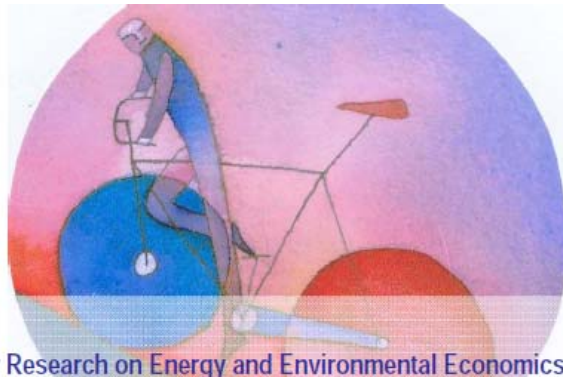


Bocconi

IEFE

Centre for Research on Energy and Environmental Economics and Policy



Research Report Series – ISSN 2036-1785

**La gestione integrata dei rifiuti urbani:
analisi economica di scenari alternativi**

Antonio Massarutto, Alessandro de Carli and Matteo Graffi

Research Report n. 5

March 2010

***IEFE - The Center for Research on Energy and Environmental
Economics and Policy at Bocconi University
via Guglielmo Röntgen 1, I-20136 Milan
tel. +39.02.5836.3820 – fax +39.02.5836.3890
www.iefе.unibocconi.it – iefe@unibocconi.it***

This report can be downloaded at: <http://www.iefе.unibocconi.it>

Antonio Massarutto (IEFE-Bocconi)
Alessandro de Carli (IEFE-Bocconi)
Matteo Graffi (IEFE-Bocconi)

Financial support from MIUR-PRIN (2006 - Prot. N. 2006097921_005) is gratefully acknowledged.

La gestione integrata dei rifiuti urbani: analisi economica di scenari alternativi

Antonio Massarutto, Alessandro de Carli e Matteo Graffi

IEFE – Istituto di economia e politica dell'energia e dell'ambiente, Università Bocconi, Milano

EXECUTIVE SUMMARY

A critical assumption of studies assessing comparatively waste management options is the consideration of a constant average cost for selective collection regardless the Source Separation Level (SSL) reached, and to neglect the mass constraint. In the literature, most often technologies are compared with each other (eg incineration vs. recycling or composting), while costs and benefits, either financial or external, are usually referred to individual facilities and technologies rather than to integrated waste management scenarios.

The present study compares alternative waste management scenarios through the development of a desktop model that tries to remove the above limits. Several alternative scenarios based on different combinations of energy and materials recovery are applied to two imaginary areas modeled in order to represent a typical Northern Italian setting. External costs and benefits implied by scenarios are also considered. Scenarios are compared on the base of the full cost for treating the total waste generated in the area. The model investigates the factors that influence the relative convenience of alternative scenarios. Finally, a sensitivity analysis is provided in order to clarify the criticalness of assumptions made in the scenarios.

The study emphasizes the need to consider waste management alternatives as complementary parts of an integrated strategy, rather than alternatives. In this light, it emerges quite clearly that both materials recycling and energy (and heat) recovery through incineration of residual waste are needed in order to minimize the waste flow addressed to landfill. The study also demonstrates that there are diminishing returns in the recovery of materials: a rate of material recycling beyond 50% implies higher costs, and these are not justified by positive externalities. It also emerges that after accounting for positive externalities (displaced energy sources), incineration can very well compare with recycling also in terms of social cost/benefit.

Questo rapporto presenta i risultati dello studio condotto dallo IEFE – Bocconi nell'ambito del progetto **“Analisi comparativa di percorsi per il recupero di materia e di energia da rifiuti”**, finanziato dal PRIN, (Anno 2006 - Prot. N. 2006097921_005) a cui hanno partecipato le seguenti Unità Operative (tra parentesi i nomi dei rispettivi coordinatori):

Dip. Energia - Politecnico di Milano (Stefano Consonni) – coordinatore nazionale

DIAR - Politecnico di Milano (Michele Giugliano)

DIEM - Università di Bologna (Cesare Saccani)

DICA - Università di Trento (Marco Ragazzi)

IEFE - Università Bocconi (Luigi De Paoli e Antonio Massarutto)

1.	INTRODUZIONE.....	3
2.	LE IPOTESI DEL MODELLO.....	5
2.1	LE CARATTERISTICHE DEI BACINI DI RIFERIMENTO.....	5
2.2	GLI SCENARI	6
3.	CARATTERIZZAZIONE DELLE DIVERSE TECNOLOGIE DI RACCOLTA, TRATTAMENTO E SMALTIMENTO.....	33
3.1	IL MODELLO DI ANALISI: GENERALITÀ.....	33
3.2	I COSTI INDUSTRIALI DELLE FASI ELEMENTARI.....	34
3.3	I COSTI ESTERNI	44
3.4	I RICAVI DERIVANTI DAL RECUPERO	47
4.	ANALISI COMPARATA DEGLI SCENARI	50
4.1	I FLUSSI QUANTITATIVI	50
4.2	IL COSTO DI GESTIONE DEL RIFIUTO URBANO	54
5.	L'ANALISI DI SENSITIVITÀ	64
5.1	PREMESSA.....	64
5.2	L'ANALISI DELLA VARIAZIONE DEI RICAVI DEI MATERIALI RECUPERATI.....	65
5.3	L'ANALISI DEI COSTI ESTERNI	66
5.4	LO SFRUTTAMENTO DI ECONOMIE DI SCALA PER IL TERMOVALORIZZATORE NEGLI SCENARI CON BACINO PICCOLO.....	67
5.5	LA CAPACITÀ IN ECCESSO	68
5.6	L'EFFICIENZA DI RECUPERO ENERGETICO	69
5.7	L'INCIDENZA DEGLI SCARTI	72
5.8	L'EFFICIENZA ECONOMICA DEL RICICLO SPINTO: UN APPROFONDIMENTO	73
6.	CONCLUSIONI	79
7.	BIBLIOGRAFIA.....	81

1. Introduzione

Esiste una cospicua letteratura internazionale dedicata alla valutazione delle opzioni alternative per la gestione dei rifiuti urbani. Tra gli studi che possono essere considerati un riferimento, ci limitiamo a citare quelli promossi dalla Commissione europea (European Commission, 2000; Eunomia-Ecotec, 2001). Sui risultati di questi studi è in larga parte fondata l'attuale politica di gestione dei rifiuti che, a livello europeo, prevede una gerarchia di principi gestionali che vede al primo posto la riduzione dei rifiuti alla fonte, seguita dal riuso, dal riciclo di materiali, dal recupero indiretto (di energia o materiali secondari) e, solo come estrema soluzione, lo smaltimento in discarica.

In genere, la gran parte delle analisi fornisce termini di confronto tra le diverse tecnologie (es. incenerimento vs. discarica; recupero energetico vs. recupero di materiali). Nella gran parte dei casi, essi indicano una preferibilità della valorizzazione rispetto alla discarica, e della valorizzazione diretta (riciclo) rispetto a quella indiretta (energetica), almeno per i principali materiali. La nuova Dir. Quadro sui rifiuti stabilisce che per i flussi prioritari (si tratta di materiali come carta, vetro, plastica e metalli) si deve puntare a un obiettivo di riciclo effettivo pari almeno al 50%.

Un limite importante di questo approccio consiste tuttavia nel non tenere conto del bilancio dei materiali. Se consideriamo tutti i rifiuti prodotti da una determinata popolazione e non solo determinati flussi, infatti, occorre tener conto del fatto che non tutte le soluzioni possono essere adatte al 100% dei rifiuti. Nella maggior parte dei casi, non si tratta tanto di scegliere una tecnologia oppure un'altra, quanto piuttosto di comporre un mix di soluzioni differenziate, in cui l'enfasi sull'impiego di questa o quella soluzione può certamente variare, ma tutte le soluzioni sono in qualche misura necessarie. Se non si considera il vincolo che tutti i rifiuti devono essere in qualche modo trattati, il confronto può risultare falsato.

Un altro elemento importante che non sempre viene tenuto debitamente in considerazione consiste nei rendimenti delle diverse soluzioni, i quali sono tendenzialmente decrescenti all'aumentare del livello di separazione. In altri termini, possiamo attenderci che il costo per kg del recupero della plastica o della carta non sia un dato costante, ma vari con il variare dell'intensità della raccolta di ciascun materiale.

Occorre, infine, tenere conto che nella valutazione, soprattutto comparata, occorre porre una grande attenzione nel distinguere le varie voci di costo in funzione della prospettiva adottata (privata o sociale, locale o generale). In particolare, occorre prestare attenzione ai costi e benefici esterni, ma nel contempo occorre depurare l'analisi da tutte le voci di costo e beneficio che, a livello sociale, rappresentano partite di giro (es. incentivi e sussidi).

Il nostro studio propone un'analisi della gestione integrata dei rifiuti urbani attraverso una metodologia che cerca di rimuovere tutte le difficoltà sopra citate, con l'obiettivo di offrire una valutazione comparata.

Lo studio adotta e sviluppa una metodologia già abbozzata in Massarutto e Kaulard, 1997. Si fa riferimento a due realtà territoriali fittizie, modellate prendendo spunto da caratteristiche tipiche di bacini territoriali italiani; vengono così formulate alcune ipotesi relative alla quantità di rifiuti e alla loro composizione, alla struttura insediativa e alla densità urbana. In secondo luogo, vengono prese come riferimento alcune tecnologie elementari, per le quali viene ricostruita attraverso un modello di tipo ingegneristico la funzione di costo. Assemblando le diverse fasi tecnologiche elementari, vengono simulati alcuni scenari alternativi, che combinano in vario modo, da un lato, diverse modalità di effettuazione della raccolta differenziata e risposta da parte dei cittadini, dall'altro diverse soluzioni impiantistiche per il trattamento dei flussi di materiali, tanto quelli raccolti in modo separato che i residui. Particolare attenzione viene posta, in ciascuno scenario, nel caratterizzare i flussi di materiale tenendo conto delle varie fasi di lavorazione e degli scarti che si generano in ciascuna fase, che diverranno poi input per altre fasi. Per ogni scenario, dunque, il modello ricostruisce un costo di gestione complessivo che, rapportato alle quantità di rifiuti iniziali, esprime anche il costo unitario per t di rifiuto complessivo generato nell'ambito territoriale in questione.

La prospettiva dell'analisi è quella sociale. Per ciascuno scenario vengono dapprima considerati i costi diretti necessari per trattare le diverse frazioni di rifiuto e i benefici diretti ricavati dal collocamento sul

mercato dei sottoprodotti. In una seconda fase a questo calcolo vengono aggiunti, evidenziandoli separatamente, i costi esterni relativi alle emissioni inquinanti di ciascuno scenario, nonché i benefici esterni, questi ultimi corrispondenti al valore delle emissioni evitate nei cicli produttivi che vengono sostituiti attraverso il recupero di materiali ed energia dai rifiuti.

Come detto, ciascuno scenario si caratterizza per un diverso mix di soluzioni, che tuttavia combinano tutte, in un modo o nell'altro, le medesime tecnologie; gli scenari si differenziano per il dosaggio delle varie soluzioni più che per un'alternativa secca tra tecnologie. Per ciascuna tecnologia elementare (le varie tipologie di raccolta, la cernita dei materiali, il trattamento per il recupero, l'incenerimento, la discarica ecc.) vengono stimati costi unitari riferiti alle quantità effettivamente trattate con quella tecnologia.

Per ogni scenario, i costi unitari vengono moltiplicati per le quantità effettivamente trattate in ciascuna fase, ottenendo un totale parziale che, diviso per i rifiuti totali prodotti nel bacino, misura l'incidenza del costo della fase tecnologica considerata. In questo modo il costo totale di gestione del rifiuto in ciascuno scenario può essere calcolato sommando il costo, e analogamente il beneficio, delle varie fasi elementari.

Ciascuno scenario è costruito con ipotesi elaborate ad hoc, e che si basano sul lavoro svolto dalle altre Unità Operative del presente progetto (Consonni et al., 2010). Le ipotesi alla base degli scenari sono ovviamente arbitrarie, per quanto siano state validate attraverso un capillare confronto con il dato reale riscontrato sul campo dai gestori. Per temperare le limitazioni dovute a questa arbitrarietà, sono state da un lato svolte alcune analisi di sensibilità riferite alle ipotesi più critiche; in secondo luogo si è cercato di evidenziare le condizioni che rendono realistiche le ipotesi adottate e le possibili conseguenze del verificarsi di condizioni diverse. Tali elaborazioni sono comunque confortanti in quanto mostrano la sostanziale robustezza dei risultati raggiunti.

In particolare, l'analisi da noi svolta enfatizza la complementarità, più che la contrapposizione, tra le diverse soluzioni tecnologiche. In particolare, le diverse forme di valorizzazione, sia diretta attraverso il recupero di materiali sia indiretta attraverso il recupero energetico, concorrono a raggiungere l'obiettivo principale di una politica sostenibile di gestione dei rifiuti, che è e deve essere quello di ridurre il più possibile i flussi destinati alla discarica. Il recupero di materiali, per quanto spinte siano le raccolte differenziate, genera comunque a valle una quantità non trascurabile di residui che si originano dalle varie fasi di selezione e trattamento. Per quanto il dato possa essere affinato e migliorato dall'esperienza e dalla migliore educazione dei cittadini, sembra di poter affermare che la quantità di residui aumenta con il livello di differenziazione, e che vi siano quindi dei rendimenti decrescenti nel recupero diretto di materiali. Oltre un certo livello, spingere ulteriormente la raccolta differenziata non porta benefici apprezzabili in termini di materiali recuperati, mentre i costi si incrementano vistosamente.

Non si può stabilire a priori e una volta per tutte quale sia la soglia oltre la quale i benefici del recupero di materia sono sopravanzati dai costi, facendo emergere la convenienza di altre forme di recupero; ciò dipende anche in buona misura dall'effettiva risposta dei cittadini alle raccolte differenziate, dalla praticabilità di soluzioni come la raccolta porta a porta o il compostaggio domestico, ma anche da altre circostanze: l'opportunità di valorizzare il calore generato dagli impianti di incenerimento oltre che l'energia elettrica; la disponibilità di flussi di altri materiali che, miscelati ai rifiuti urbani, possono renderli più facilmente collocabili; le condizioni locali dei mercati dei materiali più difficoltosi da trasportare come gli inerti. Tuttavia, la nostra analisi colloca il livello ottimale di recupero di materia intorno al 50%.

Il presente rapporto è strutturato come segue. Nel par. 2 sono presentate le principali ipotesi alla base del modello: i bacini territoriali di riferimento, la composizione dei rifiuti, gli scenari. Per ciascuno scenario vengono analizzati nel dettaglio i bilanci di massa delle diverse fasi, la composizione dei flussi di materiali e le potenzialità di recupero energetico. Il par. 3 esamina una per una le diverse tecnologie elementari e per ciascuna stima un costo unitario (per t in ingresso), considerando i costi operativi, di investimento e di remunerazione del capitale. Tutti i costi sono stimati al netto di tasse e sussidi. Successivamente vengono analizzati i costi esterni, questi ultimi basandoci su un confronto con la più recente letteratura. Il par. 4 presenta i risultati complessivi per i diversi scenari e li pone a confronto tra loro. Il par. 5 sviluppa infine un'analisi di sensibilità riferita alle ipotesi più critiche alla base del modello.

2. Le ipotesi del modello

2.1 Le caratteristiche dei bacini di riferimento

2.1.1. Introduzione

L'analisi che segue ipotizza alcuni scenari alternativi di gestione del rifiuto urbano in un bacino territoriale fittizio e ricostruito a tavolino, ma con caratteristiche che si ispirano al contesto territoriale dell'Italia centro-settentrionale. Tale metodologia si ispira a quella adottata in Massarutto e Kaulard (1997), modificandone tuttavia numerosi assunti.

Sono stati considerati due tipologie di ambito territoriale:

- Bacino grande (750.000 t/anno di RU), che ipotizza una realtà territoriale urbano-metropolitana, con insediamenti concentrati nel centro urbano e con caratteristiche suburbane nelle zone periferiche;
- Bacino piccolo (150.000 t/anno di RU), che ipotizza invece un contesto con un centro urbano di medie dimensioni, una zona suburbana e una zona prevalentemente rurale, con una maggiore dispersione della popolazione. Si ipotizza che 1/3 dei rifiuti siano prodotti in contesti urbani o suburbani e i rimanenti 2/3 in contesti rurali.

Le ipotesi di riferimento per i due bacini sono state sviluppate dall'U.O. del Politecnico di Milano, prendendo come riferimento una situazione caratteristica dell'Italia centro-settentrionale. Le ipotesi relative agli aspetti demografici e insediativi sono state formulate prendendo a riferimento il dato Istat, mentre le ipotesi relative alla composizione dei rifiuti sono state validate attraverso il confronto con operatori del settore.

Nel seguito del paragrafo verranno riassunte le principali ipotesi adottate per caratterizzare i due bacini.

2.1.2. Quantità e composizione del rifiuto

Si ipotizza una produzione di RU pari rispettivamente a 750.000 t per il bacino grande e 150.000 t per il bacino piccolo.

Considerando il rifiuto lordo come il rifiuto prodotto a monte di qualsiasi raccolta, si è ipotizzato che esso abbia la composizione merceologica riportata nella Tabella 2.1.

Tale composizione è riferita al flusso di rifiuto urbano ordinario, conferito con continuità al sistema di raccolta (differenziata e indifferenziata).

Il modello non prende perciò in considerazione i servizi di spazzamento e lavaggio di strade e marciapiede, né i rifiuti contenuti nei cestini stradali.

Un altro aspetto rilevante è dato dal fatto che la presente analisi non va a considerare lo smaltimento dei rifiuti pericolosi, dei rifiuti ingombranti e dei rifiuti elettronici, costituenti la frazione "altro" del rifiuto lordo, in quanto si ipotizza che ogni gestore, dopo aver raccolto tali materiali nelle ecopiazze, abbia organizzato un sistema di gestione specifico per tali flussi di rifiuti. Il presente lavoro si concentra cioè

esclusivamente sui flussi di rifiuto urbano conferiti al sistema in modo continuativo, e sulle frazioni merceologiche presenti in tali flussi.

Tabella 2.1 - Composizione merceologica del rifiuto lordo assunta come riferimento.

Caratterizzazione del rifiuto lordo	
Categorie	%
Carta e cellullosici	25,8
Legno	4,6
Plastica	14,6
Vetro e inerti	5,8
Metalli (escluso Alluminio)	2,1
Alluminio	0,6
FORSU - integra	21,9
FORSU – sottovaglio	9,0
Verde	8,6
Sottovaglio inerte	3,9
Altro	3,1
Totale	100

Un altro limite del modello è costituito dal fatto di non prendere in considerazione l'esistenza di altri flussi di rifiuto, soprattutto di origine commerciale e industriale, con i quali la gestione del RU potrebbe entrare in sinergia. Tale opportunità è peraltro implicitamente prevista nei sottoscenari che prevedono la produzione di CDR-Q o materiali da destinare al recupero indiretto (es. nel ciclo dell'edilizia), in quanto tali trattamenti presuppongono in genere la miscelazione del RU con altri rifiuti.

Per facilitare la modellizzazione della fase di bioessiccazione, nei casi in cui essa è presente, la frazione merceologica "sottovaglio", presente nel rifiuto lordo, è stata suddivisa per il 30% in "sottovaglio inerte" e per il 70% in "sottovaglio FORSU". La prima frazione è costituita da inerti, mentre la seconda da frazione organica. Riguardo a quest'ultima, va precisato che in realtà, nel rifiuto lordo come frazione in sé, non esiste ancora tale frazione, in quanto viene a prodursi nel momento in cui si effettua la raccolta della FORSU. Infatti, a causa della movimentazione del materiale, parte della FORSU si disintegra dando origine al "sottovaglio FORSU". Conseguentemente, la frazione "FORSU" indica la FORSU integra, priva di sottovaglio.

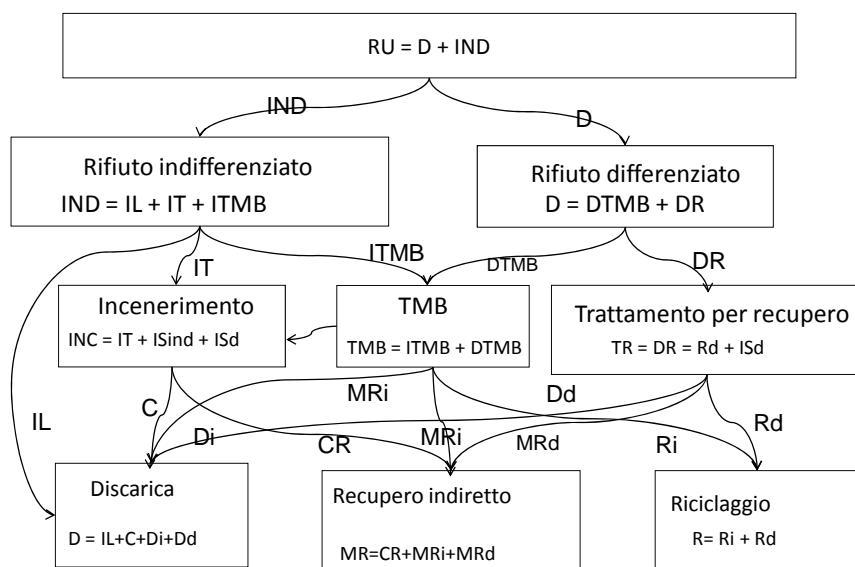
2.2 Gli scenari

2.2.1 Presentazione degli Scenari

In questo lavoro esaminiamo alcuni scenari alternativi, tutti caratterizzati da alcune ipotesi:

- Bilancio di massa complessivo (Figura 2.1): tutti i materiali che vengono conferiti al sistema devono essere trattati in qualche modo, in modo che valga un'identità tra la massa in entrata e la massa in uscita;
- La massa in entrata è rappresentata da tutti i materiali a vario titolo conferiti al sistema; la massa in uscita può essere re-immessa nel circuito produttivo, restituita all'ambiente collocandola in discarica oppure disperdersi (es. sotto forma di fumi, evaporazione);
- Il bilancio di massa deve valere anche per ciascuna singola fase; ogni attività pertanto prevede un flusso in entrata e uno in uscita; gli scarti di ciascuna attività rappresentano input per altre attività;
- Ciascuno scenario si caratterizza per una diversa composizione delle diverse tecnologie elementari: metodi di raccolta, trattamenti, modalità di conferimento finale;
- Poiché in ciascuno scenario l'impiego delle varie tecnologie elementari è diverso, i costi unitari variano in funzione delle economie di scala e di densità, essendo ciascuna fase ottimizzata rispetto alle ipotesi previste in ciascuno scenario.

Figura 2.1 – Il bilancio di massa della gestione integrata del rifiuto.



Sono stati esaminati 6 scenari caratterizzati da diverse modalità di conferimento (stradale, porta a porta) e un progressivo aumento della quota di materiali raccolti da avviare alla filiera del riciclo:

- Scenario S35: si effettua una raccolta differenziata delle principali frazioni riciclabili; la resa di intercettazione è pari al 35% del rifiuto totale. La modalità di raccolta si basa sui contenitori stradali;
- Scenario S50: si effettua una raccolta differenziata totale del 49,7%, senza attuare la raccolta dell'umido domestico. La modalità di raccolta si basa sui contenitori stradali;
- Scenario P50: si effettua una raccolta differenziata totale del 50,3%, nonché si esegue la raccolta dell'umido domestico. La modalità di raccolta prescelta è il porta a porta;
- Scenario P65: si effettua una raccolta differenziata totale del 65%, inoltre si realizza la raccolta dell'umido domestico. La modalità di raccolta prescelta è il porta a porta;

- Scenario PC75: si effettua una raccolta differenziata totale (comprensiva anche dell'umido raccolto nei composte domestiche) di circa il 79% per il bacino piccolo e del 71% per il bacino grande. La modalità di raccolta prescelta è il porta a porta ed è previsto che l'umido domestico, per il 70% nel bacino piccolo e per il 40% nel bacino grande, sia trattato direttamente da ciascuna famiglia in appositi composte domestiche, con riutilizzo diretto del compost presso la stessa abitazione. In questo scenario sono inoltre previste rese di intercettazione maggiori ed una minore quantità di scarti di selezione, rispetto allo scenario P65;
- Scenario PC85: si effettua una raccolta differenziata totale pari all'85%. La modalità di raccolta prescelta è il porta a porta ed è previsto un elevato livello di compostaggio domestico. Infatti, il 70% dell'umido domestico, sia nel bacino piccolo che nel bacino grande, viene raccolto nei composte domestiche. La parte rimanente della FORSU, per il 25% viene raccolta mediante il porta a porta, mentre per il 5% viene raccolta nel RUR. Vengono inoltre ipotizzate delle rese di intercettazione molto elevate, accompagnate da alti livelli di recupero effettivo e, conseguentemente, lo scenario presenta una quantità di scarti molto bassa.

Tali ipotesi sono rappresentate sinteticamente nella Tabella 2.2.

Tabella 2.2 – Modalità di raccolta nei diversi scenari ipotizzati.

Scenario di RD	BACINO PICCOLO		BACINO GRANDE
	Urbano (1/3)	Extraurbano (2/3)	Urbano
S35	Stradale (Mix)	Stradale (Mix)	Stradale (Mix)
S50	Stradale (Mix)	Stradale (Mix)	Stradale (Mix)
P50	PaP (Mix)	PaP (Mix)	PaP (Mix)
P65	PaP (Mix)	PaP (Mix)	PaP (Mix)
PC75	PaP (Mix)	PaP (Mix)	PaP (Mix)
PC85	PaP (Mix)	PaP (Mix)	PaP (Mix)

Sono poi state formulate ipotesi alternative riguardo alla gestione del rifiuto residuo (RUR), rappresentato dalla frazione indifferenziata (IND), dagli scarti della selezione a valle della raccolta differenziata e dagli scarti delle fasi di trattamento per il recupero. Per ciascuno scenario vengono considerate alcune opzioni alternative che generano altrettanti sotto-scenari. In particolare, si considera:

- Incenerimento del RUR e scarti in impianti dedicati;
- Selezione secco/umido, bio-stabilizzazione della frazione umida e incenerimento della frazione secca;
- Selezione secco/umido, bio-stabilizzazione della frazione umida, produzione di CDR e impiego in impianti dedicati;
- Selezione secco/umido, bio-stabilizzazione della frazione umida, produzione di CDR-Q e impiego in impianti industriali come i cementifici.

Dal punto di vista degli impianti di selezione e trattamento, si è considerato un polo integrato, nel quale sono stati previsti:

- Un termovalorizzatore, dimensionato in ognuno dei cinque scenari, in cui esso è presente, dimensionato in funzione del quantitativo di RUR in entrata e con caratteristiche qualitative tarate rispetto ai materiali trattati (RUR tal quale, CDR);
- Una discarica, dove recapitare solo i residui della combustione dei rifiuti, ubicata a 50 km dal polo integrato;
- I diversi impianti di selezione per i materiali da riciclare;

- Un impianto di compostaggio, solo per gli scenari P50, P65, PC75 e PC85;
- Gli impianti per la selezione del RUR e la produzione della sabbia sintetica, solo per lo Scenario PC85. Nel caso di bacino piccolo, gli impianti necessari sono 2, mentre nel caso di bacino grande, sono 8;
- Due impianti di trattamento meccanico biologico, per il sottoscenario di smaltimento in cui si produce CDR-Q da collocare presso due cementifici. In questo caso è previsto che i due cementifici si trovino ad una distanza di 80 km dal polo integrato, ed in prossimità di ciascuno dei due sia localizzato un impianto dotato di una linea di produzione di CDR-Q.

Inoltre, per il recupero dei materiali derivanti dalla raccolta differenziata, ai fini del calcolo dei costi di trasporto, si è ipotizzato l'esistenza di un impianto di recupero per ciascun materiale ubicato alla seguente distanza dal polo integrato:

- Carta: 61 km;
- Plastica: 79,5 km;
- Vetro: 81,4 km;
- Legno: 111,7 km;
- Alluminio: 86,6 km;
- Acciaio: 96,4 km.

Le Figure 2.2 e 2.3 riassumono i bilanci di massa previsti nei diversi scenari, rispettivamente per il bacino piccolo e quello grande.

Figura 2.2 – Gli scenari per il bacino piccolo

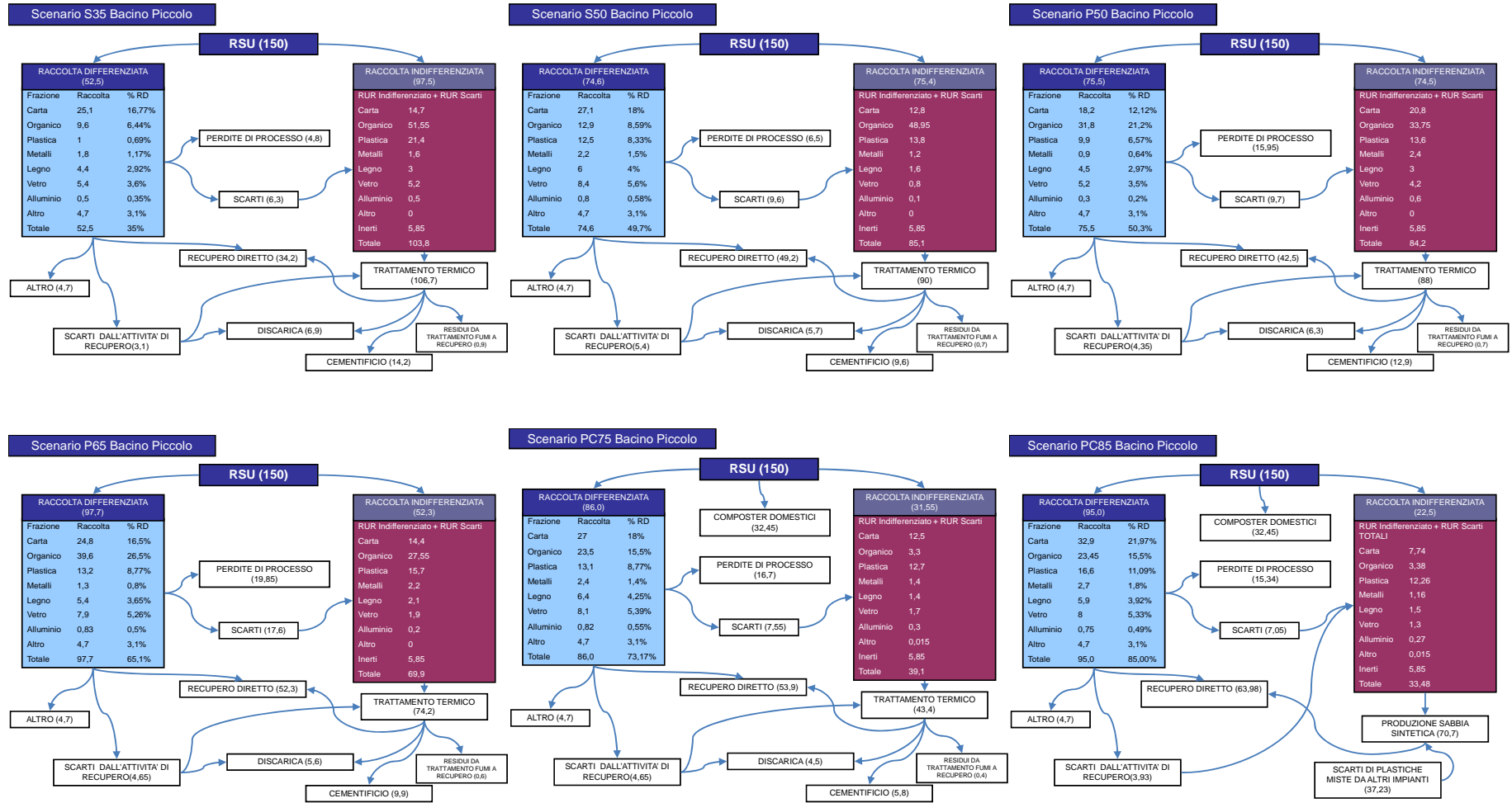
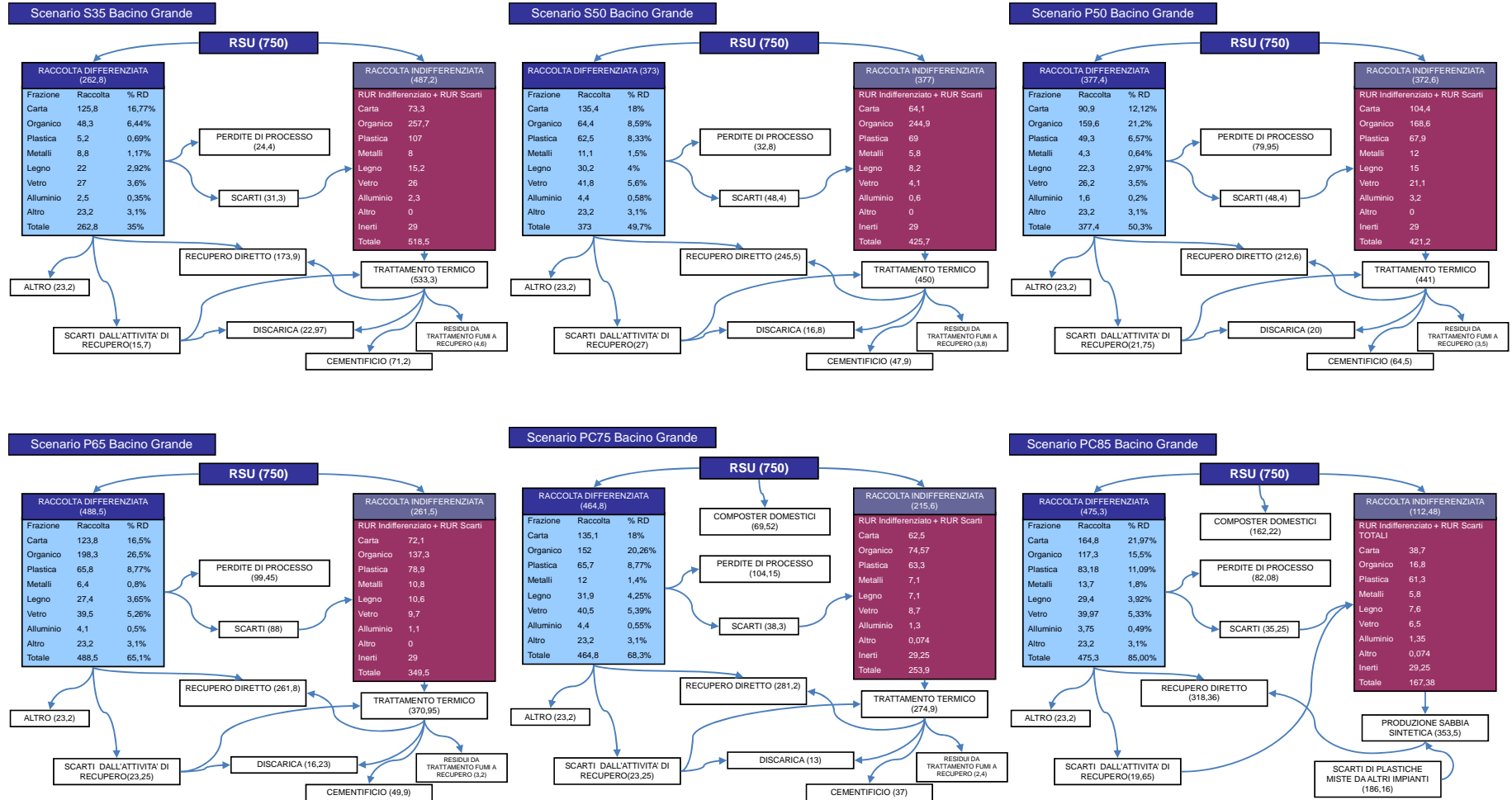


Figura 2.3– Gli scenari per il bacino grande



2.2.2. La gestione del flusso differenziato: raccolte e recupero di materia

Nelle successive sei tabelle (da 2.3 a 2.8) viene riportato, per ciascuno scenario analizzato, il quantitativo di materiale intercettato nella fase di raccolta con riferimento alle diverse frazioni merceologiche, nelle due ipotesi di bacino grande (750.000 t/a) e bacino piccolo (150.000 t/a).

Le rese di intercettazione delle diverse frazioni sono state ipotizzate dopo un attento confronto con alcune realtà gestionali esistenti. Viene ipotizzato che vi sia una corrispondenza non solo tra il tipo di raccolta (stradale, porta a porta, eco piazzola) ma anche tra l'intensità con cui ciascuna modalità viene praticata (es. frequenza del ritiro, densità dei punti di conferimento e distanza dalle abitazioni). Per questa ragione, vengono identificate due modalità prevalenti (stradale, porta a porta) per le quali vengono formulate ipotesi alternative (numero di frazioni, numero di contenitori, frequenza del ritiro) che conducono alle rese complessive ipotizzate. Ovviamente, si tratta di ipotesi che potrebbero essere contraddette dal dato empirico di questa o quella realtà; consapevoli della rilevanza dell'ipotesi, l'abbiamo comunque sottoposta ad un'analisi di sensitività per testarne la robustezza.

Normalmente, nel compostaggio della FORSU, si prevede la miscelazione della stessa FORSU con del materiale ligneo cellulosico, in questo caso la frazione verde, la quale, in base a valori di letteratura, deve rappresentare almeno il 30% del composto totale, al fine di giungere ad un'adeguata struttura dello stesso composto finale. Pertanto, nei primi quattro scenari, le percentuali di intercettazione della FORSU (integra e sottovaglio) e del verde, sono state scelte proprio in modo che il verde rappresenti il 30% e la FORSU costituisca il 70% della miscela verde - FORSU complessiva, la quale viene inviata al compostaggio misto.

Nel caso degli scenari PC75 e PC85 si ipotizza che una certa frazione della FORSU e del sottovaglio FORSU venga compostata nelle abitazioni, ricorrendo all'utilizzo di appositi composte domestiche. Nello Scenario PC75 questa frazione corrisponde al 70% nel caso del bacino piccolo, il quale è per 2/3 extraurbano, ed al 30% nel caso del bacino grande. Si ipotizza inoltre che la raccolta porta a porta dell'umido, nelle situazioni in cui non vengano utilizzati i composte domestiche, abbia una resa del 25% nel bacino piccolo e del 40% nel bacino grande. Mentre, per lo Scenario PC85, si ipotizza che, per entrambi i bacini, la FORSU venga raccolta nelle modalità previste per lo Scenario PC75 bacino piccolo, con un compostaggio domestico pari al 70% del totale, una raccolta della FORSU porta a porta pari al 25% e col rimanente 5% di FORSU raccolto mediante RUR.

Una volta raccolto, il materiale intercettato con la raccolta differenziata viene inviato al recupero di materia che prevede una prima fase di separazione dei diversi materiali raccolti con il multimateriale, laddove sia stata utilizzata tale tipologia di raccolta (scenari S35, P65, PC75 e PC85), una fase di selezione di ciascun materiale ed una successiva fase di recupero vero e proprio. Da queste fasi emergono due diverse tipologie di scarti: la componente RUR da Scarti, la quale ingloba gli scarti derivanti dalle operazioni di separazione e di selezione dei diversi materiali intercettati, e la componente Scarti dal Recupero, che invece include gli scarti conseguenti alle operazioni di recupero. Il residuo composto da RUR e scarti della selezione, negli scenari S35, S50, P50, P65, PC75, viene avviato al recupero energetico, mentre nello scenario PC85 è destinato alla produzione di sabbia sintetica. Con l'esclusione dello scenario PC85, gli scarti dal Recupero vengono invece divisi in due frazioni, una prima destinata allo smaltimento in discarica, rappresentante lo 0,2% del rifiuto totale per gli scenari S35 ed S50 e lo 0,1% per gli scenari rimanenti, ed una seconda destinata al recupero energetico, che si aggiunge al RUR ed al RUR da Scarti. Mentre, nel caso dello scenario PC85, essa viene interamente avviata alla produzione di sabbia sintetica.

Nella Tabella 2.9 si riportano le quantità della componente RUR da Scarti suddivise per materiale. Negli scenari PC75 e PC85 si ipotizza un notevole incremento di efficienza nelle operazioni di separazione e selezione, il quale consente un maggior recupero di materiali ed una minore produzione di scarti.

Le Tabelle 2.10 e 2.11 mostrano i quantitativi di materiali ottenuti dopo l'attività di riciclo in ciascuno degli scenari di raccolta, per il bacino grande e per quello piccolo.

Tabella 2.3 - Scenario S35: fase di raccolta.

SCENARIO S35				
Frazioni	Tipologia di raccolta	Resa di intercettazione (%)	Materiale intercettato (% sulla t iniziale)	
			Bacino piccolo	Bacino grande
Carta e cellullosici	Mono stradale	65	16,77%	16,77%
Legno	piattaforma	64	2,92%	2,92%
Multimateriale – Plastica	stradale	4,7	0,69%	0,69%
Multimateriale - Vetro e inerti	stradale	62	3,60%	3,60%
Metalli no Al	piattaforma	49	0,99%	0,99%
Multimateriale - Metallo no Al	stradale	8,5	0,18%	0,18%
Alluminio	piattaforma	53	0,33%	0,33%
Multimateriale – Al	stradale	2,9	0,02%	0,02%
FORSU	-	0	0	0
Sottovaglio FORSU	-	0	0	0
Verde	piattaforma	75	6,4%	6,4%
Sottovaglio inerte	-	0	0	0
Altro	piattaforma	100	3,09%	3,09%
Totale	-	-	35%	35%

Tabella 2.4 - Scenario S50: fase di raccolta.

SCENARIO S50				
Frazioni	Tipologia di raccolta	Resa di intercettazione (%)	Materiale intercettato (% sulla t iniziale)	
			Bacino piccolo	Bacino grande
Carta e cellullosici	mono stradale	70	18,05%	18,05%
Legno	Piattaforma	88	4,02%	4,02%
Plastica	mono stradale	57	8,32%	8,32%
Vetro e inerti	mono stradale	96	5,57%	5,57%
Metalli no Al	Piattaforma	70	1,48%	1,48%
Alluminio	Piattaforma	92	0,58%	0,58%
FORSU	-	0	0	0
Sottovaglio FORSU	-	0	0	0
Verde	Piattaforma	100	8,59%	8,59%
Sottovaglio inerte	-	0	0	0
Altro	Piattaforma	100	3,09%	3,09%
Totale	-	-	49,7%	49,7%

Tabella 2.5 - Scenario P50: fase di raccolta.

SCENARIO P50				
Frazioni	Tipologia di raccolta	Resa di intercettazione (%)	Materiale intercettato (% sulla t iniziale)	
			Bacino piccolo	Bacino grande
Carta e cellulose	mono porta a porta	47	12,12%	12,12%
Legno	Piattaforma	65	2,96%	2,96%
Plastica	mono porta a porta	45	6,58%	6,58%
Vetro e inerti	mono porta a porta	60	3,48%	3,48%
Metalli no Al	Piattaforma	27,5	0,58%	0,58%
Alluminio	Piattaforma	34	0,21%	0,21%
FORSU	mono porta a porta	48	10,5%	10,5%
Sottovaglio FORSU	mono porta a porta	48	4,34%	4,34%
Verde	Piattaforma	75	6,44%	6,44%
Sottovaglio inerte	-	0	0	0
Altro	Piattaforma	100	3,09%	3,09%
Totale	-	-	50,3%	50,3%

Tabella 2.6 - Scenario P 65: fase di raccolta.

SCENARIO P65				
Frazioni	Tipologia di raccolta	Resa di intercettazione (%)	Materiale intercettato (% sulla t iniziale)	
			Bacino piccolo	Bacino grande
Carta e cellulose	Mono porta a porta	64	16,51%	16,51%
Legno	Piattaforma	80	3,65%	3,65%
Multimateriale - Plastica	porta a porta	60	8,76%	8,76%
Vetro e inerti	Mono porta a porta	91	5,25%	5,25%
Metalli no Al	Piattaforma	5	0,11%	0,11%
Multimateriale – Metallo no Al	porta a porta	35	0,74%	0,74%
Alluminio	Piattaforma	58	0,37%	0,37%
Multimateriale – Al	porta a porta	30	0,19%	0,19%
FORSU	Mono porta a porta	60	13,12%	13,12%
Sottovaglio FORSU	Mono porta a porta	60	5,42%	5,42%
Verde	Piattaforma	92	7,9%	7,9%
Sottovaglio inerte	-	0	0	0
Altro	Piattaforma	100	3,09%	3,09%
Totale	-	-	65,1%	65,1%

Tabella 2.7 - Scenario PC75: fase di raccolta.

SCENARIO PC75				
Frazioni	Tipologia di raccolta	Resa di intercettazione (%)	Materiale intercettato (% sulla t iniziale)	
			Bacino piccolo	Bacino grande
Carta e cellulosici	Mono porta a porta	69,84	18,02%	18,02%
Legno	Piattaforma	92,48	4,25%	4,25%
Multimateriale - Plastica	PM porta a porta	60	8,76%	8,76%
Vetro e inerti	Mono porta a porta	93,03	5,40%	5,40%
Metalli no Al	Piattaforma	9,52	0,2%	0,2%
Multimateriale – Metallo no Al	PM porta a porta	66,6	1,4%	1,4%
Alluminio	Piattaforma	64,56	0,39%	0,39%
Multimateriale – Al	PM porta a porta	33,4	0,2%	0,2%
FORSU	Mono porta a porta	25 B.p. - 40 B.g.	5,48%	8,76%
Sottovaglio FORSU	Mono porta a porta	25 B.p. - 40 B.g.	2,25%	3,6%
Verde	Piattaforma	92	7,91%	7,91%
Sottovaglio inerte	-	0	0	0
Altro	Piattaforma	100	3,09%	3,09%
Compostaggio domestico	Composter domestici	70 B.p. - 30 B.g.	21,63%	9,27%
Totale			78,97%	71,25%

Tabella 2.8 - Scenario PC85: fase di raccolta.

SCENARIO PC85				
Frazioni	Tipologia di raccolta	Resa di intercettazione (%)	Materiale intercettato (% sulla t iniziale)	
			Bacino piccolo	Bacino grande
Carta e cellulosici	Mono porta a porta	85,17	21,97%	21,97%
Legno	Piattaforma	85,25	3,92%	3,92%
Multimateriale - Plastica	porta a porta	75,96	11,09%	11,09%
Vetro e inerti	Mono porta a porta	91,90	5,33%	5,33%
Metalli no Al	Piattaforma	10,9	0,23%	0,23%
Multimateriale – Metallo no Al	porta a porta	76,30	1,6%	1,6%
Alluminio	Piattaforma	61,11	0,37%	0,37%
Multimateriale – Al	porta a porta	22,22	0,13%	0,13%
FORSU	Mono porta a porta	25	5,48%	5,48%
Sottovaglio FORSU	Mono porta a porta	25	2,25%	2,25%
Verde	Piattaforma	92	7,91%	7,91%
Sottovaglio inerte	-	0	0	0
Altro	Piattaforma	99,68	3,09%	3,09%
Compostaggio domestico	Composter domestici	70	21,63%	21,63%
Totale			85%	85%

Tabella 2.9 - Quantitativi di materiali presenti nella componente RUR da Scarti.

RUR DA SCARTI (t)												
	BACINO PICCOLO						BACINO GRANDE					
	S35	S50	P50	P65	PC75	PC85	S35	S50	P50	P65	PC75	PC85
Carta	1.132	1.219	364	496	587	879	5.659	6.094	1.819	2.477	2.895	4.695
Legno	592	814	601	740	674	220	2.961	4.072	3.008	3.701	3.327	1.174
Plastica	567	4.645	1.807	7.216	2.919	3.075	2.836	23.225	9.036	36.080	14.404	16.431
Vetro	1.892	485	732	1.105	849	450	9.459	2.427	3.661	5.523	4.191	2.402
Metalli	333	413	163	353	499	571	1.667	2.064	811	1.765	2.460	3.051
Alluminio	111	180	66	229	182	90	557	899	332	1.145	898	480
Altro	1.631	1.930	5.946	7.464	1.911	1.768	8.151	9.647	29.730	37.322	9.925	7.023
Totale	6.258	9.686	9.679	17.603	7.621	7.051	31.290	48.428	48.397	88.013	38.099	35.257

Tabella 2.10 - Quantitativi di materiali ottenuti dopo l'attività di riciclo negli scenari, per il bacino grande.

BACINO GRANDE	Scenario S35	Scenario S50	Scenario P50	Scenario P65	Scenario PC75	Scenario PC85
Carta e cellullosici	107.029	115.262	79.416	108.141	118.035	154.800
Legno	18.024	24.783	18.306	22.530	26.220	26.910
Plastica	1.786	30.270	31.066	22.894	39.420	48.180
Vetro	17.567	39.420	22.493	33.926	34.800	39.975
Metalli no Al	7.146	9.067	3.562	4.596	8.663	9.923
Alluminio	2.049	3.449	1.275	3.014	3.195	3.150
Compost	14.497	19.330	47.873	59.502	45.612	35.183
Totale	168.098	241.581	203.990	254.605	275.944	315.121

Tabella 2.11 - Quantitativi di materiali ottenuti dopo l'attività di riciclo negli scenari, per il bacino piccolo.

BACINO PICCOLO	Scenario S35	Scenario S50	Scenario P50	Scenario P65	Scenario PC75	Scenario PC85
Carta e cellullosici	21.406	23.052	15.883	21.628	23.607	30.960
Legno	3.605	4.957	3.661	4.506	5.244	5.381
Plastica	357	6.054	6.213	4.579	7.884	9.636
Vetro	3.513	7.884	4.499	6.785	6.960	7.395
Metalli no Al	1.429	1.813	712	919	1.733	1.985
Alluminio	410	690	255	603	639	630
Compost	2.899	3.866	9.575	11.900	7.036	7.036
Totale	33.620	48.316	40.798	50.921	53.103	63.024

2.2.3. Il flusso di rifiuto indifferenziato

Il flusso di rifiuto indifferenziato si origina considerando, da un lato, il materiale non intercettato dalle raccolte differenziate e, in secondo luogo, dai materiali scartati nelle varie fasi del ciclo della differenziata. I quantitativi di RUR (RUR indifferenziato + RUR da Scarti) da inviare al recupero di energia e la corrispondente composizione merceologica sono riportati nelle seguenti Tabelle 2.12 e 2.13.

A tali quantitativi va aggiunta anche la frazione della componente Scarti dal Recupero destinata a recupero energetico, ovvero gli scarti prodotti nell'attività di recupero della carta, del legno e della plastica, che sono riportati separatamente nella Tabella 2.14. Si considera che tali scarti siano costituiti dallo stesso materiale, ovvero che gli scarti dal recupero della carta siano carta, quelli dal recupero del legno siano legno e quelli dal recupero della plastica siano plastica con perciò le stesse caratteristiche (PCI, composizione elementare, ecc.) delle frazioni del rifiuto, ad eccezione dell'umidità dello scarto di pulper a cui viene associata un'umidità maggiore di quella della carta. Si ipotizza che questi scarti vengano mandati direttamente all'impianto di recupero di energia senza che subiscano alcun pretrattamento. Nel caso dello scenario PC75, si ipotizzano delle quantità degli scarti da recupero simili a quelle dello scenario P65.

Considerando, invece, la frazione degli Scarti dal Recupero destinata a smaltimento, essa è costituita prevalentemente dagli scarti dal recupero del ferro, i quali sono delle scorie, e vengono smaltiti in discarica, mentre gli scarti dal recupero dell'alluminio, costituiti da scorie saline, vengono solitamente recuperati e trattati nello stesso impianto di recupero dell'alluminio e gli eventuali ultimi residui vengono smaltiti in discarica. Si ipotizza inoltre che il recupero del vetro non produca scarti in quanto il forno ha un rendimento del 100%.

I successivi diagrammi (Figure 2.4 e 2.5) riportano, in percentuale, il bilancio di materia complessivo di ciascuno scenario. Il materiale intercettato con la raccolta differenziata è stato così suddiviso:

- RD Selettiva: identifica la frazione "altro" del rifiuto lordo;
- Materiale Riciclato: indica il materiale ottenuto dopo il riciclo, ed è comprensivo del compost;
- Perdite di Processo del Recupero: rappresenta il compostaggio totale. Per lo Scenario PC75 il compostaggio totale include sia il compostaggio domestico sia il compostaggio delle frazioni raccolte con la raccolta porta a porta. Il valore è al netto del compost prodotto, frazione che, come si è detto, viene considerata nel materiale secondario;
- Scarti dal Recupero: definisce gli scarti derivanti dall'attività di recupero. Di questi, una parte viene avviata a smaltimento (scorie dal recupero di ferro e alluminio), ed una parte viene avviata a recupero di energia senza subire alcun pretrattamento (scarti dal recupero di carta, legno e plastica);
- RUR da Scarti: comprende sia gli scarti derivanti dalla separazione multi materiale sia quelli derivanti dalla selezione di ogni materiale.

Si noti che, per gli Scenari PC75 e PC85, la raccolta differenziata comprende anche il compostaggio domestico, mentre la voce: "Materiale a recupero di energia" raggruppa il RUR indifferenziato, il RUR da Scarti e gli Scarti dal Recupero, ovvero le frazioni che vengono avviate al termovalorizzatore. Infine, con la voce: "Materiale per la produzione della sabbia sintetica" si indica, nello Scenario PC85, il materiale indirizzato all'impianto di produzione della sabbia sintetica.

A questo punto è pertanto possibile evidenziare per ciascun scenario il totale delle tonnellate di RSU che dovranno essere avviate a recupero energetico annualmente. Tali quantità sono presentate nella tabella 2.15. Tuttavia, si consideri che per tutti gli scenari analizzati, è stato ipotizzato che l'impianto abbia una capacità potenziale di circa il 10% superiore all'effettivo quantitativo di tonnellate termovalorizzate nell'anno e che questo eccesso di capacità non sia utilizzato.

Tabella 2.12 - Quantità di RUR (RUR indifferenziato + RUR da Scarti) da inviare al recupero di energia in ogni scenario.

	BACINO GRANDE					BACINO PICCOLO				
	S35	S50	P50	P65	PC75	S35	S50	P50	P65	PC75
Carta, cellulosici	73.369	64.131	104.351	72.121	62.270	14.674	12.826	20.870	14.424	12.454
Legno	15.299	8.184	15.002	10.556	7.094	3.060	1.637	3.000	2.111	1.419
Plastica	107.231	69.010	67.941	78.907	63.278	21.446	13.802	13.588	15.781	12.656
Vetro e inerti	26.023	4.171	21.098	9.664	8.700	5.205	834	4.220	1.933	1.740
Metalli no Al	8.006	5.884	11.966	10.823	7.088	1.601	1.177	2.393	2.165	1.418
Alluminio	2.273	596	3.200	1.117	1.305	455	119	640	223	261
FORSU	164.003	164.003	101.026	85.281	49.275	32.801	32.801	20.205	17.056	1.643
Sottovaglio FORSU	67.769	67.769	41.746	35.240	20.250	13.554	13.554	8.349	7.048	675
Verde	25.773	12.887	25.773	17.010	5.160	5.155	2.577	5.155	3.402	1.032
Sottovaglio inerte	29.044	29.044	29.044	29.044	29.250	5.809	5.809	5.809	5.809	5.850
Altro	0	0	0	0	74	0	0	0	0	15
TOTALE	518.790	425.678	421.147	349.763	253.744	103.758	85.136	84.229	69.953	39.163

Tabella 2.13 - Composizione merceologica del RUR (RUR indifferenziato + RUR da Scarti) nei vari scenari (%).

COMPOSIZIONE MERCEOLOGICA RUR						
	SCENARIO S35	SCENARIO S50	SCENARIO P50	SCENARIO P65	SCENARIO PC75	
					PICCOLO	GRANDE
Carta e cellulosici	14,14	15,07	24,78	20,62	34,78	27,45
Legno	2,95	1,92	3,56	3,02	3,82	3,01
Plastica	20,67	16,21	16,13	22,56	32,30	25,49
Vetro e inerti	5,02	0,98	5,01	2,76	4,01	3,16
Metalli no Al	1,54	1,38	2,84	3,09	3,27	2,58
Alluminio	0,44	0,14	0,76	0,32	0,6	0,47
FORSU	31,61	38,53	23,99	24,38	3,78	17,92
Sottovaglio FORSU	13,06	15,92	9,91	10,08	1,56	7,37
Verde	4,97	3,03	6,12	4,86	2,38	1,88
Sottovaglio inerte	5,60	6,82	6,90	8,30	13,48	10,64
Altro	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,03
TOTALE	100,00	100,00	100,00	100,00	100	100

Tabella 2.14 - Scarti derivanti dall'attività di recupero di carta, legno e plastica inviati a recupero*.

SCARTI DAL RECUPERO (t)												
	BACINO PICCOLO						BACINO GRANDE					
	S35	S50	P50	P65	PC75	PC85	S35	S50	P50	P65	PC75	PC85
Da recupero carta	2.612	2.813	1.938	2.639	2.639	828	13.060	14.064	9.690	13.195	13.195	4.138
Da recupero legno	190	261	193	237	237	207	949	1.304	963	1.186	1.186	1.034
Da recupero plastica	106	1.799	1.846	1.360	1.360	2.896	530	8.993	9.230	6.802	6.802	14.482

* Per i primi 5 scenari a recupero energetico, mentre per il PC85 per la produzione di sabbia sintetica.

Tabella 2.15 - Rifiuto urbano residuo totale avviato a recupero energetico per gli scenari interessati.

Quantità, t/a	BACINO PICCOLO					BACINO GRANDE				
	S35	S50	P50	P65	PC75	S35	S50	P50	P65	PC75
RUR Raccolto	97.500	75.450	74.550	52.350	31.541	487.500	377.250	372.750	261.750	215.645
RUR da Scarti	6.258	9.686	9.679	17.603	7.621	31.290	48.428	48.397	88.013	38.099
Scarti dal recupero	2.908	4.873	3.977	4.236	4.236	14.539	24.361	19.883	21.183	21.183
Totale	106.666	90.009	88.206	74.189	43.398	533.329	450.039	441.030	370.946	274.927

Figura 2.4 - Il bilancio di materia degli Scenari S35, S50 ed P50 (% della t di origine).

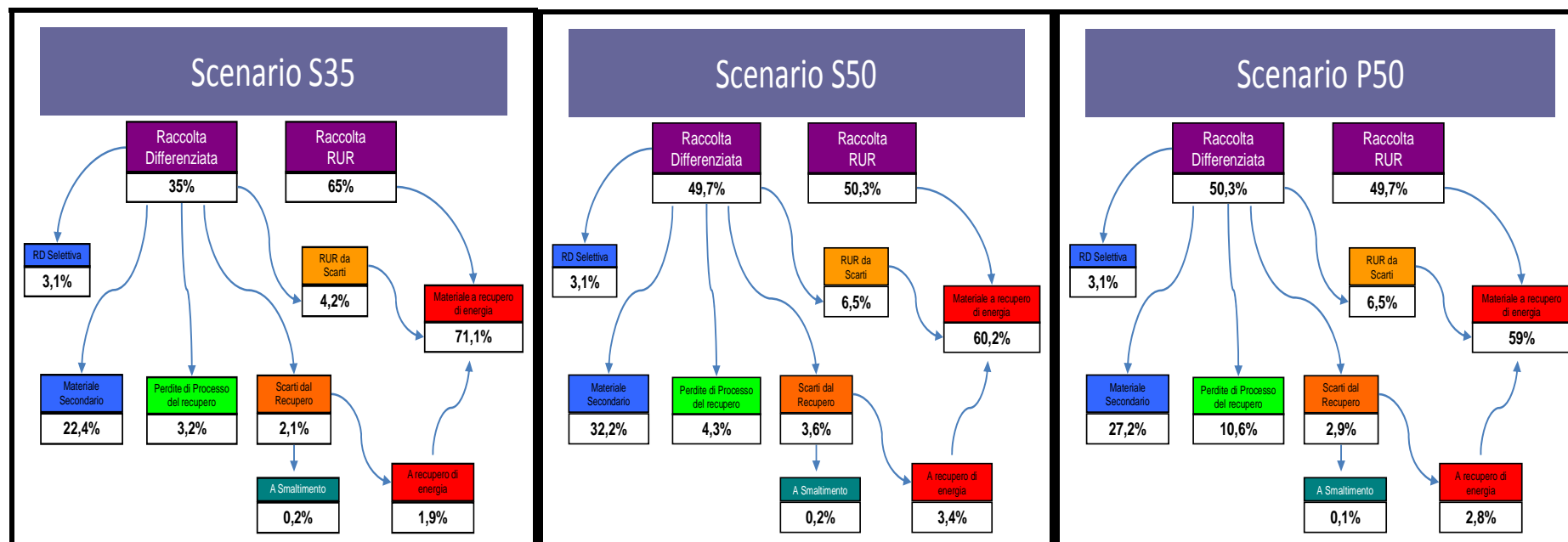
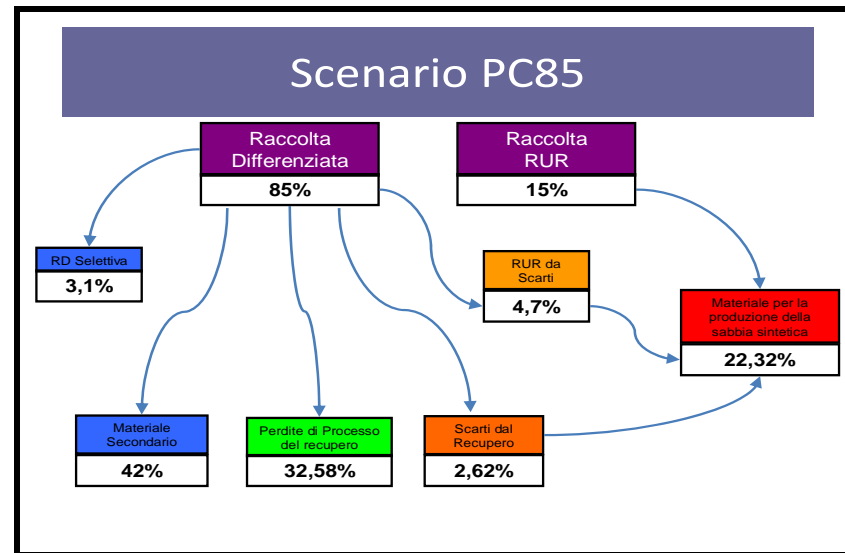
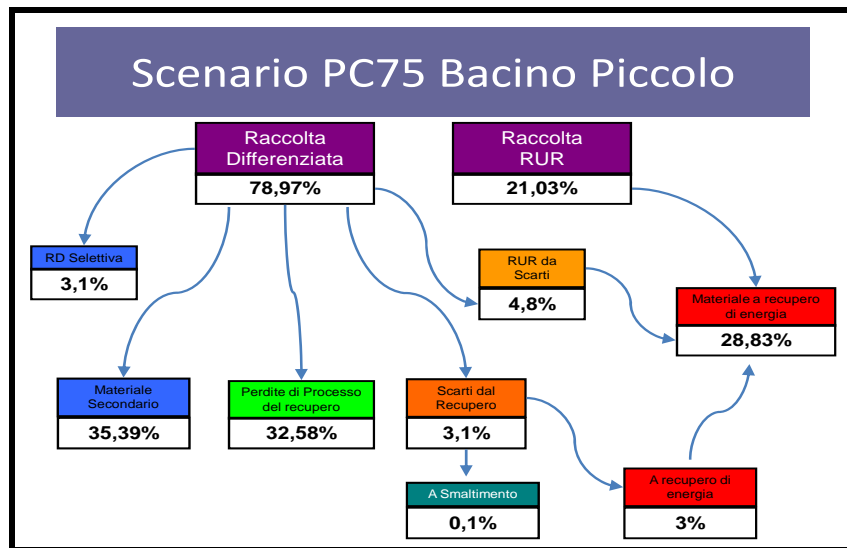
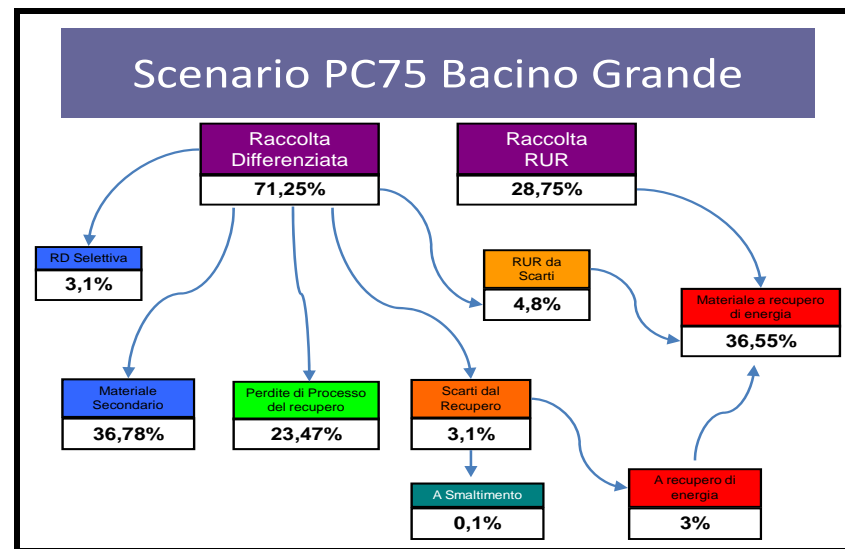
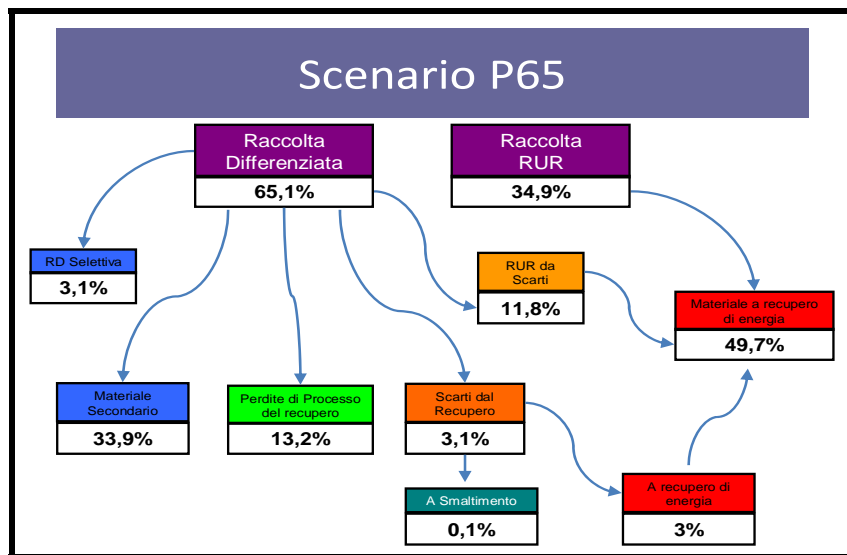


Figura 2.5 - Il bilancio di materia degli Scenari P65, PC75 Bacino Grande, PC75 Bacino Piccolo e PC85 in percentuali.



2.2.4. La gestione del RUR

Il recupero di energia: incenerimento del RUR

In tutti gli scenari a parte l'ultimo (PC85), il RUR, definito come si è visto nel par. 2.1.2, viene inviato al recupero di energia. Come si è detto tale flusso comprende il RUR indifferenziato e gli scarti provenienti dalla selezione operata a valle delle raccolte differenziate (RUR scarti). Inoltre, sono stati conteggiati in tali scarti anche quelli della fase di raffinazione del compost prodotto a partire da FORSU e verde.

Si ipotizza che l'insieme che risulta da questi tre flussi sia composto da Carbonio, Cloro, Idrogeno, Azoto, Zolfo, Ceneri ed Umidità, con le percentuali in massa sul tal quale differenziate in base alla tipologia di scenario e riportate nella seguente Tabella 2.16. La stessa tabella presenta anche il potere calorifico inferiore, le quantità sottoposte a recupero energetico ed il conseguente potenziale calorifico annuo per i diversi scenari.

Tabella 2.16 - Composizione e potere calorifico del rifiuto in ingresso all'impianto di recupero energetico.

Elementi contenuti nel mix	Scenario S35	Scenario S50	Scenario P50	Scenario P65	Scenario PC75
C	25,89	25,12	25,81	27,84	27,84
Di cui rinnovabile:	13,61	14,61	15,17	13,81	13,81
Cl	0,28	0,28	0,24	0,28	0,28
F	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
H	4,02	3,94	3,95	4,28	4,28
O	14,29	14,83	16,14	14,91	14,91
N	1,20	1,36	1,07	1,36	1,36
S	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
Ceneri	15,66	12,46	17,73	16,42	16,42
Umidità	38,69	42,05	35,07	34,96	34,96
PCI, MJ/kg	9,89	9,55	9,73	10,81	10,81
Quantità - Bacino grande, t/a	533.329	450.039	441.030	370.946	370.946
Quantità - Bacino piccolo, t/a	106.666	90.009	88.206	74.189	74.189
Poten. - Bacino grande, TJ/a	5.274	4.296	4.292	4.009	4.009
Poten. - Bacino piccolo, TJ/a	1.055	859	858	802	802

Il potere calorifico contenuto nel RUR può essere sfruttato in due modi, ipotizzando che l'impianto sia progettato per recuperare solo energia elettrica oppure congiuntamente energia elettrica e termica.

Nel recupero d'energia, per i cinque scenari relativi al bacino grande di 750.000 t/a, si ipotizza in un primo caso l'impiego di un termovalorizzatore dotato di recupero di energia elettrica, ed in un secondo caso

l'impiego di un impianto di termovalorizzazione cogenerativo, ovvero dotato sia del recupero di energia elettrica, sia del recupero di calore.

Nei cinque scenari relativi al bacino piccolo, si ipotizza l'impiego solo di un impianto di termovalorizzazione dotato di cogenerazione, essendo il solo recupero di energia elettrica inefficiente a una scala impiantistica così piccola.

Viene inoltre ipotizzato che gli impianti siano operativi per 7.500 ore annue, con un fattore di penalizzazione delle prestazioni del 2% ed un rendimento di distribuzione di potenza termica del 90%. Nelle successive tabelle (da 2.17 a 2.19) si riportano i bilanci di energia differenziati in base al bacino ed alla relativa tecnologia dell'impianto di termovalorizzazione impiegato per ciascun scenario analizzato. Si noti che per lo Scenario PC75 sono stati utilizzati i dati dello scenario P65.

Tabella 2.17 - Bilanci di energia nel bacino grande - Impianto dotato solo del recupero di energia elettrica.

BACINO GRANDE – SOLO ELETTRICO	Scenario S35	Scenario S50	Scenario P50	Scenario P65	Scenario PC75
Potenza di combustione, MW _{PCI}	195,322	159,099	158,945	148,470	148,470
Portata di combustibile, kg/s	19,753	16,668	16,334	13,739	13,739
Potenza elettrica lorda, MW _E	62,10	50,04	50,10	46,73	46,73
Autonconsumi, MW _E	6,18	5,16	5,13	4,68	4,68
Potenza elettrica netta, MW _E	55,92	44,88	44,97	42,05	42,05
Autoconsumi / Pot. lorda, %	9,95	10,31	10,24	10,01	10,01
Rendimento elettrico lordo, %	31,79	31,45	31,52	31,47	31,47
Rendimento elettrico netto, %	28,63	28,21	28,29	28,32	28,32
Portata fumi secchi, kmol/s	4,0848	3,3516	3,2824	3,0219	3,0219
Tenore di O ₂ , % _{vd}	8,418	8,493	8,374	8,306	8,306
Contenuto di CO ₂ , % _{vd}	10,421	10,419	10,698	10,495	10,495
Emissione di CO ₂ , kg/s	18,734	15,368	15,454	13,958	13,958
Fumi secchi normalizzati*, m ³ /s	115,363	94,089	93,028	86,109	86,109
Grandezze specifiche - corrette**:					
Produzione elettrica, kWh _E /kg _{IN}	0,770	0,732	0,749	0,832	0,832
Produzione fumi*, m ³ /kg _{IN}	5,833	5,636	5,689	6,256	6,256
Produzione fumi*, m ³ /kWh _E	7,578	7,701	7,599	7,522	7,522
Emissione di CO ₂ , kg/kg _{IN}	0,947	0,921	0,945	1,014	1,014
Di cui fossile, kg/kg _{IN}	0,449	0,385	0,390	0,511	0,511
Emissione di CO ₂ , kg/kWh _E	1,231	1,258	1,262	1,219	1,219
Di cui fossile, kg/kWh _E	0,584	0,527	0,521	0,615	0,615

Tabella 2.18 - Bilanci di energia nel bacino grande - Impianto di cogenerazione.

BACINO GRANDE – COGENERATIVO	Scenario S35	Scenario S50	Scenario P50	Scenario P65	Scenario PC75
Potenza di combustione, MW _{PCI}	195,322	159,099	158,945	148,470	148,470
Portata di combustibile, kg/s	19,753	16,668	16,334	13,739	13,739
Potenza elettrica lorda, MW _E	55,45	44,59	44,65	41,62	41,62
Autonconsumi, MW _E	5,78	4,82	4,80	4,36	4,36
Potenza elettrica netta, MW _E	49,67	39,77	39,85	37,26	37,26
Autoconsumi / Pot. lorda, %	10,42	10,81	10,75	10,48	10,48
Pot. termica cogenerata, MW _{th}	32,87	26,83	26,85	25,14	25,14
Rendimento elettrico lordo, %	28,39	28,03	28,09	28,03	28,03
Rendimento elettrico netto, %	25,43	25,00	25,07	25,10	25,10
Rendimento termico, %	16,83	16,86	16,89	16,93	16,93
Portata fumi secchi, kmol/s	4,0848	3,3516	3,2824	3,0219	3,0219
Tenore di O ₂ , % _{vd}	8,418	8,493	8,374	8,306	8,306
Contenuto di CO ₂ , % _{vd}	10,421	10,419	10,698	10,495	10,495
Emissione di CO ₂ , kg/s	18,734	15,368	15,454	13,957	13,957
Fumi secchi normalizzati*, m _n ³ /s	115,363	94,088	93,028	86,109	86,109
Grandezze specifiche - corrette**:					
Produzione elettrica, kWh _E /kg _{IN}	0,685	0,650	0,664	0,738	0,738
Energia termica utile, MJ _{th} /kg _{IN}	1,498	1,449	1,479	1,647	1,647
Produzione fumi*, m _n ³ /kg _{IN}	5,840	5,645	5,695	6,268	6,268
Produzione fumi*, m _n ³ /kWh _E	8,532	8,691	8,576	8,489	8,489
Emissione di CO ₂ , kg/kg _{IN}	0,948	0,922	0,946	1,016	1,016
di cui fossile, kg/kg _{IN}	0,450	0,386	0,390	0,512	0,512
Emissione di CO ₂ , kg/kWh _E	1,386	1,420	1,425	1,376	1,376
Di cui fossile, kg/kWh _E	0,657	0,594	0,587	0,694	0,694

Tabella 2.19 - Bilanci di energia nel bacino piccolo - Impianto cogenerativo.

BACINO PICCOLO – COGENERATIVO	Scenario S35	Scenario S50	Scenario P50	Scenario P65	Scenario PC75
Potenza di combustione, MW _{PCI}	39,064	31,820	31,789	29,694	29,694
Portata di combustibile, kg/s	3,951	3,334	3,267	2,748	2,748
Potenza elettrica lorda, MW _E	7,93	6,27	6,28	5,81	5,81
Autonconsumi, MW _E	1,28	1,09	1,08	0,98	0,98
Potenza elettrica netta, MW _E	6,65	5,18	5,20	4,83	4,83
Autoconsumi / Pot. lorda, %	16,14	17,38	17,20	16,87	16,87
Pot. termica cogenerata, MW _{th}	9,79	8,20	8,21	7,69	7,69
Rendimento elettrico lordo, %	20,30	19,70	19,76	19,57	19,57
Rendimento elettrico netto, %	17,02	16,28	16,36	16,27	16,27
Rendimento termico, %	25,06	25,77	25,83	25,90	25,90
Portata fumi secchi, kmol/s	0,817	0,670	0,657	0,604	0,604
Tenore di O ₂ , % _{vd}	8,418	8,493	8,374	8,306	8,306
Contenuto di CO ₂ , % _{vd}	10,421	10,418	10,698	10,495	10,495
Emissione di CO ₂ , kg/s	3,747	3,073	3,091	2,791	2,791
Fumi secchi normalizzati*, m _n ³ /s	23,073	18,816	18,607	17,220	17,220
Grandezze specifiche - corrette**:					
Produzione elettrica, kWh _E /kg _{IN}	0,458	0,423	0,433	0,479	0,479
Energia termica utile, MJ _{th} /kg _{IN}	2,230	2,214	2,262	2,519	2,519
Produzione fumi*, m _n ³ /kg _{IN}	5,840	5,644	5,696	6,267	6,267
Produzione fumi*, m _n ³ /kWh _E	12,745	13,343	13,144	13,097	13,097
Emissione di CO ₂ , kg/kg _{IN}	0,948	0,922	0,946	1,016	1,016
Di cui fossile, kg/kg _{IN}	0,450	0,386	0,390	0,512	0,512
Emissione di CO ₂ , kg/kWh _E	2,070	2,179	2,184	2,123	2,123
Di cui fossile, kg/kWh _E	0,981	0,912	0,900	1,070	1,070

* Fumi secchi all'11%_{vol} di O₂

** La produzione di elettricità è stata calcolata partendo dalla potenza elettrica netta nominale (evidenziata in giallo) e corretta mediante un fattore di penalizzazione delle prestazioni del 2%, che tiene conto dello sporcamento, del funzionamento ai carichi parziali, degli avviamenti e degli arresti. L'energia termica utile (cogenerata), invece, è stata calcolata introducendo un rendimento della rete di distribuzione del 90%.

Il recupero energetico alternativo: la produzione di CDR e CDR-Q

In alternativa all'utilizzo della termovalorizzazione del rifiuto tal quale come soluzione di smaltimento, si è pensato di presentare un sottoscenario alternativo che preveda la produzione di un CDR di qualità da impiegare nei cementifici. Considerando per esempio lo Scenario S35 bacino piccolo, si ipotizza che le raccolte differenziate ed indifferenziate rimangano invariate e che muti il trattamento dei rifiuti indifferenziati. Si è scelto il bacino piccolo in quanto la capacità dei cementifici utilizzati comporterebbe l'impiego di una decina di cementifici considerando un bacino grande, e questa situazione sarebbe irrealistica.

Pertanto, i rifiuti indifferenziati vengono avviati a due impianti di trattamento meccanico biologico dove sono sottoposti ad un processo di selezione secco - umido in modo da separare la frazione organica dalla frazione secca. La frazione organica viene inviata alla linea di biostabilizzazione da cui si otterrà in uscita biostabilizzato da avviare in discarica. Mentre, la frazione secca, viene avviata a due impianti di produzione del CDR-Q, ciascuno dei quali è ubicato nei pressi del cementificio utilizzatore. Qui la frazione secca viene deferrizzata, triturrata, essicata e miscelata con le plastiche non clorurate ed i pneumatici fuori uso, al fine di ottenere un combustibile di qualità elevata. Dai dati forniti da uno studio di Nomisma Energia, per ottenere 1 tonnellata di CDR-Q sono necessarie 1,89 tonnellate di rifiuto indifferenziato, pertanto, da 1 tonnellata di rifiuto indifferenziato si ottengono 529 kg di CDR-Q, i quali comprendono 70 kg di PNC e 70 kg di PFU. Nella Tabella 2.20 si riportano i bilanci di massa di questo sottoscenario.

Tabella 2.20 - Bilanci di massa per la produzione del CDR-Q nello scenario S35.

Frazione Merceologica	%	Quantità	Destinazione
Biostabilizzato	29,64%	31.615	Discarica
Perdite di processo	20,00%	21.333	
Frazione Secca	39,05%	41.653	CDR-Q
Scarti 19.12.12	10,24%	10.922	Termovalorizzatore
Alluminio	0,12%	123	Recupero
Metalli ferrosi	0,95%	1.016	Recupero
Scorie da smaltire	2,49%	2.654	Discarica
Scarti da smaltire	0,6%	648	Discarica

Prendendo spunto da alcuni dati del Progetto Idea Granda¹, si ipotizza che per ottenere 1 t di CDR-Q sia necessaria 1,0323 t di frazione secca, quindi avendo in entrata all'impianto 41.653 tonnellate di frazione secca, a queste vengono aggiunte 7.475 tonnellate di pneumatici fuori uso e 7.475 tonnellate di plastiche non clorurate. Si ipotizza inoltre che durante il processo dalla frazione secca evaporino 15.606 tonnellate di acqua, che si smaltiscano in discarica 648 tonnellate di scarti e che le tonnellate di CDR-Q prodotte ammontino a 40.350, le quali verranno impiegate in co-combustione con il pet coke nei cementifici.

Si assume che l'investimento necessario per l'impiego del CDR-Q in ciascun cementificio consenta una sostituzione calorica del 36% e preveda l'installazione di un impianto per l'utilizzo del CDR-Q, nonché una

¹ Progetto realizzato dalla collaborazione fra la Provincia di Cuneo, il gruppo Buzzi Unicem, la Pirelli Ambiente Renewable Energy e l'Azienda Cuneese Smaltimento Rifiuti (A.C.S.R.). Il progetto IDEA Granda (Integrazione Dell'Energia nell'Ambiente, nel cuore della Provincia di Cuneo), è stato il primo Sistema Integrato in Europa eco-sostenibile ed economicamente autosufficiente per la produzione di combustibile di qualità dai rifiuti solidi urbani a tecnologia Pirelli Ambiente Renewable Energy.

valvola di bypass, al fine di tutelare la torre cicloni nel lungo periodo. Pertanto, si considera che in ciascuno dei due cementifici vi siano due forni ed in ciascun forno vengano bruciate 1,33 t/h per 7992 ore annue, per un totale di 21.312 t annue.

Sono stati inoltre considerati due ulteriori sottoscenari di smaltimento alternativi, che sono stati applicati a tutti gli scenari con l'eccezione dello scenario PC85. Il primo di questi prevede che, inseguito ad un processo di selezione secco – umido, la frazione organica sia destinata alla produzione di biostabilizzato da collocare in discarica, mentre la frazione secca sia destinata alla termovalorizzazione. Nella sottostante Tabella 2.21 si riportano i bilanci di massa di tale sottoscenario con le destinazioni finali delle diverse frazioni merceologiche.

Nel secondo sottoscenario alternativo si ipotizza invece che, successivamente al processo di selezione secco – umido, la frazione umida sia utilizzata per la produzione di biostabilizzato, mentre la frazione secca sia destinata alla produzione di CDR di qualità normale, il quale verrà poi inviato ad un impianto dedicato. I bilanci di massa di questo sottoscenario e le destinazioni delle frazioni merceologiche sono presentate nella successiva Tabella 2.22.

Tabella 2.21 - Bilanci di massa nel sottoscenario che prevede la produzione di biostabilizzato.

Frazione merceologica	%	Destinazione
Biostabilizzato	12,00%	Discarica
Frazione secca	78,93%	Termovalorizzatore
Perdite di processo	8,00%	
Scorie derivanti dalla termovalorizzazione	16,84%	Discarica
Alluminio	0,12%	Recupero
Metalli ferrosi	0,95%	Recupero

Tabella 2.22 - Bilanci di massa nel sottoscenario che prevede la produzione di biostabilizzato e CDR.

Frazione merceologica	%	Destinazioni
Biostabilizzato	15,00%	Discarica
Inerti	10,00%	Discarica
Perdite di processo	15,00%	
CDR	58,93%	Impianto dedicato
Scorie in uscita dall'impianto dedicato	7,70%	Discarica
Alluminio	0,12%	Recupero
Metalli ferrosi	0,95%	Recupero

La trasformazione in inerti per l'edilizia (sabbia sintetica)

Per i primi scenari, sia nel bacino piccolo che in quello grande, il RUR viene destinato al recupero energetico, per il quale sono state formulate le ipotesi presentate nel paragrafo successivo.

Nel caso dello Scenario PC85 si ipotizza invece che la fase di smaltimento sia caratterizzata dalla trasformazione in sabbia sintetica del RUR e degli scarti derivanti dai processi di selezione e di recupero, prendendo spunto dall'esperienza del Centro Riciclo Vedelago.

L'applicazione di tale ciclo di lavorazione necessita che siano verificate alcune ipotesi, le quali sono indispensabili per il ricorso a questa soluzione di smaltimento. Innanzitutto, si ipotizza che i rifiuti presenti nel RUR, anche in seguito ad un'elevata sensibilizzazione della popolazione coinvolta, abbiano un basso livello di umidità. In secondo luogo, poiché la miscela per la produzione della sabbia sintetica è costituita per il 70% da scarti di plastiche miste e per il 30% da RUR, è evidente che le plastiche presenti nello stesso RUR e negli scarti dei processi di selezione e recupero, non siano sufficienti a coprire il fabbisogno di plastiche miste e, pertanto, si ipotizza che gli scarti di plastica mancanti vengano conferiti da altri impianti di selezione, considerando come distanza un raggio massimo di 400 km dal polo integrato. Una volta prodotta, si ipotizza che la sabbia sintetica abbia un valore nullo e venga collocata presso gli utilizzatori, prevalentemente nell'edilizia come inerte o presso l'industria dello stampaggio, sfruttando i viaggi di raccolta dei rifiuti.

Tabella 2.23 - Quantità di scarti derivanti dall'attività di selezione e recupero per lo Scenario PC85.

SCENARIO PC85 SCARTI (tonnellate)	BACINO GRANDE	BACINO PICCOLO
Carta e cellullosici	10.000	2.000
Legno	2.500	500
Plastica	35.000	7.000
Vetro e inerti	3.000	600
Metalli no Al	3.811	762
Alluminio	600	120
TOTALE	54.911	10.982

Tabella 2.24 - Quantità di RUR (RUR indifferenziato + RUR scarti) per lo Scenario PC85.

SCENARIO PC85 RUR (tonnellate)	BACINO GRANDE	BACINO PICCOLO
Carta e cellullosici	38.700	7.740
Legno	7.590	1.518
Plastica	61.320	12.264
Vetro e inerti	6.525	1.305
Metalli no Al	5.828	1.166
Alluminio	1.350	270
FORSU	8.213	1.643
Sottovaglio FORSU	3.375	675
Verde	5.160	1.032
Sottovaglio inerte	29.250	5.850
Altro	74	15
TOTALE	167.384	33.477

Tabella 2.25 - Composizione merceologica del RUR per produrre la sabbia sintetica nello Scenario PC85.

COMPOSIZIONE MERCEOLOGICA RUR (%)	
	SCENARIO PC85
Carta e cellulose	23,12
Legno	4,53
Plastica	36,63
Vetro e inerti	3,90
Metalli no Al	3,48
Alluminio	0,81
FORSU	4,91
Sottovaglio FORSU	2,02
Verde	3,08
Sottovaglio inerte	17,47
Altro	0,04
TOTALE	100,00

Nella tabella 2.23 si riportano gli scarti derivanti dalle attività di selezione e recupero nello Scenario PC85, mentre nelle tabelle 2.24 e 2.25 vengono riportate, sempre per lo Scenario PC85, le quantità di RUR (RUR indifferenziato + RUR scarti) e la relativa composizione percentuale.

Nella Tabella 2.26 si elencano le quantità di plastiche miste e di RUR necessarie al fine di costituire la miscela per la produzione della sabbia sintetica, sia per il bacino grande sia per il bacino piccolo, nello Scenario PC85.

Tabella 2.26 - Quantità di RUR (RUR indifferenziato + RUR scarti) per lo Scenario PC85.

SCENARIO PC85	BACINO GRANDE	BACINO PICCOLO
RUR Totale	167.384	33.477
Plastiche miste presenti nel RUR totale	61.320	12.264
30% della miscela costituito da RUR	106.064	21.213
Plastiche necessarie per costituire il 70% della miscela	247.483	49.497
Plastiche mancanti da far arrivare	186.163	37.233

La discarica

In tutti gli scenari, si ipotizza che la frazione non ulteriormente valorizzabile sia destinata alla discarica. Il costo totale della discarica include sia il costo industriale, sia il costo di scarsità, le cui componenti sono descritte nel cap. 3.

Il dimensionamento della discarica (volume) è dato dal quantitativo di rifiuti conferito per un periodo di 10 anni, ipotizzando un compattamento dei rifiuti (provenienti da trattamenti termici) pari a 1,25 t/m³ (Tabella 2.27).

Tabella 2.27 - Dati riepilogativi relativi alla discarica per tutti gli scenari considerati.

Discarica		Bacino piccolo					Bacino grande				
		S35	S50	P50	P65	PC75	S35	S50	P50	P65	PC75
Quantità in entrata	t/anno	6.908	5.691	5.417	6.324	4.519	22.970	16.882	16.263	20.046	12.996
	%	4,60%	3,80%	3,60%	4,20%	3,01%	3,06%	2,25%	2,16%	2,67%	1,73%
Durata	anni	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Compattamento	t/m ³	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25
Dimensione discarica	000 m ³	52,87	43,13	43,34	49,39	34,95	171,76	123,06	124,11	154,37	97,96
Produzione specifica CO ₂	t/tIN	0,28	0,27	0,3	0,28	0,28	0,28	0,27	0,3	0,28	0,28
CO ₂ prodotta	t/anno	1.830	1.452	1.608	1.706	1.223	5.947	4.144	4.605	5.333	3.428

Dati riepilogativi sulla gestione del RUR nei diversi scenari: bilanci di massa e di energia

Nelle tabelle 2.28 e 2.29 si riportano i bilanci di massa relativi ai diversi scenari, prima espressi in kg per tonnellata in entrata ed inseguito espressi in quantità annue. Anche in questo caso per lo Scenario PC75 sono stati utilizzati i dati dello Scenario P65.

Mentre, nella successiva Tabella 2.30, vengono indicati i materiali recuperati durante la selezione del RUR nello Scenario PC85, espressi sia in kg per tonnellata in entrata all'impianto di selezione, sia in quantità annue per il bacino grande e per il bacino piccolo.

Infine, si considerano i dati riepilogativi relativi all'impianto di termovalorizzazione, per tutti gli scenari analizzati, i quali sono riportati nelle successiva Tabella 2.31.

Tabella 2.28 - Bilanci di massa, per i diversi scenari, per ogni t di rifiuto in entrata all'impianto di termovalorizzazione

Quantità (kg / t _{IN})	Scenario S35	Scenario S50	Scenario P50	Scenario P65	Scenario PC75
Ferro recuperato da scorie	9,53	8,30	17,25	18,54	18,54
Alluminio recuperato da scorie	1,16	0,36	1,98	0,82	0,82
Scorie a recupero a cementificio	133,52	106,34	146,34	134,51	134,51
Scarti scorie a discarica	13,21	10,52	14,47	13,30	13,30
Ceneri inertizzate a discarica	21,63	17,23	22,72	20,72	20,72
Residui da trattamento fumi a recupero	8,55	8,42	7,82	8,59	8,59

Tabella 2.29 - Bilanci di massa date le quantità di rifiuto tal quale in entrata presso il termovalorizzatore.

Quantità (kg/a)	Scenario S35	Scenario S50	Scenario P50	Scenario P65	Scenario PC75
BACINO GRANDE					
Ferro recuperato da scorie	5.082.890	3.737.306	7.609.400	6.875.918	5.096.085
Alluminio recuperato da scorie	619.774	162.394	872.544	304.592	225.748
Scorie a recupero a cementificio	71.209.032	47.856.800	64.538.561	49.897.461	36.981.486
Scarti scorie a discarica	7.042.652	4.733.090	6.382.935	4.934.914	3.657.510
Ceneri inertizzate a discarica	11.534.726	7.756.093	10.020.035	7.685.285	5.695.946
Residui da trattamento fumi a recupero	4.561.685	3.788.402	3.450.353	3.187.136	2.362.145
BACINO PICCOLO					
Ferro recuperato da scorie	1.016.580	747.471	1.521.880	1.375.180	804.426
Alluminio recuperato da scorie	123.955	32.479	174.509	60.918	35.635
Scorie a recupero a cementificio	14.241.833	9.571.488	12.907.712	9.979.465	5.837.595
Scarti scorie a discarica	1.408.533	946.631	1.276.587	986.980	577.345
Ceneri inertizzate a discarica	2.306.950	1.551.239	2.004.007	1.537.053	899.115
Residui da trattamento fumi a recupero	912.339	757.691	690.071	637.425	372.869

Tabella 2.30 - Bilanci di massa, per lo Scenario PC85, espressi sia in kg per tonnellata di rifiuto tal quale in entrata presso l'impianto di selezione del RUR, sia in quantità annue.

SCENARIO PC85	kg / t _{IN}	BACINO GRANDE (kg/a)	BACINO PICCOLO (kg/a)
Ferro recuperato	18,54	3.102.658	620.535
Alluminio recuperato	0,82	137.442	27.488

Tabella 2.31 - Dati riepilogativi relativi al termovalorizzatore per tutti gli scenari analizzati.

Termovalorizzatore		Bacino piccolo					Bacino grande									
		S35	S50	P50	P65	PC75	S35	S35	S50	S50	P50	P50	P65	P65	PC75	PC75
							EL	COGEN	EL	COGEN	EL	COGEN	EL	COGEN	EL	COGEN
RSU	000 t/anno	150	150	150	150	150	750	750	750	750	750	750	750	750	750	750
Quantità in entrata	000 t/anno	107	90	88	74	43	533	533	450	450	441	441	371	371	275	275
potenzialità impianto (+10% circa)		115	95	100	80	50	600	600	480	480	480	480	400	400	300	300
%		71%	60%	59%	49%	29%	71%	71%	60%	60%	59%	59%	49%	49%	37%	37%
PCI	MJ/kg	9,89	9,55	9,73	10,81	10,81	9,89	9,89	9,55	9,55	9,73	9,73	10,81	10,81	10,81	10,81
Produzione specifica EE	MWhe/tIN	0,458	0,423	0,433	0,479	0,479	0,77	0,685	0,732	0,65	0,749	0,664	0,832	0,738	0,832	0,738
EE prodotta	GWh/anno	49	38	38	36	21	411	365	329	292	330	293	309	274	229	203
Produzione specifica calore	MWhT/tIN	2,23	2,214	2,262	2,519	2,519	-	1,498	-	1,449	-	1,479	-	1,647	-	1,647
Calore prodotto	GWh/anno	238	199	200	187	108	-	799	-	652	-	652	-	611	-	453
Produzione specifica CO2	t/tIN	0,948	0,922	0,946	1,016	1,016	0,947	0,948	0,921	0,922	0,945	0,946	1,014	1,016	1,016	1,016
CO2 prodotta	000 t/anno	101	82,98	83,42	75,36	43,688	505	505	415	415	416	416	376	376	279,4	279,4

3. Caratterizzazione delle diverse tecnologie di raccolta, trattamento e smaltimento

3.1 *Il modello di analisi: generalità*

L'analisi economica degli scenari alternativi di gestione parte dalla caratterizzazione delle diverse fasi che compongono i vari scenari. Questi, come si è visto sopra, assemblano e combinano in vario modo fasi che, con peso diverso, sono presenti in ciascuno scenario.

Il primo passo consiste dunque nel valutare da un punto di vista economico le varie tecnologie, ricavando un costo unitario per t in ingresso. Tale valore rappresenterà l'input della fase successiva (cap. 4), in cui il costo totale di ciascuna fase sarà calcolato moltiplicando il valore unitario per t in ingresso, e dividendo il risultato per le t totali di RU prodotte nel bacino. Questa metodologia si richiama direttamente a quanto proposto in Massarutto e Kaulard (1997).

Il secondo passo consiste nella valutazione economica dei costi esterni associati a ciascuna fase. Sono stati considerati i costi associati alle emissioni inquinanti, al netto di quelli eventualmente risparmiati attraverso il recupero di materiali ed energia. Sono inoltre state considerate le emissioni di CO₂, sempre al netto di quelle risparmiate attraverso il recupero di materiali. Ci si è avvalsi per questo di studi condotti in letteratura per la quantificazione unitaria del costo, mentre si sono invece utilizzate le ipotesi sopra descritte nel cap. 2 per quanto attiene ai bilanci di massa ed energia. Questo perché molti studi presenti in letteratura stimano i costi esterni complessivi di alcune tecnologie (es. incenerimento) ipotizzando rese alquanto diverse. Nel cap. 5 questo valore sarà sottoposto ad analisi di sensitività, al fine di mostrare come il risultato varia in funzione delle rese energetiche effettive.

Il terzo passo consiste, infine, nel valutare i ricavi derivanti dalla cessione al mercato dei sottoprodotti e dei materiali recuperati. Per tutte le forme di recupero, si è adottata la convenzione di considerare tra i costi tutte le fasi necessarie a far sì che il materiale in questione acquisti un valore positivo. Si parte cioè dal presupposto che qualsiasi cosa può giungere ad avere un valore commerciabile, purché la si sottoponga a un ciclo appropriato di lavorazioni.

Ad esempio, il vetro raccolto nelle campane ha di solito già in quel momento un valore (ossia, un impianto industriale è disposto a pagare un prezzo positivo per ricevere quel materiale); mentre nel caso della plastica, ai costi della raccolta si sommano quelli delle successive fasi di cernita, granulatura etc.

Analogamente a quanto abbiamo visto per i costi (che qui riferiamo alla t in ingresso in ciascun impianto), i ricavi sono riferiti a loro volta alla t in uscita da ciascun ciclo di lavorazione. Tali valori unitari verranno poi moltiplicati per le quantità effettivamente recuperate in ciascuno scenario, e poi divise per il rifiuto complessivamente prodotto in ciascun bacino onde ricavare un valore riferito alla t di rifiuti di partenza.

Sia i costi che i ricavi sono valutati al netto dei sistemi di incentivazione, sia quelli relativi all'energia elettrica prodotta da fonti rinnovabili (certificati verdi, CIP6) sia quelli relativi ai materiali (contributi CONAI e incentivi al recupero). Sono stati altresì esclusi dal calcolo i disincentivi, come l'ecotassa.

Questa scelta è stata motivata dal fatto che, in un'analisi riferita ai costi sociali, tali valori rappresentano delle partite di giro. Sono stati in compenso stimati, quando possibile, costi e benefici esterni, i primi relativi alle emissioni e all'impatto sul paesaggio delle principali fasi di trattamento, i secondi relativi invece alle emissioni risparmiate nelle produzioni che i derivati dai rifiuti vanno a sostituire. Nel caso della discarica si è anche stimato il valore del costo di scarsità.

E' importante perciò sottolineare che la nostra analisi non si colloca al livello dell'ambito di gestione, per il quale i ricavi derivanti dagli incentivi sono ovviamente parte integrante del calcolo, ma piuttosto al livello nazionale, a supporto di scelte di ordine generale relative alle priorità strategiche da perseguire.

3.2 I costi industriali delle fasi elementari

3.2.1 Le stime ingegneristiche

Lo strumento proposto tenta di modellare la scelta che l'autorità di ambito territoriale ottimale è chiamata a compiere rispetto alla gestione dei rifiuti domestici prodotta in quell'area di data popolazione, struttura abitativa e produzione giornaliera di rifiuti. E' un modello aperto nel senso che non predice la decisione dell'amministrazione ma semplicemente emula i termini della scelta che essa è chiamata a fare. Esso individua i costi e l'impatto diretto sull'occupazione di ciascuno scenario alternativo mentre la decisione dell'amministrazione dipende dalla struttura delle sue preferenze.

I dati di costo da usare nel modello possono essere ottenuti attraverso una tecnica di stima chiamata *stima ingegneristica*. Viene chiesto ad ingegneri esperti in quel campo di progettare un impianto rappresentativo e stimarne i costi sulla carta in base ai dati tecnici di performance delle attrezzature installate, alle produttività teoriche del lavoro e ai prezzi di mercato dei fattori di produzione. Questa metodologia ha il vantaggio di assicurare il massimo della confrontabilità tra le tecniche in quanto consente di lasciar fuori dal confronto diversità di criteri di calcolo (es. gli ammortamenti) nonché le inefficienze incrociate (es. le rigidità di alcuni contratti di lavoro) che invece sono invece difficilmente isolabili dall'analisi dei dati di costo e di funzionamento di impianti esistenti (vedi tecniche statistiche).

Tra gli svantaggi delle stime ingegneristiche vi è la tendenza a sottostimare i costi perché, in quanto basate su un impianto ideale, non contemplan inefficienze tecniche o distorsioni del mercato. Questo è particolarmente evidente per quanto riguarda i costi del lavoro. Inoltre le stime ingegneristiche fanno riferimento solo agli input diretti, ossia ai fattori produttivi riconducibili in modo non ambiguo all'unità di analisi.

Tuttavia, il principale metodo di stima concorrente alle stime ingegneristiche, le *stime statistiche*, presenta difficoltà ben superiori, in particolare con riferimento al settore oggetto del presente studio. Infatti, la tecnica delle stime statistiche non funziona bene quando applicata a imprese tecnologicamente non omogenee (e gli schemi di gestione dei rifiuti, come noto, sono molto differenti l'uno dall'altro) e necessita di una gran quantità di dati omogenei e di buona qualità per essere di qualche utilità (e le statistiche sui rifiuti, in particolare per quello che riguarda i costi delle diverse attività di gestione, sono famose per essere poco affidabili se non inesistenti).

3.2.2 Le raccolte

Sono state prese in considerazione raccolte stradali, porta a porta e centri di raccolta multi materiale.

Di seguito, nella Tabella 3.1, viene riassunta la procedura utilizzata per stimare i costi delle raccolte. Il modello è quello definito da Massarutto e Kaulard (1997), integrato con indicazioni tratte dal manuale dell'ANPA (1999).

Tabella 3.1 - Modello per stimare i costi delle raccolte.

	Unità di misura	Note
Quantità raccolta all'anno	t/anno	
Quantità raccolta all'anno procapite	Kg/abitante/anno	
Quantità raccolta al giorno	t/giorno	
Abitanti		
dimensione campane/cassonetti/sacchi	Litri	In funzione della modalità di raccolta e del materiale da raccogliere
riempimento cassonetti	%	70% fonte: Massarutto <i>et al.</i> , 1997
densità rifiuti nel cassonetto	Kg/m ³	Fonte: ANPA, 1999
Quantità massima da raccogliere (Q _{max})	ton/giorno	Funzione del numero di svuotamenti settimanali
cassonetti totali		
produttività raccolta	cassonetti/turno	
cassonetti da svuotare giornalmente	cassonetti/giorno	
turni lavorativi	turni/giorno	
turni giornalieri totali		
Operatori		
operatori per veicolo		
operatori totali		
operatori totali + 20%		
Di cui caposquadra		
Veicoli		
compattatori da 13 t (nette)		
compattatori da 10 t (nette)		

Q_{MAX} è il quantitativo massimo di rifiuti, funzione della produzione giornaliera media e dalla frequenza di raccolta (f_R);

$$Q_{MAX} = Q_{giorn} \times f_R$$

La stima del numero di cassonetti è data dalla seguente relazione:

$$cassonetti = \frac{Q_{MAX}}{dens \times riemp \times vol}$$

dove:

Q_{MAX} è il quantitativo massimo di rifiuti, funzione della produzione giornaliera media e dalla frequenza di raccolta;

dens è la densità dei rifiuti nei cassonetti, sono stati presi i valori indicati in Tabella 3.2;

riemp è la percentuale di riempimento dei cassonetti, posta cautelativamente pari al 70% del volume disponibile (Massarutto e Kaulard, 1997; ANPA, 1999);

vol è il volume del contenitore (campana, cassonetto o sacco).

Tabella 3.2 - Densità dei rifiuti nei cassonetti in funzione della composizione (kg/litro).

Tipologia di raccolta	Densità
Monomateriale organico putrescibile (esclusa frazione verde)	0,50 – 0,60
Frazione organica putrescibile con frazione verde	0,25 – 0,30
Monomateriale carta	0,25 – 0,30
Monomateriale cartone	0,05 – 0,10
Raccolta combinata vetro-lattine	0,15 – 0,20
Monomateriale plastica	0,020 – 0,025
Multimateriale vetro-plastica-lattine	0,07 – 0,08
Monomateriale vetro	0,20 – 0,25

Fonte: ANPA (1999)

I turni lavorativi necessari per raccogliere i rifiuti sono calcolati sulla base della seguente equazione:

$$Turni_{giorno} = \frac{C_{giorno}}{P_{svuot}}$$

dove:

$Turni_{giorno}$ sono i turni totali necessari per raccogliere il quantitativo massimo di rifiuti;

C_{giorno} sono i cassonetti da svuotare giornalmente;

P_{svuot} è la produttività di svuotamento, funzione del mezzo utilizzato e della modalità di raccolta (stradale, PP).

Per la produttività sono stati utilizzati i valori riportati nella Tabella 3.3.

Tabella 3.3 - Valori utilizzati per la produttività di svuotamento.

Raccolta stradale	Con automezzo robotizzato (1 addetto) e cassonetti da 2400 litri	130 cassonetti/turno
	Con automezzo tradizionale (3 addetti) e cassonetti da 1500 litri	150 cassonetti/turno
Raccolta porta a porta	Cassonetti da 80 litri	500 cassonetti/turno
	Sacchi da 80 litri	10 ton/turno

Le stime degli addetti fanno riferimento solo a quelli direttamente coinvolti nelle raccolte:

$$Op_{tot} = \frac{T_{giorno} \times G_L}{T_{Op}}$$

T_{giorno} sono i turni totali necessari per raccogliere il quantitativo massimo di rifiuti;

G_L sono i giorni lavorativi alla settimana (6 giorni);

T_{Op} rappresenta il numero di turni che un operatore effettua alla settimana (3 turni/settimana –Massarutto e Kaulard, 1997).

Per gli operatori sono previste 6 ore lavorative per turno per 6 giorni la settimana e riserve pari al 25% sul totale degli addetti per le sostituzioni. Viene supposto che un operatore possa fare un solo turno alla settimana.

Per ogni raccolta viene stimato il costo annuo, secondo lo schema generale riportato nella tab. 3.4. I dati relativi ai mezzi di trasporto, al personale provengono dalla metodologia esposta precedentemente. Per i costi di impianto, vengono formulate ipotesi circa la vita utile e la remunerazione del capitale investito. Nella Tabella 3.5 sono riportati i costi specifici di ogni singola raccolta (RUR, Vetro, ecc) ottenuti dai costi totali diviso il quantitativo effettivamente raccolto durante ogni raccolta.

Tabella 3.4 - Voci di costo per le raccolte dei rifiuti.

Voci di costo considerate	
Costi di impianto	Costi O&M
Mezzi di raccolta	manutenzione veicoli, assicurazioni, ecc.
Altre infrastrutture	Combustibile
Veicoli, ecc.	manutenzione cassonetti
Campane, Cassonetti	manutenzione edifici
Officina, uffici (edifici)	manutenzione attrezzature
Attrezzature	Personale (operatore, caposquadra, amm.vo
	Costi indiretti

Tabella 3.5 - Costi delle raccolte rapportato alla quantità di rifiuto raccolto durante ogni singola raccolta (€/t effettivamente raccolta).

Raccolte	BACINO PICCOLO						BACINO GRANDE					
	S35	S50	P50	P65	PC75	PC85	S35	S50	P50	P65	PC75	PC85
RUR – stradale	81	85					70	71				
RUR – PP			160	168	168	187			150	153	154	160
Carta – stradale	29	29					22	22				
Carta – PP			97	99	101	99			62	62	62	62
MultiMat – stradale	103						75					
Vetro – stradale		85						22				
Vetro – PP			190	149	148	149			77	78	78	78
Plastica – stradale		249						245				
Plastica – PP			307						372			
Plastica Metalli – PP				123	116	94				118	118	118
Organico – PP			138	122	124	124			82	91	91	91
Piattaforma	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61
Raccolte - totale (€/t)	275	509	953	723	718	714	228	421	804	564	564	564

3.2.3 Centro di raccolta multimateriale

E' stato preso in considerazione un centro di raccolta multi materiale con una capacità superiore al 20% di quella effettivamente necessaria per tutti e dieci gli scenari analizzati.

Di seguito, nella Tabella 3.6, si riporta la struttura dei costi, non comprendendo l'eccesso di capacità.

Tabella 3.6 - Struttura dei costi dei centri di raccolta multi materiale.

	Costo totale 000 euro	Costo annuo 000 euro/anno
Costi di investimento	287	115
Costi di esercizio		115
Costi annui totali		230
Costi per tonnellata trattata (Euro/ton)		51

3.2.4 Impianto di selezione frazioni secche

Ci siamo riferiti a due sistemi per la cernita dei materiali con caratteristiche operative abbastanza distinte: il modello "carta" ed il modello "contenitori per liquidi". A questi due modelli sono riconducibili, come loro varianti, tutti gli impianti di selezione, la cui capacità è stata ipotizzata essere superiore del 20% di quella effettivamente necessaria. Gli impianti di selezione per "contenitori per liquidi" (vetro, plastica, metalli ferrosi e non ferrosi) sono relativamente semplici e grandemente automatizzati. Si può stimare che un impianto di selezione di "contenitori per liquidi" in grado di trattare circa 15 tonnellate al giorno abbia un costo totale di circa 46 €/ton di materiale in entrata.

Nella Tabella 3.7 viene esemplificato il modello "carta", con una capacità di 15.000 t/anno.

Tabella 3.7 - Il modello "carta".

		Costo totale 000 euro	Costo annuo 000 euro/anno
Costi di investimento		2250	273
Costi di esercizio		720	1382
Costi annui totali			1655
Costi per tonnellata trattata (Euro/ton)			110

Si ipotizza che i materiali ottenuti dal processo di selezione vengano inviati al relativo impianto di recupero mediante dei camion in grado di trasportare 16 tonnellate di materiale, con un volume di 21,42 metri cubi, ed un consumo pari a 0,249 €/km.

Pertanto, conoscendo le densità dei diversi materiali in seguito alle operazioni di pressatura, è stato possibile ricavare il numero di camion necessari per il trasporto dei diversi materiali. Nella successiva Tabella 3.8 si riportano le densità dei diversi materiali.

Si è inoltre ipotizzato che, nei casi del legno, delle materie plastiche e della carta, i camion sfruttassero il viaggio di ritorno per trasportare al polo integrato gli scarti derivanti dall'attività di recupero, al fine di avviarli al recupero energetico, insieme al RUR ed agli scarti di selezione.

Tabella 3.8 - Densità dei materiali recuperati in seguito alle operazioni di pressatura.

	Densità (kg/m3)
Plastica	460
Carta	400
Vetro	750
Alluminio	75
Acciaio	2500
Legno	300

3.2.5 Impianto per la produzione di compost

Nella successiva Tabella 3.9 si riportano i costi relativi ad un impianto base con potenzialità di 30.000 ton/anno per la produzione di compost. Anche per questa tipologia di impianti si ipotizza che vi sia una capacità superiore al 20% di quella effettivamente necessaria.

Tabella 3.9 - Costi per l'impianto di produzione di compost.

	Costo totale 000 euro	Costo annuo 000 euro/anno
Costi di investimento	6.134	619
Costi di esercizio	720	720
Costi annui totali		1.339
Costi per tonnellata trattata (Euro/ton)		45

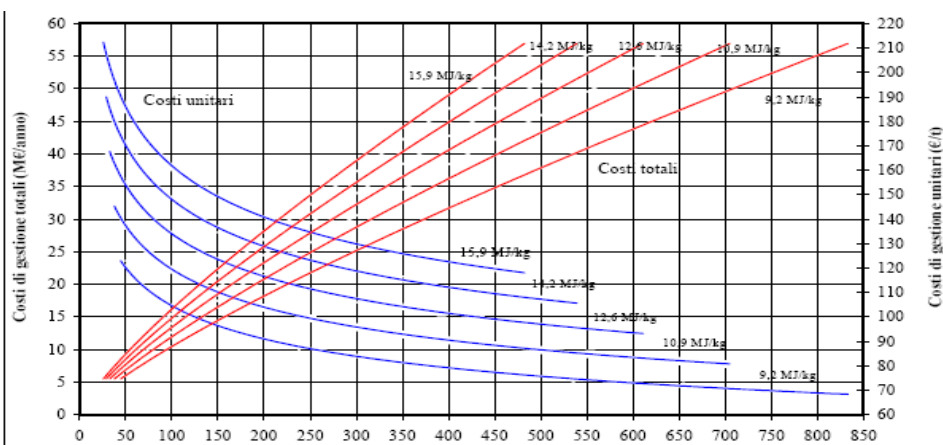
Una volta prodotto negli impianti di compostaggio, si ipotizza che il compost di qualità sia prelevato dagli agricoltori presso gli stessi impianti.

Per gli Scenari PC75 e PC85, si ipotizza il ricorso al compostaggio domestico, mediante l'utilizzo di composte con un volume di 600 litri e del costo di 34,8 € cadauno. La vita utile di ciascuna compostiera è di 10 anni e, considerando il numero medio di componenti per famiglia pari a 2,59, si ipotizza che venga consegnato un composte domestico per ogni famiglia.

3.2.6 Termovalorizzatore

Per la definizione dei costi dei termovalorizzatori si è fatto riferimento all'approfondito studio condotto dell'ENEA (Iaboni e De Stefanis, 2007). In ogni scenario si è ipotizzato una capacità dell'impianto superiore del 10% a quella effettivamente in entrata al forno. La Figura 3.1 riporta i costi degli impianti in funzione della taglia e del potere calorifico dei rifiuti.

Figura 3.1 - Costi degli impianti di termovalorizzazione in funzione della taglia e del PCI dei rifiuti.



Fonte: Iaboni e De Stefanis, 2007

3.2.7 Discarica

Per il calcolo dei costi della discarica, è stato utilizzato lo schema proposto in elaborato nel 2005 dalla Regione Emilia Romagna, riportato nella successiva Tabella 3.10. La discarica si trova a 50 km dal polo integrato ed il costo per trasportarvi una tonnellata di scarti è di 10,625€.

Un'ulteriore dimensione che consideriamo nel presente studio è rappresentata dal costo di scarsità, particolarmente rilevante in un contesto come quello italiano. Per stimare questo valore si è considerata la differenza tra il prezzo attuale di mercato nelle aree congestionate ed il costo industriale di gestione, al netto delle ecotasse. Questa differenza può essere interpretata infatti come il valore della rendita di scarsità, che viene in parte appropriata dalla collettività, sotto forma di imposte ambientali, royalties richieste dai comuni in cui sono situati gli impianti, valore del terreno, qui complessivamente chiamata Benefit EELL; ed in parte viene goduta dal proprietario dell'impianto, qui definita come Benefit proprietario. (Massarutto, 2007). Pertanto, per ogni tonnellata smaltita in discarica si ipotizza un'ecotassa di 25 €, un Benefit EELL di 25 € ed un Benefit Proprietario pari a 50 €, che vanno quindi ad aggiungersi al costo industriale riportato nella sottostante Tabella 3.10.

Tabella 3.10 - Costi della discarica.

	Volumetria (m3)			
	< 300.000 m ³		> 300.000 m ³	
Voce di costo	€/m3	%	€/m3	%
Manutenzione	3,41	7,7%	3,28	8,9%
Personale	4,06	9,2%	3,21	8,7%
Consumi	1,82	4,1%	1,29	3,5%
Gestione percolato	1,14	2,6%	1,03	2,8%
Materiali di copertura	0,52	1,2%	0,52	1,4%
analisi e monitoraggi	1,40	3,2%	1,29	3,5%
Ammortamenti realizzazione	16,06	36,2%	16,24	44,0%
Ammortamenti post-gestione	6,59	14,9%	2,12	5,7%
Accantonamenti per post gestione	7,50	16,9%	6,63	18,0%
spese generali	1,85	4,2%	1,32	3,6%
Totale	44,35	100,0%	36,93	100,0%

Fonte: Regione Emilia-Romagna, ARSIRU, 2005.

3.2.8 Impianto di trattamento meccanico-biologico

I costi relativi all'impianto di trattamento meccanico biologico impiegato nel sottoscenario caratterizzato dalla produzione di CDR di qualità sono riportati nella sottostante Tabella 3.11.

Il costo di selezione e trattamento presso l'impianto di TMB è stato desunto dai dati forniti dalla Net Spa di Udine ed è composto dalle voci di costo riportate nella successiva Tabella 3.12. Esse si riferiscono ad un impianto di TMB che tratti 66.000 tonnellate annue di rifiuto indifferenziato, pertanto si ipotizza l'uso di

due impianti di questa tipologia, nonché l'impiego di due impianti per la produzione di CDR-Q ubicati in prossimità dei cementifici.

Il costo di produzione di una tonnellata di CDR-Q a partire da una tonnellata di frazione secca si desume da un dato fornito da Nomisma Energia. Poiché produrre 1 tonnellata di CDR-Q comporta un costo pari a 151,2 € e per produrre 1 tonnellata di CDR-Q sono necessarie 1,89 tonnellate di rifiuto tal quale, con una tonnellata di tal quale si ottengono 0,529 t di CDR-Q (comprendenti 70 kg di PFU e 70 kg di PNC) ad un costo di 80 €/t. Pertanto, ipotizzato che il processo di selezione secco-umido comporti un costo pari a 39,1 €/t, il costo di trasformazione della frazione secca in CDR-Q, comprensivo dello smaltimento degli scarti, sarà di 40,9 €/t. Il costo di trasporto della frazione secca all'impianto di produzione del CDR-Q, distante 80 km, è pari a 17 €/t.

Tabella 3.11 - Costi dell'impianto di trattamento meccanico biologico considerato.

Impianto TMB		
	UdM	Totale
RSU	Ton/anno	150.000
Materiali totali in piattaforma	Ton/anno	106.666
Costo totale	€/anno	4.170.640,6
Costo base per ton in entrata	€/t	39,10
Costo/RSU	€/t	27,80

Tabella 3.12 - Composizione del costo di selezione e trattamento dell'impianto TMB.

Costi	€/t
Costi trattamento impianto	20,3
Costi energia elettrica	7,8
Costo manutenzione impianto	3
Ammortamento impianto	8
Totale	39,1

3.2.9 Riutilizzo del CDR-Q in cementificio

Si ipotizza che l'investimento necessario per l'impiego del CDR-Q nel cementificio consenta una sostituzione calorica del 36% e preveda l'installazione di un impianto per l'utilizzo del CDR e di una valvola bypass.

L'investimento è ammortizzato considerando vite utili delle apparecchiature di 15 anni (n), un saggio marginale di profitto del 5% (r) ed il tasso di ammortamento annuo calcolato con la formula sottostante.

$$t = pm \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1}$$

Come riportato nella successiva Tabella 3.13, l'impianto ha dei costi di manutenzione annui pari a 120.000€. In ognuno dei due cementifici vi sono due forni ed in ciascun forno vengono bruciate 1,33 t/h per 7992 ore annue, per un totale di 21.312 t annue.

Nella sottostante Tabella 3.14 si riporta la quantità di frazione secca risultante dai due impianti TMB, la quantità di CDR-Q in uscita dai due impianti di produzione del CDR-Q che verrà impiegata nei due cementifici, ed il costo totale, per tonnellata ed unitario di adeguamento dei cementifici all'impiego del CDR-Q.

Tabella 3.13 - Costi industriali di adattamento al CDR-Q per singolo cementificio.

Costi industriali di adattamento al CDR-Q per singolo cementificio		
	costo totale	costo annuo
impianto CDR	2.000.000,00	192.684,58
by pass	1.600.000,00	154.147,66
Costi di esercizio	120.000,00	120.000,00
Totale annuo		466.832,24
Costo / t		21,90

Tabella 3.14 - Costi di impiego del CDR-Q in cementificio.

Impianto Cementificio		
	Udm	
Frazione secca	T	41.653,07
CDR-Q	T	40.349,28
costo totale	€	237.748,09
costo / t di CDR	€/t	21,90
Costo/t di RSU	€/t	5,89

3.2.10 *Impianto per la produzione della sabbia sintetica*

I costi relativi agli impianti di produzione della sabbia sintetica, utilizzati nel caso dello Scenario PC85, sono stati desunti dall'esperienza del Centro Riciclo Vedelago. Si ipotizza che vengano impiegati degli specifici impianti con una capacità annua pari a 20.000 tonnellate, i quali implicano un costo di selezione di 58 €/t ed un costo di produzione della sabbia sintetica pari a 42 €/t.

3.3 I costi esterni

La valutazione dei costi esterni generati dal trattamento dei rifiuti pone problemi metodologici e di stima che non è stato possibile affrontare in questo lavoro con una valutazione ad hoc, anche per via del fatto che la metodologia utilizzata non permetteva di fare riferimento a un sito specifico. E' stato pertanto giocoforza considerare valori di riferimento desunti dalla letteratura. Consapevoli dei limiti che caratterizzano questo approccio, uno dei principali riferimenti adottati è rappresentato dallo studio di Rabl et al. (2007). Questo lavoro considera in modo analitico non solo le diverse tipologie di emissioni, utilizzando il noto modello CAFE-ExternE, ma valuta altresì i benefici delle emissioni risparmiate a seconda del tipo di tecnologia utilizzata per produrre energia elettrica.

Nella Tabella 3.15 si riporta un confronto tra i dati relativi alla produzione specifica di energia tra gli impianti considerati nel lavoro di Rabl e quelli considerati nel nostro studio. A questo punto si espongono i costi esterni, al netto delle emissioni evitate, espressi in €/t, per le diverse tipologie impiantistiche. Questi sono stati calcolati rapportando i costi esterni netti, stimati da Rabl sulla base della produzione specifica di energia degli impianti considerati dal suo studio, con i dati sulla produzione specifica dei termovalorizzatori impiegati nei nostri scenari. Per una maggiore chiarezza nella tabella vengono rappresentati anche i dati relativi alle emissioni evitate per ciascun impianto preso in considerazione, nonché i costi esterni per la disamenity dei termovalorizzatori, che nel lavoro di Rabl sono pari a 1 €/t.

La tabella riporta altresì i costi esterni della discarica. Sia per la disamenity che per le emissioni prodotte, si è scelto di utilizzare il valore presentato da Rabl per la discarica senza recupero energetico, a cui è stato sommato il costo esterno per la produzione di percolato, pari a 1,5 €/t (Nepal e Jamsb, 2009).

Per la considerazione dei costi esterni per il trasporto dei materiali, si è ricorso ad uno studio elaborato dalla CE Delft et al. (2008). Da questo lavoro sono stati ricavati i costi esterni in euro per tonnellata per chilometro percorso, la cui composizione è riportata nella sottostante Tabella 3.16.

Moltiplicando questo valore per i chilometri percorsi è stato possibile stimare i costi esterni per la fase di raccolta, di trasporto degli scarti in discarica, di trasporto dei materiali da recuperare ai relativi impianti di recupero, e di trasporto delle plastiche mancanti per la produzione della sabbia sintetica. Mentre, considerando le ceneri risultanti dal processo di termovalorizzazione destinate al recupero presso i cementifici, si ipotizza che i costi esterni del loro trasporto siano compensati dai costi esterni evitati di una loro eventuale destinazione in discarica.

I benefici esterni sono stati stimati a partire dalle emissioni evitate riportate nella Tabella 3.15, considerando, nel caso della sola generazione elettrica, impianti alimentati a carbone e petrolio, mentre per la cogenerazione di elettricità e calore, si sono ipotizzati impianti siano alimentati a gas, carbone e petrolio.

Per i benefici esterni connessi al recupero di materia, essi sono stati calcolati per quel che riguarda il CO₂ ed il risparmio energetico, utilizzando come riferimento i valori proposti nella meta-analisi elaborata da Bianchi (2008). Nelle Tabelle 3.18 e 3.19 si riportano i valori medi rispettivamente del risparmio energetico e delle emissioni di CO₂ evitate connesse al riciclo di ciascuna tipologia di materiale. Il calcolo del beneficio esterno è stato fatto ipotizzando un valore unitario del MW/h pari a 35 €, corrispondente al valore di un MW/h termico, ed un costo esterno di una t di CO₂ pari a 19 €. Per il calcolo dei benefici esterni legati alle materie plastiche riciclate si è ipotizzato che una tonnellata di plastica generica riciclata, avesse la composizione percentuale riportata nella Tabella 3.17, e fornita dalla società Idealservice Scrl di Pasion di Prato (UD).

Tabella 3.15 – Costi esterni per i diversi impianti.

DATI SUI COSTI ESTERNI				RABL	BACINO PICCOLO					BACINO GRANDE									
					S35	S50	P50	P65	PC75	S35		S50		P50		P65		PC75	
										EL	COG	EL	COG	EL	COG	EL	COG	EL	COG
Termovalorizzatore	Produzione specifica impianti (kW/h per t)	Cogenerativo	Elettricità	202	458	423	433	479	479	-	685	-	650	-	664	-	738	-	738
			Calore	607	2.230	2.214	2.262	2.519	2.519	-	1.498	-	1.449	-	1.479	-	1.647	-	1.647
		Solo Elettrico	Elettricità	270	-	-	-	-	-	770	-	732	-	749	-	832	-	832	-
	CE Emissioni nette prodotte (€/t)	Senza Recupero energetico		21,2	21,2	21,2	21,2	21,2	21,2	21,2	21,2	21,2	21,2	21,2	21,2	21,2	21,2	21,2	21,2
		Solo Elettrico		15,9	-	-	-	-	-	6,1	-	6,8	-	6,5	-	4,9	-	4,9	-
		Cogenerativo		13,1	-5,7	-5,2	-5,8	-8,8	-8,8	-	-0,7	-	0,2	-	-0,3	-	-2,7	-	-2,7
	CE Emissioni evitate (€/t)	Senza Recupero energetico		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		Solo Elettrico		5	-	-	-	-	-	15,1	-	14,4	-	14,7	-	16,3	-	16,3	
		Cogenerativo		8,1	26,9	26,4	27,0	30,0	30,0	-	21,9	-	21,0	-	21,5	-	23,9	-	23,9
	Disamenity impacts (€/t)			1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
Discarica	CE Emissioni nette prodotte (€/t)	Senza Recupero energetico		12,8	12,8	12,8	12,8	12,8	12,8	12,8	12,8	12,8	12,8	12,8	12,8	12,8	12,8		
		Disamenity impacts (€/t)			1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		
	Damage from leachate (€/t)			1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5		

Tabella 3.16 - Componenti dei costi esterni per il trasporto dei materiali.

Costi Esterni Trasporto	€/tkm
Noise Urban Night	0,0112
Air Pollution Urban Diesel	0,0093
Climate Change	0,0023
Up and down stream processes	0,0027
Soil and Water Pollution	0,0009
Totale	0,0264

Fonte: CE Delft, 2008

Tabella 3.17 – Composizione percentuale di una tonnellata di plastica generica recuperata.

Polimeri	%
PET	30%
HDPE	10%
PVC	10%
Plastiche miste (scarti, PP, film)	50%
Totale	100%

Fonte: nostra indagine diretta presso Idealservice Srl

Tabella 3.18 – Risparmio energetico conseguente al riciclo. Valore medio in MJ/t

Risparmio energetico conseguente al riciclo	Valore medio in MJ/t
Alluminio	181.117
Acciaio	131.180
Vetro	2.777
HDPE	54.199
PET	43.425
PVC	33.280
Plastiche miste	11.200
Carta e Cartone	12.833

Fonte: Bianchi, 2008

Tabella 3.19 – Emissioni di CO2 evitate col riciclo. Valore medio in kg di CO2 a t.

Emissioni evitate	Riduzioni emissione di CO2 in kgCO2/t
Alluminio	11.912
Acciaio	1.434
Vetro	411
HDPE	1.303
PET	1.784
PVC	1.740
Plastiche miste	850
Carta e Cartone	1.091

Fonte: Bianchi, 2008

3.4 I ricavi derivanti dal recupero

Per il calcolo dei ricavi sono stati considerati i prezzi di riferimento dell'energia e delle materie prime seconde riportati nella successiva Tabella 3.20.

Si ipotizza che per ogni MWh elettrico venduto si conseguano 75€, mentre per ogni MWh termico venduto si realizzino 35€. Per quanto riguarda i prezzi di vendita delle materie prime seconde, sono state condotte delle indagini conoscitive che, per ogni materiale, hanno tenuto conto delle serie storiche dei prezzi di tali materie riportati nel listino "Rilevazione dei prezzi all'ingrosso sulla piazza di Milano", elaborato dalla Camera di Commercio di Milano, considerando in genere come arco temporale gli ultimi dieci anni. Pertanto:

- Il prezzo del vetro, pari a 5,15 €/t, è ricavato dalla media del prezzo del rottame di vetro misto considerando gli anni che vanno dal 2002 al 2009;
- Il prezzo della carta, pari a 30,32 €/t, è derivato considerando la media del prezzo delle carte e cartoni misti (selezionati) tenendo conto degli anni che vanno dal 2000 al 2009;
- Il prezzo della plastica, pari a 294 €/t, corrisponde al valore di una generica tonnellata di plastiche miste risultante dalla selezione e dal recupero a valle della raccolta differenziata, ed è stato calcolato facendo riferimento ai polimeri (PE, PET, Vaschette, Film, Cassette, ecc.) presenti nella composizione percentuale della tonnellata sopracitata. Considerando la media dei prezzi di ciascun polimero nell'arco degli anni che vanno dal 1999 al 2009, si è moltiplicato il prezzo medio di ciascun polimero per la percentuale di esso presente nella tonnellata di plastiche miste generica, trovando, in questo modo, il ricavo ottenuto per ciascun polimero presente nella tonnellata. La somma dei valori ottenuti rappresenta il ricavo per l'intera tonnellata, pari a 294 €;

- Il prezzo dell'alluminio derivante da raccolta differenziata, pari a 723,77 €/t, è derivato dalla media del prezzo del rottame composto da lattine usate, con riferimento al periodo 2000- 2009;
- Il prezzo dell'alluminio recuperato dalle scorie, pari a 1173,33 €/t, è ricavato dalla media del prezzo del rottame di alluminio proveniente da processi di separazione di residui non ferrosi frantumati, considerando gli anni che vanno dal 2000 al 2009;
- Il prezzo dei metalli ferrosi è stato desunto Bianchi, 2008, e viene utilizzato per valutare sia i rottami ferrosi risultanti dalla raccolta differenziata, sia il ferro recuperato dalle scorie;
- Il prezzo del recupero scorie in cementificio è stato ricavato considerando il prezzo di vendita di una tonnellata di sabbia di fiume, pari a 20€/t;
- Il prezzo del compost di qualità, pari a 8 €/t, è risultato da una pubblicazione della Scuola Agraria Parco Monza. Si ipotizza che esso venga prelevato dagli agricoltori locali;
- Nel caso del recupero dei residui da trattamento fumi, si ipotizza che la cessione di questa frazione non comporti dei ricavi, in quanto venga prelevata gratuitamente presso l'impianto dagli utilizzatori, col trasporto a spese di questi ultimi;
- I ricavi relativi alla vendita del legno non sono stati considerati in quanto non è stata trovata una voce attendibile per il prezzo di tale materiale.;

Per giungere al valore dei ricavi derivanti dal risparmio del coke in cementificio si è considerato un prezzo dello stesso coke pari a 100 €/t. Ipotizzando che il CDR-Q abbia un PCI pari a 4860 kcal, si ritiene che una tonnellata di CDR-Q sia in grado di sostituire 600 kg di coke e che una tonnellata di rifiuto tal quale trasformata in CDR-Q possa quindi sostituire 0,171 tonnellate di coke. I dati che hanno portato a tale risultato sono riportati nella Tabella 3.21.

Per tutti gli altri materiali recuperati (compost da frazioni indifferenziate, inerti) è stato ipotizzato un valore pari a zero. Tale ipotesi è motivata, da un lato, dalla difficoltà di ottenere un riscontro valido nei dati di mercato, i quali provengono da situazioni eterogenee e difficilmente generalizzabili. Va anche considerato il fatto che molti di questi mercati sono presumibilmente influenzati dalle quantità immesse. Se una certa quantità può trovare collocazione in sostituzione di altri materiali (ammendanti agricoli, inerti da cava), è dubbio che lo stesso accadrebbe se le quantità in gioco fossero maggiori, come accadrebbe se queste soluzioni venissero adottate alla scala di bacino provinciale.

Si è dunque preferito considerare i costi delle fasi impiantistiche corrispondenti fino al punto in cui il materiale ottenuto possa essere ragionevolmente collocato sul mercato a costo zero.

Tabella 3.20 - Prezzi di vendita dell'energia e delle materie prime seconde.

Prezzi di vendita post selezione	UdM	Valori	Anno/i di riferimento	Fonte
Energia elettrica	€/MWh _E	75	2008	GME
Calore	€/MWh _T	35	2008	Massarutto e Kaulard, 1997.; tesi di laurea PoliMI
Vetro (Rottame vetro misto)	€/t	5,15	2002-2009	Camera di Commercio di Milano
Carta (Carte e cartoni misti selezionati)	€/t	30,32	2000-2009	Camera di Commercio di Milano
Plastica	€/t	294	1999-2009	Camera di Commercio di Milano
Alluminio da Raccolta Differenziata	€/t	723,77	2000-2009	Camera di Commercio di Milano
Alluminio recuperato da scorie	€/t	1173,33	2000-2009	Camera di Commercio di Milano
Recupero Scorie in cementificio	€/t	20	2009	Indagine conoscitiva
Metalli Ferrosi	€/t	8	2008	Bianchi, 2008
Compost	€/t	8		Pubblicazione Scuola Agraria Parco Monza

Tabella 3.21 - Quantità di coke sostituito dalla frazione secca presente in una tonnellata di rifiuto indifferenziato.

	CDR-Q	Frazione secca	PNC	PFU	Frazione secca presente in 1 t di rifiuto indifferenziato
Kg	1000	735,4	132,3	132,3	390,5
Composizione %	100,00%	73,54%	13,23%	13,23%	39,05%
PCI	4860	3550	8500	8500	3550
coke sostituito (kg)	600	322,30	138,83	138,83	171,15

4. Analisi comparata degli scenari

4.1 *I flussi quantitativi*

Le successive Tabelle 4.1 e 4.2 sintetizzano i dati ottenuti applicando i valori di costo e ricavo per t trattata, stimati nel cap. 3, ai flussi di materiali che caratterizzano i diversi scenari, rispettivamente in valori assoluti e percentuali.

Per calcolare il costo totale di ciascuno scenario, i costi unitari delle singole tecnologie elementari sono stati moltiplicati per le t in ingresso in ciascuna fase tecnologica, ottenendo così un costo totale annuo. Il risultato finale è stato diviso per la quantità totale di rifiuti generati nei due bacini (750 e 150 kt rispettivamente) per ottenere un valore riferito alla t di rifiuti lorda originaria.

Tale elaborazione è stata svolta separatamente per i costi industriali di gestione delle raccolte, dei trattamenti, dei costi esterni, nonché dei ricavi derivanti dalla collocazione sul mercato dei sottoprodotti recuperati.

Le Tabelle 4.3 e 4.4 riassumono i destini finali dei vari flussi di materiale, suddivisi tra recupero di materia, recupero energetico e discarica, esprimendoli in dati fisici ed in percentuali. Mentre, nella Tabella 4.5 si riportano le quantità di sottoprodotti recuperati in ciascuno scenario considerato.

Tabella 4.1 - Suddivisione RUR – RD (in termini assoluti, espressi in migliaia di t) negli scenari elaborati.

	Bacino piccolo						Bacino grande					
	S35	S50	P50	P65	PC75	PC85	S35	S50	P50	P65	PC75	PC85
RSU	150	150	150	150	150	150	750	750	750	750	750	750
RUR	97,5	75,4	74,5	52,3	31,55	22,5	487,2	377	372,6	261,5	215,6	112,48
RD	52,5	74,6	75,5	97,7	118,45*	127,5**	262,8	373	377,4	488,5	534,32***	637,52****
Plastica	1	12,5	9,9	13	13,15	16,5	5	62,5	49,3	65,8	65,7	83,2
Carta	25	27	18	24,8	27,1	33	125,8	135,4	90,9	123,8	135,1	164,8
Vetro	5,5	8	5	7,9	8,1	7,9	27	42	26	39,5	40,5	40
Legno	4	6	4,5	5,5	6	5,9	22	30,1	22,3	27,4	31,9	29,4
Metallo	1,5	2,2	0,9	1,3	2,4	2,7	9	11	4,4	6,3	12	13,7
Alluminio	0,5	0,9	0,3	0,8	0,9	0,7	2,6	4,4	1,6	4,2	4,4	3,7
Organico	-	-	22,2	27,6	44	44	-	-	111,4	139	162,22	220,22
verde	10	13	9,7	11,8	11,8	11,8	48,2	64,4	48,3	59,3	59,3	59,3
Altri RD	5	5	5	5	5	5	23,2	23,2	23,2	23,2	23,2	23,2

* R.D. 86 e compostaggio domestico 32,45; ** R.D. 95 e compostaggio domestico 32,45; *** R.D. 464,8 e compostaggio domestico 69,52; **** R.D. 475,3 e compostaggio domestico 162,22.

Tabella 4.2 - Suddivisione RUR – RD (in termini percentuali) negli scenari elaborati.

	Bacino piccolo						Bacino grande					
	S35	S50	P50	P65	PC75	PC85	S35	S50	P50	P65	PC75	PC85
RUR (%)	65,01%	50,27%	49,68%	34,87%	21,03%	15%	64,96%	50,27%	49,68%	34,87%	28,75%	15%
RD tot	35,04%	49,73%	50,32%	65,13%	78,97%	85,00%	35,04%	49,73%	50,32%	65,13%	71,25%	85,00%
Plastica (%)	0,69%	8,33%	6,58%	8,77%	8,76%	11,09%	0,69%	8,33%	6,58%	8,77%	8,76%	11,09%
Carta (%)	16,77%	18,06%	12,12%	16,51%	18,02%	21,97%	16,77%	18,06%	12,12%	16,51%	18,02%	21,97%
Vetro (%)	3,60%	5,58%	3,49%	5,26%	5,4%	5,33%	3,60%	5,58%	3,49%	5,26%	5,4%	5,33%
Legno (%)	2,92%	4,02%	2,97%	3,66%	4,25%	3,92%	2,92%	4,02%	2,97%	3,66%	4,25%	3,92%
Metallo (%)	1,18%	1,48%	0,58%	0,85%	1,6%	1,83%	1,18%	1,48%	0,58%	0,85%	1,6%	1,83%
Alluminio (%)	0,35%	0,58%	0,21%	0,56%	0,59%	0,50%	0,35%	0,58%	0,21%	0,56%	0,59%	0,50%
Organico (%)	0,00%	0,00%	14,84%	18,54%	29,36%	29,36%	0,00%	0,00%	14,84%	18,54%	21,63%	29,36%
verde (%)	6,44%	8,59%	6,44%	7,91%	7,91%	7,91%	6,44%	8,59%	6,44%	7,91%	7,91%	7,91%
Altri RD (%)	3,09%	3,09%	3,09%	3,09%	3,09%	3,09%	3,09%	3,09%	3,09%	3,09%	3,09%	3,09%

Tabella 4.3 – Destinazione dei flussi di rifiuto: recupero diretto, recupero energetico, discarica.

Migliaia di t	BACINO PICCOLO						BACINO GRANDE										
	S35	S50	P50	P65	PC75	PC85	S35		S50		P50		P65		PC75		PC85
							EL	COG	EL	COG	EL	COG	EL	COG	EL	COG	
RSU	150	150	150	150	150	150	750	750	750	750	750	750	750	750	750	750	750
Recupero di materia *	49	59	56	63	60	57	249	249	297	297	280	280	315	315	321	321	283
Quantità a recupero energetico	107	90	88	43	74	0	533	533	450	450	441	441	371	371	275	275	0
Quantità avviata in discarica	6,9	5,7	5,4	6,3	4,5	0	22,9	22,9	16,9	16,9	16,3	16,3	20	20	13	13	0
Totale CO2 prodotta	103	84	85	44	77	0	511	511	418	419	422	422	381	381	283	283	0

* Il recupero di materia include anche le scorie a recupero in cementificio ed i residui da trattamento fumi a recupero.

Tabella 4.4 – Destinazione dei flussi di rifiuto: recupero diretto, recupero energetico, discarica. Valori percentuali.

	BACINO PICCOLO						BACINO GRANDE										
	S35	S50	P50	P65	PC75	PC85	S35		S50		P50		P65		PC75		PC85
							EL	COG	EL	COG	EL	COG	EL	COG	EL	COG	
Recupero di materia	33%	40%	37%	42%	40%	38%	33%	33%	40%	40%	37%	37%	42%	42%	43%	43%	38%
% termovalorizzata	71%	60%	59%	29%	49%	0	71%	71%	60%	60%	59%	59%	49%	49%	37%	37%	0
% avviata in discarica	4,6%	3,8%	3,6%	4,2%	3,01%	0	3,06%	3,06%	2,25%	2,25%	2,16%	2,16%	2,67%	2,67%	1,73%	1,73%	0

Tabella 4.5 – Sottoprodotti recuperati nei vari scenari.

	BACINO PICCOLO						BACINO GRANDE										
	S35	S50	P50	P65	PC75	PC85	S35		S50		P50		P65		PC75		PC85
							S.E.	COGEN	S.E.	COGEN	S.E.	COGEN	S.E.	COGEN	S.E.	COGEN	
Energia elettrica (MW/h)	48.853	38.074	38.193	35.537	20.787	0	410.663	365.330	329.429	292.525	330.331	292.844	308.627	273.758	228.738	202.896	0
Calore (MW/h)	237.865	199.280	199.522	186.882	109.319	0	0	798.927	0	652.107	0	652.283	0	610.948	0	452.804	0
Vetro (t)	3.513	7.884	4.499	6.785	6.960	7.935	17.567	17.567	39.420	39.420	22.493	22.493	33.926	33.926	34.800	34.800	36.975
Carta (t)	21.406	23.052	15.883	21.628	23.607	30.960	107.029	107.029	115.262	115.262	79.416	79.416	108.141	108.141	118.035	118.035	154.800
Plastica (t)	357	6.054	6.213	4.579	7.884	9.636	1.786	1.786	30.270	30.270	31.066	31.066	22.894	22.894	39.420	39.420	48.100
Recupero scorie (t)	14.242	9.571	12.908	9.979	5.838	0	71.209	71.209	47.857	47.857	64.539	64.539	49.897	49.897	36.981	36.981	0
Alluminio da RD (t)	410	690	255	603	639	630	2.049	2.049	3.449	3.449	1.275	1.275	3.014	3.014	3.195	3.195	3.150
Alluminio recuperato da scorie (t)	124	32	175	61	36	27	620	620	162	162	873	873	305	305	226	226	137
Metallo (t)	2.446	2.560	2.234	2.294	2.537	2.605	12.229	12.229	12.804	12.804	11.171	11.171	11.472	11.472	13.759	13.759	13.025
Compost (t)	2.899	3.866	9.575	11.900	7.036	7.036	14.497	14.497	19.330	19.330	47.873	47.873	59.502	59.502	45.612	45.612	35.183
Residui da trattamento fumi a recupero (t)	912	758	690	637	373	0	4.561	4.561	3.788	3.788	3.450	3.450	3.187	3.187	2.362	2.362	0

4.2 Il costo di gestione del rifiuto urbano

4.2.1 Il costo di gestione delle raccolte

Nella Tabella 4.6 sono riportati i costi di ogni singola raccolta (RUR, Vetro, ecc) ottenuti dai costi totali diviso la quantità di RU generati (riferiti cioè alla t di RU di partenza). A titolo di esempio, nella prima colonna (scenario S35, bacino piccolo) il costo totale di raccolta è pari a 71 €/t, e deriva dalla somma dei costi riferiti alle singole raccolte praticate in quello scenario.

Tabella 4.6 - Costi delle raccolte rapportato alla quantità di RSU generata (euro/t RSU).

	BACINO PICCOLO						BACINO GRANDE					
	S35	S50	P50	P65	PC75	PC85	S35	S50	P50	P65	PC75	PC85
RUR – stradale	53	43					46	36				
RUR – PP			80	59	48	28			75	54	44	24
Carta – stradale	5	5					4	4				
Carta – PP			12	16	18	22			7	10	11	14
MultiMat – stradale	5						3					
Vetro – stradale		5						1				
Vetro – PP			7	8	8	8			3	4	4	4
Plastica – stradale		21						20				
Plastica – PP			20						24			
Plastica Metalli – PP				12	12	12				11	12	15
Organico – PP			20	23	10	10			12	17	11	7
Piattaforma	8	11	8	9	10	10	8	11	8	9	10	10
Raccolte - totale (€/t RSU)	71	85	147	127	106	89	61	72	130	105	93	73

4.2.2 Il costo di gestione delle fasi impiantistiche

Nella seguente Tabella 4.7 sono riportati i costi specifici degli impianti, ottenuti dividendo i costi industriali per la quantità di RSU generati nel bacino considerato. Nelle Tabelle 4.8 e 4.9 sono riportati in dettaglio i costi dell'incenerimento e della discarica.

Tabella 4.7 - Costi di trattamento e smaltimento rapportati alla quantità di RSU generata (euro/t RSU).

COSTI	BACINO PICCOLO						BACINO GRANDE											
	S35	S50	P50	P65	PC75	PC85	S35		S50		P50		P65		PC75		PC85	
							EL	COG	EL	COG	EL	COG	EL	COG	EL	COG		
Sabbia sintetica	0	0	0	0	0	33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	33
Termovalorizzatore	84	73	77	64	40	0	64	64	52	52	52	52	45	45	34	34	0	
Discarica	7	5	6	5	4	0	4	4	3	3	4	4	3	3	2	2	0	
Costi trasporto	1	2	1	2	2	3	1	1	2	2	1	1	2	2	2	2	3	
Selez. Multi Mat	3	0	0	0	0	0	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Selez. Carta	27	24	16	22	24	29	22	22	24	24	16	16	22	22	24	24	29	
Selez. Vetro	0	3	2	3	3	3	0	0	3	3	2	2	3	3	3	3	3	
Selez. Plastica	0	8	7	0	0	0	0	0	8	8	7	7	0	0	0	0	0	
Selez. Plastica-Metalli	0	0	0	9	10	11	0	0	0	0	0	0	9	9	10	10	11	
Compost	0	0	11	14	12	12	0	0	0	0	11	11	14	14	14	14	11	
Impianti - Totale	122	115	120	119	94	90	94	94	93	93	93	93	98	98	88	88	89	

Tabella 4.8 – Dettaglio dei costi dell'inceneritore.

Termovalorizzatore		Bacino piccolo					Bacino grande									
		S35	S50	P50	P65	PC75	S35	S35	S50	S50	P50	P50	P65	P65	PC75	PC75
							EL	COGEN	EL	COGEN	EL	COGEN	EL	COGEN	EL	COGEN
Costo (ENEA)	€/t	110	115	115	120	120	80	80	82	82	82	82	85	85	85	85
Costo totale	milioni €	12,65	10,95	11,5	9,6	6	48	48	39,36	39,36	39,36	39,36	34	34	25,5	25,5
Costo/RSU	€/t	84	73	77	64	40	64	64	52	52	52	52	45	45	34	34

Tabella 4.9 – Dettaglio dei costi della discarica

Discarica		Bacino piccolo					Bacino grande				
		S35	S50	P50	P65	PC75	S35	S50	P50	P65	PC75
Costo industriale	€/t	44,35	44,35	44,35	44,35	44,35	36,93	36,93	36,93	36,93	36,93
Costo industriale	€/t RSU	2,04	1,68	1,87	1,65	1,34	1,13	0,83	0,99	0,8	0,64
Ecotassa	€/t RSU	1,15	0,95	1,05	0,93	0,75	0,77	0,56	0,67	0,54	0,43
Benefit EELL	€/t RSU	1,15	0,95	1,05	0,93	0,75	0,77	0,56	0,67	0,54	0,43
Benefit proprietario	€/t RSU	2,3	1,9	2,11	1,86	1,51	1,53	1,13	1,34	1,08	0,87
Costo Totale	€/t RSU	6,65	5,48	6,09	5,36	4,35	4,19	3,08	3,66	2,97	2,37

4.2.3 I costi esterni

Nella Tabella 4.10 viene riportato il dettaglio dei costi esterni calcolati per i diversi scenari. Come si può vedere, il totale risulta chiaramente influenzato dai benefici esterni. Questo calcolo è influenzato dalle ipotesi adottate a proposito del recupero energetico: nel caso della cogenerazione, esso risulta addirittura superiore al costo esterno associato alle emissioni degli impianti. Per quel che riguarda i benefici derivanti dal recupero di materia, si tratta, come si notava sopra, di una stima alquanto imprecisa, plausibile soprattutto come ordine di grandezza.

Tabella 4.10 – Costi esterni nei diversi scenari.

		Bacino Piccolo						Bacino Grande										
		S35	S50	P50	P65	PC75	PC85	S35		S50		P50		P65		PC75		PC85
								S.E.	CO.	S.E.	CO.	S.E.	CO.	S.E.	CO.	S.E.	CO.	
Costi Esterni	Fonte	18,45	16,72	16,18	14,50	9,98	7,96	18,21	18,21	16,48	16,48	15,95	15,95	14,26	14,26	11,58	11,58	7,97
Emissioni prodotte	Termovalorizzatore	15,08	12,72	12,47	10,49	6,13	0,00	15,08	15,08	12,72	12,72	12,47	12,47	10,49	10,49	7,77	7,77	0,00
	Discarica	0,59	0,49	0,54	0,48	0,39	0,00	0,39	0,39	0,29	0,29	0,34	0,34	0,28	0,28	0,22	0,22	0,00
Disamenity Impacts	Termovalorizzatore	0,71	0,60	0,59	0,49	0,29	0,00	0,71	0,71	0,60	0,60	0,59	0,59	0,49	0,49	0,37	0,37	0,00
	Discarica	0,05	0,04	0,04	0,04	0,03	0,00	0,03	0,03	0,02	0,02	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,00
Damage from leachate	Discarica	0,07	0,06	0,06	0,06	0,05	0,00	0,05	0,05	0,03	0,03	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,00
CE Trasporto	Raccolta	0,25	0,35	0,73	0,78	0,60	0,61	0,25	0,25	0,35	0,35	0,73	0,73	0,78	0,78	0,68	0,68	0,61
	Discarica	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Raccolta plastiche mancanti	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,59	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,59
	Recupero	1,70	2,46	1,75	2,17	2,49	2,76	1,70	1,70	2,46	2,46	1,75	1,75	2,17	2,17	2,50	2,50	2,78
Benefici esterni	Fonte	-69,75	-83,60	-69,46	-63,60	-79,47	-81,78	-61,36	-66,16	-76,38	-80,37	-62,25	-66,22	-68,25	-71,98	-78,76	-81,53	-81,78
Emissioni evitate	Termovalorizzatore	-19,14	-15,84	-15,87	-14,85	-8,68	0,00	-10,75	-15,54	-8,62	-12,61	-8,65	-12,62	-8,08	-11,81	-5,99	-8,75	0,00
Risparmio energetico	Recupero	-46,17	-61,64	-49,12	-43,50	-64,42	-74,11	-46,17	-46,17	-61,64	-61,64	-49,12	-49,12	-54,68	-54,68	-66,36	-66,36	-74,11
CO2 evitata	Recupero	-4,45	-6,12	-4,48	-5,25	-6,36	-7,67	-4,45	-4,45	-6,12	-6,12	-4,48	-4,48	-5,49	-5,49	-6,42	-6,42	-7,67
Saldo Costi – Benefici		-51,30	-66,88	-53,28	-49,10	-69,49	-73,82	-43,15	-47,94	-59,90	-63,89	-46,30	-50,27	-53,99	-57,72	-67,18	-69,95	-73,80

4.2.4 I ricavi dalla vendita di materiali recuperati e sottoprodotti

A questo punto, per i sei scenari raffiguranti il bacino piccolo, e per gli undici scenari raffiguranti il bacino grande (considerando sia l'ipotesi di impiego di un termovalorizzatore senza il recupero di calore, sia l'ipotesi di utilizzo di un impianto cogenerativo), vengono di seguito presentate le tabelle (da 4.11 a 4.14) riportanti i diversi ricavi relativi al recupero energetico ed al recupero di materia.

Se invece si va a considerare un esempio dei ricavi derivanti dal sottoscenario di smaltimento in cui si ha la produzione del CDR-Q, questi sono elencati nella successiva Tabella 4.15. Come è facile notare, essi sono molto inferiori rispetto allo scenario di smaltimento tradizionale, in quanto risentono del minor quantitativo di tonnellate avviate al termovalorizzatore, e della conseguente minor produzione di energia elettrica e termica. Tuttavia, in queste voci di ricavo, particolare importanza è assunta dalla voce relativa al risparmio del coke in cementificio conseguente all'impiego del CDR-Q presso questi impianti.

Questa convenzione è stata adottata dal momento che il prezzo del CDR-Q riscontrabile sul mercato risente delle imperfezioni di questo, e non può essere preso come riferimento del suo effettivo valore. Si parte dall'ipotesi che per il produttore di CDR-Q il minimo prezzo accettabile è costituito dal valore che copre il costo dello smaltimento alternativo del flusso di rifiuto secco (es. in discarica o in inceneritore) al netto dei costi industriali: questo valore dipende dunque dai costi di smaltimento risparmiati, che non sono gli stessi in ogni contesto. D'altra parte, l'utilizzatore del CDR-Q sarà disposto a pagare una somma pari al valore del combustibile sostituito, al netto degli eventuali costi da sostenere per adeguare l'impianto. Il prezzo di mercato potrà collocarsi in un punto qualsiasi entro questi due limiti, in funzione del potere contrattuale delle controparti; a questo proposito, si può avanzare l'ipotesi che in questo caso sia l'utilizzatore finale a trovarsi in posizione di vantaggio, e a poter imporre le condizioni. Se si considerasse il prezzo, invece che il valore complessivo, verrebbe trascurato il margine di profitto ottenuto dall'utilizzatore finale.

Tabella 4.11 - Ricavi relativi al recupero energetico per gli scenari con bacino piccolo.

BACINO PICCOLO	S35	S50	P50	P65	PC75	PC85
Energia elettrica (MW/h prodotti)	48.853	38.074	38.193	35.537	20.787	0
Energia elettrica (Ricavi totali in €)	3.663.977	2.855.536	2.864.490	2.665.240	1.559.025	0
Energia elettrica (Ricavi/tRSU)	24,43	19,04	19,10	17,77	10,39	0
Calore (MW/h prodotti)	237.865	199.280	199.522	186.882	109.319	0
Calore (Ricavi totali in €)	8.325.281	6.974.797	6.983.269	6.540.873	3.826.165	0
Calore (Ricavi/RSU)	55,5	46,50	46,56	43,61	25,51	0

Tabella 4.12 - Ricavi relativi al recupero di materia per gli scenari con bacino piccolo.

BACINO PICCOLO		S35	S50	P50	P65	PC75	PC85
Vetro	Ricavi totali (€)	18.092	40.603	23.170	34.943	35.844	40.865
	Ricavi/RSU	0,12	0,27	0,15	0,23	0,24	0,25
Carta	Ricavi totali (€)	649.030	698.937	481.573	655.761	715.764	938.707
	Ricavi/RSU	4	4,66	3,21	4,37	4,77	6,26
Plastica	Ricavi totali (€)	104.958	1.779.876	1.826.622	1.346.226	2.317.896	2.832.984
	Ricavi/RSU	0,70	11,87	12,18	8,97	15,45	18,89
Recupero Scorie	Ricavi totali (€)	284.837	191.430	258.154	199.589	116.760	0
	Ricavi/RSU	2	1,28	1,72	1,33	0,78	0
Alluminio da RD	Ricavi totali (€)	296.746	499.401	184.561	436.433	462.489	455.975
	Ricavi/RSU	2	3,33	1,23	2,91	3,08	3,04
Alluminio recuperato da scorie	Ricavi totali (€)	145.440	38.109	204.756	71.477	42.240	32.253
	Ricavi/RSU	1	0,25	1,37	0,48	0,28	0,21
Metalli ferrosi	Ricavi totali (€)	19.565	20.484	17.871	18.353	20.296	20.840
	Ricavi/RSU	0,13	0,14	0,12	0,12	0,13	0,14
Compost	Ricavi totali (€)	23.192	30.928	76.600	95.200	56.288	56.288
	Ricavi/RSU	0,15	0,21	0,51	0,63	0,38	0,38
Ricavi Totali (Recupero di materia ed energia) Ricavi/RSU		90,21	87,53	86,14	80,43	61,02	29,17

Tabella 4.13 - Ricavi relativi al recupero energetico per gli scenari con bacino grande.

BACINO GRANDE	S35		S50		P50		P65		PC75		PC85
	S.E.	COGEN	S.E.	COGEN	S.E.	COGEN	S.E.	COGEN	S.E.	COGEN	
Energia elettrica (MW/h prodotti)	410.663	365.330	329.429	292.525	330.331	292.844	308.627	273.758	228.738	202.896	0
Energia elettrica (Ricavi totali in €)	30.799.750	27.399.777	24.707.1€41	21.939.401	24.774.860	21.963.294	23.147.030	20.531.861	17.155.350	15.217.200	0
Energia elettrica (Ricavi/RSU)	41,07	36,53	32,94	29,25	33,03	29,28	30,86	27,38	22,87	20,29	0
Calore (MW/h prodotti)	0	798.927	0	652.107	0	652.283	0	610.948	0	452.804	0
Calore (Ricavi totali in €)	0	27.962.439	0	22.823.728	0	22.829.918	0	21.383.182	0	15.848.140	0
Calore (Ricavi/RSU)	0	37,28	0	30,43	0	30,44	0	28,51	0	21,13	0

Tabella 4.14 - Ricavi relativi al recupero di materia per gli scenari con bacino grande.

BACINO GRANDE		S35		S50		P50		P65		PC75		PC85
		S.E.	COGEN	S.E.	COGEN	S.E.	COGEN	S.E.	COGEN	S.E.	COGEN	
Vetro	Ricavi totali (€)	90.470	90.470	203.013	203.013	115.839	115.839	174.719	174.719	179.220	179.220	190.421
	Ricavi/RSU	0,12	0,12	0,27	0,27	0,15	0,15	0,23	0,23	0,24	0,24	0,25
Carta	Ricavi totali (€)	3.245.119	3.245.119	3.494.744	3.494.744	2.407.893	2.407.893	3.278.835	3.278.835	3.578.821	3.578.821	4.693.535
	Ricavi/RSU	4,33	4,33	4,66	4,66	3,21	3,21	4,37	4,37	4,77	4,77	6,26
Plastica	Ricavi totali (€)	525.084	525.084	8.899.380	8.899.380	9.133.404	9.133.404	6.730.836	6.730.836	11.589.480	11.589.480	14.141.400
	Ricavi/RSU	0,70	0,70	11,87	11,87	12,18	12,18	8,97	8,97	15,45	15,45	18,89
Recupero Scorie	Ricavi totali (€)	1.424.181	1.424.181	957.136	957.136	1.290.771	1.290.771	997.949	997.949	739.620	739.620	0
	Ricavi/RSU	1,90	1,90	1,28	1,28	1,72	1,72	1,33	1,33	0,98	0,98	0
Alluminio da RD	Ricavi totali (€)	1.483.005	1.483.005	2.496.283	2.496.283	922.807	922.807	2.181.443	2.181.443	2.312.445	2.312.445	2.279.875
	Ricavi/RSU	1,98	1,98	3,33	3,33	1,23	1,23	2,91	2,91	3,08	3,08	3,04
Alluminio recuperato da scorie	Ricavi totali (€)	727.199	727.199	190.541	190.541	1.023.782	1.023.782	357.386	357.386	265.172	265.172	161.265
	Ricavi/RSU	0,97	0,97	0,25	0,25	1,37	1,37	0,48	0,48	0,35	0,35	0,21
Metalli ferrosi	Ricavi totali (€)	97.831	97.831	102.434	102.434	89.371	89.371	91.775	91.775	110.072	110.072	104.205
	Ricavi/RSU	0,13	0,13	0,14	0,14	0,12	0,12	0,12	0,12	0,14	0,14	0,14
Compost	Ricavi totali (€)	115.976	115.976	154.640	154.640	382.984	382.984	476.016	476.016	364.896	364.896	281.464
	Ricavi/RSU	0,15	0,15	0,21	0,21	0,51	0,51	0,63	174.719	0,48	0,48	0,38
Ricavi Totali (Recupero di materia ed energia) Ricavi/RSU		51,34	84,09	54,94	81,68	53,52	80,21	49,91	74,94	48,39	66,94	29,17

Tabella 4.15 - Ricavi per il sottoscenario S35 Bacino Piccolo CDR-Q.

RICAVI	UdM	Prezzo	Quantità (t)	Ricavi totali (€)	Ricavi/RSU
Energia elettrica	€/MWh	75	10.923	375.191	2,50
Calore	€/MWh	35	10.923	852.509	5,68
Vetro	€/ton	5,15	3.513	18.092	0,12
Carta	€/ton	30,32	21.406	649.030	4,33
Plastica	€/ton	294	357	104.958	0,70
Alluminio da RD	€/ton	723,77	410	296.746	1,98
Alluminio recuperato da scorie	€/ton	1173,33	124	145.440	0,97
Metalli ferrosi	€/ton	8	2.446	19.565	0,13
Compost	€/ton	8	2.899	23.192	0,15
Ricavi da risparmio di coke	€/ton	17,11	106.666	1.825.536	12,17
TOTALE RICAVI	€/t RSU				28,74

4.2.5 Confronto finale

La Tabella 4.16 contiene la sintesi dei risultati ottenuti, evidenziando separatamente il costo di raccolta, il costo di trattamento, il costo esterno netto e i ricavi derivanti dalla vendita dei sottoprodotti.

La tabella è costruita in forma di conto economico a scalare, in modo da evidenziare l'importanza relativa dei diversi saldi. In particolare, vengono evidenziati a parte i costi e benefici esterni.

In termini di costo industriale, come si può vedere, gli scenari basati su raccolte stradali presentano costi inferiori rispetto a quelli in cui si effettua una raccolta capillare. Questi ultimi evidenziano un andamento marcatamente decrescente in funzione delle rese di raccolta e della possibilità di praticare forme intensive di recupero di materiale. Pur risultando avere costi comunque superiori, infatti, questi scenari si riavvicinano sensibilmente ai valori dei primi due.

Questo dato induce a riflettere in merito alla desiderabilità, da un punto di vista economico, del recupero diretto. I sistemi di raccolta porta a porta e le complesse filiere che è necessario mobilitare a valle implicano dei costi fissi importanti, che possono essere convenientemente assorbiti solo se le rese sono molto elevate. Le ipotesi che sorreggono gli ultimi due scenari, infatti, non solo presuppongono un'adesione molto elevata alla raccolta differenziata, ma anche un'effettiva capacità e disponibilità ad effettuare presso le abitazioni tutte le attività di separazione, lavaggio, pulizia dei contenitori etc, tutte necessarie affinché dalla raccolta differenziata si possa passare al recupero senza scarti eccessivi. Molto elevati invece risultano i costi di questi sistemi di gestione se la risposta dei cittadini fosse inferiore alle attese (lo scenario P50 potrebbe essere considerato rappresentativo del livello minimo di risposta da parte dei cittadini). E' dunque fondamentale che la scelta di questi sistemi si accompagni a un'intensa campagna di sensibilizzazione e partecipazione dei cittadini, possibilmente incentivata anche da strumenti di tipo economico come una tariffa premiante per il conferimento differenziato.

Va inoltre verificata la praticabilità della raccolta porta a porta, la quale si presta molto bene alle utenze diffuse e alle zone residenziali, ma molto meno bene ai contesti urbani ad alta densità, ai quartieri popolari o ai centri storici. Un fattore che incide in modo significativo sui costi è rappresentato dalla raccolta differenziata dell'umido domestico; questi possono essere evitati ipotizzando il compostaggio diretto a domicilio, ma anche in questo caso occorre verificare la disponibilità delle famiglie e il contesto residenziale, dovendo il compost autoprodotta essere utilizzato presso il proprio giardino o nelle aree verdi limitrofe, condominiali o pubbliche.

Va ancora osservato che lo scenario PC85, rappresentativo delle aree italiane considerate da molti come le più avanzate in termini di recupero diretto (es. casi come Aviano, PN o Vittorio Veneto, TV) a un occhio più attento rivelano limiti importanti quando si immagina di trasferire la loro esperienza a scale territoriali più grandi, come quella dell'ambito provinciale. Infatti, il recupero diretto del RUR attraverso la trasformazione in materiali per l'edilizia (sabbia sintetica) richiede la miscelazione con quantità ben maggiori di scarti industriali, la cui reperibilità condiziona la fattibilità tecnica dello scenario. D'altra parte, se questi scarti non fossero valorizzati in questo modo, potrebbero essere destinati alla produzione di cdr, o semplicemente inviati a discarica, ma allora i costi sarebbero ben maggiori.

E' opportuno sottolineare che l'apparente vantaggiosità economica di questi scenari per i comuni, risultante anche dall'analisi dei dati forniti dai comuni all'Osservatorio nazionale rifiuti attraverso i rendiconti tariffari (Ecoistituto di Faenza, 2008), è una vantaggiosità artificiale, che dipende da un lato dagli elevati incentivi che i comuni ricevono per i materiali raccolti in modo differenziato, dall'altro dagli elevati costi di smaltimento evitati, dovendo questi comuni altrimenti rivolgersi o a discariche di terzi o a impianti di incenerimento che praticano tariffe di conferimento molto elevate.

E' utile ribadire infatti che la nostra analisi valuta i costi delle varie tecnologie attraverso un modello ingegneristico, e dunque non solo considerando impianti dimensionati in modo ottimale e con le migliori tecnologie disponibili, ma anche operanti in un mercato non distorto, in cui le tariffe corrispondono ai costi effettivi, senza extra-profitti e rendite di monopolio. La traduzione di questa ipotesi al dato reale richiede perciò un'attenta regolazione del mercato, volta a ricondurre le tariffe di conferimento al costo effettivo, in assenza del quale il potere di mercato di cui godrebbero i gestori degli impianti potrebbe consentir loro di praticare tariffe maggiori.

Tra gli scenari basati sulle raccolte stradali, comunque, risulta vincente quello in cui il livello di differenziazione, e dunque di recupero diretto, è maggiore. Un'altra caratteristica che emerge in modo netto è l'importanza della cogenerazione. Pur essendo gli scenari basati sul solo recupero di elettricità ancora meno costosi degli altri, la cogenerazione consente un abbattimento del costo industriale di un ulteriore 30%. Il recupero del calore richiede la messa in opera di una rete di teleriscaldamento (che qui si è supposto già esistente, ma il cui costo potrebbe incidere in modo sensibile se dovesse essere realizzata ad hoc). Il calore potrebbe essere recuperato anche in altro modo, ad esempio in poli industriali prossimi all'impianto, o utilizzato per utenze pubbliche (es. impianti sportivi), realizzando così uno scambio con il territorio potenzialmente vantaggioso e tale da circoscrivere le opposizioni sociali.

Va infine considerato che secondo la nostra indagine per il trattamento del RUR l'opzione che risulta largamente preferibile è la combustione diretta dell'intero flusso, che come noto si compone sia del rifiuto conferito in modo indifferenziato, sia degli scarti della selezione e del trattamento per il recupero. La separazione del secco dall'umido, e a maggior ragione la produzione di CDR, comportano maggiorazioni di costo sensibili, tali da spostare decisamente l'ordine di convenienza a favore del riciclaggio diretto spinto.

Queste soluzioni possono risultare desiderabili come rimedi di second-best, qualora non sia possibile né realizzare impianti di termovalorizzazione adeguati né spingere la raccolta differenziata oltre certi livelli. Per la produzione di CDR-Q valgono inoltre considerazioni analoghe a quelle svolte per lo scenario PC85, ossia la necessità per ottenere un combustibile dalle caratteristiche adeguate di miscelare il flusso urbano con scarti di origine industriale, la cui effettiva reperibilità condiziona la fattibilità dell'operazione.

Passando dai costi industriali ai costi esterni la nostra analisi consente di smentire in modo abbastanza netto l'opinione comune secondo cui il recupero diretto sarebbe da preferirsi da un punto di vista ambientale rispetto all'incenerimento. Se è vero infatti che, complessivamente, le emissioni di quest'ultimo sono relativamente elevate rispetto al recupero, questa valutazione si tempera notevolmente se si tiene conto dei benefici rappresentati dalle emissioni evitate. In questo caso, se lo scenario PC85 risulta complessivamente vincente, anche gli altri scenari esibiscono performance notevoli, con un bilancio nettamente favorevole rispetto allo status quo.

Si fa presente che questo risultato dipende in modo sensibile dall'efficienza di recupero energetico: i nostri dati sono infatti stimati in relazione a impianti che adottano le migliori tecnologie oggi disponibili, e nell'ipotesi che il RUR raggiunga determinati livelli di potere calorifico. D'altra parte, è opportuno anche ricordare che l'approccio seguito per quantificare costi e benefici esterni, basato sul lavoro di Rabl e Spadaro, 2008, avvalendosi del metodo dell'impact-pathway analysis consente una quantificazione molto precisa dei potenziali impatti negativi sulla salute, essendo basato sulle risultanze dei più recenti modelli epidemiologici; vale la pena di notare che, in ogni caso, il bilancio va fatto mettendo su un piatto della bilancia le emissioni dell'inceneritore, ma sull'altro quelle evitate, che dipendono anche dal tipo di combustibili che si va a sostituire. Poiché in generale gli inceneritori più moderni presentano standard di emissione molto severi e generalmente migliori di quelli degli impianti che vanno a sostituire, maggiore è il costo esterno unitario, maggiore è anche il beneficio delle emissioni evitate; questo vale soprattutto per gli impianti di riscaldamento domestico e per le centrali termoelettriche alimentate ad olio combustibile o a carbone.

Va ricordato infine che gli studi epidemiologici su cui si basa il modello CAFE, utilizzato da Rabl e Spadaro, considerano gli impatti per i quali esiste una consolidata base di letteratura; tra questi tutti gli inquinanti atmosferici tradizionali (SOx, NOx, polveri sottili) e i microinquinanti come le diossine; non altri potenziali

impatti, in particolare quelli legati alle polveri ultrasottili; per questi ultimi, non esistono tuttora evidenze empiriche che dimostrino il reale impatto aggiuntivo della presenza di un inceneritore, e che dunque siano in grado di correlare le emissioni con l'insorgere di patologie. Nel caso in cui nuovi studi dovessero fornire evidenza di un impatto significativo da parte degli inceneritori, se ne dovrebbe evidentemente tenere conto.

Tabella 4.16 – Costi di gestione, costi esterni, ricavi e costi netti effettivi: tabella di sintesi (€/t RSU).

Valori in €/t	BACINO PICCOLO						BACINO GRANDE										
	S35	S50	P50	P65	PC75	PC85	S35		S50		P50		P65		PC75		PC85
							EL	COG	EL	COG	EL	COG	EL	COG	EL	COG	
Costi Raccolte	71	85	147	127	106	89	61	61	72	72	130	130	105	105	93	93	73
Costi industriali di recupero e smaltimento	122	115	120	119	94	90	94	94	93	93	93	93	98	98	88	88	89
Costo Totale	193	200	267	246	200	179	156	156	165	165	223	223	203	203	181	181	163
Ricavi	90	88	86	80	61	29	51	84	55	82	54	80	50	75	48	67	29
Costo Netto Industriale	103	112	181	166	139	150	104	72	110	83	170	143	153	128	132	114	134
Costi esterni	18	17	16	14	10	8	18	18	16	16	16	16	14	14	12	12	8
Costo totale parziale	121	129	197	180	149	158	122	90	126	99	185	159	168	143	144	125	142
Benefici esterni	-70	-84	-69	-64	-79	-82	-61	-66	-76	-80	-62	-66	-68	-72	-79	-82	-82
Costo effettivo netto Totale	51	46	127	116	70	76	61	24	50	19	123	93	100	71	65	44	60
Incremento di costi con sottoscenari che implicano diverse soluzioni per il trattamento del RUR																	
Produzione Biostabilizzato	+60	+46	+44	+36	+25			+47		+44		+47		+37		+34	
Produzione Biostabilizzato+ CDR	+71	+52	+48	+45	+26			+73		+73		+71		+62		+49	
Produzione Biostabilizzato + CDR-Q	+83	+70	+59	+59	+31												

5. L'analisi di sensitività

5.1 Premessa

Analizzando la tabella riassuntiva dei risultati si può notare che le soluzioni più economiche sono quelle caratterizzate dai primi due scenari, caratterizzati da più basse percentuali di raccolta differenziata. Il costo aumenta con l'aumento della percentuale di RD e l'introduzione della raccolta porta a porta incrementa il costo in maniera sempre più marcata.

Poiché molte ipotesi del modello sono state formulate con una certa discrezionalità, seppur basandosi su numerosi riferimenti presenti in letteratura, giudizi di esperti e dati empirici, esse, inevitabilmente, si prestano ad essere criticate ed hanno reso necessario lo svolgimento di un'analisi di sensitività del modello per verificare la sua efficacia e la sua solidità. L'obiettivo di questa analisi è quello di individuare le variabili rappresentanti i punti deboli dello stesso modello, al fine di valutare la robustezza dei risultati.

A questo scopo, sono state preliminarmente individuate le ipotesi alla base di ciascuno scenario e di ciascuna tecnologia elementare, identificando quelle su cui poteva esserci una minore certezza; si sono successivamente formulate ipotesi alternative estreme, in modo da testare la robustezza del risultato finale rispetto alla variazione delle ipotesi relative. L'analisi che segue dunque non è "realistica", nel senso che in molti casi l'ipotizzare valori pari al doppio o alla metà di quelli utilizzati negli scenari conduce a risultati del tutto impossibili da riscontrare nella realtà; il senso dell'analisi consiste essenzialmente nel cogliere l'importanza delle diverse variabili e il modo con cui le ipotesi effettivamente formulate condizionano il risultato finale.

Tra le ipotesi del modello, sono stati perciò individuati i seguenti punti:

- L'impatto dei ricavi dovuti alla vendita delle materie recuperate sui costi netti unitari, ipotizzando una variazione dei prezzi dei sottoprodotti;
- L'impatto che i costi esterni hanno sul costo netto unitario, ipotizzando una variazione dei costi unitari presi come riferimento per le diverse tipologie di emissione, e in particolare per la CO₂;
- L'impatto delle economie di scala negli impianti più capital intensive (inceneritori), ipotizzando che il RUR possa essere smaltito in impianti di ottima dimensione e senza la necessità di prevedere buffer di capacità;
- L'impatto dell'efficienza energetica, ipotizzando impianti con rendimenti inferiori a quelli assunti come riferimento, oppure composizioni merceologiche del rifiuto con minore potere calorifico;
- L'incidenza degli scarti, provenienti sia dalla raccolta differenziata che dai trattamenti finalizzati al recupero.

Infine per lo Scenario PC75 sono state effettuate anche le seguenti analisi:

- La variazione dei costi di raccolta unitari al diminuire della percentuale di materiale intercettato durante la raccolta stessa;
- Un'analisi di tipo net-back diretta a stimare la resa di raccolta differenziata che si dovrebbe ipotizzare affinché le modalità di smaltimento previste nello Scenario PC75 risultino competitive con quelle dello scenario meno costoso;
- Come variano i costi di questo scenario al variare delle percentuali di FORSU raccolta con il PaP, utilizzando i composte domestici e quella rimanente nel RUR.

L'analisi di sensitività è stata effettuata, salvo specificazione contraria, ipotizzando che il parametro critico assumesse un valore pari alla metà o al doppio di quello preso come riferimento nel modello.

Di seguito si riporta un paragrafo per ognuno di questi punti, spiegando loro importanza, i risultati ottenuti ed una loro breve interpretazione.

5.2 L'analisi della variazione dei ricavi dei materiali recuperati

L'analisi sui ricavi mira ad individuare la loro influenza sul modello. Il fine è quello di valutare l'affidabilità del sistema nel vendere i materiali recuperati. L'energia è stata esclusa da questa analisi in quanto avrà sempre mercato e pertanto il suo collocamento sarà sempre certo, mentre per gli altri materiali questo non è sicuro.

Di conseguenza si è deciso di raddoppiare e dimezzare tali ricavi, considerando i valori risultanti come i limiti del range di variazione della variabile considerata.

Le variazioni del costo netto unitario, espresso in €/t RSU) sono riportati nella Tabella 5.1 sottostante, dove in azzurro si può notare la soluzione più economica per entrambi i tipi di bacini.

Tabella 5.1 - Variazione dei ricavi dei materiali recuperati.

		Risultati Effettivi	Ricavi Raddoppiati	Ricavi dimezzati	
Bacino piccolo	Scenario S35	51,34	41,06	56,48	
	Scenario S50	45,53	23,54	56,53	
	Scenario P50	127,39	106,90	137,63	
	Scenario P65	116,44	97,39	125,97	
	Scenario PC75	69,94	44,83	82,50	
	Scenario PC85	76,38	47,21	90,96	
Bacino Grande	Scenario S35	solo elettrico	61,13	50,85	66,27
		Cogenerativo	23,58	13,30	28,72
	Scenario S50	solo elettrico	49,83	27,83	60,83
		Cogenerativo	19,10	-2,90	30,10
	Scenario P50	solo elettrico	123,20	102,71	133,45
		Cogenerativo	92,54	72,05	102,79
	Scenario P65	solo elettrico	99,50	80,45	109,03
		Cogenerativo	70,75	51,70	80,27
	Scenario PC75	solo elettrico	65,18	39,66	77,94
		Cogenerativo	43,87	18,35	56,63
	Scenario PC85		60,00	30,84	74,59

Dai valori ottenuti si può notare che le variazioni sono più accentuate quando si considerano gli Scenari PC75 e PC85. Questo risultato era intuibile in quanto più la raccolta differenziata si fa spinta, più materiale

viene recuperato e maggiori sono gli introiti per la sua vendita. Raddoppiando i ricavi lo Scenario S50 permane il più economico, evidenziando che nel bacino grande comporterebbe addirittura un beneficio. Mentre, nel caso si dimezzassero i ricavi dovuti alla vendita dei materiali recuperati, la soluzione più economica non sarebbe più lo Scenario S50 ma diventerebbe lo Scenario S35.

5.3 L'analisi dei costi esterni

L'oggetto di analisi di questo paragrafo sono tutte le esternalità collegate all'attività di raccolta e smaltimento dei rifiuti, ovvero si cerca di associare un quantitativo monetario all'impatto ambientale di queste attività.

L'analisi effettuata nello studio tiene conto dei costi esterni dei seguenti componenti:

- Gas serra;
- Inquinanti atmosferici convenzionali e alcune sostanze tossiche volatili;
- Percolato;
- Effetti ambientali.

Tabella 5.2 - Variazioni di costo netto al variare dei costi esterni.

		Risultati Effettivi	Costi esterni Raddoppiati	Costi esterni Dimezzati	
Bacino piccolo	Scenario S35	51,34	0,04	76,99	
	Scenario S50	45,53	-21,34	78,97	
	Scenario P50	127,39	74,11	154,03	
	Scenario P65	116,44	67,34	140,99	
	Scenario PC75	69,94	0,45	104,69	
	Scenario PC85	76,38	2,56	113,29	
Bacino Grande	Scenario S35	solo elettrico	61,13	17,98	82,70
		Cogenerativo	23,58	-24,36	47,55
	Scenario S50	solo elettrico	49,83	-10,07	79,78
		Cogenerativo	19,10	-44,79	51,04
	Scenario P50	solo elettrico	123,20	76,90	146,35
		Cogenerativo	92,54	42,27	117,68
	Scenario P65	solo elettrico	99,50	45,52	126,50
		Cogenerativo	70,75	13,03	99,61
	Scenario PC75	solo elettrico	65,18	-2,00	98,77
		Cogenerativo	43,87	-26,08	78,84
	Scenario PC85		60,00	-13,80	96,91

La valutazione tiene conto inoltre delle esternalità positive dovute alla diminuzione di emissioni per il recupero di energia e per il riciclo.

Bisogna, tuttavia, sottolineare la considerevole incertezza legata a questi costi, ed è proprio da questa incertezza che scaturisce la necessità di verificare l'impatto di questi dati sul risultato finale.

Si è deciso di analizzare le variazioni di costo netto unitario al raddoppiare e dimezzare dei costi esterni unitari. I risultati sono riportati nella Tabella 5.2.

Si può notare dalla tabella che le variazioni sono molto significative e spesso sono superiori al 50%. Il modello, dunque, risulta essere poco robusto ad errori commessi sulle ipotesi relative ai costi esterni. Inoltre, nel caso in cui questi costi raddoppiassero sono diversi gli scenari che rappresenterebbero un beneficio, mantenendo tuttavia lo scenario S50 come quello maggiormente preferibile. Il dimezzamento dei costi renderebbe, invece, più economico di poche unità lo Scenario S35.

5.4 Lo sfruttamento di economie di scala per il termovalorizzatore negli scenari con bacino piccolo

Per quanto riguarda gli scenari con bacino piccolo, nel modello si è ipotizzato di utilizzare un termovalorizzatore di dimensioni inferiori rispetto a quello utilizzato nel bacino grande e questo implica maggiori costi di operativi.

Per tal motivo si è ipotizzato di poter sfruttare delle economie di scala facendo confluire il RUR di più bacini piccoli in un unico termovalorizzatore comune. Questo introduce ulteriori costi di trasporto del RUR all'impianto. Si è quindi ipotizzata una distanza media di 80 km tra il bacino ed il termovalorizzatore, un costo di trasporto pari a 17 €/t e dei costi operativi pari a quelli del bacino grande.

Tabella 5.3 - Economie di scala per il termovalorizzatore negli scenari con bacino piccolo.

		Risultati Effettivi	Economie di scala	Variazione %
Bacino piccolo	Scenario S35	51,34	40,43	-21%
	Scenario S50	45,53	34,84	-23%
	Scenario P50	127,39	115,39	-9%
	Scenario P65	116,44	106,18	-9%
	Scenario PC75	69,94	63,19	-10%

I risultati sono riportati nella Tabella 5.3. È possibile notare che, anche se relativamente contenuti, vi sarebbe la possibilità di conseguire dei risparmi dalle economie di scala, in particolare per gli scenari che fanno un maggior ricorso al termovalorizzatore. Questo non vale per lo Scenario P50 che, a differenza dello Scenario S50, presenta un costo di raccolta molto più oneroso e recupera minori quantitativi di materiali.

E' bene sottolineare che affinché questa ipotesi possa concretizzarsi, occorre ipotizzare che gli impianti vengano gestiti con una certa flessibilità. Questo presuppone che venga indebolito il vincolo legato al principio di prossimità ed autosufficienza, in base al quale i rifiuti devono essere trattati entro l'ambito

territoriale di provenienza, permettendo a ciascun impianto di ottenere anche dall'esterno i rifiuti che mancano per ottimizzare l'impiego della capacità: infatti, in caso contrario, ogni ambito territoriale dovrebbe programmare un'adeguata offerta di impianti, adattandoli alla quantità di rifiuti effettivamente generati. Con una maggiore flessibilità, si potrebbero ipotizzare invece impianti di dimensioni ottimali, posti al servizio di un maggior numero di ambiti territoriali. In questo caso vi sarebbero da considerare presumibilmente costi di trasporto maggiori (che non sono stati valutati).

5.5 La capacità in eccesso

Nel modello si è assunto che la capacità del termovalorizzatore fosse superiore del 10% rispetto al necessario. Questa capacità in eccesso comporta dei costi aggiuntivi che potrebbero pesare molto sul bilancio finale. È quindi stato necessario analizzare come la capacità in eccesso vada ad influire sul costo netto unitario di gestione dei rifiuti. Si è ipotizzato di avere due diversi impianti con una capacità in eccesso pari allo 0% ed al 20% e si sono confrontati i costi con il modello originale.

Tabella 5.4 - Analisi della capacità in eccesso degli impianti di termovalorizzazione.

		Risultati Effettivi (10% di eccesso)	Senza capacità in eccesso	Eccesso 20%	
Bacino piccolo	Scenario S35	51,34	45,23	60,87	
	Scenario S50	45,53	41,71	55,51	
	Scenario P50	127,39	118,35	131,87	
	Scenario P65	116,44	111,79	123,66	
	Scenario PC75	69,94	64,66	71,60	
Bacino Grande	Scenario S35	solo elettrico	61,13	54,01	65,39
		cogenerativo	23,58	16,47	27,85
	Scenario S50	solo elettrico	49,83	46,55	56,39
		cogenerativo	19,10	15,82	25,66
	Scenario P50	solo elettrico	123,20	118,94	128,59
		cogenerativo	92,54	88,28	97,92
	Scenario P65	solo elettrico	99,50	96,21	104,62
		cogenerativo	70,75	67,46	75,86
	Scenario PC75	solo elettrico	65,18	62,34	68,57
		cogenerativo	43,87	41,03	47,26

I risultati sono riportati nella Tabella 5.4. Come si può notare le variazioni di costo unitario sono abbastanza contenute e variano dall'1% al 10%.

Anche in questo caso, affinché si possano concretizzare queste ipotesi, è necessario prevedere una maggiore flessibilità nell'uso degli impianti, e dunque un relativo indebolimento del principio di autosufficienza; in caso contrario, non potendo prevedere in anticipo i flussi di rifiuti esatti, ciascun ambito territoriale sarebbe costretto a programmare capacità in eccesso per far fronte alle esigenze future: questo è in linea con quanto avvenuto, ad esempio, in Germania e in Olanda, paesi che proprio per questo motivo hanno a un certo punto deciso di permettere agli impianti di recupero energetico di trattare anche rifiuti di provenienza diversa rispetto al proprio ambito territoriale, una volta soddisfatto l'obbligo di smaltire i rifiuti generati da questi (Massarutto, 2007).

5.6 L'efficienza di recupero energetico

Nei vari scenari si è ipotizzato di utilizzare termovalorizzatori all'avanguardia, con delle produzioni specifiche di energia su tonnellata in ingresso molto elevate. Questi dati sono stati forniti dal Politecnico di Milano e si basano sulle migliori tecnologie disponibili, oltre che su determinate ipotesi relative al potere calorifico del rifiuto. Sebbene queste ipotesi siano senz'altro realistiche, il loro impatto

Tali ipotesi implicano nel caso della cogenerazione addirittura costi esterni negativi ossia benefici esterni, in quanto la sostituzione di centrali termoelettriche e impianti di riscaldamento con l'inceneritore determina una riduzione complessiva delle emissioni (Tabella 5.5).

Si è pensato di sostituire ai valori proposti dal Politecnico le produzioni suggerite da Rabl et al. (2007), che si basano su dati reali forniti da impianti già in esercizio, e che per quanto mediamente più obsoleti rispetto a quelli più recenti, rappresentano tuttavia lo stato dell'arte della tecnologia "su piazza". Con rese minori, oltre a vendere meno energia, si hanno dei costi esterni molto più elevati che possono impattare pesantemente sui risultati. Di seguito si riportano le tabelle con i vari risultati (Tabelle 5.6 e 5.7).

Si può notare che in questo caso le variazioni percentuali sono molto grandi, in particolare per i costi esterni, che diventano in tutti i casi positivi (le emissioni dell'impianto non sono interamente compensate da quelle risparmiate).

Utilizzando i dati di Rabl, nonostante sia lo Scenario S50 a rimanere quello più economico, si nota che nel bacino piccolo lo Scenario PC75 si dimostra estremamente competitivo. Questo denota ancora una volta l'importanza dell'apporto del recupero energetico nel confronto tra i diversi scenari. L'incentivo economico derivante dalla produzione di energia risulta essere uno degli elementi determinanti che incidono pesantemente sul risultato finale.

E' dunque necessaria un'approfondita indagine preventiva per verificare l'effettiva raggiungibilità nel sito previsto dei livelli di recupero energetico.

Tabella 5.5 - Risultati utilizzando i dati del Politecnico di Milano.

		Produzione specifica energia							
		Elettrica	Cogenerativo	Totale	Ricavi Totali	Ricavi Unitari (€/t RSU)	Costo Netto (€/t RSU)	Costi esterni emissioni	
Bacino piccolo	Scenario S35	458	2.230	2.688	13.531.117	90,21	51,34	-609.407	
	Scenario S50	423	2.214	2.637	13.130.100	87,53	45,53	-468.280	
	Scenario P50	433	2.262	2.695	12.921.066	86,14	127,39	-510.123	
	Scenario P65	479	2.519	2.998	12.064.096	80,43	116,44	-654.129	
	Scenario PC75	479	2.519	2.998	9.152.354	61,02	69,94	-382.640	
Bacino Grande	Scenario S35	Solo elettrico	770		770	38.508.615	51,34	61,13	3.245.406
		Cogenerativo	685	1.498	2.183	63.071.082	84,09	23,58	-350.389
	Scenario S50	Solo elettrico	732		732	41.205.313	54,94	49,83	3.074.266
		Cogenerativo	650	1.449	2.099	61.261.301	81,68	19,10	82.832
	Scenario P50	Solo elettrico	749		749	40.141.711	53,52	123,20	2.865.552
		Cogenerativo	664	1.479	2.143	60.160.063	80,21	92,54	-113.120
	Scenario P65	Solo elettrico	832		832	37.435.990	49,91	99,50	1.805.820
		Cogenerativo	738	1.647	2.385	56.204.003	74,94	70,75	-993.943
	Scenario PC75	Solo elettrico	832		832	36.294.851	48,39	65,18	1.338.383
		Cogenerativo	738	1.647	2.385	50.204.757	66,94	43,87	-736.660

Tabella 5.6 - Risultati utilizzando i dati tratti dal lavoro di Rabl.

		Produzione specifica energia						
		Elettrica	Cogenerativo	Totale	Ricavi Totali	Ricavi Unitari (€/t RSU)	Costo Netto (€/t RSU)	Costi esterni
Bacino piccolo	Scenario S35	202	607	809	5.423.968	36,16	118,77	1.397.325
	Scenario S50	202	607	809	6.575.644	43,84	100,21	1.179.118
	Scenario P50	202	607	809	6.283.565	41,89	182,74	1.155.499
	Scenario P65	202	607	809	5.558.091	37,05	170,65	971.876
	Scenario PC75	202	607	809	5.346.597	35,64	101,65	568.509
Bacino Grande	Scenario S35	solo elettrico	270	270	18.508.777	24,68	94,77	8.479.931
		cogenerativo	202	607	809	27.119.374	36,16	81,30
	Scenario S50	solo elettrico	270	270	25.611.461	34,15	76,06	7.155.620
		cogenerativo	202	607	809	32.877.341	43,84	64,69
	Scenario P50	solo elettrico	270	270	24.297.709	32,40	149,86	7.012.377
		cogenerativo	202	607	809	31.418.138	41,89	138,72
	Scenario P65	solo elettrico	270	270	21.800.616	29,07	125,81	5.898.041
		cogenerativo	202	607	809	27.789.539	37,05	116,44
	Scenario PC75	solo elettrico	270	270	24.706.699	32,94	84,68	4.371.331
		cogenerativo	202	607	809	29.145.387	38,86	77,73

Tabella 5.7 – Variazione dei costi e dei ricavi usando i diversi impianti.

		Variazione Ricavi Totali %	Variazione Ricavi Unitari %	Variazione Costo Netto %	Variazione Costi %	
Bacino piccolo	Scenario S35	-60%	-60%	131%	329%	
	Scenario S50	-50%	-50%	120%	352%	
	Scenario P50	-51%	-51%	43%	327%	
	Scenario P65	-54%	-54%	47%	249%	
	Scenario PC75	-42%	-42%	45%	249%	
Bacino Grande	Scenario S35	solo elettrico	-52%	-52%	55%	161%
		cogenerativo	-57%	-57%	245%	2094%
	Scenario S50	solo elettrico	-38%	-38%	53%	133%
		cogenerativo	-46%	-46%	239%	7017%
	Scenario P50	solo elettrico	-39%	-39%	22%	145%
		cogenerativo	-48%	-48%	50%	5207%
	Scenario P65	solo elettrico	-42%	-42%	26%	227%
		cogenerativo	-51%	-51%	65%	589%
	Scenario PC75	solo elettrico	-32%	-32%	30%	227%
		cogenerativo	-42%	-42%	77%	589%

5.7 L'incidenza degli scarti

In questo paragrafo si cerca di analizzare come i costi netti varino al variare degli scarti di materiale durante le varie fasi della raccolta/smaltimento. Questo aspetto è rilevante perché, da una parte l'aumento degli scarti fa diminuire la quantità di materiale vendibile e fa quindi diminuire i ricavi, mentre dall'altra fa aumentare i costi di smaltimento.

Nella Tabella 5.8 si riportano i risultati di tale analisi. Nella penultima e nell'ultima colonna sono riportati i costi netti unitari relativi, rispettivamente, alle ipotesi di avere un valore di scarti pari al doppio o alla metà di quello attuale. Se gli scarti raddoppiassero lo Scenario S35 diverrebbe quello più conveniente, ma in generale permarrrebbe la leadership degli scenari "cassonetto" rispetto a quelli "porta a porta". Nel caso in cui gli scarti si dimezzassero, le variazioni sarebbero più contenute, rispetto al caso precedente, e lo

scenario S50 continuerebbe ad essere il più economico. Il risultato finale è dunque abbastanza robusto rispetto a questa ipotesi.

Tabella 5.8 - Incidenza degli scarti.

		Risultati Effettivi	Scarti raddoppiati	Scarti dimezzati	
Bacino piccolo	Scenario S35	51,34	56,31	48,86	
	Scenario S50	45,53	58,11	39,25	
	Scenario P50	127,39	133,02	124,57	
	Scenario P65	116,44	124,86	112,23	
	Scenario PC75	69,94	72,09	68,87	
	Scenario PC85	76,38	108,74	60,20	
Bacino Grande	Scenario S35	solo elettrico	61,13	70,18	56,60
		Cogenerativo	23,58	29,41	20,67
	Scenario S50	solo elettrico	49,83	68,82	40,33
		Cogenerativo	19,10	33,12	12,08
	Scenario P50	solo elettrico	123,20	134,98	117,32
		Cogenerativo	92,54	99,57	89,03
	Scenario P65	solo elettrico	99,50	115,49	91,51
		Cogenerativo	70,75	78,27	66,99
	Scenario PC75	solo elettrico	65,18	72,52	61,51
		Cogenerativo	43,87	46,61	42,50
	Scenario PC85		60,00	87,87	46,07

5.8 L'efficienza economica del riciclo spinto: un approfondimento

Gli scenari PC75 e PC85 sono modellati tenendo a mente le realtà che, secondo molti osservatori, rappresentano la punta avanzata della gestione dei rifiuti in Italia, dimostrando non solo la fattibilità ma anche la desiderabilità economica di puntare verso un "azzeramento" dei rifiuti (Viale, 2008).

Come si è notato sopra, effettivamente questi scenari, pur presentando costi complessivamente superiori a quelli degli scenari S35 e S50, si discostano relativamente poco da questi. Il messaggio che ne deriva è che, una volta perseguita la strada del riciclo spinto, questa deve essere portata avanti fino in fondo.

Tuttavia, a questo punto possono subentrare altre difficoltà, che sono dovute, in ultima analisi, al livello di confidenza che si può nutrire ex ante sull'effettivo verificarsi delle numerose ipotesi che sostengono questi scenari. La variabile critica è rappresentata dalla resa effettiva della raccolta differenziata, non solo in termini di intercettazione alla fonte, ma anche di qualità del materiale recuperato (scarti della selezione e dei trattamenti successivi). Una variabile particolarmente critica è rappresentata dalla frazione organica: il costo dello scenario risulta favorevolmente influenzato dalla possibilità di ridurre alla fonte questa frazione attraverso il compostaggio domestico, ma si tratta di un'opzione la cui praticabilità dipende dalla struttura insediativa e urbana.

In questo par. esaminiamo con maggiore dettaglio la robustezza dello scenario "rifiuti zero" rispetto alle variabili critiche. Ci focalizziamo in particolare sullo scenario PC75, dal momento che lo scenario PC85 risulta applicabile, a nostro giudizio, solo a situazioni molto particolari.

Consideriamo in primo luogo l'impatto della resa effettiva di intercettazione. Prevedere una raccolta differenziata superiore al 70% implica il dover sostenere le spese per avere delle strutture e delle attrezzature in grado di effettuarla. Ma cosa succede se una volta effettuati questi investimenti la percentuale di materiale recuperato durante la raccolta differenziata è inferiore alle aspettative? In questo paragrafo si è analizzato come i costi dello Scenario PC75 variano in funzione di questa variabile. Si è ipotizzato cioè di adottare un sistema di raccolta differenziata porta a porta, il cui costo è stato considerato come fisso; e si sono ipotizzati livelli crescenti di resa di intercettazione.

Nelle Tabelle 5.9 e 5.10 e nelle Figure 5.1 e 5.2 sono illustrati i risultati dell'elaborazione, rispettivamente per il bacino piccolo che per quello grande.

Si può notare che per piccoli scostamenti dai valori attesi i costi per tonnellata raccolta non subiscono variazioni apprezzabili; ma se si comincia ad avere una quantità recuperata inferiore all'80% del valore atteso, la curva di costo comincia ad essere abbastanza ripida e di conseguenza i costi saranno molto superiori alle attese.

Risulta quindi importante rispettare i valori obiettivo delle rese di intercettazione una volta che sono stati definiti.

In secondo luogo, proviamo a procedere a ritroso. Nelle ipotesi adottate dagli scenari, risulta in genere preferibile spingere il recupero diretto fino a un certo livello, e oltre questo effettuare il recupero energetico. Tale risultato potrebbe essere condizionato dal fatto di aver formulato determinate ipotesi circa le rese delle raccolte differenziate. Quale resa della raccolta differenziata occorrerebbe ipotizzare al fine di rendere convenienti gli scenari di riciclo spinto rispetto a quelli basati sulla termovalorizzazione?

Nella tab. 5.11 e nella fig. 5.1, ipotizziamo che, mantenendo costante il costo unitario della raccolta, il tasso di intercettazione vari da un minimo del 10% a un massimo del 100%. Come si può vedere, anche se per assurdo la raccolta riuscisse a intercettare tutti i materiali, il costo rimane in ogni caso superiore a quello degli scenari più bilanciati; in compenso, il costo totale aumenta molto rapidamente se il tasso di intercettazione scende al di sotto del 50-60%.

Una caratteristica distintiva dello Scenario PC75 è data dai composter utilizzati per smaltire parte della FORSU in maniera privata, senza farla entrare nel processo di raccolta e smaltimento visto in precedenza. Nel modello è stato ipotizzato che nel bacino piccolo la FORSU sia divisa nel seguente modo: il 25% sia raccolto tramite la raccolta porta a porta, il 70% sia smaltito grazie ai composter e infine l'ultimo 5% risulta essere raccolto nel RUR. Per il bacino piccolo, invece, queste percentuali sono, rispettivamente, 40%, 30% e 30%. Si è provato a monitorare l'andamento del costo netto unitario al variare di queste percentuali. Il risultato di tale operazione è riportato nella Tabella 5.13. È possibile osservare che l'influenza di questa ipotesi sui risultati finali è abbastanza marginale se le oscillazioni sono contenute; tuttavia, se la quantità da

raccogliere con il sistema porta a porta fosse maggiore, si ricadrebbe negli scenari P50 e P65, con costi decisamente maggiori.

Complessivamente, si può dunque ritenere che gli scenari di riciclo spinto risultano vulnerabili alla risposta da parte della popolazione, sia in termini quantitativi (frazione di raccolta differenziata) che qualitativi (frazione degli scarti a valle della raccolta differenziata). In altre parole, si tratta di scenari che risentono molto dell'effettiva quantità di RUR che rimane da gestire dopo aver provveduto al riciclo.

Soprattutto nei casi in cui il sistema si trova in una situazione di partenza molto arretrata (prevalenza della discarica, livelli di raccolta differenziata molto scarsi, partecipazione dei cittadini ancora superficiale o episodica) occorre valutare con molto realismo l'effettiva possibilità di attuare in tempi brevi percorsi virtuosi che portino a rendere plausibili determinati livelli di recupero.

Nelle esperienze internazionali più avanzate, questo percorso di apprendimento è stato ricercato soprattutto sfruttando la fase terminale della vita delle discariche, programmando con un certo anticipo gli sforzi in modo da arrivare al momento critico con una consapevolezza chiara di quanti rifiuti non riciclabili restavano da gestire. Il rischio che molte gestioni italiane corrono, invece, è quello di procrastinare le decisioni fino all'ultimo, quando nel momento dell'emergenza è impensabile creare un sistema di gestione complesso ed evoluto come quello che permette alle filiere del recupero di funzionare.

Tabella 5.9 - Variazione dei costi dello Scenario PC75 Bacino Piccolo in funzione della quantità raccolta.

BACINO PICCOLO								
Percentuale	RUR	Vetro	Carta	Plastica	FORSU	Piattaforma	Costo t generica raccolta	Variazione %
0,1	1.676,46	1.480,93	1.007,86	1.157,06	1.238,62	512,74	1.149,05	900,00%
0,2	838,23	740,46	503,93	578,53	619,31	256,37	574,52	400,00%
0,3	558,82	493,64	335,95	385,69	412,87	170,91	383,02	233,33%
0,4	419,12	370,23	251,97	289,27	309,66	128,19	287,26	150,00%
0,5	335,29	296,19	201,57	231,41	247,72	102,55	229,81	100,00%
0,6	279,41	246,82	167,98	192,84	206,44	85,46	191,51	66,67%
0,7	239,49	211,56	143,98	165,29	176,95	73,25	164,15	42,86%
0,8	209,56	185,12	125,98	144,63	154,83	64,09	143,63	25,00%
0,9	186,27	164,55	111,98	128,56	137,62	56,97	127,67	11,11%
1	167,65	148,09	100,79	115,71	123,86	51,27	114,90	
Composizione ton generica	27%	7%	23%	11%	10%	22%	100%	

Figura 5.1 - Variazione dei costi dello Scenario PC75 Bacino Piccolo in funzione della quantità raccolta.

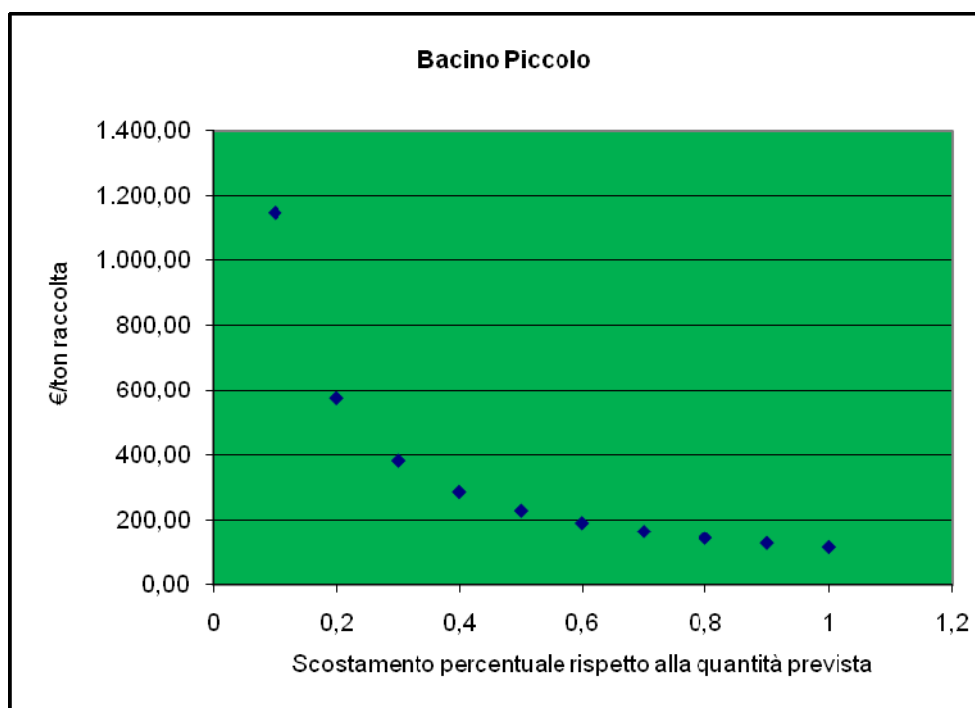


Tabella 5.10 - Variazione dei costi dello Scenario PC75 Bacino Grande in funzione della quantità raccolta.

BACINO GRANDE								
Percentuale	RUR	Vetro	Carta	Plastica	FORSU	Piattaforma	Costo t generica raccolta	Variazione %
0,1	1.537,83	779,54	617,32	1.180,30	911,47	512,74	993,00	900,00%
0,2	768,91	389,77	308,66	590,15	455,73	256,37	496,50	400,00%
0,3	512,61	259,85	205,77	393,43	303,82	170,91	331,00	233,33%
0,4	384,46	194,88	154,33	295,08	227,87	128,19	248,25	150,00%
0,5	307,57	155,91	123,46	236,06	182,29	102,55	198,60	100,00%
0,6	256,30	129,92	102,89	196,72	151,91	85,46	165,50	66,67%
0,7	219,69	111,36	88,19	168,61	130,21	73,25	141,86	42,86%
0,8	192,23	97,44	77,16	147,54	113,93	64,09	124,12	25,00%
0,9	170,87	86,62	68,59	131,14	101,27	56,97	110,33	11,11%
1	153,78	77,95	61,73	118,03	91,15	51,27	99,30	
Composizione ton generica raccolta	32%	6%	20%	10%	14%	19%	100%	

Figura 5.2 - Variazione dei costi dello Scenario PC75 Bacino Grande in funzione della quantità raccolta.

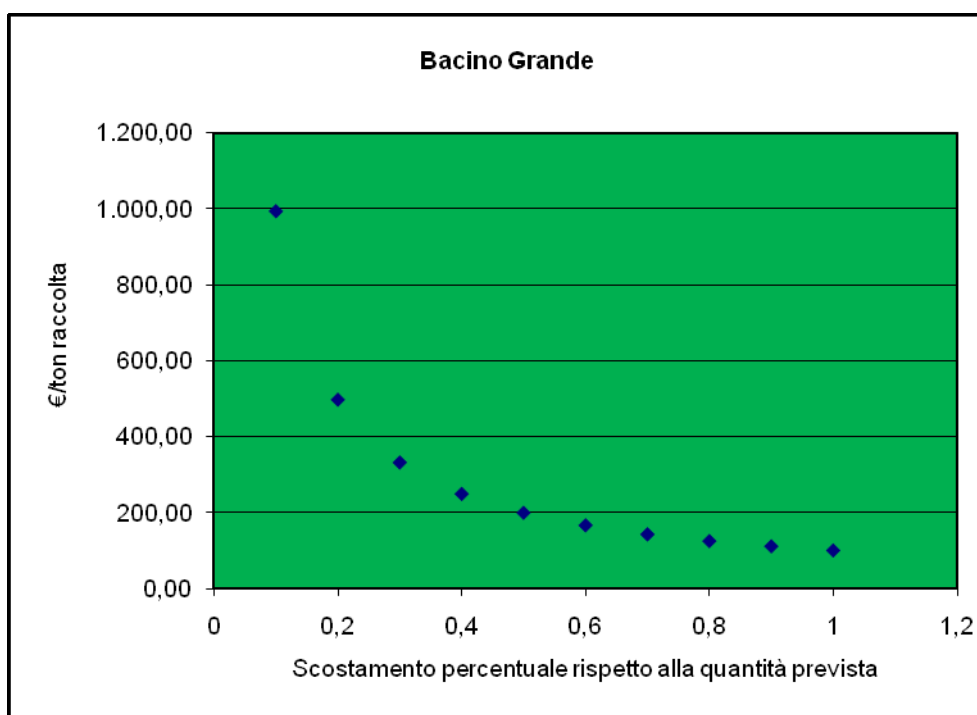
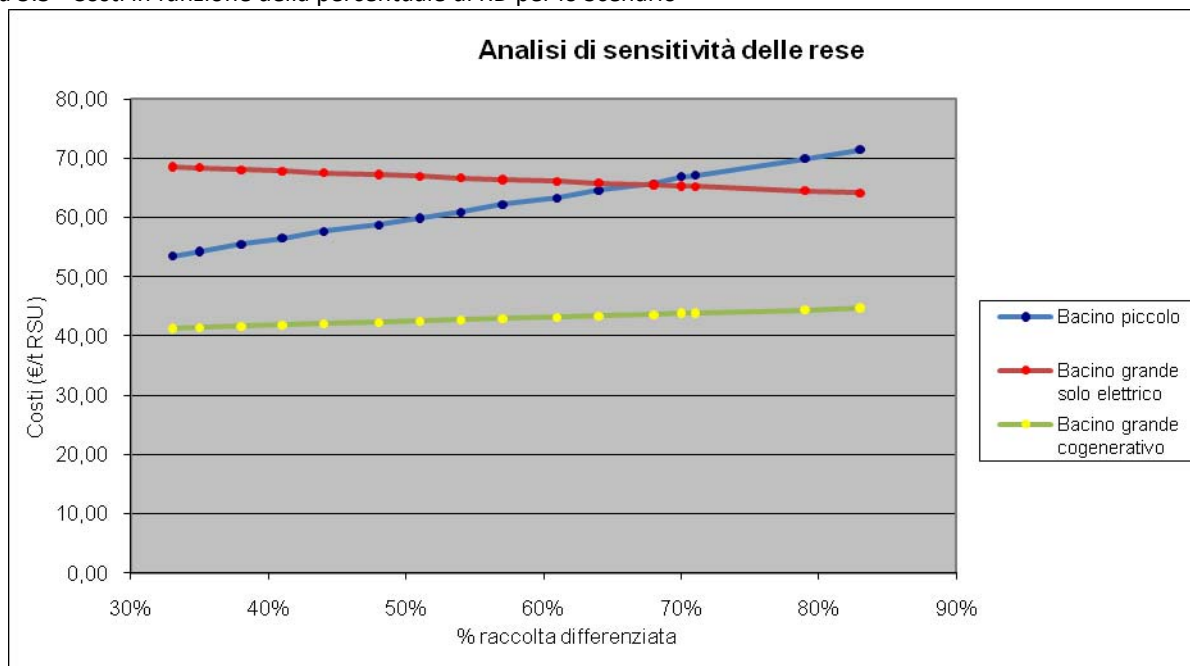


Tabella 5.11 - Costi in funzione della percentuale di RD per lo Scenario PC75.

	Bacino piccolo	Bacino grande	
		Solo elettrico	Cogenerativo
R.D.	Costi (€/t RSU)	Costi (€/t RSU)	Costi (€/t RSU)
33%	53,42	68,56	41,26
35%	54,27	68,40	41,40
38%	55,45	68,07	41,59
41%	56,47	67,81	41,83
44%	57,67	67,54	42,06
48%	58,69	67,25	42,28
51%	59,87	66,95	42,49
54%	60,91	66,66	42,71
57%	62,19	66,39	42,94
61%	63,30	66,08	43,15
64%	64,57	65,80	43,37
68%	65,68	65,52	43,60
70%	66,86	65,26	43,84
71%	67,09	65,18	43,87
79%	69,94	64,52	44,39
83%	71,45	64,11	44,72

Figura 5.3 - Costi in funzione della percentuale di RD per lo Scenario



PC75.

Tabella 5.12 - Variazione del costo netto al variare delle percentuali di raccolta della FORSU.

		25-70-5	20-75-5	15-80-5	0-100-0	30-40-30	
Bacino piccolo	Scenario S35	51,34					
	Scenario S50	45,53					
	Scenario P50	127,39					
	Scenario P65	116,44					
	Scenario PC75	69,94	68,58	67,18	62,99	72,13	
	Scenario PC85	76,38					
Bacino Grande	Scenario S35	solo elettrico	61,13				
		Cogenerativo	23,58				
	Scenario S50	solo elettrico	49,83				
		Cogenerativo	19,10				
	Scenario P50	solo elettrico	123,20				
		Cogenerativo	92,54				
	Scenario P65	solo elettrico	99,50				
		Cogenerativo	70,75				
	Scenario PC75	solo elettrico	65,18	63,45	62,66	59,07	67,85
		Cogenerativo	43,87	42,52	41,62	39,69	45,37
Scenario PC85		60,00					
		40-30-30	30-40-30	20-45-35	15-65-20	45-15-40	

6. Conclusioni

In questo studio sono state comparate diverse alternative per la gestione dei rifiuti urbani con una metodologia innovativa, che anziché confrontare *le tecnologie* (es. riciclo vs. incenerimento) ha esaminato piuttosto *scenari integrati*, ossia sistemi di gestione che, assemblando diverse tecnologie, permettono di offrire una soluzione complessiva alla totalità dei rifiuti generati. Ciò nella consapevolezza che nessuna tecnologia può pretendere di rivolgersi al 100% dei rifiuti, e ciascuna genera scarti e residui che, a loro volta, devono essere smaltiti.

Una volta inserito nel modello il vincolo di rispettare il bilancio di massa (ossia, la garanzia che tutti i residui vengono in qualche modo trattati e finiscano o in discarica, o nuovamente nel sistema produttivo, al netto di quanto si disperde per evaporazione), molte contrapposizioni si stemperano, nel senso che le varie soluzioni si rivelano complementari e non alternative, e la questione riguarda non tanto la scelta dell'una rispetto all'altra, quanto piuttosto il dosaggio dei vari ingredienti. Vi sono due flussi principali: il primo, quello dei rifiuti differenziati, ha come terminale finale il riciclo; il secondo, quello del rifiuto residuo, originato dalla raccolta indifferenziata e dagli scarti di selezione e trattamento, ha come terminale lo smaltimento, il quale può essere effettuato recuperando indirettamente materie secondarie e soprattutto energia e calore. In nessun caso si può fare a meno dell'uno o dell'altro.

Per quanto la definizione degli scenari si basi su ipotesi abbastanza arbitrarie, lo spettro di soluzioni esaminate rappresenta abbastanza bene quelle che sono le principali alternative in discussione. Essi spaziano infatti da sistemi imperniati in modo decisivo sull'incenerimento, con una raccolta differenziata soprattutto ancillare rispetto a questo e orientata a massimizzarne la resa (modello che, per semplificare, potremmo vedere incarnato nel caso bresciano, milanese o emiliano) a modelli che, all'opposto, adottano nel modo più completo la strategia che è stata definita "rifiuti zero", con una raccolta differenziata spinta fino a livelli elevatissimi e forme di gestione del residuo orientate ad estrarne materiali secondari (sabbia sintetica, inerti) piuttosto che energia. Gli altri scenari possono essere visti come soluzioni intermedie rispetto a questi due estremi.

Nei nostri scenari abbiamo evidenziato che si può espandere la dimensione del primo flusso a scapito del secondo, ma con rendimenti decrescenti e costi tendenzialmente maggiori, soprattutto quando si supera la soglia critica del 50%.

La nostra analisi mostra che le raccolte meno costose sono quelle stradali (soprattutto in ambito urbano), con le quali è difficile immaginare di superare certe soglie di riciclo; lo stesso valore del 50% senza la FORSU, ipotizzato nello scenario S50, rappresenta un limite superiore raggiungibile solo in determinati contesti. Oltre questo livello occorre immaginare sistemi di tipo porta a porta, che comportano un costo complessivo superiore, ma un costo unitario che è funzione della resa.

Tuttavia, va anche notato che, una volta assicurata la disponibilità degli impianti, gli scenari "stradali" si dimostrano meno vulnerabili, nel senso che l'incremento di costo derivante da rese di raccolta differenziata inferiori al target impattano relativamente poco sul costo finale. Viceversa, gli scenari che puntano a livelli di recupero maggiori, basati su raccolte porta a porta e su altri accorgimenti come il compostaggio domestico, risultano competitivi solo se le rese di intercettazione sono effettivamente molto alte (superiori al 70%), mentre risultano molto vulnerabili in termini di costo qualora le rese fossero inferiori. La fattibilità di questi scenari dipende dunque in modo cruciale dall'effettiva possibilità di adottare determinate soluzioni (porta a porta, compostaggio domestico) e sulla risposta dei cittadini. Se la quantità di RUR resta importante, dovendo questa essere gestita comunque, il vantaggio del porta a porta anche in termini ambientali si riduce notevolmente.

Per la gestione del RUR, in compenso, la soluzione dell'incenerimento diretto con recupero di energia e calore si rivela la soluzione di gran lunga preferibile, e l'unica vera alternativa alla discarica. Soluzioni diverse (separazione meccanica secco / umido, biostabilizzazione e compostaggio della parte umida, trasformazione della frazione secca in CDR o CDR-Q) risultano complessivamente più costose; possono

essere considerate, tutt'al più, nel caso in cui le soluzioni teoricamente migliori non siano disponibili o siano politicamente indigeste.

L'analisi di sensibilità svolta nel cap. 5, dal canto suo, è confortante in quanto mostra nella gran parte dei casi la robustezza del risultato raggiunto rispetto al variare delle ipotesi di partenza.

In particolare, il risultato non risente in modo decisivo né delle ipotesi relative al valore di mercato dei sottoprodotti, né a quelle relative all'ottimo dimensionamento degli impianti. Anche ipotizzando il raddoppio del valore di mercato dei materiali riciclati, si ridurrebbero le distanze ma non risulterebbe alterata la gerarchia di preferenza. Ciò accadrebbe solo nel caso – per la verità piuttosto improbabile – di una drastica riduzione del valore di mercato dell'energia e del calore. Si sottolinea peraltro che i prezzi considerati per l'energia sono valori di mercato corrente, al netto degli incentivi eventualmente previsti per le energie rinnovabili o alternative.

Variabili critiche si rivelano invece per gli scenari con maggiore presenza di incenerimento i recuperi energetici effettivi e la natura delle emissioni risparmiate per sostituzione; mentre invece per gli scenari che puntano maggiormente sul riciclo la variabile in assoluto più critica è rappresentata dalla praticabilità delle varie soluzioni (funzione di variabili urbanistiche difficilmente modificabili nel breve-medio termine), dall'effettiva risposta della popolazione e dalla qualità, oltre che dalla quantità, dei materiali raccolti.

Gli scenari basati sulla cogenerazione sono in assoluto quelli che permettono il costo sociale netto più basso; essi sono tuttavia a loro volta vincolati dalla possibilità effettiva di recuperare il calore. Nel nostro calcolo non abbiamo incluso i costi per realizzare una rete di teleriscaldamento, ipotizzando che essa sia già presente. In compenso, gli scenari che prevedono per il RUR altre destinazioni sono condizionati dal fatto che per ottimizzare la trasformazione del RUR in un prodotto di sicuro valore commerciale (CDR-Q, sabbia sintetica) è necessario miscelarlo con scarti industriali, la cui effettiva disponibilità nelle quantità richieste non si può dare per scontata e va valutata preliminarmente; mentre il collocamento sul mercato dei sottoprodotti più scadenti (compost di bassa qualità, "ecoballe", CDR) si è rivelato finora più teorico che reale

Un'ultima conclusione, che emerge con molta forza, è il fatto che comunque tutti gli scenari considerati rappresentano significativi passi avanti rispetto allo status quo; ma che questo passo in avanti deve molto al fatto che la soluzione tradizionale, imperniata sulla discarica, incontra limiti crescenti derivanti soprattutto dalla scarsità di suolo. Senza la componente "costo di scarsità" i valori economici in gioco non dimostrerebbero con assoluta certezza la desiderabilità del recupero. L'effetto della scarsità si può misurare in una rendita di scarsità (percepita dai proprietari dei siti, dai comuni o dalla regione sotto forma di *royalties* ed ecotasse) quantificabile in 100 €/t, il che porta a un incremento del costo rispetto al puro costo industriale anche superiore al 200%. In altre parole, se non vi fossero vincoli all'apertura di discariche, queste ultime, anche includendo i costi esterni, rappresenterebbero la soluzione meno costosa; ma una volta preso atto del vincolo, le cose non stanno più così.

Quest'ultima considerazione è importante, soprattutto alla luce della tendenza del mercato a non anticipare per tempo la crisi, ma a precipitarvi in modo repentino non appena si profilano le prime difficoltà a realizzare nuovi siti. Fino a quel momento, la discarica esercita una sorta di "concorrenza sleale", poiché chi può continuare a usarla non ha incentivo ad adottare soluzioni alternative e più costose, soprattutto se queste ultime implicano scelte politicamente difficili. Per evitare di precipitare nella crisi, è opportuna dunque una strategia di prevenzione che "accompagni" l'uscita di scena della discarica anticipando convenientemente il suo esaurimento introducendo tasse e altre forme di disincentivo (Massarutto, 2007).

7. Bibliografia

- ANPA – ONR, 1999, La raccolta differenziata – aspetti progettuali e gestionali, Manuale ANPA
- Bianchi D. (a cura di), 2008, Il riciclo eco-efficiente. Performance e scenari economici, ambientali ed energetici, Edizioni Ambiente, Milano
- CE Delft, 2008, Handbook on estimation of external costs in the transport sector. Internalisation Measures and Policies for All external Cost of Transport (IMPACT)
- Consonni S., Giugliano M., Massarutto A., Ragazzi M., Sacconi C., 2010, “Materials and Energy recovery in integrated waste management systems”, *Waste Management*, in corso di pubblicazione
- Ecoistituto di Faenza, 2008, Raccolta stradale – raccolta domiciliare: 1.813 comuni a confronto, www.ecoistituto.com
- Enviros Consulting, 2003, Costing the Mayor's Waste Strategy for London, (http://www.london.gov.uk/mayor/strategies/waste/doc_download.jsp)
- Eunomia, Ecotec, 2001, Costs for Municipal Waste Management in the EU, European Commission, DG Environment (<http://www.eunomia.co.uk/reports.htm>)
- European Commission, DG Environment, 2000, Externalities from landfill and incineration. A study on economic valuation of Environmental externalities from landfill disposal and incineration of waste – Final Main Report
- IA GmbH, 2006, Life Cycle Comparison of Waste-to-Energy plant and Landfill in Europe by the Method of Total Cost of Ownership (TCO), Cewep (www.cewep.com)
- Iaboni V., De Stefanis P., 2007, Aspetti economici del recupero energetico da rifiuti urbani, RT/2007/7/ACS, ENEA, Roma. www.enea.it
- Iaboni V., De Stefanis P., 2007, Aspetti economici del recupero energetico da rifiuti urbani, ENEA (<http://www.enea.it/com/web/pubblicazioni/volumi.html>)
- Massarutto A., 2007, “Waste management as a public utility: options for competition in an environmentally-regulated industry”, *Utilities Policy*, 15, 9-19
- Massarutto A., Kaulard A., 1997, La gestione integrata dei rifiuti urbani – Analisi dei costi industriali, FrancoAngeli
- Nepal R., Jamasb T., 2009, Issues and Options in Waste Management: A Social Cost Benefit Analysis of Waste-to-Energy in the UK
- Rabl A., Spadaro J.V., Zoughaib A., 2007, Environmental impacts and costs of solid waste: a comparison of landfill and incineration
- Regione Emilia Romagna, Agenzia regionale per la vigilanza dei servizi idrici e di gestione dei rifiuti urbani, 2005, Definizione del prezzo medio regionale del recupero e dello smaltimento dei rifiuti urbani per tipologia e caratteristica degli impianti
- Ricci M., Tornavacca A., Francia C., 2003, “Gestione integrata dei RU: analisi comparata dei sistemi di raccolta” FEDERAMBIENTE – Scuola Agraria del Parco di Monza
- US-EPA, 2006, Solid Waste Management and Greenhouse Gases, US-EPA
- Viale G., 2008, Azzerare i rifiuti. Vecchie e nuove soluzioni per una produzione e un consumo sostenibili, Bollati Boringhieri.