende il prodotto finito cui si fa riferimento.

Sono quindi stati sviluppati due grafici (*Figura 26. e 27.*) che mettono in evidenza, per ciascuna tipologia di prodotto finito, il comportamento della media dell'exergia al variare del numero di cicli di utilizzo considerati.

È possibile evidenziare da questi grafici quanto un modello di riciclo di materia integrale permette, se confrontato con il modello che non prevede alcun tipo di recupero, una riduzione di circa l'80% del consumo di exergia per ciascun ciclo di utilizzo una volta superato il decimo ciclo di utilizzo. Da lì in avanti, infatti, il consumo di exergia media tende a stabilizzarsi su un valore che si avvicina asintoticamente al valore di exergia totale cumulata calcolato alle *equazioni 7.9 e 7.13*.

Per quanto riguarda il secondo modello presentato, in cui il materiale è avviato a recupero energetico, anche in questo caso la curva tende a stabilizzarsi a partire dal quinto ciclo di utilizzo sul valore di exergia totale cumulata calcolato alle *equazioni 7.8 e 7.12*. La riduzione del consumo di exergia rispetto al caso con mancato recupero energetico risulta in questo caso pari a circa il 12% per ciascun ciclo di utilizzo.

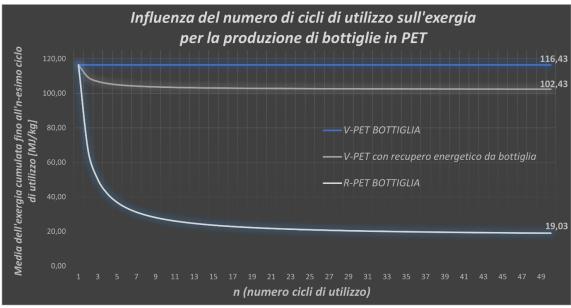


Figura 26. Influenza del numero di cicli di utilizzo sull'exergia per la produzione di bottiglie in PET.

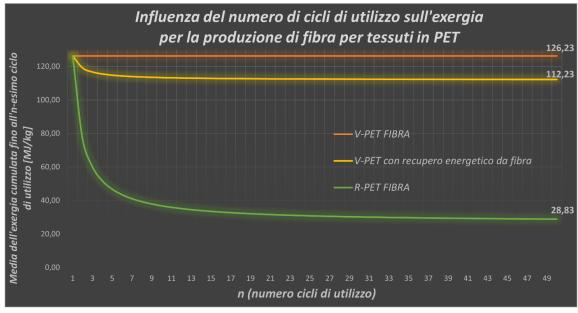


Figura 27. Influenza del numero di cicli di utilizzo sull'exergia per la produzione di fibra per tessuti in PET.

Ciò che si può intuire inoltre dalle *Figure 26. e 27.* è che il comportamento asintotico delle curve relative al recupero energetico e di materia del prodotto presuppone una capacità di recupero del materiale nella sua totalità ed un utilizzo esclusivo del materiale stesso nella fase di produzione. Questo modello può quindi essere considerato come ideale, in quanto non tiene conto della pluralità dei prodotti ottenibili dal PET e della capacità del sistema di raccolta locale e dell'impianto di selezione di separare correttamente questi prodotti ed inviarli interamente a recupero energetico o di materia. Inoltre, non tiene conto del fatto che il materiale ottenuto dal processo di riciclo presenta delle soglie di tolleranza per le impurezze: ciò comporta una riduzione della qualità dal punto di vista tecnico del materiale. Affinchè siano garantiti gli standard tecnici per la commercializzazione del prodotto, negli anni sono state adottate soluzioni di *blending*, ovvero di produzione di PET misto tra materiale riciclato e materiale vergine.

I limiti di questo modello evidenziano come non sia in grado di rispecchiare il sistema reale attualmente presente sul territorio.

8.2. Exergia cumulata – modello reale

Per sviluppare un modello che sia in grado di adeguarsi al contesto reale locale in cui viene applicato e tenere conto, di conseguenza, di quegli elementi in precedenza non considerati, è necessario che questi sia definito in funzione di parametri quali l'efficienza del processo di selezione e riciclo del PET, l'incidenza percentuale del percorso di riciclo Bottle-to-Bottle rispetto al percorso Bottle-to-Fibre e la percentuale di materiale riciclato utilizzato nella produzione di un nuovo prodotto. Un ulteriore aspetto che influisce in maniera determinante sul calcolo dell'exergia cumulata è la possibile variazione nel tempo della domanda di produzione di bottiglie in termini percentuali rispetto a quella di fibra per tessuti.

La definizione di questo modello permette di realizzare due obiettivi:

- definire l'exergia cumulata per ciclo di utilizzo reale riferita ad un'area geografica in cui è
 possibile descrivere un comune sistema di gestione del PET;
- ipotizzare scenari futuri in funzione della variazione dei parametri in precedenza descritti.

La *Figura 28.* mostra lo schema di produzione di bottiglia e fibra in PET adottato per la modellizzazione di un contesto reale. Le ipotesi di calcolo adottate per questo modello sono le seguenti:

- Nessun prodotto in PET viene inviato in discarica, bensì può essere destinato a recupero energetico o riciclo di materia.
- I prodotti in fibra di PET non vengono raccolti né selezionati con la plastica, per cui non possono essere avviati a riciclo di materia. Essi sono quindi destinati totalmente al recupero energetico.
- Le bottiglie in PET scartate nel processo di raccolta e selezione vengono anch'esse inviate a recupero energetico, mentre le bottiglie avviate a riciclo di materia possono essere destinate alla produzione di nuove bottiglie (*Bottle-to-Bottle*) oppure nuova fibra (*Bottle-to-fibre*).
- Il percorso di riciclo si conclude dopo 10 cicli di utilizzo, inviando tutte le bottiglie prodotte nell'ultimo ciclo di utilizzo a recupero energetico. Questo numero di cicli è valutato arbitrariamente, in quanto risulta sufficiente per determinare con accuratezza l'exergia totale accumulata di un modello reale.

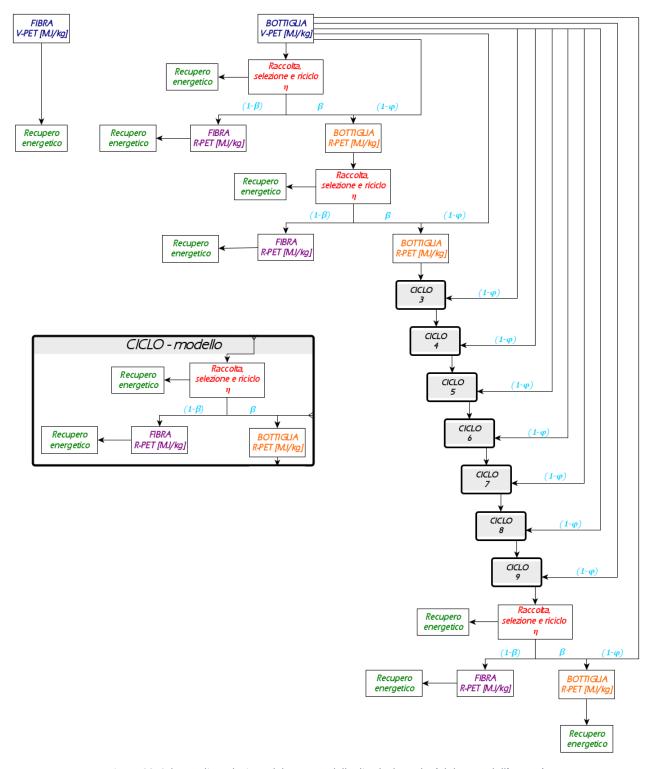


Figura 28. Schema di produzione del PET - modello di calcolo reale. (Elaborato dall'autore)

I simboli adottati in *Figura 28.* rappresentano i parametri sui quali si poggia il modello descritto:

 $\eta = efficienza del processo di raccolta, selezione e riciclo del PET [%]$

 $\beta = percentuale\ di\ materiale\ riciclato\ destinato\ al\ percorso\ Bottle\ -\ to\ -\ Bottle\ [\%]$

 $\varphi = percentuale di materiale riciclato all'interno di una bottiglia <math>R - PET$ [%]

È utile precisare che i termini β e φ si distinguono in termini percentuali come descritto in precedenza, ma in termini totali rappresentano lo stesso flusso sul diagramma in *Figura 28*.

Per poter descrivere in maniera efficace il modello in funzione della domanda di bottiglie e di filato in fibra sul mercato è utile ragionare in termini frazionari. L'equazione 8.2. impone infatti la produzione totale di PET come pari a 1000 kg:

$$X_{bot} + X_{fib} = 1000 \ kg \tag{8.2}$$

Possiamo quindi ricavare da questa equazione che:

$$X_{bot} = \frac{m_{bot}}{m_{tot}} * 1000 [kg];$$
 (8.3) $X_{fib} = \frac{m_{fib}}{m_{tot}} * 1000 [kg]$ (8.4)

dove m_{tot} è la produzione totale di PET, m_{bot} e m_{fib} sono le relative quote di produzione totale.

Detto che i termini X_{bot} e X_{fib} devono essere impostati preliminarmente in funzione del contesto di mercato in cui si intende venga svolto il calcolo, si nota che la produzione di PET può essere interpretata come composta da una somma di materiale vergine e di materiale derivante da un processo di riciclo. I termini X_{bot} e X_{fib} sono quindi anche pari a:

$$X_{bot} = X_{bot_{V-PET}} + X_{bot_{R-PET}} \tag{8.5}$$

$$X_{fib} = X_{fib_{V-PET}} + X_{fib_{R-PET}} \tag{8.6}$$

Ai fini del calcolo dell'exergia cumulata bisogna determinare l'incidenza di ciascuno di questi contributi, tenuto conto del diagramma descritto in *Figura 28.*, al variare dei parametri η , β , φ .

Il primo termine che è quindi necessario descrivere è il contributo iniziale di bottiglie in V-PET necessario per il primo ciclo di utilizzo: esso rappresenta solo una parte della produzione di bottiglie in V-PET totale ed è fondamentale in quanto determina la quantità di materia che può essere destinata ad un percorso di riciclo.

$$X_0 = \frac{X_{bot}}{1 + \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{\eta * \beta}{\varphi}\right)^i}$$
(8.7)

Per n si intende il numero massimo di cicli di utilizzo possibili nel modello (nel nostro caso si è imposto n=10).

Una volta determinato X_0 , è possibile descrivere i quattro contributi espressi alle *equazioni* 8.5 e 8.6 come segue:

$$X_{bot_{V-PET}} = X_0 + (1 - \varphi) * X_0 * \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{\eta * \beta}{\varphi}\right)^i$$
 (8.8)

$$X_{bot_{R-PET}} = X_0 * \eta * \beta + X_0 * \eta * \beta * \sum_{i=1}^{n-1} \left(\frac{\eta * \beta}{\varphi}\right)^i$$
 (8.9)

$$X_{fib_{R-PET}} = X_0 * \eta * (1 - \beta) + X_0 * \eta * (1 - \beta) * \sum_{i=1}^{n-1} \left(\frac{\eta * \beta}{\varphi}\right)^i$$
 (8.10)

$$X_{fib_{V-PET}} = X_{fib} - X_{fib_{R-PET}} (8.11)$$

È inoltre possibile determinare la quantità di materiale che non è possibile avviare al riciclo di materia e, secondo il modello qui esposto, sarà destinato a recupero energetico:

$$PET_{perso} = (1 - \eta) * X_0 + (1 - \eta) * X_0 * \sum_{i=1}^{n-1} \left(\frac{\eta * \beta}{\varphi}\right)^i + X_0 * \left(\frac{\eta * \beta}{\varphi}\right)^n$$
(8.12)

Una volta determinati questi termini, è possibile descrivere il calcolo dell'exergia cumulata per ciclo di utilizzo come una media pesata in funzione della totalità del materiale prodotto dal processo: al denominatore dell'*equazione 8.13* è descritta infatti la somma dei flussi attraverso cui il prodotto in PET può portare a termine il suo ciclo di utilizzo. L'applicazione della formula seguente permette di confrontare i risultati di ciascun scenario reale possibile al variare dei parametri descritti in questo capitolo:

$$Ex = \frac{Ex_{bot_{V-PET}} * X_{bot_{V-PET}} * Ex_{bot_{V-PET}} * X_{bot_{V-PET}} * Ex_{fib_{V-PET}} * Ex_{fib_{V-PET}} * Ex_{fib_{N-PET}} * Ex_{fib_{R-PET}} * Ex_{fi$$

L'equazione 8.13 riesce a tenere conto della totalità dei flussi descritti nel processo, ma al contempo non permette di evidenziare quali sono i modelli caratterizzati da un'elevata capacità di riciclo e, conseguentemente, da un uso elevato di bottiglie R-PET, le quali sono le uniche a poter avere un elevato numero di cicli di utilizzo. Per mettere in evidenza questo aspetto è possibile modificare il denominatore dell'equazione 8.13, in modo da considerare solamente il peso del materiale ottenuto da riciclo di materia. Si ottiene così l'equazione 8.14:

$$Ex_{RIC} = \frac{Ex_{bot_{V-PET}}*X_{bot_{V-PET}}*X_{bot_{V-PET}}*X_{bot_{R-PET}}*X_{fib_{V-PET}}*X_{fib_{V-PET}}*X_{fib_{R-PET}}*X_{fib_{R-PET}}-Ex_{rec,PET}*(X_{fib}+PET_{perso})}{X_{bot_{R-PET}}} \left[\frac{MJ}{kg}\right] \tag{8.14}$$

È importante sottolineare come l'equazione 8.14 non rappresenti più però l'exergia cumulata come visto in precedenza, bensì essa mette in evidenza l'exergia cumulata in funzione della quantità di bottiglie riciclata. I risultati delle due equazioni non sono quindi confrontabili direttamente, ma servono a mettere in evidenza aspetti diversi di uno stesso modello di produzione e consumo del PET.

8.2.1. Scenario 1: Stato attuale

Per poter descrivere adeguatamente lo stato attuale del Piemonte è necessario comprendere come l'unico parametro sul quale la Regione possa intervenire in maniera diretta è l'efficienza di raccolta, selezione e riciclo η in quanto è determinata dal sistema di raccolta dei rifiuti che la Regione sceglie di adottare e dalla metodologia adottata in fase di selezione, già analizzata al *Capitolo 5.2.2*.

I parametri β e φ sono invece soggetti ad un elevato numero di fattori su cui le aziende che si occupano di riciclo di materia e di lavorazione dei prodotti in PET svolgono le loro valutazioni. In particolare, il limite più stringente vigente in Italia fino al 2020 riguardava la possibilità di produrre bottiglie e vaschette alimentari in R-PET con $\varphi_{max}=50$ %. Solamente da gennaio 2021, grazie alla Legge di Bilancio 2021, è diventato possibile anche in Italia produrre bottiglie in PET con $\varphi=100$ %. Risulta quindi efficace presentare i dati ottenuti dall'applicazione del modello qui presentato in funzione della variazione dei parametri β e φ , in modo da potere confrontare i possibili scenari una volta determinato il valore di η . In questo caso si è scelto di svolgere i calcoli descrivendo i parametri β e φ ad intervalli di 20 punti percentuali (partendo dal 20 % fino a giungere al 100 %).

Per definire il valore η è necessario conoscere la massa di PET incolore, azzurrato e colorato avviato a riciclo e per ciascuno di questi calcolare le perdite dovute alle impurezze accettabili in uscita dal CSS, come descritto in *Tabella 16.*, e le perdite che si hanno all'interno del CSS descritte in *Tabella 17.*: utilizzando i dati riferiti all'anno 2018 e già indicati in *Figura 17.* e 18., è possibile calcolare il valore di η attuale riferito alla regione Piemonte.

2018	PET AVVIATO A RICICLO [ton/anno]	PET IN USCITA DAL CSS [ton/anno]	BOTTIGLIA PET IN INGRESSO CSS [ton/anno]
INCOLORE	4141,7	4601,9	7281,4
AZZURRATO	3195,0	3550,0	5617,1
COLORATO	3017,5	3352,8	7620,0
TOTALE	10354,2	11504,7	20518,5

Tabella 31. PET in Regione Piemonte – calcolo η per l'anno 2018.

$$\eta_{Piemonte} = \frac{m_{RICICLATO}}{m_{CSS}} = \frac{10354,2}{20518,5} = 0,5$$
(8.14)

L'ultimo parametro che è necessario determinare per completare la descrizione riguarda il contesto di mercato in cui intendiamo applicare il modello qui sviluppato. A livello mondiale, infatti, circa il 65 % del polimero in PET prodotto viene destinato alla realizzazione di fibre, mentre circa il 30 % è destinato alla produzione di bottiglie. Al contrario, in Europa la produzione di fibra rappresenta circa il 35 % dei polimeri prodotti in totale. [50] Ciò è dovuto al fatto che i principali produttori di PET a livello mondiale sono il mercato asiatico, che copre il 50 % della produzione mondiale di resina di PET (solo la Cina produce il 27 % del totale): in queste aree geografiche l'utilizzo del PET per la produzione di tessuti è preponderante.

Vista la forte variabilità delle percentuali relative alla produzione di fibra e di bottiglie in PET in funzione del contesto geografico scelto, verranno presentati i risultati nel caso vi sia una prevalenza di produzione di bottiglie (*CASO 1:* Bottiglia = 70%, Fibra = 30%) oppure una prevalenza di fibra (*CASO 2:* Bottiglia = 30%, Fibra = 70%).

Caso 1

Le *Figure 29. e 30*. mostrano i risultati ottenuti per quanto riguarda l'exergia cumulata e l'exergia cumulata in funzione della quantità di bottiglie riciclate nello stato attuale, ovvero con $\eta=50$ %, in un contesto di mercato che richiede che la produzione di prodotto finale in PET sia dedicata per il 70 % alla produzione di bottiglie e per il 30 % alla produzione di fibre.

È quindi possibile constatare come in *Figura 29*. l'exergia cumulata sia uguale in tutti i casi in cui si verifica che $\varphi \geq \beta$, mentre aumenta al diminuire di φ ed all'aumentare di β : quest'ultimo aspetto è dovuto al fattore $\left(\frac{\eta*\beta}{\varphi}\right)$ che permette di calcolare la quantità di PET rimanente ad ogni ciclo di utilizzo successivo. Dai dati raccolti in questo grafico potremmo supporre quindi che per minimizzare l'exergia cumulata sia necessario avere un valore di β minimo (ovvero avere un modello di riciclo in prevalenza Bottle-to-fibre) e di φ massimo (ovvero produrre bottiglie 100 % R-PET). La *Figura 30*. mette invece in evidenza come la minimizzazione dell'exergia cumulata in funzione della quantità di bottiglie riciclate si ottenga rendendo massima la quantità di materiale destinato alla produzione R-PET (β massimo), massimizzando contemporaneamente il valore di φ .

Confrontando il valore minimo di exergia cumulata in *Figura 29*. con i dati presentati in *Figura 26*. e 27. per la produzione di R-PET si nota come il costo exergetico dell'attuale sistema di riciclo risulti ancora molto superiore rispetto al modello idealizzato, in particolare a causa di un valore di efficienza η molto basso.

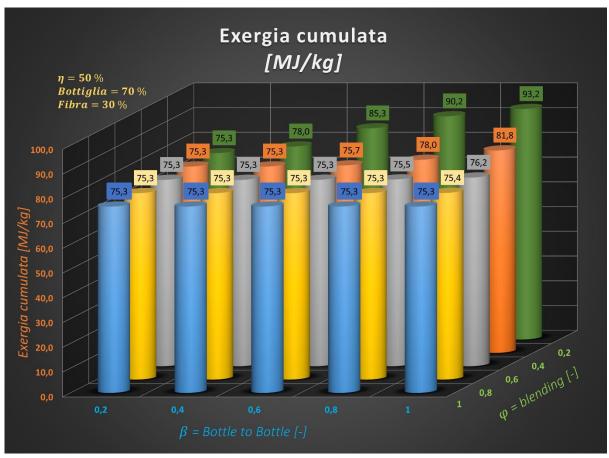


Figura 29. Exergia cumulata – Scenario 1 - CASO 1.

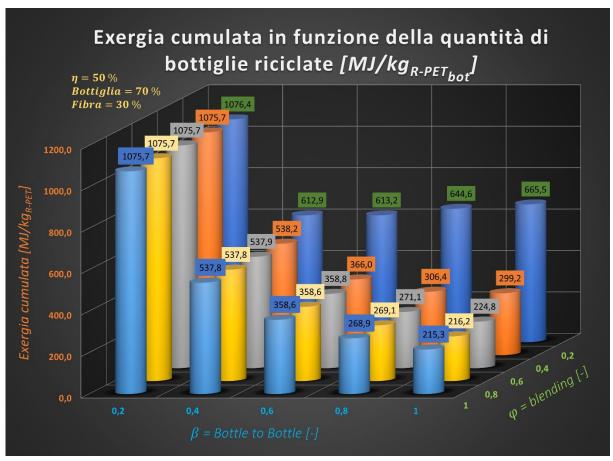


Figura 30. Exergia cumulata in funzione della quantità di bottiglie riciclate – Scenario 1 - CASO 1.

Caso 2

Le *Figure 31.* e 32. mostrano i risultati ottenuti in un contesto di mercato in cui la produzione di prodotto finale in PET sia dedicata per il 70 % alla produzione di bottiglie e per il 30 % alla produzione di fibre. Essendo riferito allo stato attuale, avremo $\eta = 50$ %.

I dati mostrati confermano il comportamento già evidenziato nel *Caso 1*.: l'exergia cumulata è minimizzata ogni volta che $\varphi \geq \beta$, mentre aumenta al diminuire di φ ed all'aumentare di β . Rispetto al *Caso 1*., però il valore minimo ottenuto in questo caso risulta maggiore di 20,9 $\frac{MJ}{kg}$: ciò è dovuta al fatto che l'exergia cumulata per la produzione di 1 kg di fibra è maggiore rispetto alla bottiglia a causa del processo di lavorazione che deve subire.

Un ulteriore aspetto di interesse è dato dal fatto che anche nel Caso 2. viene confermato che complessivamente per minimizzare l'exergia cumulata sia necessario minimizzare β e massimizzare φ : questo risultato può sembrare controintuitivo in quanto ci viene chiarito che in un modello con $\eta=50~\%$ il maggiore utilizzo di PET riciclato per la produzione di fibra minimizza l'exergia cumulata complessiva indipendentemente dal contesto di mercato, nonostante ciò comporti una produzione molto bassa di bottiglie R-PET e si abbia quindi una quantità molto limitato di materiale che è in grado di raggiungere i 10 cicli di utilizzo massimi per il modello. Per mettere in evidenza questo aspetto si è prodotta la *Figura 32.*, da cui risulta chiaro che per massimizzare la produzione di bottiglie R-PET è necessario raggiungere un modello con $\beta=100~\%$. Confrontando però questo grafico con la *Figura 30.*, risulta un exergia minima cumulata di molto superiore al *Caso 1.*, in quanto la quantità di bottiglie richiesta dal sistema in questo caso è notevolmente minore.

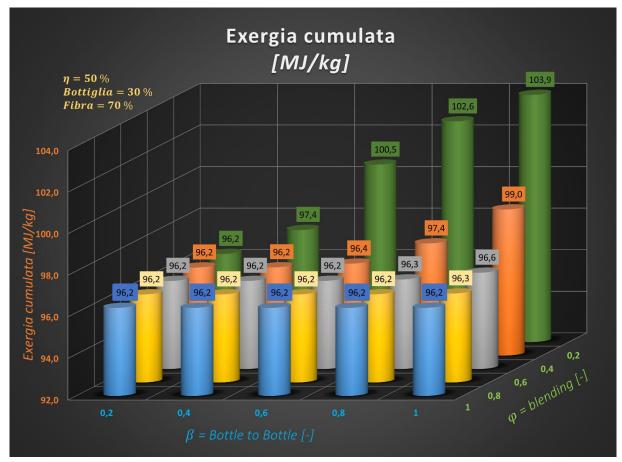


Figura 31. Exergia cumulata – Scenario 1 - CASO 2.

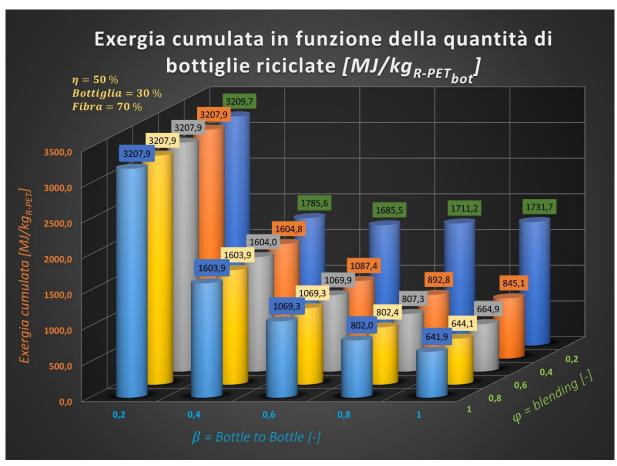


Figura 32. Exergia cumulata in funzione della quantità di bottiglie riciclate – Scenario 1 - CASO 2.

8.2.2. Scenario 2

I dati raccolti in riferimento allo stato attuale mostrano come il valore minimo di exergia cumulata ottenibile attualmente sia pari a 75,3 $\frac{MJ}{kg}$. Ai fini di una valutazione complessiva del modello attuale, è utile confrontare i dati fin qui raccolti con quelli ottenuti da uno scenario alternativo in cui si ipotizza $\eta=90\%$: questo risultato è ottenibile attraverso una attenta riorganizzazione del sistema di raccolta e selezione dei rifiuti. Un ruolo importante in questo senso può essere ricoperto dal modello della raccolta selettiva, descritto al *Capitolo 3.3.*: esso può permettere il raggiungimento di valori di efficienza η molto elevati, ma a fronte di un cambio importante di paradigma a livello di gestione del sistema: perché risulti efficace, necessita ad esempio di un maggiore grado di informazione nella popolazione sulla capacità di distinzione e separazione del materiale, di una diffusione capillare sul territorio degli ecocompattatori e di un contatto diretto con le aziende produttrici di questi materiali, al fine di uniformare il più possibile i prodotti dal punto di vista della composizione dei materiali, al fine di semplificarne la fase di raccolta e riciclo.

Per permettere una efficace valutazione dell'influenza di η sul valore dell'exergia cumulata, è utile che gli altri parametri su cui si basa il modello seguano lo stesso comportamento adottato al *Capitolo 8.2.1.*: β e φ varieranno quindi dal 20 % fino al 100 %, sfruttando degli intervalli di 20 punti percentuali. La domanda di mercato sarà nuovamente descritta da due casi esemplificativi:

- CASO 1: Bottiglia = 70%, Fibra = 30%;
- CASO 2: Bottiglia = 30%, Fibra = 70%.

Caso 1

Le *Figure 33.* e 34. mostrano i risultati ottenuti in un contesto di mercato in cui la produzione di prodotto finale in PET sia dedicata per il 70 % alla produzione di bottiglie e per il 30 % alla produzione di fibre. I dati presentati in *Figura 33*. in questo caso presentano un comportamento particolare dell'exergia cumulata in funzione di β e φ , che è possibile riassumere come segue:

- l'exergia cumulata diminuisce sempre all'aumentare di φ ;
- nel caso in cui $\varphi < 40$ %, l'exergia cumulata diminuisce al diminuire di β (come già descritto nello Scenario 1);
- nel caso in cui $\varphi \geq 40$ %, l'exergia cumulata si minimizza per valori di β discreti e intermedi, ciò a dimostrare che in un sistema ad elevata efficienza e con una capacità di produrre bottiglie R-PET con una percentuale di materiale riciclato massima, la destinazione d'uso del materiale riciclato non può essere ricercata totalmente in uno solo dei due percorsi di riciclo qui descritti, ma questi devono coesistere in percentuali che permettano le minimizzazione dell'exergia cumulata. Il confronto con lo *Scenario 1*. evidenzia come per valori di η più bassi questo comportamento diventi sempre meno evidente fino a non essere più percepibile.
- Nel caso in cui $\varphi=100$ %, l'exergia cumulata minima sarà data da $\beta_{opt}=60$ %, e risulta pari a 51,5 $\frac{MJ}{kg}$. Possiamo quindi osservare che con un miglioramento dell'efficienza η del sistema dal 50 % al 90 % si ottiene un risparmio di 23,8 $\frac{MJ}{kg}$ nel caso ottimale.

La *Figura 34*. conferma invece come l'ottimizzazione della produzione di bottiglie di R-PET si raggiunga attraverso la massimizzazione dei parametri β e φ .

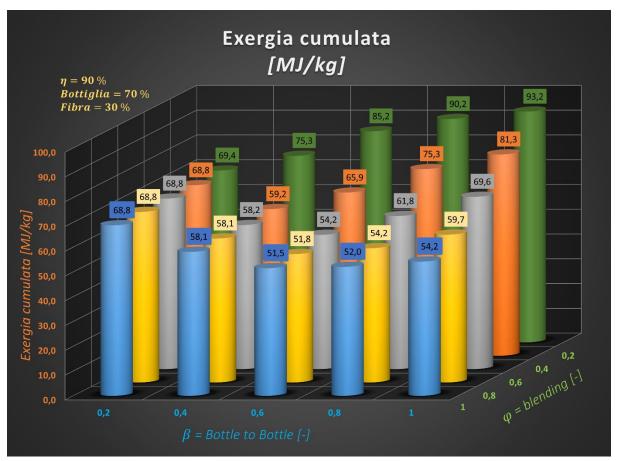


Figura 33. Exergia cumulata – Scenario 2 - CASO 1.

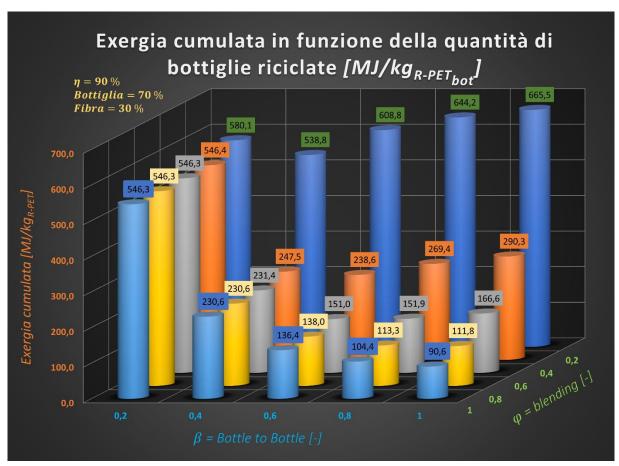


Figura 34.Exergia cumulata in funzione della quantità di bottiglie riciclate – Scenario 2 - CASO 1.

Ciò che è interessante notare è la netta riduzione dell'exergia cumulata in funzione della quantità di bottiglie riciclate: abbiamo infatti un risparmio nel caso ottimale di $124,7~\frac{MJ}{kg}$. Ciò è causato dal fatto che migliorando l'efficienza η si ottiene una quantità maggiore di materiale riciclato insieme ad un aumento della quantità di bottiglie R-PET prodotte dal modello.

Caso 2

La *Figura 35.* mostra il comportamento dell'exergia cumulata nel caso in cui $\eta = 90\%$, ma il contesto di mercato richieda una produzione maggioritaria di fibra in PET (70%).

In questo caso è confermata l'influenza del fattore φ sulla minimizzazione dell'exergia cumulata, mentre per quanto riguarda β , l'elevata richiesta da parte del mercato di fibre in PET influisce notevolmente sull'ottimizzazione del sistema: risulta infatti conveniente destinare la maggiore quantità possibile di materiale riciclato alla produzione di fibra R-PET, anche se ciò comporta lo sfruttamento del materiale considerato per un basso numero di cicli di utilizzo. L'effetto positivo dato dal miglioramento dell'efficienza η risulta inoltre più attenuato rispetto al caso precedente: si ha infatti una riduzione dell'exergia cumulata ottimale rispetto al **CASO 1** pari a 10.2 $\frac{MJ}{kg}$.

La *Figura 36.*, rappresentando l'exergia cumulata in funzione della quantità di bottiglie riciclate, conferma la dipendenza nei confronti della produzione di bottiglie R-PET nel modello. Confrontando i dati con quelli espressi in *Figura 32.*, si evidenzia come il solo miglioramento dell'efficienza η abbia comportato una riduzione importante dell'exergia cumulata grazie alla maggiore capacità del modello di produrre bottiglie R-PET: questo risparmio nel caso ottimale risulta pari a 301,7 $\frac{MJ}{kg}$.

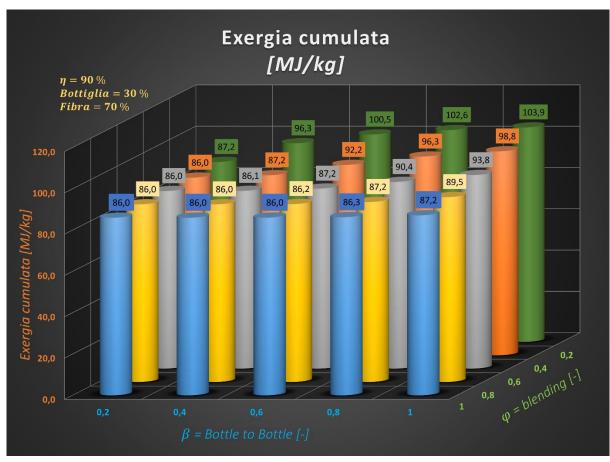


Figura 35. Exergia cumulata – Scenario 2 - CASO 2.

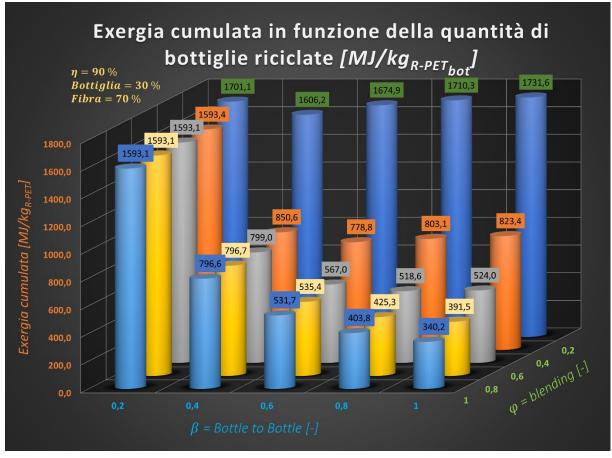


Figura 36. Exergia cumulata in funzione della quantità di bottiglie riciclate – Scenario 2 - CASO 2.

8.2.3. Exergia cumulata in funzione di η

Il confronto fra lo Scenario 1 e lo Scenario 2 descritti nei capitoli precedenti pone in evidenza come la possibilità di intervenire sulla capacità di un sistema di selezionare ed avviare a recupero il materiale sembra permettere al sistema stesso una diminuzione dell'exergia cumulata qualsiasi sia il contesto in cui viene inserito. Diventa per cui interessante analizzare con maggiore accuratezza questo aspetto e verificare di conseguenza quale sia il valore minimo di exergia cumulata possibile per questo modello e in quale contesto sia possibile ottenerlo.

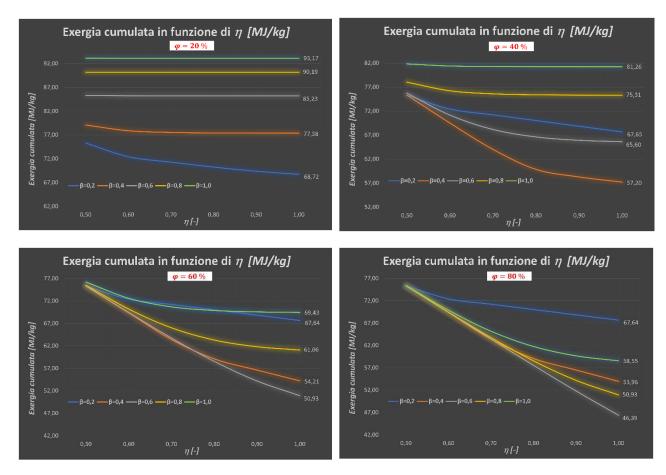
Per svolgere questa analisi è però nuovamente necessario definire il contesto di mercato all'interno del quale si inserisce questa valutazione. I risultati qui ottenuti saranno presentati mantenendo le condizioni descritte per **CASO 1** e **CASO 2**.

Caso 1

I dati raccolti per il **CASO 1** e presentati nei grafici di *Figura 37.* descrivono l'andamento dell'exergia cumulata in funzione di η per ciascuno dei valori di β presi come riferimento, avendo per ogni grafico un determinato valore di φ .

Dall'analisi di questi grafici possiamo trarre le seguenti conclusioni:

- per valori di φ bassi (ovvero percentuale bassa di materiale riciclato nella produzione di bottiglie R-PET) e di β alti (materiale riciclato destinato in prevalenza al percorso *Bottle-to-Bottle*) gli interventi di miglioramento dell'efficienza η non producono alcun effetto utile;
- per valori di φ bassi, l'exergia cumulata cresce al crescere del valore di β . All'aumentare del valore di φ questo aspetto però si modifica, e si evidenzia come il valore di β che permette di minimizzare l'exergia cumulata sia un valore intermedio che può avere piccole variazioni in funzione di φ : possiamo assumere come valore di riferimento circa il 60%.
- per valori di φ alti risulta invece evidente come gli interventi sul sistema per il miglioramento dell'efficienza η abbiano un effetto utile importante è che può essere inteso come quasi lineare. Inoltre, risulta evidente che a fronte di un maggiore valore di φ , si avrà un maggiore valore di η necessario affinchè sia possibile apprezzare una differenza tra le curve di exergia cumulata descritte nei grafici;
- tenuto conto che attualmente risulta possibile dal punto di vista tecnico ed è stata definita una norma che ne permette la produzione in Italia, produrre bottiglie riciclate solamente con una percentuale di $\varphi=100$ % è uno scenario che può essere ritenuto possibile. I grafici descritti in *Figura 37*. evidenziano come questo aspetto, se non accompagnato da un aumento dell'efficienza η , non produce alcun effetto benefico, in quanto il valore di exergia cumulata rimane intorno a $75 \, \frac{MJ}{kg}$. L'aumento di efficienza η in questo caso sarebbe invece in grado di produrre una riduzione significativa dell'exergia e in maniera quasi indipendente dal valore di β (deve comunque risultare $\beta>40\%$). Solamente per $\eta>70$ % la scelta di β può comportare un'effettiva riduzione dell'exergia cumulata prodotta;
- il valore minimo di exergia cumulata presentato dai grafici in *Figura 37*. si ottiene nel caso in cui $\varphi=100$ %, $\eta=100$ %, $\beta=60$ %. Andando a verificare più nel dettaglio il comportamento in funzione di β , si ottiene che $\beta_{opt}=57$ %: per questo valore di β si ottiene infatti $Ex_{min,1}=45,65$ $\frac{MJ}{kg}$.



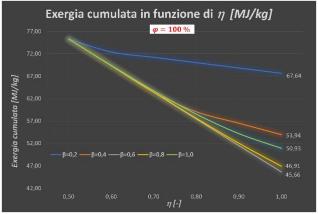


Figura 37. Exergia cumulata in funzione di η - CASO 1

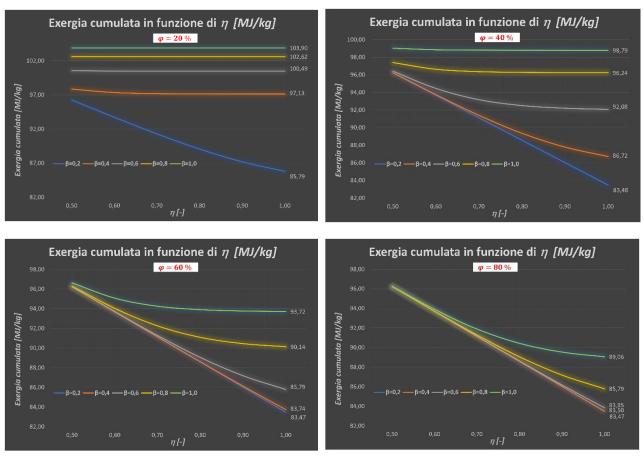
Caso 2

Applicando i criteri fin qui adottati al **CASO 2,** il modello qui presentato ottiene come risultato i grafici espressi in Figura 28.: come nel caso precedente, essi sono presentati in funzione dell'efficienza η .

Le valutazioni che si possono fare su questi grafici presentano alcune importanti differenze rispetto al **CASO** 1:

- per valori di β bassi (ovvero materiale riciclato destinato in prevalenza al percorso *Bottle-to-Fibre*), gli interventi svolti con l'obiettivo di aumentare il valore di φ non comportano un reale effetto utile;
- è invece confermato che per valori di φ bassi e di β alti, gli interventi di miglioramento dell'efficienza η non producono un effetto utile significativo;
- per valori di β bassi risulta invece evidente come gli interventi sul sistema per il miglioramento dell'efficienza η comportino una riduzione dell'exergia cumulata quasi lineare indipendentemente dal valore di φ . Questo comportamento è causato dal fatto che la quantità di materiale che viene avviata a riciclo aumenta linearmente all'aumentare di η . Contemporaneamente, va però sottolineato come all'aumentare di φ e di η l'influenza di β risulta sempre meno determinante. Si può, ad esempio, notare come per $\varphi=100$ % e $\eta=100$ % le curve che presentano $\beta=20$ %, $\beta=40$ % e $\beta=60$ % presentino differenze minime;
- nel caso in cui $\beta=100$ % si può invece notare come, a parità di altri fattori, esso rappresenti sempre il "worst scenario". Ciò è dovuto al fatto che l'utilizzo esclusivo del modello di riciclo Bottle-to-Bottle porta come conseguenza la necessità di produrre tutta la fibra in PET da materiale vergine (che in questo scenario è la componente predominante);
- il valore minimo di exergia cumulata presentato dai grafici in Figura 38. è ottenibile attraverso un vario numero di configurazioni: nel caso in cui $\beta < 20~\%$, $\varphi > 60~\%$ e $\eta = 100~\%$, è possibile ottenere l'exergia cumulata ottimale nel caso in cui la produzione totale di PET sia destinata al 70% alla produzione di fibra e al 30 % alla produzione di PET. Andando a verificare più nel dettaglio il range di valori per cui si ottiene l'exergia totale ottimizzata, si ottiene che nel caso in cui si abbia $\eta = 100~\%$ e $\varphi = 100~\%$, risulta che $\beta_{opt} < 42~\%$: il valore di exergia ottimizzata risulta quindi $Ex_{min,2} = 83,47~\frac{MJ}{kg}$. Confrontando i risultati ottenuti al **CASO 1** e al **CASO 2** per quanto riguarda il valore minimo di exergia cumulata ci si rende conto che la differenza tra i due dati è pari a $Ex_{min,2} Ex_{min,1} = 37,82~\frac{MJ}{kg}$.

Da ciò è possibile intuire quanto la capacità di ridurre in maniera efficace il costo exergetico necessario per ottenere un kg di PET sia legata alla domanda di bottiglie, e alla conseguente capacità di riciclo delle stesse, presente sul mercato di riferimento.



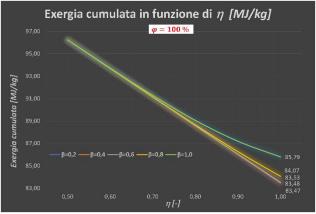


Figura 38. Exergia cumulata in funzione di η - CASO 2

9. Conclusioni

Il presente lavoro di Tesi fornisce un'analisi accurata del modello di raccolta e selezione della plastica nella Regione Piemonte, concentrandosi in particolare sulle possibilità di recupero del PET post-consumo. Le informazioni raccolte in questo campo contribuiscono a determinare i valori di exergia cumulata in funzione della tipologia di prodotto che si vuole ottenere, in modo da permettere un confronto tra diversi modelli di recupero e valutare quali siano gli aspetti su cui un intervento migliorativo potrebbe portare maggiori effetti positivi riguardo il consumo di exergia.

In particolar modo, ci si è concentrati sul modello di raccolta differenziata proposto dal Piano di Gestione dei Rifiuti Urbani e dei fanghi di depurazione della Regione Piemonte e sul metodo di selezione del materiale plastico attuato dal Consorzio COREPLA sul territorio italiano. Si è quindi voluto definire un percorso del materiale avviato a riciclo in Piemonte, il quale permette di definire quantitativamente i costi exergetici per il trasporto del materiale. Dai risultati ottenuti ci si può accorgere che, dal punto di vista exergetico, essi rappresentano una quota risibile rispetto al costo exergetico totale necessario per ottenere un kg di prodotto in PET.

Grazie ad alcuni colloqui con le aziende del territorio è stato poi possibile descrivere in maniera approfondita il processo di selezione interno ad un Centro di Selezione Secondario e ad un impianto deputato al riciclo meccanico delle bottiglie in PET, nonché ottenere informazioni sui consumi reali degli impianti che si occupano dello svolgimento di queste fasi.

Infine, si è reso necessario descrivere i processi di lavorazione del PET per ottenere un prodotto finito. Si è quindi dovuto distinguere tra due principali tipologie di prodotto: bottiglie in PET, ottenute tramite un processo di stampaggio ad iniezione, e fibre in PET, ottenute tramite filatura. I dati utilizzati in questa Tesi per i processi descritti sono frutto di ricerca nell'ambito della letteratura scientifica già presente sul tema. Si invita pertanto a svolgere ulteriori ricerche future in questo ambito, in modo tale da approfondire l'analisi dei contributi exergetici di questi processi, valutare lo stato dell'arte attuale e gli interventi di efficientamento sui modelli di produzione che è già possibile attuare. Una volta approfonditi questi studi, risulterebbe certamente efficace tenere anche conto di una maggiore diversificazione dei prodotti in PET riciclato presenti sul mercato.

Dopo aver raccolto i dati relativi al consumo exergetico totale riferiti ad un singolo ciclo di utilizzo per ciascuno dei prodotti ottenibili in PET (sia nel caso di produzione da materiale esclusivamente vergine sia nel caso di produzione da materiale totalmente riciclato), si è reso necessario definire un modello che permettesse di confrontare i consumi reali al variare di alcune caratteristiche che possono determinarne l'ottimizzazione. Si è quindi giunti alla definizione di un modello che è funzione di 4 parametri: l'efficienza di raccolta, selezione e riciclo (η), la percentuale di materiale riciclato inviato al percorso Bottle-to-Bottle (β), la percentuale di blending con cui si è in grado di produrre una bottiglia riciclata (φ) e l'incidenza della domanda di bottiglie in PET sulla domanda totale di prodotti in PET. Questo modello permette di comprendere come il costo exergetico totale sia influenzato da ciascuno di questi fattori e che agire isolatamente solamente su uno di questi fattori non permette di ottenere effetti positivi adeguati. È quindi necessario ricordare come qualsiasi intervento di miglioramento in questo senso debba essere accompagnato da un coerente adeguamento degli altri fattori.

Andando ad analizzare più nel concreto i risultati ottenuti, ci si rende conto che il parametro più soggetto a cambi di valutazione è β , mentre per quanto riguarda η e φ essi risultano sempre ottimizzati una volta pari al loro valore massimo. Per quanto riguarda invece la percentuale di bottiglie in PET richieste dal mercato rispetto alla domanda totale di prodotti in PET, su questo parametro lo spazio di intervento per rendere il modello più efficiente è molto limitato in quanto non è possibile attuare politiche che si pongano questo come unico obiettivo e che possano incidere in maniera così determinante sulla domanda di un prodotto rispetto ad un altro in un'area geografica delimitata. Pertanto, è necessario che il valore di questo parametro sia monitorato ciclicamente in modo da conoscerne sempre il valore aggiornato, ma deve essere comunque interpretato come un dato fornito attorno al quale si possono svolgere valutazioni sugli altri parametri.

Il modello presentato al *Capitolo 8.2.* è stato sviluppato dall'autore sulla base di alcuni esempi già presenti in letteratura *[50]*. I dati raccolti in questa Tesi attraverso questo modello rappresentano solo una parte rispetto alla mole di informazioni che sarebbe possibile ottenere: sono infatti quelli ritenuti più interessanti per il contesto geografico cui il testo è riferito. È però certamente possibile ottenere ulteriori informazioni dallo stesso utilizzando metodi di variazione dei parametri differenti. Si raccomanda quindi che vengano svolte ricerche future in questo campo che possano applicare il modello qui descritto, ampliandolo eventualmente, in modo da ottenere ulteriori informazioni sui criteri di efficientamento che è conveniente adottare una volta definite le condizioni attuali con cui viene gestito il percorso post-consumo dei prodotti in PET.

Bibliografia

- 1) Henrik Thunman, Teresa Berdugo Vilches, Martin Seemann, Jelena Maric, Isabel Cañete Vela, Sébastien Pissot, Huong N.T. Nguyen, Circular use of plastics-transformation of existing petrochemical clusters into thermochemical recycling plants with 100% plastics recovery, 2019
- 2) Sofia Russo, Alicia Valero, Antonio Valero, Marta Iglesias Embil, *Exergy-based assessment of Polymers Production and Recycling: An Application to the Automotive Sector*, 2021
- 3) ISPRA, Rapporti 313/2019, Rapporto Rifiuti Urbani, Edizione 2019
- 4) CONAI, Linee guida per la facilitazione delle attività di riciclo degli imballaggi in materiale plastico
- 5) European Commission, Reference Document on Best Available Techniques in the Production of Polymers. Chapter 10, 2007
- 6) Anshuman Shrivastava, Introduction to Plastics Engineering, 2018
- 7) University of Cincinnati, *Polymer Data Handbook*, 1998
- 8) Quantis, commissionato da CEFIC, Chemical recycling: greenhouse gas emission reduction potential of an emerging waste management route, 2020
- 9) Raoul Meys, Felicitas Frick, Stefan Westhues, Andre Sternberg, Jurgen Klankermayer, Andre Bardow, *Towards a circular economy for plastic packaging wastes the environmental potential of chemical recycling*, 2020
- 10) Martyna Solis, Semida Silveira, **Technologies for chemical recycling of household plastics – A technical review and TRL assessment**, 2020
- 11) Regione Piemonte, Osservatorio Regionale Rifiuti, Rapporto Rifiuti Urbani, 2018
- 12) Caterina Conte, Pietro Navarotto, Mario Grosso, *Analisi sperimentale di un impianto di selezione avanzata dei rifiuti plastici da raccolta differenziata*, 2018
- 13) a2aambiente, Impianto recupero plastica, Cavaglià (Biella)
- 14) CONAI, Lista degli imballaggi nelle fasce contributive, 2020
- 15) Norio Stato, *Chemical Energy and Exergy: an introduction to chemical thermodynamics for engineers*, Oxford, 2004
- 16) T.J. Kotas, The exergy method of thermal plant analysis. Introduction, 1985
- 17) I. Dincer and M.A. Rosen, *Exergy: Energy, Environment and Sustainable Development*, Elsevier, 2007
- 18) I. Dincer and Y. A. Cengel, *Energy, Entropy and Exergy Concepts and Their Roles in Thermal Engineering*, 3:116–149, 2001
- 19) W. Stanek, Thermodynamics for Sustainable Management of Natural Resources. Chapter 3: Fundamental of Exergy Analysis, 37-80, 2017
- 20) J. Szargut, Exergy Analysis: Technical and ecological applications, 2005
- 21) T.J. Kotas, The exergy method of thermal plant analysis. Basic exergy concepts, 1985
- 22) A. Bejan, Advanced Engineering Thermodynamics, 2016
- 23) J. Szargut, Chemical exergies of the elements, Applied Energy, 32, 269-285, 1989
- 24) T.J. Kotas, The exergy method of thermal plant analysis. Appendix A, 1985
- 25) T.J. Kotas, The exergy method of thermal plant analysis. Appendix C, 1985
- 26) I. Dincer, The Role of Exergy in Energy Policy Making. Energy Policy, 2000

- 27) M.V. Rocco, E. Colombo, E. Sciubba, *Advances in exergy analysis: a novel assessment of the Extended Exergy Accounting Method*, 2013
- 28) W. Stanek, Thermodynamics for Sustainable Management of Natural Resources. Chapter 5: Cumulative Calculus and Life Cycle Evaluation, 109-130, 2017
- 29) Regione Piemonte, *Proposta di Progetto di Piano Regionale di gestione dei Rifiuti Urbani e dei Fanghi di depurazione*, 2009
- 30) Regione Piemonte, Piano di Gestione dei Rifiuti Urbani e dei Fanghi di depurazione, 2016
- 31) ANCI-CONAI-COREPLA, Accordo di Programma Quadro per la gestione dei rifiuti di imballaggio conferiti al servizio pubblico. Allegato Tecnico Imballaggi in Plastica, 2020
- 32) COREPLA, Contratto di selezione di rifiuti di imballaggi in plastica. Allegati A, B, C, 2014
- 33) COREPLA, Regolamento Aste Telematiche COREPLA, 2017
- 34) PlasticsEurope e CPME, Eco-profile: Polyethylene Terephthalate (PET) (Bottle Grade), 2017
- 35) P.T. Benavides, J.B. Dunn, J. Han, M. Biddy, J. Markham, *Exploring Comparative Energy and Environmental Benefits of Virgin, Recycled and Bio-Derived PET bottles*, 2018
- 36) Plastic Division of the American Chemistry Council, *Cradle-to-gate life cycle inventory of nine plastic resins and four polyurethane precursors*, 2011
- 37) CEN, EN ISO 12185:96/C1, 2001
- 38) Sofia Russo, Vittorio Verda, Influencing factors of Solid Waste Management global cost and efficiency: a multi-objective optimization focusing on the collection system, 2020
- 39) Codice della strada, Articolo 61 del D. Lgs. 30 aprile 1992 n. 185, 1992
- 40) Osservatorio sulle attività di autotrasporto, **Costo chilometrico medio relative al consumo** di gasolio delle imprese di autotrasporto per conto terzi, 2011
- 41) M.R. Over cash, J.H. Ewell, E.M. Griffing, *Life cycle energy comparison of different polymer recycling processes*, 2019
- 42) H. Saechtling, Manuale delle materie plastiche, 2006
- 43) L. Shen, E. Worrell, M. K. Patel, *Open-loop recycling: a LCA case study of PET bottle-to-fibre recycling*, 2010
- 44) S.D.A. Sharuddin, F. Abnisa, W.M.A. Wan Daud, M.K. Aroua, *Energy recovery from pyrolysis* of plastic waste: Study on non-recycled plastics (NRP) data as the real measure of plastic waste, 2017
- 45) G. Cau, D. Cocco, Processi di gassificazione. Università di Cagliari, 2012
- 46) Y. Zhang, G. Ji, D. Ma, C. Chen, Y. Wang, W. Wang, A. Li, Exergy and energy analysis of pyrolysis of plastic wastes in rotary kiln with heat carrier, Appendix A, 2020
- 47) A.B. Trindade, J.C.E. Palacio, A.M. Gonzalez, D.J.R. Orozco, E.E.S. Lora, M.L.G. Renò, O.A. del Olmo, *Advanced exergy analysis and environmental assessment of the steam cycle of an incineration system of municipal solid waste with energy recovery*, 2018
- 48) Y.W. Huang, M.Q. Chen, Q.H. Li, W. Xing, A critical evaluation on chemical exergy and its correlation with high heating value for single and multi-component typical plastic wastes, 2018
- 49) Y. Zhang, G. Ji, D. Ma, C. Chen, Y. Wang, W. Wang, A. Li, *Exergy and energy analysis of pyrolysis of plastic wastes in rotary kiln with heat carrier*, 2020
- 50) L. Shen, E. Nieuwlaar, E. Worrell, M. K. Patel, *Life cycle energy and GHG emissions of PET recycling: change-oriented effects*, 2011

Ringraziamenti

Si ringraziano per la collaborazione e le informazioni fornite l'azienda a2a Ambiente, nella persona di Davide Marinzi, in riferimento all'impianto di Cavaglià (BI), e l'azienda Dentis Recycling Italy, nella persona di Roberto Tangorra, in riferimento all'impianto di Albano Stura (CN).