POLITECNICO DI MILANO

Centro studi MatER

Materia & Energia da Rifiuti

Progetto a tema 2013-2014

Indicatore di sostenibilità ambientale ed economica di sistemi di gestione integrata di rifiuti urbani

SINTESI

L. Rigamonti – I. Sterpi – F. Lovato – M. Grosso

Dicembre 2014

INDICE

1. OBIETTIVI DEL PROGETTO 3
2. ARTICOLAZIONE DEL PROGETTO 3
2.1. Fase 1: Definizione degli indicatori 3
4.1.1 Indicatore di recupero di materia 3
4.1.2 Indicatore di recupero di energia 5
4.1.3 Indicatore relativo ai costi 6
2.2. Fase 2: Modalità di aggregazione degli indicatori 7
4.2 Fase 3: Applicazione a casi reali 7
4.3 Discussione 9
4.3.1 Indicatori di recupero di materia ed energia – formulazione alternativa con approccio economico 10
3. CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI 10
BIBLIOGRAFIA 12

1. OBIETTIVI DEL PROGETTO

Obiettivo di questo progetto è la definizione di un indicatore per la valutazione della sostenibilità ambientale ed economica di un sistema di gestione integrata dei rifiuti urbani. La sfida consiste nel definire un indicatore semplice ma completo, che possa essere calcolato anche dagli amministratori locali e dai gestori del sistema di raccolta/ trattamento e non solo da ricercatori o esperti in LCA e LCC. Tale strumento potrà essere utilizzato per valutare nel tempo le prestazioni di un sistema, in un'ottica di miglioramento continuo o anche per effettuare un confronto oggettivo tra diversi sistemi. L'indicatore non pretende naturalmente di sostituire uno studio di LCA ed LCC, ma può essere utilizzato come uno strumento di screening in una prima fase della valutazione e quando il tempo e le risorse economiche sono limitati.

2. ARTICOLAZIONE DEL PROGETTO

2.1. Fase 1: Definizione degli indicatori

La prima fase del progetto è consistita nella definizione a livello di sistema dei tre indicatori: indicatore di recupero di materia, indicatore di recupero di energia ed indicatore relativo ai costi.
Ogni indicatore è calcolato come rapporto tra alcune variabili. Tutte le variabili devono riferirsi allo stesso anno. Una variabile chiave, che rientra nel calcolo di tutti e tre gli indicatori, è il quantitativo di rifiuti urbani (RU) raccolti.
In questo progetto si considerano come **RU raccolti** le seguenti frazioni:

- frazioni organiche (frazione umida e verde) raccolte con la raccolta differenziata;
- rifiuti di imballaggio in vetro, carta, plastica, legno, acciaio e alluminio e frazioni merceologiche similari (f.m.s.) (quali giornali e riviste raccolte contestualmente agli imballaggi in carta) raccolti con la raccolta differenziata, sia in modalità mono-materiale che multi-materiale;
- rifiuti urbani indifferenziati.

Sono quindi esclusi dal calcolo:

- rifiuti di apparecchiature elettriche ed elettroniche;
- rifiuti ingombranti;
- abiti usati e i rifiuti tessili;
- raccolta selettiva (ossia pile e accumulatori, farmaci scaduti, contenitori T/F, inchiostri, vernici, oli, altri rifiuti urbani pericolosi);
- rifiuti da spazzamento stradale;
- rifiuti inerti.

4.1.1 Indicatore di recupero di materia

Per ogni sotto unità presente nel sistema integrato di gestione dei rifiuti urbani (riciclo delle diverse frazioni raccolte con RD, compostaggio/digestione anaerobica della frazione organica, termovalorizzazione del rifiuto residuo, ecc.) sono stati individuati i contributi di recupero di materia.
L'indicatore di recupero di materia è definito come il rapporto tra il quantitativo totale di materiale recuperato nel sistema in esame e il quantitativo di rifiuti raccolti.

L'indicatore di recupero di materia può quindi essere calcolato nel seguente modo:

$$\frac{\text{MPS da RD imballaggi e f.m.s. [t] + MPS da residui combustione [t] + MPS da TMB [t] + Compost [t]}}{\text{RU raccolti [t]}}$$

Per il calcolo del denominatore (RU raccolti) si rimanda a quanto esposto nel paragrafo precedente.
Per quanto riguarda il numeratore, i diversi contributi sono qui di seguito descritti.

Con **MPS da RD imballaggi e f.m.s.** si intendono le Materie Prime Secondarie (MPS) prodotte con le attività di riciclo dei materiali (imballaggi e frazioni merceologiche similari) raccolti con la raccolta differenziata, sia in modalità mono-materiale sia multi-materiale. Sono quindi i quantitativi di materiali secondari (quali alluminio, metalli ferrosi, vetro, carta, legno e plastica) in uscita dagli impianti di riciclo previa eventuale separazione tra le diverse frazioni (se raccolte in modalità multi-materiale), selezione e processo di riciclo.

Con **MPS da residui combustione** si intendono le Materie Prime Secondarie ricavate dai materiali recuperati dai residui prodotti nella combustione dei rifiuti del circuito urbano (ad es. incenerimento del residuo tal quale, incenerimento delle frazioni prodotte negli impianti di pretrattamento oppure incenerimento degli scarti derivanti dalle attività di recupero dei materiali da imballaggio e f.m.s. e della frazione organica e derivanti dalle attività di pretrattamento). Tali MPS sono quindi ad esempio:

- metalli recuperati dalle scorie in uscita dall'impianto di riciclo;
- materiale inerte ricavato dal trattamento delle scorie e utilizzato (dopo eventuale pretrattamento) ad es. nei sottofondi stradali o nei cementifici.

Con **MPS da TMB** si intendono le Materie Prime Secondarie ottenute con il riciclo dei materiali recuperati negli impianti di pretrattamento del rifiuto urbano residuo, quali, per esempio, metalli e polimeri plastici.

Con **Compost** si intende il compost prodotto direttamente da compostaggio aerobico oppure ottenuto dal digestato da digestione anaerobica. Esso deriva dal trattamento della frazione organica, sia l'umido sia il verde.

Tutti i termini (sia al numeratore che al denominatore) sono da esprimersi in tonnellate.
L'indicatore di recupero di materia, così calcolato, risulta essere un indice (essendo adimensionale) variabile tra 0 e 1 (0 se non viene effettuato nessun recupero di materia, 1 se tutto il rifiuto è recuperato come materiale con un'efficienza del 100%, opzione non realizzabile nella realtà).
Si sottolinea che i materiali da includere nei vari termini al numeratore sono solo quelli di cui ci sia evidenza (ad es., perché hanno un valore di mercato) che vengano davvero utilizzati come prodotti per scopi specifici.

4.1.2 Indicatore di recupero di energia

Per il calcolo dell'indicatore di recupero di energia viene considerata non solo l'energia prodotta direttamente dai rifiuti, ma anche quei prodotti che, pur avendo un contenuto energetico, non vengono impiegati per una produzione diretta di energia elettrica e/o calore.
Il recupero energetico diretto (elettrico e termico) avviene ad esempio:

- in discarica dalla combustione del biogas;
- in digestione anaerobica dalla combustione del biogas;
- in attività di combustione (termoutilizzazione o gassificazione) di combustibile solido secondario (CSS), di rifiuto urbano residuo (RUR) o di scarti derivanti dalle attività di recupero dei materiali raccolti con RD e/o derivanti dalle attività di pretrattamento.

I prodotti del sistema rifiuti con contenuto energetico ma non direttamente impiegati per la produzione di energia sono ad esempio:

- materiali provenienti dal circuito dei RU utilizzati in impianti produttivi, quale CSS utilizzato in cementifici e centrali termoelettriche in sostituzione dei combustibili tradizionali (pet-coke e carbone);
- biometano da biogas immesso nella rete di distribuzione del metano;
- syngas da impianti di piro-gassificazione.

Per tenere in considerazione sia la quantità sia la qualità dell'energia prodotta, è stato utilizzato il concetto di exergia[1] (Grosso et al., 2010). In questo modo l'indicatore rappresenta l'exergia utile recuperata sul totale di exergia disponibile, e può essere calcolato con la seguente formulazione:

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

Al numeratore sono presenti i contributi elencati di seguito.

MJ_{el} = flusso di exergia associato alla produzione di energia elettrica che avviene direttamente nel sistema di gestione dei rifiuti: corrisponde all'elettricità prodotta (espressa in MJ). Tale contributo deve essere preso al netto degli autoconsumi dell'impianto;

MJ_{th} = flusso di exergia associato alla produzione di calore che avviene direttamente nel sistema di gestione dei rifiuti: corrisponde al calore prodotto (espresso in MJ) moltiplicato per il fattore di Carnot. Quando il calore viene trasferito a una rete di teleriscaldamento, tale fattore corrisponde a $1 - \frac{T_a}{T_{ml}}$, dove T_a è la temperatura

[1] Exergy can be defined as "the maximum amount of work that can be obtained from a given process, or from a given system by reversible processes" (Grosso et al., 2010)

ambiente e T_{ml} è la temperatura media logaritmica di T_{out} e T_{in} (le temperature del calore in uscita dall'impianto e quando rientra dalla rete di teleriscaldamento):

$$\frac{T_{in}-T_{out}}{ln\frac{T_{in}}{T_{out}}}.$$

Se l'impianto fornisce calore industriale invece che a una rete di teleriscaldamento, T_{ml} viene sostituita da T_c, che è la temperatura del vapore fornito all'utilizzatore. Anche tale flusso di exergia, come quello relativo all'elettricità, deve essere preso al netto degli autoconsumi dell'impianto.

$MJ_{indiretti}$ = flusso di exergia associato a prodotti con contenuto energetico non direttamente impiegati per la produzione di energia: corrisponde al PCI del prodotto (espresso in MJ per massa) moltiplicato per la massa del prodotto. Da questo termine va sottratta l'energia spesa per la produzione del prodotto.

Al denominatore sono presenti i **$MJ_{disponibili}$**, ovvero l'exergia totale disponibile associata ai RU raccolti. Tale exergia è calcolata moltiplicando la massa di rifiuto lordo per il PCI del rifiuto lordo, come proposto di seguito:

$$MJ_{disponibili} = \sum_i t_{RDi} * PCI_{RDi} + t_{RUR} * PCI_{RUR}$$

dove RD_i è riferito ai materiali raccolti in modo differenziato e RUR indica il rifiuto urbano residuo.

Tutti i termini (sia al numeratore sia al denominatore) sono da esprimersi in MJ.
L'indicatore di recupero di energia, così calcolato, risulta essere un indice variabile tra 0 e 1 (0 se non viene effettuato nessun recupero di energia, 1 se tutto il rifiuto è recuperato sotto forma di energia, con un'efficienza pari al 100%, condizione che non si può realizzare in un caso reale).

4.1.3 Indicatore relativo ai costi

L'indicatore relativo ai costi è utile per comprendere a che costo si sono ottenute le prestazioni in recupero di materia ed energia calcolate con i due indicatori precedenti. Anche questo indicatore, come quello di recupero di materia, presenta al denominatore i RU raccolti, mentre al numeratore presenta i costi del sistema:

$$\frac{\textbf{Costi di Raccolta [€] + Costi dei Processi di trattamento [€] + Costo di smaltimento [€]}}{\textbf{RU raccolti [t]}}$$

Al numeratore tutti i costi si intendono al netto dei ricavi diretti (quindi al netto dei proventi derivanti dalla vendita dei materiali e dell'energia recuperata e dei contributi CONAI), ma comprensivi degli eventuali ammortamenti e del costo d'uso del capitale.
In dettaglio i tre termini includono ciascuno i seguenti contributi:

- costi di raccolta e trasporto: costo della RD mono-materiale e multi-materiale e della raccolta del RUR, inclusi i costi di trasporto fino al primo impianto di trattamento;
- costi dei processi di trattamento;
- costo di smaltimento finale in discarica.

Questo indicatore fornisce così il costo associato alla gestione di una tonnellata di RU, infatti è espresso in [€/t]: quindi, a differenza dei primi due, non è un indice.

2.2. Fase 2: Modalità di aggregazione degli indicatori

Per poter rappresentare i tre indicatori su uno stesso diagramma di modo da avere una comprensione immediata delle prestazioni del sistema in esame, si è deciso di utilizzare un diagramma "costi vs recupero di materia ed energia", in cui sull'asse y è posizionato l'indicatore dei costi e sull'asse x l'indice derivato dall'aggregazione dell'indicatore di recupero di materia con l'indicatore di recupero di energia. Al fine di aggregare correttamente i due indicatori, è stata proposta una somma pesata, affinché la somma sia uguale al massimo a 1:

Indice di materia ed energia = indicatore di recupero di materiaw_m + indicatore di recupero di energia*w_e*

Per quanto riguarda il valore assunto dai pesi w_m e w_e, una prima opzione è quella di utilizzare lo stesso valore ossia $w_m=w_e= 0,5$. Volendo seguire la gerarchia dei rifiuti proposta dall'UE (in cui il recupero di materia è posizionato ad un livello superiore rispetto al recupero di energia), si potrebbe eventualmente associare al peso dell'indicatore di recupero di materia un valore maggiore.

Nella delimitazione dei quadranti, in questa fase si è solo definita la suddivisione orizzontale, che definisce l'economicità del sistema, e che è stata tracciata in corrispondenza del valore dell'indicatore dei costi calcolato sulla media nazionale (elaborazione dati ISPRA, 2012): 189 €/t (anno 2009, anno di riferimento per i casi di studio con i quali è stato testato il calcolo degli indicatori). La suddivisione verticale, che definisce l'efficienza del sistema, deve ancora essere individuata: sarà infatti possibile stabilirla solo avendo a disposizione un'ampia casistica di indicatori, relativi a diverse realtà.

4.2 Fase 3: Applicazione a casi reali

Per determinarne l'efficacia, il calcolo dei 3 indicatori è stato testato per i sistemi di gestione integrata dei rifiuti urbani implementati nel 2009 in Regione Lombardia e nelle 4 province di Milano, Bergamo, Pavia e Mantova. Una volta calcolati i tre indicatori, essi sono stati rappresentati utilizzando il diagramma "costi vs recupero di materia ed energia" (Figura 4).

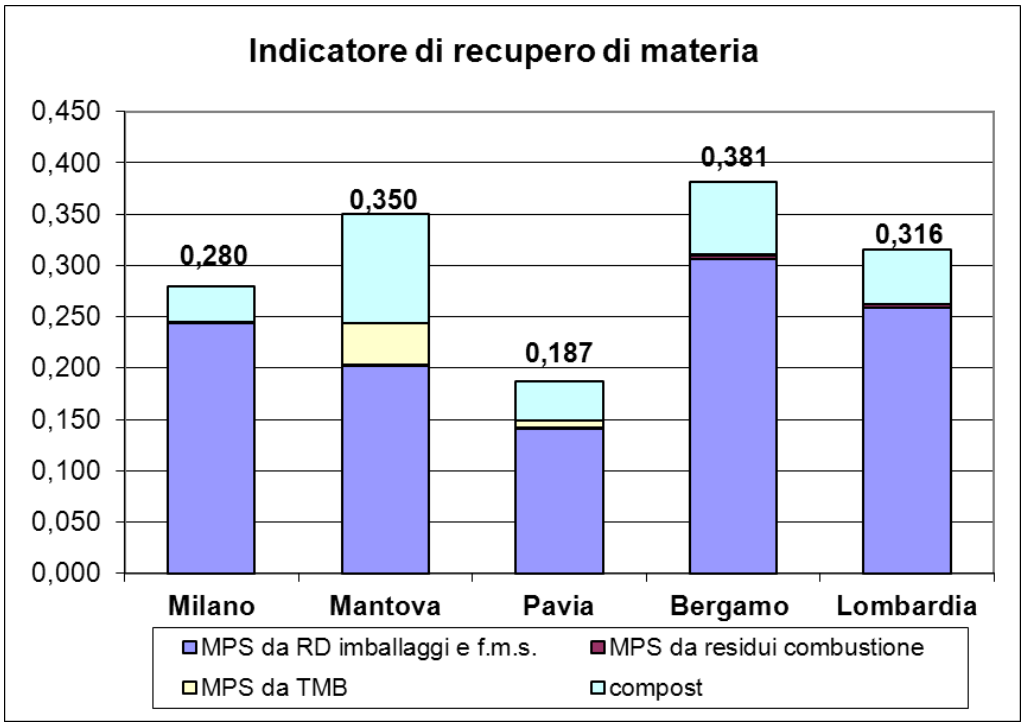

Figura 1: indicatore di recupero di materia per i casi di studio considerati

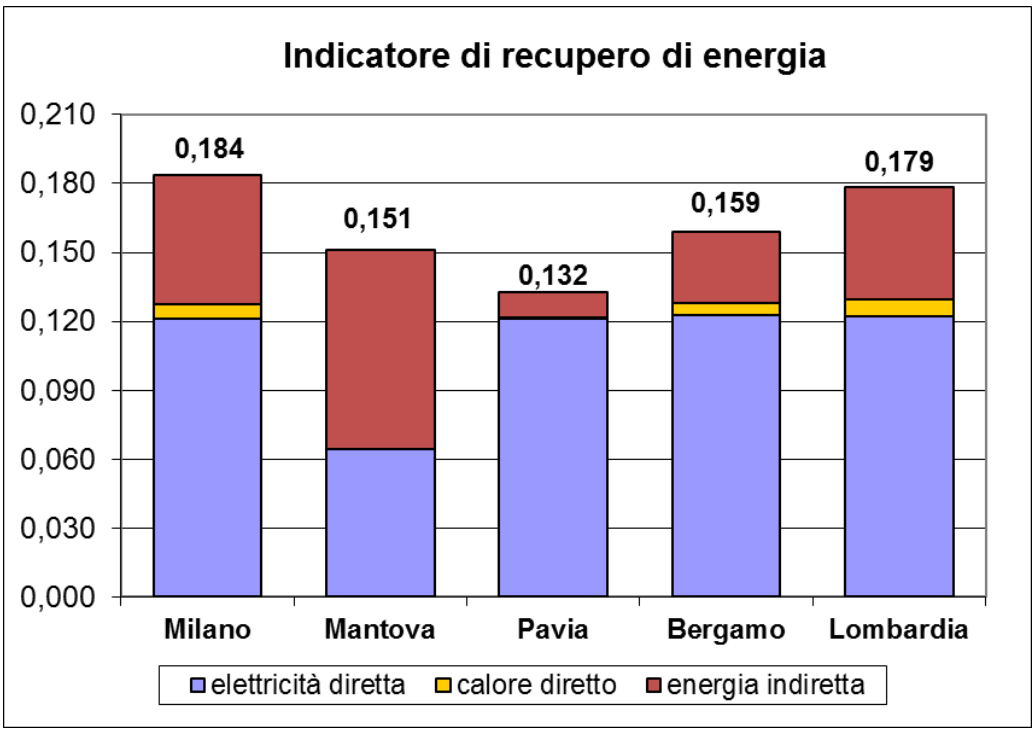

Figura 2: indicatore di recupero di energia per i casi di studio considerati

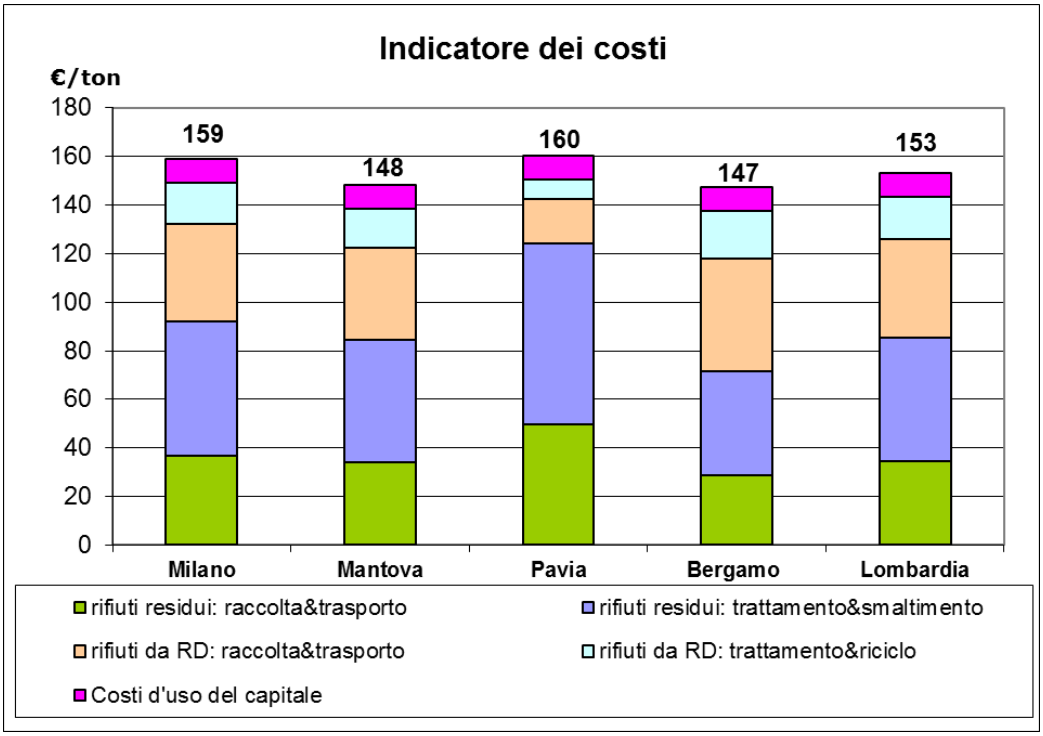

Figura 3: indicatore dei costi per i casi di studio considerati

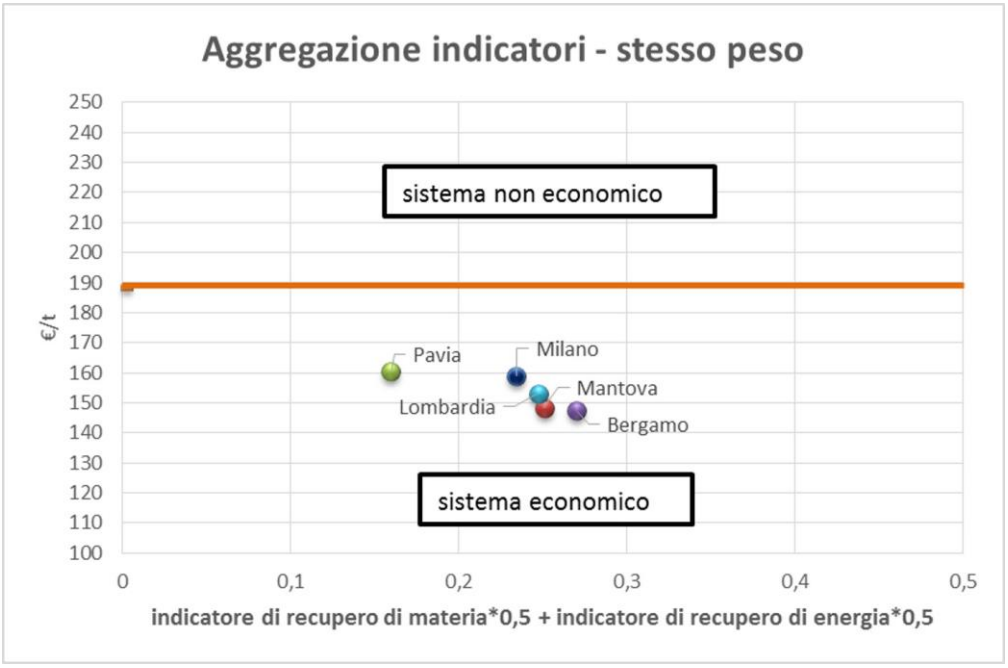

Figura 4: aggregazione degli indicatori per il caso di studio (gli indicatori di recupero di materia ed energia sono stati sommati utilizzando lo stesso peso)

4.3 Discussione

Gli indicatori di recupero di materia ed energia, così come sono stati proposti, hanno un significato fisico immediato e non includono considerazioni di natura economica: l'indicatore di recupero di materia esprime i materiali recuperati utilizzabili sul totale dei rifiuti raccolti, mentre l'indicatore di recupero di energia rappresenta l'exergia utile

recuperata sull'exergia totale disponibile nei rifiuti raccolti. Le valutazioni economiche sono demandate al terzo indicatore, indipendente dai primi due.
Tuttavia, le formulazioni proposte non sono le uniche possibili: durante la definizione degli indicatori sono state prese in considerazione anche altre opzioni, come la formulazione alternativa con approccio economico.

4.3.1 Indicatori di recupero di materia ed energia – formulazione alternativa con approccio economico

- Indicatore di recupero di materia

$$\frac{\text{Somma di ogni MPS [t] moltiplicata per il suo valore di mercato specifico in [€/t]}}{\text{RU raccolti [t]}}$$

- Indicatore di recupero di energia

$$\frac{MJ_{el} * [€/MJ] + MJ_{th} * [€/MJ] + MJ_{indiretti} * [€/MJ]}{\text{RU raccolti [t]}}$$

In questa formulazione entrambi i denominatori rappresentano le tonnellate di rifiuti raccolti. Per l'indicatore di recupero di materia il numeratore è calcolato moltiplicando ogni materiale ottenuto dalle attività di riciclo per il suo valore di mercato specifico [€/t]. Analogamente, anche per l'indicatore di recupero di energia (secondo l'opzione senza fattore di Carnot), al numeratore ciascun termine è moltiplicato per il proprio valore di mercato specifico [€/t].
Così calcolati, i due indicatori rappresentano rispettivamente i ricavi generati dal sistema rifiuti per aver conseguito un determinato livello di recupero di materia e di energia, tenendo in considerazione le tipologie di prodotti recuperati (materiali o energia che siano).
In questo caso i due indicatori non sono più indici adimensionali, ma risultano espressi in [€/t], diventando così paragonabili all'indicatore dei costi, essendo anch'esso espresso in [€/t]: in questo modo è possibile confrontare i costi di funzionamento dei sistema di gestione dei rifiuti con i ricavi che lo stesso ha generato.

3. CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

L'indicatore proposto consente di confrontare diversi sistemi integrati di gestione dei rifiuti urbani e di monitorarne le prestazioni ambientali ed economiche nel tempo. Questo indicatore non ha la pretesa di sostituire uno studio di LCA o LCC, ma può costituire una prima fase di analisi quando le risorse economiche ed il tempo sono limitati.
Ulteriori studi potranno essere finalizzati a perfezionare l'indicatore, in particolare sarebbe interessante poter svolgere:

- Ulteriori test su casi reali per poter identificare, nel diagramma "costi vs recupero di materia ed energia", la suddivisione tra "sistemi efficienti" e "sistemi non efficienti";
- Test dell'indicatore dei costi su casi reali mediante l'acquisizione di dati primari;
- Studi per l'acquisizione dei valori di mercato dei prodotti (sia materiali che energia) del sistema di gestione dei rifiuti, in modo da poter valutare i due indicatori di recupero di materia e di energia secondo la formulazione basata sull'approccio economico.
- Predisposizione di un file Excel facilmente compilabile da parte dei gestori del sistema rifiuti al fine di ottenere il valore dei tre indicatori.

BIBLIOGRAFIA

Giugliano M., Cernuschi S., Grosso M., Rigamonti L. (2011). *Material and energy recovery in integrated waste management systems. An evaluation based on life cycle assessment.* Waste Management 31, 2092-2101.

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.

ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale) (2012). Rapporto rifiuti urbani Edizione 2012. www.isprambiente.gov.it/

Rigamonti L., Grosso M., Sunseri M.C. (2009a). *Influence of assumptions about selection and recycling efficiencies on the LCA of integrated waste management systems*. International Journal of Life Cycle Assessment, 14 (5), 411-419.

Rigamonti L., Grosso M., Giugliano M. (2009b). *Life cycle assessment for optimising the level of separated collection in integrated MSW management systems*. Waste Management 29, 934-944.

Rigamonti e L., Grosso M., Giugliano M. (2010). *Life cycle assessment of sub-units composing a MSW management system.* Journal of Cleaner Production, Volume 18, Issues 16-17, Pages 1652-1662.

Rigamonti L., Falbo A., Grosso M. (2013a). *Improvement actions in waste management systems at the provincial scale based on a life cycle assessment evaluation*. Waste Management, 33, 2568-2578.

Rigamonti L., Falbo A., Grosso M. (2013b). *Improving integrated waste management at the regional level: the case of Lombardia*. Waste Management Research, 31(9), 946-953.

Rigamonti L., Ferreira S., Grosso M., Marques R.C. (2014). Economic-financial analysis of the Italian packaging waste management system. Proceedings of SUM2014.