

ANALISI DEI COSTI DEL CICLO DI VITA DI FILIERE DI PRODUZIONE DI ENERGIA DAL RIFIUTO URBANO INDIFERENZIATO BASATE SUL PRETRATTAMENTO MECCANICO BIOLOGICO

Lucia Rigamonti^{1,*}, Giulia Borghi¹, Giovanna Martignon², Giovanni Ciceri², Mario Grosso¹

¹ Politecnico di Milano, Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambiente – sezione Ambientale, Milano.

² Ricerca sul Sistema Energetico – RSE S.p.A., Dipartimento Sviluppo sostenibile e Fonti Energetiche, Milano.

Sommario – Oggetto del presente studio è un'analisi economica della filiera costituita dal trattamento del rifiuto urbano residuo (RUR) in impianti di trattamento meccanico-biologico (TMB) per la produzione di flussi di materiali, come Combustibili Solidi Secondari (CSS) o frazioni secche, aventi potenziale energetico sfruttabile in termovalorizzatori per il recupero di energia elettrica e termica o in co-combustione in impianti industriali (cementifici o centrali termoelettriche) in sostituzione dei combustibili fossili. Il contesto geografico dell'analisi è quello italiano, con particolare riferimento all'anno 2015. La ricerca ha applicato la metodologia di analisi dei costi del ciclo di vita (Life Cycle Costing), che permette di stimare i costi complessivi del trattamento in base al tipo di impianto e ai destini dei flussi in uscita e di fare alcune considerazioni in merito all'alternativa economica più vantaggiosa. Lo studio si è basato su dati primari acquisiti presso alcuni impianti operativi in Italia nel 2015, e ha permesso di evidenziare le caratteristiche e le criticità che contraddistinguono le due principali tipologie di impianti TMB (impianti TMB a flusso unico o a flusso separato) e i diversi flussi in uscita generati dal TMB. Siccome l'analisi è stata impostata come una LCC Ambientale, i risultati ottenuti potrebbero essere integrati con quelli di un'analisi Life Cycle Assessment (LCA) del medesimo sistema, in modo tale da ottenere sia una valutazione economica sia un quadro degli impatti ambientali del sistema.

Parole chiave: LCC, rifiuto indifferenziato, costi, exergia, TMB.

LIFE CYCLE COSTING OF ENERGY PRODUCTION FROM THE RESIDUAL WASTE BASED ON MECHANICAL BIOLOGICAL PRETREATMENT

Abstract – This study is aimed at analysing the energy supply chain based on the treatment of the Residual Waste (RW) in mechanical-biological plants (MBT) to generate material streams, such as Solid Recovered Fuels (SRF) or dried fractions, that have the energy potential exploitable in dedicated power plants for electric and thermal energy production or in co-combustion in industrial facilities (cement plants or thermoelectric power plants). Italy represents the geographical context of the study, with a focus on the year 2015. The Life Cycle Costing (LCC) methodology has been applied, which allows to estimate the overall treatment costs according to the type of plant and to the destiny of the output streams and to make some considerations about the most convenient economic alternative. To get prima-

ry data, a questionnaire was sent to some selected MBT plants. By processing the gathered data, the main peculiarities of each type of MBT technology (single and separated streams) and of the outgoing streams were evaluated. In particular, four strategies were analysed: 1. single-stream MBT followed by SRF co-combustion in cement kiln, 2. single-stream MBT followed by SRF combustion in fluidised bed waste-to-energy (WTE) plants, 3. single-stream MBT followed by SRF combustion in fluidised bed and grate WTE plants, and 4. MBT with streams separation followed by SRF combustion in fluidised bed WTE plants. Considering the dual role of MBT plants, i.e. on the one hand they represent a form of treatment of the RW and on the other they are a tool for the production of a fuel destined to energy recovery, the Environmental LCC was performed considering two different functional units: 1 tonne of RW at the entrance of the MBT plant, and 1 MWh of exergy produced by the energy valorisation of the flows leaving the MBT plant. The LCC included the internal costs, i.e. operational and maintenance costs, the capital investment, end-of-life costs and costs for insurances, costs of transport and treatment of the MBT output flows. When the functional unit is 1 tonne of RW entering the MBT plant, strategies 1 and 4 resulted the most expensive (219 and 214 €/t_{RW}, respectively). When the functional unit is 1 MWh of produced exergy, the results suggest that the strategy based on the single-stream MBT followed by SRF co-combustion (i.e. strategy 1) is the best one from the economic point of view: in fact, while for the strategy 1 the total costs are 68 €/MWh_{ex}, strategies 2, 3 and 4 sustained in 2015 higher costs, respectively equal to 330, 308 and 1,079 €/MWh_{ex}. The highest cost is therefore that associated with strategy 4, based on a separated-stream MBT: therefore, if we consider the cost to produce 1 MWh of exergy, the treatment of waste in this type of MBT is the most expensive. Moreover, it resulted that 570 kg of RW are needed to produce 1 MWh of exergy in strategy 1, while 8,520 kg of RW are required to produce 1 MWh of exergy in strategy 4. In this regard, it can be concluded that promoting waste treatment in single-stream MBT plants reduces the costs for the disposal of difficult-to-manage flows (wet fraction to stabilize and dispose of) on the one hand, and on the other allows to produce a high-quality SRF well suitable for co-combustion, with consequent energy savings from fossil fuels. Since the LCC has been calculated as an Environmental LCC, the obtained results could be integrated with a Life Cycle Assessment (LCA) of the same system, in order to get both an economic and an environmental evaluation.

Keywords: LCC, residual waste, costs, exergy, MBT.

Ricevuto il 19-10-2018. Modifiche sostanziali richieste il 17-1-2019. Accettazione il 21-3-2019.

* Per contatti: lucia.rigamonti@polimi.it. Piazza Leonardo da Vinci, 32 – 20133 Milano. Tel. 0223996415.

1. INTRODUZIONE

Le pubbliche amministrazioni e gli operatori del settore sono alla continua ricerca di strategie e azioni volte alla prevenzione della produzione di rifiuti e alla massimizzazione del recupero di materia ed energia a discapito dello smaltimento in discarica. La maggiore consapevolezza in merito alla protezione dell'ambiente ha fatto crescere, inoltre, l'interesse verso la definizione e l'utilizzo di tecniche e metodi che permettano di quantificare da un lato gli impatti ambientali associati alla gestione dei rifiuti e dall'altro i benefici che derivano dalle azioni di recupero di materia ed energia, con l'obiettivo di comprendere quali processi gravano maggiormente sull'ambiente e come è meglio pianificare la gestione per ridurre gli impatti ambientali complessivi. A tale proposito, la metodologia dell'analisi del ciclo di vita (Life Cycle Assessment – LCA) è a oggi accettata e largamente impiegata dalla comunità scientifica come strumento di supporto alle politiche decisionali in merito alla gestione dei rifiuti. Parallelamente, quando si tratta di valutare le conseguenze di scelte strategiche in materia di gestione dei rifiuti, l'attenzione dei portatori di interesse (gestori di impianti di trattamento, amministrazioni locali, ecc.) ricade non solo su tematiche ambientali, ma anche su valutazioni di tipo economico. In questo contesto vi è la necessità di affiancare alla LCA una seconda metodologia, detta Life Cycle Costing (LCC), che si pone come obiettivo la valutazione dei costi dell'intero ciclo di vita di un processo o servizio.

In accordo con quanto stabilito da SETAC – Europe Working Group on LCC (Hunkeler et al., 2008), a seconda dei confini del sistema scelti per l'analisi LCC e delle voci di costo che si intendono includere, è possibile definire tre tipologie di LCC (Martinez Sanchez et al., 2015):

- **LCC Convenzionale:** si propone di effettuare una valutazione dei costi associati al ciclo di vita di un prodotto/processo quando gli aspetti ambientali non rappresentano il focus dell'analisi. Può essere utilizzata, ad esempio, per valutare la fattibilità economica di alcune soluzioni di trattamento, identificare la soluzione più performante o valutare le conseguenze economiche dell'implementazione di una soluzione specifica nel trattamento/gestione dei rifiuti. Non presenta alcuna relazione con l'analisi LCA e i confini del sistema includono unicamente i costi interni (es. costi di investimento, costi di gestione e manutenzione). Solitamente una LCC Convenzionale prevede un solo portatore di interesse.

- **LCC Ambientale:** è tipicamente destinata a integrare un'analisi LCA con una valutazione della prestazione economica del sistema e considera tutte le voci di costo interne (compreso il costo di fine vita) ed esterne (ossia che si verificano fuori dal sistema economico), purché sia prevista una loro internalizzazione nel breve periodo. A differenza della LCC Convenzionale, la LCC Ambientale espande i confini del sistema in modo tale che combacino con quelli della LCA, con la quale condivide anche la stessa unità funzionale; in questo modo i risultati della LCA possono essere letti parallelamente anche in chiave economica.
- **LCC Sociale:** viene solitamente svolta per esaminare l'efficienza economica di specifici scenari a livello sociale con l'obiettivo di stimare la perdita o il ricavo di benessere in seguito a una redistribuzione delle risorse. Per effettuare una LCC Sociale risulta necessario avere già svolto la LCA per il medesimo sistema, in modo tale da poter monetizzare gli impatti ed internalizzare i costi; siccome la LCC Sociale considera già gli impatti sull'ambiente, la LCA del medesimo sistema non viene considerata nella fase di interpretazione dei risultati, per evitare un doppio conteggio delle esternalità.

Nello studio qui presentato è stata condotta una LCC Ambientale, finalizzata a valutare i costi associati alle filiere di produzione di Combustibile Solido Secondario (CSS) a partire dal Rifiuto Urbano Residuo (RUR). L'analisi ha permesso inoltre di fare alcune considerazioni in merito all'alternativa più vantaggiosa dal punto di vista economico in termini di tipologia di trattamento meccanico-biologico (TMB) da applicare per ottenere CSS e in termini di utilizzo finale del CSS stesso (termovalorizzazione o co-combustione).

Un esempio di applicazione della stessa metodologia è lo studio di Martinez Sanchez et al. (2016) dove la filiera analizzata è quella del trattamento dei rifiuti organici in Danimarca.

1.1. Il trattamento meccanico biologico in Italia

Nel 2015 la produzione di rifiuti solidi urbani in Italia è stata di 29,5 milioni di tonnellate, pari a 487 kg / (ab * anno) (ISPRA, 2016). Il 44% di tali rifiuti è stato sottoposto a recupero di materia mentre il 19% è stato incenerito. Oltre 7,8 milioni di tonnellate di rifiuti, corrispondenti al 26,4% del totale, sono invece stati smaltiti in discarica; di questi l'86% è stato sottoposto a forme di trattamento preliminare meccanico e biologico prima

Tabella 1 – Suddivisione degli impianti TMB produttori di CSS nel 2015 in base alla tipologia di trattamento del RUR (elaborazione dati ISPRA, 2016)

Tipologia di tecnologia	Numero di impianti autorizzati alla produzione di CSS nel 2015	Numero di impianti che hanno effettivamente prodotto CSS nel 2015	CSS prodotto [t/a]
TMB con solo tritovagliatura	11	9	518.771
TMB a flusso unico	5	4	201.704
TMB a flusso separato	33	26	761.597

dello smaltimento finale, mentre le restanti 1,1 milioni di tonnellate sono state smaltite senza il preventivo ed idoneo pretrattamento, in deroga al divieto imposto dall'art. 7 del D.Lgs n. 36/2003.

I processi di trattamento meccanico-biologico (TMB) rappresentano una prima fase della filiera di gestione del rifiuto urbano residuo, generalmente propedeutica ad opportuni trattamenti successivi, quali il conferimento a discarica, l'incenerimento in forni dedicati o la co-combustione in impianti industriali. Relativamente al primo destino, la volontà di servirsi di questo processo è dovuta al fatto che permette di ottenere un materiale di massa inferiore e di maggiore stabilità biologica, con conseguente limitata putrescibilità e minor produzione di percolato e biogas. Per quanto riguarda i destini energetici, l'obiettivo del trattamento è la riduzione dell'umidità e la separazione delle frazioni a basso contenuto energetico, azioni che rendono il rifiuto maggiormente idoneo alla termovalorizzazione o alla sostituzione di combustibili fossili in centrali termoelettriche o cementifici. Quando lo scopo è la valorizzazione energetica del flusso in uscita, l'obiettivo del trattamento è quello di produrre un Combustibile Solido Secondario (CSS) così come definito dal D.Lgs n. 205/2010.

Dal punto di vista del processo a cui il rifiuto viene sottoposto, le linee di trattamento meccanico biologico possono distinguersi in due categorie: a flusso unico e a flusso separato. Gli impianti a flusso unico comprendono uno stadio di bioessiccazione della totalità del RUR conferito, seguito da un trattamento di raffinazione meccanica. Gli impianti che utilizzano una tecnologia di trattamento a flusso separato effettuano, invece, una preliminare separazione meccanica della frazione umida dalla frazione secca. La prima viene inviata a biostabilizzazione al fine di ridurre l'attività biologica della componente organica in essa contenuta e ottenere una Frazione Organica Stabilizzata (FOS) adatta al conferimento in discarica. Il secondo flusso viene invece sottoposto a raffinazione meccanica fino ad ottenere un materiale adatto agli scopi energetici per cui è stato trattato. Esistono poi de-

gli impianti TMB più semplici, privi di alcuna fase biologica, e consistenti quindi in una semplice lavorazione meccanica di tritovagliatura.

Nel 2015, anno di riferimento dello studio in esame, sul territorio italiano erano attivi 118 impianti TMB (ISPRA, 2016); 49 erano autorizzati alla produzione di CSS, di cui però solo 39 hanno effettivamente prodotto CSS nell'anno (Tabella 1). Tra le diverse tipologie di rifiuti entranti nei 118 impianti, il CER¹ 20 03 01 (rifiuti urbani non differenziati) ha rappresentato più dell'80% del totale (ISPRA, 2016). Per quanto riguarda i flussi in uscita, il CSS e la Frazione Secca (FS) ne hanno costituito la componente maggiore, rappresentando rispettivamente il 33% e il 31% del totale. Seguono, con una incidenza minore, la Frazione Organica Non Compostata (FONC: 14%), il Biostabilizzato (BS: 12%), la Frazione Umida (FU: 4%), il percolato (2%), il materiale a recupero (1,4%), gli scarti e rifiuti di processo (0,95%) e il Bioessiccato (BE: 0,75%). Rispetto al CSS, i dati ISPRA relativi al 2015 evidenziano come, del quantitativo totale prodotto, il 49% sia stato inviato ad incenerimento, il 21% a co-combustione in impianti industriali, il 15% in discarica, l'8,5% è stato messo in riserva, il 5,5% ad ulteriore raffinazione, l'1% circa a recupero di materia. Si osserva come la destinazione a discarica abbia riguardato in realtà un solo impianto TMB.

2. MATERIALI E METODI

2.1. Generalità sulla metodologia LCC

A differenza di quanto accade per l'LCA, per una LCC non sono disponibili standard (norme ISO) di riferimento. Lo studio ha quindi fatto riferimento, per i principi generali, ad una linea guida elaborata da SETAC – *Society of Environmental Toxicology and Chemistry* – (SETAC, 2011) e per l'applicazione della LCC alla gestione dei rifiuti a indicazioni mutuata dalla letteratura (Martinez Sanchez et al. 2015).

¹ CER: Codice Europeo Rifiuti

In un'analisi LCC si possono individuare tre fasi principali:

- Fase 1 – *definizione dell'obiettivo e del campo d'applicazione*. Rappresenta la fase preliminare in cui vengono definite: finalità dello studio; prospettiva dell'analisi (ovvero quali sono i portatori d'interesse considerati); unità funzionale; confini del sistema (tecnici/temporali/geografici: questo perché i costi cambiano in base alla località considerata e i costi futuri devono essere attualizzati tramite un tasso di sconto); come saranno risolti i casi di multi-funzionalità che si presentano quando un sistema esplica, oltre alla sua funzione principale, anche delle altre funzioni (dette co-funzioni); quali categorie di costo rientreranno nell'analisi del ciclo di vita; le assunzioni e i limiti dello studio.
- Fase 2 – *analisi di inventario*. Ha come obiettivo la realizzazione di un modello approssimato della realtà che sia in grado di rappresentare tutti gli scambi tra i singoli processi del sistema. Quando la LCC si applica alla gestione dei rifiuti, i processi rappresentano le fasi di trattamento e i destini del rifiuto. Questa fase include la raccolta dei dati di costo dell'intero ciclo di vita; per la valutazione dei costi di un servizio come la gestione dei rifiuti, possono essere utilizzate come voci di costo anche le tariffe al cancello degli impianti (*gate fees*) che includono in forma aggregata i costi e i ricavi associati al trattamento successivo del rifiuto. Dal momento che nella LCC si valuta una sola categoria d'impatto (ossia i costi), la fase d'inventario coincide anche con la fase di valutazione degli impatti, a differenza della LCA in cui queste due fasi risultano distinte.
- Fase 3 – *interpretazione dei risultati*. È il momento conclusivo di una LCC, nel quale vengono confrontate eventuali diverse alternative proposte all'interno dell'analisi e proposti cambiamenti volti alla riduzione dell'impatto economico delle attività considerate, tramite l'individuazione delle fasi critiche per le quali i costi risultano essere maggiori. Nel caso in cui si effettui una LCC Ambientale, e l'analisi LCA relativa al medesimo sistema sia già stata conclusa, si possono generare degli indicatori di eco-efficienza che mettano in relazione costi ed impatti ambientali.

Di seguito sono descritte nel dettaglio le modalità di conduzione delle tre fasi nello studio in esame.

2.2. Definizione dell'obiettivo e del campo d'applicazione dell'analisi LCC

L'analisi LCC Ambientale oggetto dello studio ha

la *finalità* di fornire una valutazione dei costi caratterizzanti il processo di trattamento del RUR e di recupero energetico dello stesso.

Si è deciso di considerare i costi sostenuti da ogni portatore d'interesse coinvolto nella filiera di gestione del rifiuto, in modo tale da avere una visione più ampia possibile. I confini geografici del sistema comprendono le filiere di trattamento del RUR in impianti TMB ubicati in Italia.

L'anno di riferimento scelto è il 2015, in quanto questo periodo più recente per cui sono risultati disponibili dati di inventario omogenei a livello nazionale. Nella definizione delle *filiera da analizzare* si è tenuto conto del fatto che i dati sui costi sono solitamente riservati e quindi non sempre disponibili. Per acquisire informazioni di tipo primario necessarie all'analisi, è stato quindi predisposto un questionario sottoposto ai gestori degli impianti TMB. La scelta degli impianti a cui inviarlo è stata fatta di modo da poter includere nell'analisi sia le diverse tecnologie impiegate per il trattamento del rifiuto (tritovagliatura; trattamento a flusso unico o differenziato) che i possibili destini finali del CSS prodotto (incenerimento in impianti a griglia o a letto fluido; sostituzione calorica nei cementifici o in centrali termoelettriche).

Solo quattro dei cinque impianti a cui è stato inviato il questionario hanno fornito un riscontro. Ne è derivata una disponibilità di dati per le seguenti quattro filiere cui l'analisi LCC Ambientale è stata applicata:

- Filiera 1: "TMB1" con tecnologia a flusso unico, il cui CSS in uscita viene conferito a co-combustione in cementificio;
- Filiera 2: "TMB2" con tecnologia a flusso unico, il cui CSS in uscita viene conferito a termovalorizzazione in inceneritore a letto fluido bollente;
- Filiera 3: "TMB3" con tecnologia a flusso unico, il cui CSS in uscita viene conferito a termovalorizzazione sia in inceneritore a letto fluido bollente, sia in inceneritore a griglia;
- Filiera 4: "TMB4" con tecnologia a flusso separato, il cui CSS in uscita viene conferito a termovalorizzazione in inceneritore a letto fluido bollente.

I *confini del sistema* comprendono il trattamento del RUR negli impianti TMB e il successivo destino di tutti i flussi di materiali originati da tale trattamento. Nei confini del sistema è inclusa la fase di raccolta del RUR, ma non le fasi che contribuiscono alla generazione del rifiuto, in accordo con la cosiddetta *zero-burden assumption* (Ekvall et al., 2007), che si suppone siano comuni a tutti i sistemi di gestione.

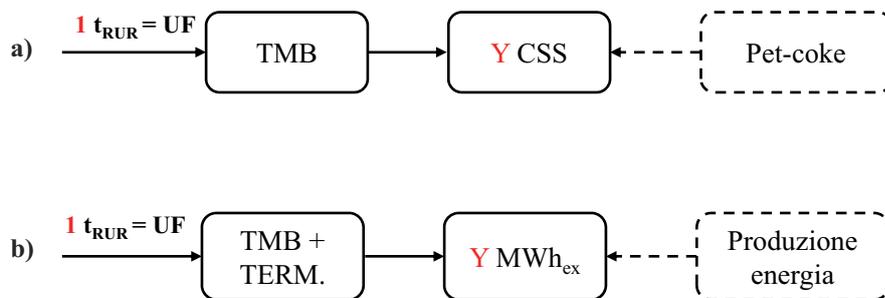


Figura 1 – Confini del sistema nel caso in cui l'unità funzionale (UF) è la tonnellata di RUR: il tratteggio indica l'espansione dei confini del sistema a seguito della risoluzione dei casi di multi-funzionalità quando il CSS è impiegato come combustibile in cementificio (a) e quando è inviato a termovalorizzazione per la produzione di energia (b). La y indica che il quantitativo di CSS (caso a) e i MWh_{ex} (caso b) sono da determinare considerando 1 t di RUR in ingresso

Per ognuna delle quattro filiere analizzate, l'analisi LCC è stata condotta in riferimento a due diverse unità funzionali: 1 tonnellata di RUR in ingresso all'impianto TMB e 1 MWh di exergia prodotta dalla valorizzazione energetica dei flussi uscenti dall'impianto TMB.

Questo in considerazione del duplice ruolo esercitato dai TMB, che da una parte rappresentano una forma di trattamento del RUR e dall'altra sono uno strumento per la produzione di una matrice combustibile destinata a recupero energetico (CSS, Frazione Secca, Bioessiccato). Relativamente a quest'ultimo utilizzo, il recupero si attua in forme diverse (energia elettrica e/o termica); ciò richiede il ricorso ad un parametro che sia in grado di valutarlo nel complesso. Come tale è stata considerata l'exergia, una grandezza che rappresenta la quantità massima di lavoro che può essere ottenuta da un determinato processo o sistema tramite trasformazioni reversibili. Per il caso in studio, l'exergia totale prodotta è stata calcolata, sommando i flussi di exergia associati alla produzione di energia elettrica e calore che avviene direttamente nel sistema di gestione dei rifiuti e il flusso di exergia associato ai prodotti con contenuto energetico, non direttamente impiegati per la produzione di energia (ad es. il CSS utilizzato come combustibile nei cementifici) (Rigamonti et al., 2015).

2.2.1. Risoluzione dei casi di multifunzionalità

Per la risoluzione dei casi di multi-funzionalità, che si presentano quando un sistema esplica, oltre alla sua funzione principale, anche delle altre funzioni (dette co-funzioni), è stato applicato il metodo dell'espansione dei confini del sistema con inclusione degli impatti evitati (Finnveden et al., 2009; EC, JRC, 2010). Quando l'unità funzionale del sistema è la tonnellata di RUR (e quindi la funzione principale del si-

stema è quella di trattare i rifiuti) si presentano i seguenti casi di multi-funzionalità:

- CSS inviato a co-combustione in cementificio (Filiere 1): la co-funzione del sistema è rappresentata dalla produzione di un combustibile (il CSS) impiegato al posto del pet-coke, il combustibile fossile più comunemente impiegato nell'industria cementiera; in questo caso l'espansione dei confini del sistema ha incluso l'evitato costo del pet-coke (Figura 1a).
- CSS inviato a termovalorizzazione (Filiere 2, 3 e 4): la co-funzione del sistema è rappresentata dalla produzione di exergia (MWh_{ex}); pertanto l'espansione dei confini del sistema ha incluso il ricavo dalla vendita dell'energia elettrica e termica (Figura 1b).

Viceversa, nel caso in cui l'unità funzionale del sistema è il MWh di exergia prodotta in seguito alla valorizzazione energetica dei flussi di rifiuti uscenti dai TMB (e quindi si considera come funzione principale la produzione di exergia), la co-funzione è rappresentata dal trattamento del rifiuto in ingresso; quindi, per poter confrontare le filiere tra loro, i confini del sistema sono stati espansi per includere i costi dell'evitato trattamento del rifiuto secondo una modalità alternativa (Figura 2, a pagina seguente).

2.2.2. Categorie di costo

In uno studio LCC avente come oggetto la gestione dei rifiuti, i costi del sistema possono includere le seguenti voci (Martinez-Sanchez et al., 2015):

- Costi interni, ossia flussi monetari che fluiscono sia dall'interno verso l'esterno del sistema di gestione, sia al contrario; essi si suddividono ulteriormente nei cosiddetti *budget costs* (costi di investimento e costi di gestione e manutenzione) e *transfers* (ossia flussi monetari che interessano solo le parti interne al sistema, come le tasse o i sussidi);

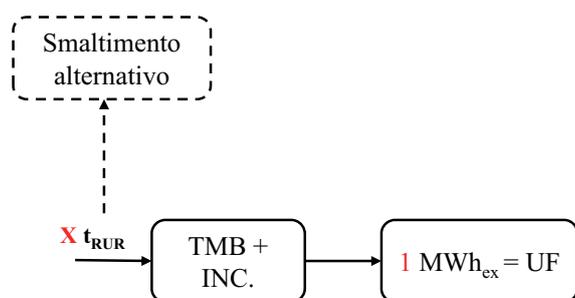


Figura 2 – Confini del sistema nel caso in cui l'unità funzionale (UF) è il MWh di exergia prodotta dalla valorizzazione energetica dei flussi uscenti dagli impianti TMB, siano essi flussi inviati a termovalorizzazione oppure a co-combustione in cementificio: il tratteggio indica l'espansione dei confini del sistema a seguito della risoluzione della multi-funzionalità. La x indica che il quantitativo di RUR in ingresso deve essere determinato considerando che il sistema deve produrre 1 MWh di exergia

- Costi esterni o esternalità, ossia costi che si verificano fuori dal sistema economico; sono detti anche “beni/servizi non monetizzabili” in quanto non hanno un valore direttamente monetizzabile sul mercato.

Nello studio che applica una LCC Ambientale, sono stati considerati unicamente i costi interni, suddivisi in tre macro-categorie, come mostrato in Tabella 2. I costi sono quelli associati al trattamento del rifiuto, ai quali si aggiungono anche quelli della raccolta (voce non elencata in Tabella 2). Per i flussi uscenti dal TMB, si è incluso il costo del trasporto al successivo trattamento, poi modellizzato utilizzando le *gate fees*, ossia le tariffe di conferimento che il gestore del TMB deve pagare all'impianto destinatario, o il ricavo associato all'invio di materiali di buona qualità a recupero di materia. La *gate fee* è un indicatore aggregato che ben rappresenta la realtà del-

la gestione economica degli impianti riceventi i flussi in uscita dai TMB: tiene infatti conto di tutti i costi/ricavi associati allo smaltimento, recupero energetico o agli ulteriori trattamenti a cui deve essere sottoposto il rifiuto conferito.

Rispetto all'unità funzionale “tonnellata di RUR in ingresso all'impianto TMB”, i costi totali dell'impianto TMB1 hanno incluso il ricavo derivato dall'evitato utilizzo del pet-coke nel cementificio, che utilizza CSS al posto del combustibile fossile tradizionale. Allo stesso modo, nei costi degli impianti TMB2, TMB3 e TMB4 sono stati conteggiati i ricavi associati alla vendita dell'energia elettrica e termica prodotta dal termovalorizzatore cui i flussi in uscita sono indirizzati. I suddetti ricavi sono in realtà già inclusi nelle tariffe di conferimento dei flussi in uscita dagli impianti TMB e quindi in questo caso l'utilizzo della *gate fee* è corretto.

Quando l'unità funzionale è il “MWh di exergia prodotta”, nel sistema così modellizzato, essendone la funzione principale quella di produrre exergia, sono stati inclusi solo i costi del trattamento del rifiuto e non i ricavi associati all'utilizzo dell'energia prodotta in seguito alla valorizzazione energetica dei flussi in uscita dai TMB. Di conseguenza, assumendo che la tariffa di conferimento (€/t) corrisponda alla differenza tra la voce Costi e la voce Ricavi, il costo del trattamento dei flussi in uscita dagli impianti TMB è stato calcolato come somma della tariffa di conferimento e del ricavo. Nel paragrafo 2.3.2 per le diverse filiere sono riportati i dettagli del calcolo.

2.3. Inventario dell'analisi LCC: reperimento di dati primari e assunzioni per i dati mancanti

Dai questionari compilati dai gestori degli impianti è stato possibile ricavare dati sui costi del tratta-

Tabella 2 – Suddivisione dei costi associati al trattamento del rifiuto in macro-categorie

Costi di gestione dell'impianto TMB	Altri costi dell'impianto TMB	Tariffe di conferimento e costi di trasporto per i flussi in uscita dall'impianto TMB
Personale Energia elettrica Consumo combustibile per usi interni all'impianto Costo d'ammortamento annuo 2015 Costi di manutenzione	Costo di fine vita Costi d'assicurazione	CSS a termovalorizzazione CSS a co-combustione Frazione Secca a termovalorizzazione Frazione Secca a discarica Bioessiccato a termovalorizzazione Bioessiccato a discarica Recupero metalli ferrosi Recupero metalli non ferrosi Percolato a depurazione Scarti e rifiuti a discarica Frazione umida a stabilizzazione Frazione umida a discarica

Tabella 3 – Bilancio di massa dei quattro impianti analizzati (valori in t/a)

	TMB1	TMB2	TMB3	TMB4
RUR in ingresso	66.537	131.309	53.043	162.841
CSS a cementificio	22.924	-	-	-
CSS a termovalorizzazione	-	60.997	39.411	39.160
Frazione secca a incenerimento	-	21.403	335	524
Bioessiccato a incenerimento	-	1.863	3.170	-
Metalli ferrosi	1.712	3.196	269	1.358
Metalli non ferrosi	109	-	-	-
Frazioni a discarica / biostabilizzazione	32.475	26.429	-	110.195
Percolato a depurazione	7.415	-	2.380	118
Perdite di processo	1.902	17.421	7.478	11.486

mento, sui bilanci di massa e sul potere calorifico posseduto dai flussi considerati. In secondo luogo sono state raccolte informazioni utili per il calcolo dell'exergia prodotta in seguito alla valorizzazione energetica dei flussi in uscita dagli impianti TMB (CSS, frazione secca o bioessiccato), come ad esempio i rendimenti di produzione di energia elettrica e termica dei termovalorizzatori.

I bilanci di massa dei quattro impianti qui sintetizzati in Tabella 3 (e dettagliati anche nelle Figure MS1-MS4 del materiale supplementare) sono risultati congruenti a quanto emerge dal Rapporto sui Rifiuti Urbani di ISPRA (ISPRA, 2016).

Per quanto riguarda le voci di costo, le informazioni raccolte con i questionari sono riassunte in Tabella 4. Ulteriori dettagli sono riportati nella Tabella MS1 del materiale supplementare.

Tabella 4 – Voci di costo espresse in [€/anno] dei quattro impianti analizzati relative all'anno 2015, che comprendono i dati ottenuti elaborando i questionari compilati dai gestori degli impianti TMB

	TMB1 [€/a]	TMB2 [€/a]	TMB3 [€/a]	TMB4 [€/a]
Costi di gestione				
Personale	500.000	80.000	1.074.000	859.000
Energia elettrica	576.000	165.005	321.000	794.427
Consumo di combustibile per usi interni all'impianto	81.795	0	0	0
Costo di ammortamento annuo 2015	700.000	700.000	700.000	663.646
Costi di manutenzione	550.000	737.250 ⁽¹⁾	433.000	1.071.531
Altro	0	0	0	1.268.443 ⁽³⁾
Altri costi				
Costi d'assicurazione	0	0	0	11.000
Costo di fine vita	0	0	0	0
Tariffe di conferimento e costi di trasporto per i flussi in uscita ⁽²⁾				
CSS a termovalorizzazione	0	4.218.959	3.042.926	1.574.232
CSS a co-combustione	515.790	0	0	0
Frazione secca a termovalorizzazione	0	1.702.288	26.758	47.008
Frazione secca a discarica	0	1.791.763	0	4.052.064
Bioessiccato a termovalorizzazione	0	149.283	253.614	0
Bioessiccato a discarica	0	234.248	0	0
Recupero metalli ferrosi	-34.240	-79.900	-2.959	-6.790
Recupero metalli non ferrosi	-13.625	0	0	0
Percolato a depurazione	203.913	0	1.785	8.210
Scarti e rifiuti a discarica	2.354.438	0	0	0
Frazione umida a stabilizzazione	0	0	0	4.073.215
Frazione umida a discarica	0	0	0	619.494
Biostabilizzato a discarica	0	0	0	543.145 ⁽⁴⁾

⁽¹⁾ Valore assunto pari a 3/2 del valore medio del costo di manutenzione sostenuto dal TMB1 e dal TMB3. Questi ultimi infatti risultano avere una capacità autorizzata di trattamento pari alla metà di quella del TMB2; si è deciso quindi di assegnare al TMB2 un costo di manutenzione che sia "meno che proporzionale" rispetto alla media di quello dei suddetti TMB, in accordo con l'andamento tipico della crescita dei costi di manutenzione in funzione della taglia degli impianti.

⁽²⁾ Per maggiori dettagli si veda la Tabella MS1 e le rispettive note.

⁽³⁾ Comprende i costi di gestione dell'impianto TMB per attività di movimentazione materiali e facchinaggio svolta da una ditta terza e i costi di gestione per l'impianto di biostabilizzazione 1 (vedi Figura MS4 nel materiale supplementare).

⁽⁴⁾ Include i costi di caricamento e trasporto FOS (Frazione Organica Stabilizzata) a Discarica 4 (vedi Figura MS4 nel materiale supplementare).

Tabella 5 – Rendimenti di produzione di energia elettrica e termica dei termovalorizzatori considerati nell'analisi

	Energia elettrica netta prodotta	Energia termica prodotta	Rifiuto in ingresso		Rendimento netto energia elettrica	Rendimento energia termica
	[MWh]	[MWh]	PCI [MJ/kg]	Quantità [t/a]		
Termovalorizzatore 1	52.726	108.593	15	61.123	20,7%	42,6%
Termovalorizzatore 2	572.760	848.184	11	686.575	27,3%	40,4%
Termovalorizzatore 3	42.160	0	15	64.248	15,7%	-
Termovalorizzatore 4	335.744	289.061	11	505.680	21,7%	18,7%
Termovalorizzatore 5	89.751	0	10,5	146.969	20,9%	-
Termovalorizzatore 6	32.407	0	15,5	51.746	14,5%	-

Nell'elaborazione dei dati forniti con il questionario (non riportati nell'articolo per questioni di riservatezza), sono state fatte le seguenti assunzioni:

- per le voci di costo in cui è stato riportato un intervallo di valori, si è considerato il valore medio;
- per i flussi destinati a termovalorizzatori e/o di scariche interni al sito del TMB, il costo di trasporto è stato posto pari a 0 €/t, salvo diverse indicazioni da parte dei gestori degli impianti;
- per il costo per unità di energia elettrica utilizzata, laddove non dichiarato nel questionario (ossia per TMB1 e TMB2), è stato assunto un valore di 0,15 €/kWh (costo dichiarato per il TMB3).

2.3.1. Dati per il calcolo dell'exergia

Dalle informazioni ricevute tramite i questionari è stato possibile identificare i termovalorizzatori cui sono state inviate le frazioni in uscita dai TMB (CSS, frazione secca e/o bioessiccato, a seconda del TMB – Figure MS1-MS4).

Per ogni termovalorizzatore in Tabella 5 sono riportati i dati relativi alla produzione di energia elettrica netta e termica, al quantitativo totale di rifiuti trattati e al relativo PCI medio, quali ricavati dai Rapporti di ISPRA (ISPRA, 2014; ISPRA, 2016); il rendimento di produzione di energia elettrica e termica di ogni termovalorizzatore è stato calcolato come rapporto tra i MJ/a di energia prodotta e i MJ/a entranti. Solo tre dei sei termovalorizzatori coinvolti nelle filiere analizzate erano connotati nel 2015 da funzionamento cogenerativo, mentre i restanti hanno dato luogo alla sola produzione di energia elettrica, con un conseguente rendimento complessivo minore.

Quanto alla modalità di quantificazione dell'exergia prodotta nelle quattro filiere, si è utilizzata la formula:

$$\frac{MJ_{el} + MJ_{th} * \left(1 - \frac{T_a}{T_{ml}}\right) + MJ_{indiretti}}{MJ_{disponibili}}$$

i cui termini sono spiegati nel dettaglio in Rigamonti et al., 2015. In particolare, il fattore di Carnot:

$$1 - \frac{T_a}{T_{ml}}$$

è stato assunto pari a 0,217, come risultato di una situazione media italiana in cui $T_a = 289,2$ K, $T_{out} = 408,15$ K e $T_{in} = 333,15$ K (Grosso et al., 2010).

Si è deciso di includere nel calcolo non solo l'exergia prodotta dall'invio dei flussi di CSS a co-combustione o a termovalorizzazione, ma anche quella associata ai quantitativi di frazione secca e bioessiccato. I termini della formula dell'exergia sono quindi stati calcolati come di seguito riportato:

- Per termovalorizzatori che producono solo energia elettrica: $[MJ_{exergia}/a] = [MJ_{el}/a]$, ossia i MJ di exergia uscenti dal termovalorizzatore sono pari ai MJ di energia elettrica prodotti dalla combustione del flusso uscente dal TMB e inviato a incenerimento nel medesimo impianto;
- Per termovalorizzatori cogenerativi: $[MJ_{exergia}/a] = [MJ_{el}/a] + [MJ_{th}/a] * 0,217$, ossia i MJ di exergia uscenti dal termovalorizzatore sono pari alla somma dei MJ di energia elettrica e termica (quest'ultima moltiplicata per il fattore di Carnot) prodotti dalla combustione del flusso uscente dall'impianto TMB e inviato a incenerimento nel medesimo impianto;
- Per cementifici: $[MJ_{exergia}/a] = [MJ_{indiretti}/a]$, ossia i MJ di exergia imputabili alla combustione del flusso uscente dal TMB utilizzato in cementificio sono pari al prodotto tra PCI e massa del CSS uscente dal TMB e inviata a cementificio.

Sulla base dei dati massici sui singoli flussi in uscita dagli impianti TMB verso i termovalorizzatori e sul relativo PCI medio annuo (Tabella 6) (dati primari ricevuti dai gestori e assunzioni riportate nel materiale supplementare – Tabella MS1), e dei dati di rendimento (Tabella 5) sono

Tabella 6 – Caratteristiche dei flussi in uscita dagli impianti TMB avviati a valorizzazione energetica (co-combustione in cementificio o termovalorizzazione), quantità di exergia prodotta, exergia consumata ed exergia netta per ogni filiera

		Flussi in uscita [t/a]	PCI [MJ/t]	Energia elettrica prodotta [MWh/a]	Energia termica prodotta [MWh/a]	Exergia prodotta [MWh/a]	Exergia usata dall'impianto TMB [MWh/a]	Exergia netta [MWh/a]
Filiera 1	CSS	22.924	19.000 ⁽¹⁾	-	-	120.988	3.840	117.148
Filiera 2	CSS	60.997	13.000	34.690	-	34.690	1.100	49.048
	Fr. secca 1	8.711	7.465	4.932	7.303	6.516		
	Fr. secca 2	12.692	7.465	5.719	4.924	6.787		
	Bioess. 1	980	13.500	1.003	1.486	1.326		
	Bioess. 2	883	13.100	698	601	829		
Filiera 3	CSS 1	8.882	16.640	8.500	17.506	12.299	2.140	54.678
	CSS 2	28.510	13.300	28.757	42.585	37.998		
	CSS 3	2.019	13.400	1.633	1.406	1.938		
	Fr. secca	334	11.300	287	424	1.050		
	Bioess. 1	2.951	13.500	3.021	4.474	3.992		
	Bioess. 2	219	13.500	179	154	212		
Filiera 4	CSS	39.160	15.070	23.844	-	23.844	5.028	19.122
	Fr. secca	524	10.046	306	-	306		

⁽¹⁾ I gestori dell'impianto hanno dichiarato un PCI del CSS uscente compreso tra 18.000 e 20.000 MJ/t, pertanto un valore medio di 19.000 è stato assunto per la filiera in oggetto.

Tabella 7 – Quantità di rifiuto trattata da ciascuna filiera per la produzione di un MWh di exergia nel 2015

	Rifiuto trattato nel 2015 [t]	Exergia netta prodotta nel 2015 [MWh _{ex}]	[t _{RUR} /MWh _{ex}]
Filiera 1	66.537	117.148	0,57
Filiera 2	131.309	49.048	2,68
Filiera 3	53.043	54.678	0,97
Filiera 4	162.841	19.122	8,52

stati calcolati il quantitativo di energia elettrica e termica prodotto dall'incenerimento dei singoli flussi e l'exergia complessivamente prodotta (si vedano i bilanci di exergia nelle Figure MS5-MS8 del materiale supplementare). Per quanto riguarda invece il CSS utilizzato come combustibile sostitutivo in cementificio (Filiera 1), l'energia prodotta è stata quantificata direttamente come exergia; sottraendo dall'exergia così calcolata l'exergia associata agli autoconsumi degli impianti TMB (pari al valore di consumo di energia elettrica dichiarata dai gestori dei TMB), è stato possibile ricavare l'exergia netta indicata in Tabella 6. Considerando il quantitativo annuo di rifiuto trattato in ciascuna filiera, è poi possibile calcolare il quantitativo di rifiuto necessario per la produzione di un MWh di exergia: tali valori sono mostrati in Tabella 7.

2.3.2. Costi del trattamento e della raccolta

Come indicato in precedenza, quando l'unità funzionale è il MWh di exergia prodotta, è stato necessario calcolare il costo del trattamento dei flussi in uscita dagli impianti TMB a ritroso, sommando alla tariffa di conferimento il ricavo. Le tariffe di conferimento sono state fornite dai gestori degli impianti TMB e sono visibili nella Tabella MS1: per il conferimento dei flussi in uscita dai TMB verso i termovalorizzatori sono comprese tra i 40 e i 70 €/t, siano essi CSS, frazione secca o bioessiccato, mentre la tariffa di conferimento del CSS a co-combustione in cementificio è pari a 5 €/t.

Per la Filiera 1 il ricavo considerato è quello conseguito in seguito al non utilizzo del pet-coke nel cementificio, calcolato applicando la seguente formula, dove il prezzo medio del pet-coke ($P_{\text{pet-coke}}$)

è stato fissato pari a 55 €/t (AITEC, 2016) e il PCI del pet-coke ($PCI_{\text{pet-coke}}$) a 34.454 MJ/t (Ministero dell'Ambiente, 2017), mentre il quantitativo di CSS prodotto dal TMB della Filiera 1 nel 2015 e il rispettivo PCI sono quelli riportati nella precedente Tabella 6:

$$\text{Ricavo } [€/a] = P_{\text{pet-coke}} * t_{\text{CSS}} * (PCI_{\text{CSS}}/PCI_{\text{pet-coke}})$$

Per le filiere 2, 3 e 4 il ricavo considerato è quello associato alla vendita di energia elettrica e termica dei termovalorizzatori. Esso è stato calcolato utilizzando il prezzo medio di vendita dell'energia elettrica e termica, moltiplicato per i MWh elettrici e termici prodotti nei vari impianti. Il prezzo medio di vendita dell'energia elettrica considerato è di 150 €/MWh_{el}, come suggerito dagli stessi gestori degli impianti TMB, mentre un prezzo medio di vendita dell'energia termica di 80 €/MWh_{th} è stato ritenuto rappresentativo del caso in esame (A2A, 2015).

Inoltre, quando l'unità funzionale del sistema è il MWh di energia, la co-funzione è rappresentata dal trattamento del rifiuto: quindi per poter confrontare i quattro sistemi è stato necessario aggiungere ad ogni filiera il costo evitato dello smaltimento alternativo del quantitativo di RUR trattato (Figura 2). Assumendo verosimile che, se il rifiuto non viene avviato a pretrattamento negli impianti TMB, potrebbe essere destinato ad incenerimento diretto per il recupero di energia, è stata considerata una tariffa di conferimento pari a 110 €/tRUR. Questo valore è stato ritenuto ben rappresentativo in particolare per il Nord Italia, anche se bisogna evidenziare che si tratta di un dato fortemente variabile di anno in anno e passando da un contesto regionale all'altro.

I costi medi specifici della raccolta del RUR utilizzati qualunque sia l'unità funzionale sono stati estrapolati dal Rapporto sui Rifiuti Urbani di ISPRA (ISPRA, 2016). Per ogni filiera analizzata, il costo totale della raccolta è stato poi stimato come prodotto tra il costo specifico per tonnellata di

rifiuto (diverso in base alla regione in cui si colloca l'impianto TMB) e la quantità di RUR trattata nell'anno di riferimento dal singolo impianto: i risultati sono riportati in Tabella 8.

3. RISULTATI E DISCUSSIONE

3.1. Costi stimati utilizzando come unità funzionale una tonnellata di RUR in ingresso agli impianti TMB

In Figura 3 sono riportati i costi unitari (€/t_{RUR}) stimati per ciascuna filiera analizzata. Dai risultati emerge che il minor costo unitario sia stato sostenuto nel 2015 dalla Filiera 2 (171 €/t_{RUR}), mentre quello più elevato dalla Filiera 1 (219 €/t_{RUR}).

Se si confrontano le quattro filiere, si nota come la Filiera 1 presenti i costi maggiori associati alla raccolta del rifiuto: questo perché la tariffa per la raccolta nella regione Piemonte è maggiore rispetto a quella in Lombardia ed Emilia Romagna (Tabella 5). Le differenze tra Filiera 2 e Filiera 3 sono imputabili principalmente ai costi di gestione, in ragione di differenti politiche di allocazione del costo del personale tra l'impianto TMB e il termovalorizzatore, quando localizzati, come nei due casi, nel medesimo sito e aventi lo stesso gestore. Questo fa sì che il quadro dei costi ricostruito per la Filiera 1, in cui il TMB è collocato in maniera autonoma rispetto agli impianti di destino del CSS, sia da considerarsi più veritiero e rappresentativo della realtà di mercato rispetto a quello relativo alle Filiere 2 e 3, dove le diverse politiche aziendali si possono ripercuotere sull'effettiva rappresentatività delle voci di costo. Comparando la Filiera 1 (caratterizzata da TMB a flusso unico) con la Filiera 4 (caratterizzata da TMB a flusso separato), i costi complessivi per tonnellata di rifiuto appaiono differenziarsi per 5 €/t_{RUR}; se da un lato la Filiera 1 risulta soggetta ad un maggior costo per le voci "raccolta RUR" e "gestione", dall'altro la Filiera 4 risente di costi più ingenti per quanto riguarda le voci "tariffe di conferimento" e "trasporti".

Tabella 8 – Stima del costo della raccolta del rifiuto in ingresso agli impianti TMB nelle quattro filiere

	Costo raccolta (ISPRA, 2016)	RUR trattato dall'impianto TMB	Totale costo della raccolta
	[€/t]	[t/a]	[€/a]
Filiera 1 – Piemonte	138	66.537	9.148.838
Filiera 2 – Lombardia	97	131.309	12.750.104
Filiera 3 – Lombardia	97	53.043	5.150.475
Filiera 4 – Emilia Romagna	119	162.841	19.345.511

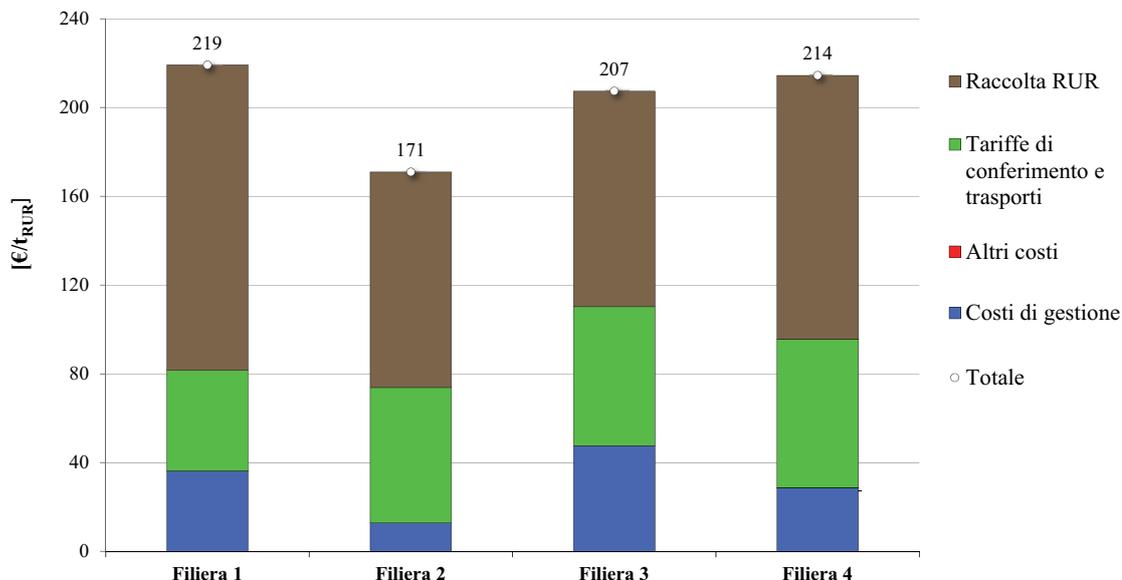


Figura 3 – Dati di costo per ogni filiera analizzata, espressi in €/t_{RUR}

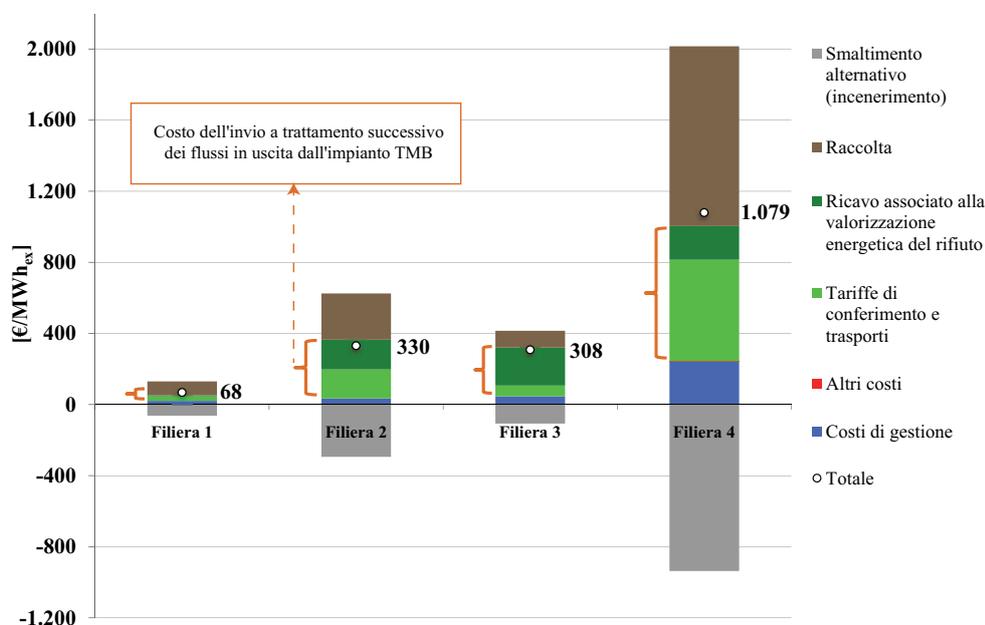


Figura 4 – Dati di costo per ogni filiera analizzata, espressi in €/MWh_{ex}; lo smaltimento alternativo del RUR considerato è l'incenerimento diretto. Il costo del trattamento dei flussi in uscita dagli impianti TMB è stato calcolato, come spiegato nel paragrafo 2.2.2, come somma della tariffa di conferimento e del ricavo associato all'utilizzo dell'energia prodotta in seguito alla valorizzazione energetica dei flussi in uscita dai TMB

3.2. Costi stimati considerando come unità funzionale 1 MWh di exergia prodotta dalla valorizzazione energetica dei flussi uscenti dagli impianti TMB

La Figura 4 illustra gli esiti dell'analisi LCC quando i costi unitari delle filiere sono stati valutati su base energetica (€/MWh_{ex}).

Alla Filiera 4 (caratterizzata da TMB a flusso separato) sono risultati associati costi maggiori per la

produzione di un MWh di exergia (1.079 €/MWh_{ex}) rispetto alle altre tre filiere i cui impianti TMB trattano il rifiuto con tecnologia a flusso unico.

In particolare, lo scostamento maggiore si rileva con la Filiera 1, cui corrisponde un costo complessivo pari a 68 €/MWh_{ex}. Il TMB della Filiera 1 è anche l'impianto che è risultato trattare un minor quantitativo di rifiuto per produrre un MWh di exergia (0,57 t_{RUR}/MWh_{ex}), a fronte di un quantitativo quattro volte superiore nel caso della Filiera 2

e che arriva ad essere quindici volte superiore per la Filiera 4 (Tabella 7). Questo dato così elevato della Filiera 4 è da ricondurre al fatto che il termovalorizzatore a cui è stato destinato il CSS non operava in regime cogenerativo e presentava un rendimento di produzione di energia elettrica piuttosto basso (14,5%).

Dal punto di vista energetico, la produzione di un combustibile idoneo per essere inviato a co-combustione permette da un lato di generare un maggior quantitativo di exergia, in quanto vengono meno i rendimenti di produzione di energia elettrica e termica dei termovalorizzatori, e dall'altro di ridurre i costi per MWh_{ex} prodotto.

Se si confrontano le Filiere 2 e 3, i costi per MWh di exergia risultano comparabili, pari rispettivamente a 330 €/MWh_{ex} e 308 €/MWh_{ex}. A parità di exergia prodotta, per la Filiera 2 sono risultati costi maggiori associati alla raccolta, oneri compensati però dal costo dell'evitato incenerimento diretto del RUR. Una rilevante differenza di costi (pari a circa 100 €/MWh_{ex}) si riscontra per la voce "tariffe di conferimento e trasporti", in quanto il TMB della Filiera 2 è risultato soggetto a costi più elevati per l'invio a termovalorizzazione o a smaltimento dei flussi in uscita (tratta un maggior quantitativo di rifiuti). Infine va rilevato che il TMB della Filiera 3 ha avuto nel 2015 un maggiore ricavo associato alla valorizzazione energetica del rifiuto, avendo inviato i tre flussi di CSS prodotti a termovalorizzatori che conseguono recupero di energia sia elettrica che termica, a differenza del TMB2 che invia il CSS ad un inceneritore non cogenerativo.

4. CONCLUSIONI

Lo studio ha avuto come obiettivo l'analisi dei costi del ciclo di vita di filiere di trattamento del rifiuto urbano indifferenziato basate sul trattamento meccanico-biologico (TMB) e la successiva valorizzazione in termini energetici (invio a termovalorizzazione o a co-combustione del CSS e degli altri flussi di frazione secca o bioessiccato con conseguente produzione di energia elettrica e calore) e di recupero di materiali (separazione di metalli ferrosi e non ferrosi destinati ad impianti di riciclo). Lo studio risulta essere il primo esempio pubblicato in Italia di applicazione della metodologia LCC Ambientale a tali filiere.

Con riferimento all'anno 2015, sono state caratterizzate e analizzate quattro filiere: una è connotata da un impianto TMB che produce CSS destina-

to a co-combustione in cementificio mentre le rimanenti tre sono connotate da impianti TMB che inviano i flussi in uscita a termovalorizzatori (con recupero di energia e calore). Tre degli impianti analizzati (TMB-filiera 1, TMB-filiera 2 e TMB-filiera 3) effettuavano un trattamento del RUR a flusso unico, mentre l'altro (TMB-filiera 4) sottoponeva il rifiuto in ingresso ad un trattamento a flusso separato.

Dalla valutazione dei costi che è stata effettuata per tutte le filiere analizzate rispetto a due distinte unità funzionali – la tonnellata di RUR in ingresso all'impianto e il MWh di exergia prodotto dalla valorizzazione energetica dei flussi in uscita dai TMB – sono derivabili le seguenti considerazioni principali:

- esiste un divario molto ampio per quanto riguarda le tariffe di conferimento dei CSS a co-combustione in cementificio (circa 5 €/t) rispetto a quelle per l'invio a termovalorizzazione (comprese tra i 40 e i 70 €/t);
- se si considera come unità funzionale la tonnellata di rifiuto in ingresso a ciascun impianto TMB, alla Filiera 1 sono risultati associati i costi maggiori, pari a 219 €/t_{RUR}. Confrontando questa filiera (caratterizzata da un TMB a flusso unico) con la Filiera 4 (caratterizzata da un TMB a flusso separato), non emergono importanti differenze per quanto concerne i costi complessivi per tonnellata di rifiuto (pari nel caso del TMB4 a 214 €/t_{RUR}). La produzione di CSS da impiegare in co-combustione in cementificio in sostituzione del pet-coke permette di ottenere la maggiore produzione di exergia per tonnellata di RUR. Quando il CSS è inviato a termovalorizzazione, i rendimenti di produzione di energia elettrica e termica degli inceneritori riducono la quantità di exergia complessivamente disponibile a seguito della valorizzazione del rifiuto;
- i risultati ottenuti considerando come unità funzionale 1 MWh di exergia prodotto a seguito della valorizzazione energetica del rifiuto suggeriscono invece che il trattamento del RUR in impianti a flusso unico per produzione di CSS da inviare a co-combustione sia l'alternativa migliore dal punto di vista economico. Infatti, mentre i costi complessivi per la Filiera 1 sono risultati nel 2015 pari a 68 €/MWh_{ex}, per le Filiere 2, 3 e 4 appaiono più ingenti, rispettivamente pari a 330, 308 e 1.079 €/MWh_{ex}. Il costo maggiore, quello della Filiera 4, è associato ad un TMB di tipologia a flusso separato:

quindi, se si considera il costo per produrre 1 MWh di exergia, il trattamento del rifiuto in impianti a flusso separato risulta essere l'alternativa meno conveniente. È emerso, inoltre, che per produrre 1 MWh di exergia sono serviti in questo TMB 570 kg di rifiuti, mentre sono circa 8.520 kg per produrre 1 MWh di exergia nel caso dell'impianto TMB a flusso separato della Filiera 4;

- il conseguimento di risultati differenti a seconda dell'unità funzionale considerata può essere interpretato come una limitazione intrinseca della metodologia LCC applicata a filiere di trattamento meccanico-biologico e successivo recupero energetico di rifiuti, dovuta ai diversi punti di vista adottati e alla grande diversità delle condizioni al contorno di ciascuna filiera.

Gli esiti dello studio, nei limiti dei dati e delle stime effettuate, porterebbero a concludere che incentivare il trattamento del rifiuto in sistemi TMB a flusso unico da un lato può ridurre gli oneri per lo smaltimento di flussi di difficile gestione (frazione umida da stabilizzare e smaltire) e dall'altro mettere a disposizione un CSS con caratteristiche di qualità idonee a soddisfare le esigenze, tecnologiche, economiche e ambientali, di un utilizzo co-combustivo come sostituto di combustibili fossili. Risultati più robusti si potranno ottenere ripetendo l'analisi qualora fossero a disposizione i dati per altri impianti TMB, oltre a quelli qui già analizzati.

Dato che lo studio ha applicato una LCC Ambientale, i risultati potrebbero essere utilizzati, una volta elaborata anche una LCA dello stesso sistema, per generare indicatori di eco-efficienza che mettano in relazione i costi con gli impatti ambientali.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- A2A Calore & Servizi (2015) Tariffe e costi del teleriscaldamento in Lombardia. Documento disponibile sul sito: http://www.ilteleriscaldamento.eu/teleriscaldamento_lombardia.htm
- AITEC (2016). Relazione annuale 2016 AITEC (Associazione Italiana Tecnico Economica Cemento).
- ARPA Emilia Romagna (2015) Flussi, impianti e costi dello smaltimento. *Ecoscienza* n. 5/2015.
- Ekvall, T., Assefa, G., Bjorklund, A., Erikson, O., Finnveden, G., (2007) What life-cycle assessment does and does not do in assessments of waste management. *Waste Management* 27, 989-996.
- European Commission (EC), JRC (Joint Research Center) (2010). ILCD Handbook: General Guide for Life Cycle Assessment and Detailed Guidance. <http://eplca.jrc.ec.europa.eu/uploads/ILCD-Handbook-General-guide-for-LCA-DETAILED-GUIDANCE-12March2010-ISBN-fin-v1.0-EN.pdf> (accesso nel Novembre 2016).
- Finnveden G., Hauschild M.Z., Ekvall T., Guinée J., Heijungs R., Hellweg S., Koehler A., Pennington, D., Suh S., (2009) Recent developments in life cycle assessment. *Journal of Environmental Management* 91 (1), 1-21.
- Grosso M., Motta A., Rigamonti L. (2010) Efficiency of energy recovery from waste incineration, in the light of the new Waste Framework Directive. *Waste Management* 30, 1238-1243.
- Hunkeler D, Lichtenwort K, Rebitzer G (eds.) (2008) Environmental life cycle costing. SETAC, Pensacola, FL (US) in collaboration with CRC Press Taylor & Francis Group.
- ISPRA (2014) Rapporto sul recupero energetico da rifiuti urbani in Italia.
- ISPRA (2016) Rapporto Rifiuti Urbani 2016. <http://www.isprambiente.gov.it/it/pubblicazioni/rapporti/rapporto-rifiuti-urbani-edizione-2016>
- ISPRA (2017) Rapporto Rifiuti Urbani 2017. <http://www.isprambiente.gov.it/it/archivio/eventi/2017/ottobre/rapporto-rifiuti-urbani-edizione-2017>
- Martinez-Sanchez V., Kromann M. A., Astrup T. F. (2015) Life Cycle Costing of waste management system: Overview, calculation principles and case studies. *Waste Management* 36, 343-355.
- Martinez-Sanchez V., Tonini D., Moller F., Astrup T.F. (2016) Life-Cycle Costing of Food Waste Management in Denmark: Importance of indirect effects", *Environmental Science & Technology* 50(8), 4513-4523.
- Rigamonti L., Sterpi I., Grosso M. (2015) Indicatore di sostenibilità ambientale ed economica di sistemi di gestione integrata di rifiuti urbani. *Ingegneria dell'ambiente* Vol. 2 n. 4/2015.
- SETAC (2011) Environmental Life Cycle Costing: A Code of Practice. Editori: Swarr T.E., Hunkeler D., Klopffer W., Pesonen H.-L., Ciroth A., Brent A. C., Pagan R.

RINGRAZIAMENTI

Questo lavoro è stato finanziato dal Fondo di Ricerca per il Sistema nell'ambito dell'Accordo di Programma tra RSE S.p.A. ed il Ministero dello Sviluppo Economico – Direzione generale per il mercato elettrico, le rinnovabili e l'efficienza energetica, il nucleare – in ottemperanza al DM 8 marzo 2006.

Si ringraziano inoltre i gestori degli impianti che hanno fornito i dati per l'analisi LCC e l'ing. Roberta Bassani per il supporto nella loro elaborazione.

Materiale supplementare è disponibile gratuitamente all'indirizzo www.ingegneriadellambiente.net



INGEGNERIA DELL'AMBIENTE

per il 2019 è sostenuta da:



INGEGNERIA
DELL'AMBIENTE



N. 1/2019

