

MODELLAZIONE DI RICICLO, RIUSO E RECUPERO ENERGETICO NELLE ANALISI DEL CICLO DI VITA DEI PRODOTTI: UN CONFRONTO FRA LE EQUAZIONI DISPONIBILI NELLA NORMATIVA TECNICA

Laura Tagliabue*

Politecnico di Milano, Dipartimento di Energia

SOMMARIO. Nella norma ISO 14044 sono state definite alcune regole generali per gestire i problemi di allocazione che sorgono durante le analisi LCA (*Life Cycle Assessment*), tuttavia, esistono molti approcci diversi per modellare il riuso, il riciclo e il recupero energetico dei materiali. Questo articolo ha l'obiettivo di analizzare e confrontare dal punto di vista teorico le diverse equazioni avanzate dalle recenti norme tecniche: la ISO/TS 14067, la *Product Environmental Footprint* (PEF) indicata nella Raccomandazione 2013/179/UE, la metodologia adottata dal Sistema Internazionale EPD (*Environmental Product Declaration*) e la "formula integrata" di Wolf e Chomkamsri (2014) discussa in ambito europeo. Per confrontare i diversi approcci, tutte le formule sono state riscritte e presentate sulla base di una terminologia comune descritta nella sezione *Materiali e metodi*. Le quattro metodologie sono state poi confrontate sulla base di un set di 10 criteri di valutazione, fra cui, per esempio, l'applicabilità in caso di riciclo ad anello aperto e chiuso, l'intuitività, la praticità, il riconoscimento di crediti ambientali legati al recupero di materia ed energia. In base a questa analisi, il riferimento normativo internazionale più solido a cui fare riferimento per gestire i casi di riciclo/riuso e recupero energetico sembra essere la ISO/TS 14067, in particolare nella sua formulazione estesa qui presentata. Anche la "formula integrata" di Wolf e Chomkamsri si dimostra ugualmente adatta e applicabile a qualsiasi tipo di recupero di materia o di energia.

Parole chiave: LCA, riciclo, ISO14067, PEF, EPD System

MODELLING OF RECYCLING, REUSE AND ENERGY RECOVERY IN LCA OF PRODUCTS: A COMPARISON BETWEEN EQUATIONS AVAILABLE IN TECHNICAL STANDARDS

ABSTRACT. The ISO standard 14044 specifies some general rules to deal with end of life recovery processes and related secondary material and energy production in LCA studies. However, different competing approaches have been adopted by existing guidelines and methods for environmental assessment of products. This paper aims at analysing and comparing different formulae prescribed in recent technical standards: ISO/TS 14067, Recommendation 2013/179/EU, and International EPD System. Additionally, the "Integrated formula" advanced by Wolf and Chomkamsri (2014) has been

* Via Lambruschini 4 - 20156 Milano. tel. +39 02 2399 8683. e-mail: laura.tagliabue@polimi.it

evaluated. In order to carry out a systematic comparison between these selected modelling approaches, equations from the original sources have been re-expressed using a common terminology defined in the Materials and methods section. Then, all of these methods are judged based on a set of ten criteria, such as applicability in case of open-loop and closed-loop recycling situations, intuitiveness, practicability.

According to this analysis, the ISO technical standard 14067 seems to be the most appropriate to handle recycling/re-use and energy recovery processes, as well the "Integrated formula" proposed by Wolf and Chomkamsri.

Keywords: LCA, recycling, ISO 14067, PEF, EPD system

Ricevuto il 24-6-2015. Correzioni richieste il 9-7-2015. Accettazione il 14-7-2015.

1 INTRODUZIONE

1.1 Scopo dell'articolo

Quando si realizza un'analisi del ciclo di vita di un prodotto (LCA), ci si trova spesso ad affrontare problemi di allocazione per decidere come ripartire gli impatti ambientali di un processo produttivo fra i vari co-prodotti e sottoprodotti. Lo standard ISO 14044 descrive i requisiti e le linee guida per condurre valutazioni del ciclo di vita e indica una gerarchia di soluzioni da adottare in questi casi (ISO, 2006). In primo luogo, l'allocazione dovrebbe essere evitata suddividendo il processo produttivo in sub-processi, oppure tramite espansione del sistema. Se ciò non fosse possibile, si dovrebbe impostare una procedura di allocazione basata su relazioni fisiche (es. massa, energia). Nel caso in cui anche questa opzione non fosse praticabile, si può fare ricorso a un'allocazione fondata su altre relazioni (es. economica). La ISO 14044 indica che questi stessi principi di allocazione si applicano anche alle situazioni di riuso e riciclo, come pure di compostaggio o altri processi che possono essere assimilati al riutilizzo o al riciclaggio. In questi casi, però, non si tratta soltanto di allocare gli impatti ambientali fra più prodotti in uscita dallo stesso processo, ma anche di ripartire fra diversi sistemi produttivi le fasi di estrazione e lavorazione delle

materie prime e di fine vita dei materiali.

Questo lavoro si propone di analizzare come sono modellati nelle valutazioni LCA il riuso, il riciclo e il recupero energetico dei materiali in ingresso e in uscita da un sistema produttivo. L'obiettivo generale di questa analisi è quello di confrontare i diversi approcci recentemente proposti nella normativa tecnica internazionale, in particolare le formule suggerite nella specifica tecnica ISO/TS 14067 (ISO, 2013) e quella indicata nella Raccomandazione 2013/179/UE (CE, 2013) per la parte riguardante la *Product Environmental Footprint* (di seguito PEF). Sono analizzate e discusse, inoltre, la "formula integrata" descritta in Wolf e Chomkamsri (2014) e la metodologia adottata dal Sistema Internazionale EPD (International EPD System, 2013).

La PEF si basa sulle metodologie esistenti, ma vuole ridurre il margine di interpretazione che è attualmente presente nelle norme generali. Uno dei principali obiettivi della PEF, infatti, è quello di permettere in futuro il confronto fra le prestazioni ambientali dei prodotti. La PEF considera 14 categorie di impatto in un'ottica di LCA (ad esempio, *carbon* e *water footprint*, acidificazione, tossicità, ecc.). Quando la metodologia LCA è declinata al solo impatto derivante dalle emissioni di gas serra, si parla di *carbon footprint*.

La ISO/TS 14067 è stata scelta perché, anche se è stata finora pubblicata solo come specifica tecnica, mira a diventare lo standard di riferimento principale a livello internazionale per l'analisi della *carbon footprint* di prodotto (Pernigotti, 2013). La *carbon footprint*, costituisce, di fatto, una LCA "single issue"; dal punto di vista metodologico, perciò, non vi è alcuna differenza in termini di modellazione dei casi di riciclo/riuso e recupero energetico. L'approccio proposto dalla ISO/TS 14067, quindi, può essere direttamente confrontato con quello della PEF. La formula integrata di Wolf e Chomkamsri (2014) è stata scelta perché a livello europeo si è aperta una fase pilota per testare l'applicazione della PEF e valutare diversi approcci che è possibile adottare per comunicare al pubblico i risultati degli studi LCA (Bedo, 2014). Nell'ambito di questa fase pilota si è tenuto il *Workshop on End of Life (EoL) formulas in the context of the Environmental Footprint pilot phase* (CE, 2014), in cui la formula di Wolf e Chomkamsri è stata presentata e discussa come possibile approccio alternativo a quello finora descritto nella PEF.

Infine, fra i vari programmi di dichiarazioni ambientali di Tipo III esistenti, l'interesse verso il Sistema Internazionale EPD è motivato dal fatto che ha validità internazionale, che è un programma conforme alla ISO/TS 14067 ed è il programma di riferimento per le aziende italiane.

L'analisi di seguito proposta è simile a quella recentemente effettuata da Allacker et al. (2014) in cui gli autori, oltre alla ISO/TS 14067 e alla PEF, esaminano tre metodi qui non trattati (PAS 2050, BP X 30-323-0, REAPRO), ma

non analizzano l'approccio del Sistema Internazionale EPD e la formula integrata di Wolf e Chomkamsri.

1.2 Principali approcci utilizzati negli studi LCA per modellare l'utilizzo di materiali di riciclo e il fine vita dei prodotti

Per meglio introdurre la *review* di seguito descritta, è utile fornire una panoramica di quelli che sono i principali approcci a cui possono essere ricondotti i metodi finora utilizzati nella pratica dell'LCA per gestire il riuso, il riciclo e il recupero energetico dei materiali.

La modellazione del riciclo dei materiali, e in particolare dei metalli, è da tempo molto dibattuta (Allacker et al., 2014; Atherton, 2006; Bergsma e Sevenster, 2013; Cederstrand et al., 2014; CE, 2014; Ekvall e Tillman, 1997; Frischknecht, 2010; NCASI, 2012; Werner e Scholz, 2002). I metodi attualmente utilizzati possono essere classificati in tre principali approcci, ciascuno dei quali, avendo obiettivi differenti, adotta punti di vista diversi.

Approccio 100-0 (o "recycled content", o "cut-off")

È un approccio che guarda al sistema precedente che ha generato la materia prima secondaria. In quest'ottica, l'uso di un prodotto di riciclo è da incentivare perché fornisce un diversivo allo smaltimento del materiale in discarica o negli impianti di incenerimento. Lo scopo generale di questo approccio è quello di promuovere un mercato per il materiale di riciclo, che sarebbe altrimenti trattato come un rifiuto. Al sistema che utilizza il materiale secondario è quindi assegnato un "credito da riciclo", mentre nessun credito ambientale è riconosciuto al possibile riciclo dello stesso dopo l'uso.

Alcune metodologie che adottano l'approccio 100-0 sono l'International EPD System, la UNI EN 15804 (UNI, 2012) e la PAS 2050 nel caso di *open loop* (BSI, 2011), cioè quando il materiale di recupero è riciclato in un processo produttivo diverso da quello che l'ha generato e subisce un cambiamento nelle sue proprietà intrinseche.

Approccio 0-100 (o "recyclability substitution", o "End-of-life recycling approach", o "avoided burden" o "substitution approach")

È un approccio che guarda al destino del prodotto analizzato dopo il suo uso e si basa sul presupposto che il materiale che non è riciclato necessita di essere rimpiazzato attraverso la produzione di nuovo materiale vergine. Si focalizza quindi sul recupero e sul riciclo del materiale dopo l'uso. Sono queste pratiche da incentivare perché sono quelle che effettivamente permettono di evitare l'input di ulteriore materia prima vergine sul mercato. Il "credito da riciclo" è quindi assegnato al sistema che genera il ma-

teriale secondario (viene perciò incoraggiato l'ecodesign del prodotto, es. facilità nel separare fra di loro i diversi materiali che compongono un prodotto per aumentarne la riciclabilità dopo l'uso), mentre non è riconosciuto nessun credito ambientale al contenuto di materiale riciclato nel prodotto: utilizzare un materiale secondario in un processo produttivo significa semplicemente che un altro sistema produttivo avrà bisogno di materia prima vergine (approccio consequenziale).

È questo l'approccio generalmente indicato come corretto nel caso dei metalli, sia dalla letteratura scientifica (Frees, 2008) che dalle associazioni industriali dei metalli (Atherton, 2006). I metalli infatti sono riciclabili infinite volte senza che via sia una perdita di qualità del materiale e l'incremento del contenuto di materiale riciclato nei prodotti è limitato dalla disponibilità di materiale secondario (se disponibile, infatti, tipicamente l'utilizzo risulta già economicamente conveniente rispetto alla produzione di metallo vergine). Alcuni autori, tuttavia, hanno recentemente sottolineato come la qualità dei metalli recuperati dalle ceneri di fondo degli inceneritori possa scendere gradualmente per la presenza di sostanze indesiderate, indebolendo i benefici ambientali del riciclo. (Allegrini et al., 2015).

La ISO/TS 14067 adotta l'approccio 0-100 in caso di *closed loop*, cioè quando il materiale di recupero è riciclato nello stesso processo produttivo che l'ha generato, o comunque quando il materiale recuperato presenta già proprietà intrinseche compatibili con quelle della materia prima vergine che va a sostituire (cfr. paragrafo 2.2.1 più avanti). Altre metodologie che adottano l'approccio 0-100 sono la PAS 2050 nel caso di *closed loop* e la BPX 30-323-0 (AFNOR, 2011) nel caso di *open loop with market disequilibrium* (cioè quando la domanda di materiale secondario è superiore all'offerta).

Approccio 50-50

È un approccio in cui gli impatti e i benefici del riciclo dei materiali sono equamente ripartiti fra il sistema produttivo che genera il materiale secondario e il sistema produttivo che lo utilizza. I "crediti da riciclo" sono quindi assegnati equamente ai due sistemi in questione.

Metodologie che adottano questo approccio sono la PEF e la BPX 30-323-0 nel caso di *open loop with no market disequilibrium* (cioè quando la domanda di materiale secondario è effettivamente soddisfatta dall'offerta).

Esistono poi degli approcci ibridi che, nella loro formulazione, oltre ad essere applicabili sia in caso di *open loop* che in caso di *closed loop*, risultano premiare sia il contenuto di materiale riciclato in input, sia la riciclabilità del materiale dopo l'uso, senza aderire all'approccio 50-50. È questo il caso della formula integrata di Wolf e Chomkamsri (2014), che sarà testata insieme all'approccio 50-50 nell'ambito della fase pilota della PEF. Come

discusso in seguito, anche la formula indicata nella ISO/TS 14067 in caso di *open loop* può essere estesa ed essere vista come una formula integrata di questo tipo.

L'obiettivo di uno studio LCA non determina automaticamente la scelta di un approccio modellistico appropriato: si tratta, infatti, di fare più o meno consapevolmente una scelta di valori che riflette il modello mentale di chi redige il *life cycle inventory* (Werner e Scholz, 2002). Ogni approccio, infatti, valorizza uno o più aspetti, fra cui (Allacker et al., 2014; Frischknecht, 2010; NCASI, 2012):

- la volontà di promuovere il riciclo dei materiali dopo l'uso dei prodotti;
- la volontà di promuovere l'utilizzo di materiali di riciclo nei prodotti;
- la volontà di promuovere sia il riciclo dopo l'uso che il contenuto di materiale riciclato nei prodotti;
- la scelta di considerare il materiale recuperato come una risorsa;
- la scelta di considerare il materiale recuperato come un rifiuto finché non è sottoposto ad un processo di trattamento in grado di trasformarlo in risorsa;
- la scelta di considerare il disequilibrio fra la domanda e l'offerta nel mercato delle materie prime secondarie;
- la scelta di considerare o meno il rischio legato alla maggior distanza temporale, e quindi alla minor certezza di un effettivo riciclo, nel caso di prodotti riciclabili caratterizzati da una lunga vita utile;
- la scelta di preferire un'unica formula per i casi di *closed loop* e di *open loop* e che includa sia il riuso/riciclo che il recupero energetico;
- la scelta di tenere conto del *downcycling* (perdita di qualità della materia prima secondaria rispetto alla materia prima vergine).

Poiché l'adozione di una formula di calcolo piuttosto che di un'altra può portare a risultati e conclusioni significativamente differenti (NCASI, 2012; Cederstrand et al., 2014), è importante che in ogni studio LCA la metodologia adottata per modellare il riuso, il riciclo e il recupero dei materiali sia il più possibile trasparente e che siano esplicitamente spiegate le ragioni che stanno dietro alla scelta di una formula piuttosto che di un'altra.

2 MATERIALI E METODI

2.1 Impostazione dell'analisi

Affinché sia possibile confrontare i diversi metodi, tutte le formule sono state riscritte e presentate utilizzando una terminologia comune descritta in tabella 1. In linea con il lavoro svolto da Allacker et al. (2014) e da Wolf e Chomkamsri (2014), i termini e le definizioni sono basati principalmente su quelli della PEF. La formula della PEF, infatti, è la più dettagliata e descrive, oltre al

Tabella 1 - Definizione dei termini comuni utilizzati nelle equazioni presentate in seguito

Termine	Definizione	Termine corrispondente nella ISO/TS 14067	Termine corrispondente nella PEF (213/179/ EU)
E	Emissioni e risorse consumate connesse all'acquisizione delle materie prime e alle operazioni di fine vita.	E_M («Emissioni di gas serra legate all'acquisizione del materiale grezzo e alle operazioni di EoL»)	RUaEP («Uso delle Risorse e Profilo delle Emissioni»)
R_1	Frazione del materiale riciclato (o riutilizzato) in input al sistema produttivo analizzato.	C	R_1
R_2	Frazione del materiale nel prodotto che verrà riciclata (o riutilizzata) nel sistema produttivo successivo.	R	R_2
R_3	Frazione del materiale nel prodotto che verrà destinata al recupero di energia (termica e/o elettrica).	n.d.	R_3
E_v	Emissioni specifiche e risorse consumate (per unità funzionale) per l'acquisizione e il pretrattamento (cradle-to-gate) del materiale vergine in input.	E_v	E_v
E_v^*	Emissioni specifiche e risorse consumate (per unità funzionale) per l'acquisizione e il pre-trattamento (cradle-to-gate) del materiale vergine presumibilmente sostituito per via del fatto che il materiale recuperato R_2 è inviato a riuso/riciclo attraverso un processo di tipo open loop. Se ha luogo un riuso/riciclo di tipo closed loop, o se l'open loop è modellato come un closed loop, allora $E_v^* = E_v$.	n.d. (ipotizza implicitamente che $E_v^* = E_v$ sempre)	E_v^*
$E_{recycled}$	Emissioni specifiche e risorse consumate (per unità funzionale) derivanti dal processo di riciclaggio della frazione del materiale riciclato (o riutilizzato) R_1 . Sono comprese tutte le fasi: raccolta, selezione, trasporto all'impianto di riciclo, processo di riciclo, pretrattamento del materiale riciclato, trasporto fino all'impianto produttivo analizzato che usa il materiale di riciclo R_1 come input.	n.d.	$E_{recycled}$
E_{pp}	Emissioni specifiche e risorse consumate (per unità funzionale) per l'acquisizione e il pretrattamento (cradle-to-gate) della frazione del materiale riciclato (o riutilizzato) R_1 in input. Sono comprese le fasi: pretrattamento del materiale riciclato, trasporto fino all'impianto produttivo analizzato che usa il materiale di riciclo R_1 come input. Nota: E_{pp} è una componente di $E_{recycling,EoL}$	E_{pp} («Emissioni di gas serra legate al pre-trattamento del materiale riciclato affinché rispetti le richieste di qualità del materiale primario sostituito»)	n.d.
$E_{recycling,EoL}$	Emissioni specifiche e risorse consumate (per unità funzionale) derivanti dal processo di riciclaggio nella fase di fine vita del materiale destinato a riciclo/riuso R_2 . Sono comprese tutte le fasi: raccolta, selezione, trasporto all'impianto di riciclo, processo di riciclo, pretrattamento del materiale riciclato, trasporto fino all'impianto produttivo successivo che usa il materiale di riciclo R_2 come input. Se ha luogo un riuso/riciclo di tipo closed loop, o se l'open loop è modellato come un closed loop, allora $E_{recycling,EoL} = E_{recycled}$ Nota: $E_{recycling,EoL} = E_{R,EoL} + E_{PP,EoL}$	n.d.	$E_{recycling,EoL}$
$E_{R,EoL}$	Emissioni specifiche e risorse consumate (per unità funzionale) derivanti dal processo di riciclaggio nella fase di fine vita del materiale destinato a riciclo/riuso R_2 . Sono comprese le fasi: raccolta, selezione, trasporto all'impianto di riciclo, processo di riciclo.	n.d.	n.d.
$E_{PP,EoL}$	Emissioni specifiche e risorse consumate (per unità funzionale) derivanti dal processo di riciclaggio nella fase di fine vita del materiale destinato a riciclo/riuso R_2 . Sono comprese le fasi: pretrattamento del materiale riciclato, trasporto fino all'impianto produttivo successivo che usa il materiale di riciclo R_2 come input.	n.d.	n.d.
E_{ER}	Emissioni specifiche e risorse consumate (per unità funzionale) derivanti dal processo di recupero di energia dalla frazione R_3 del materiale.	n.d.	E_{ER}
$X_{ER,th}$	Efficienza del processo di recupero di energia termica dalla frazione R_3 del materiale.	n.d.	$X_{ER,elec}$

$X_{ER,el}$	Efficienza del processo di recupero di energia elettrica dalla frazione R_3 del materiale.	n.d.	$X_{ER,elec}$
LHV	Potere calorifico inferiore della frazione R_3 del materiale che viene destinato al recupero di energia.	n.d.	LHV
$E_{SE,th}$	Emissioni specifiche e risorse consumate (per unità funzionale) che sarebbero derivate dalla fonte di energia termica sostituita.	n.d.	$E_{SE,heat}$
$E_{SE,el}$	Emissioni specifiche e risorse consumate (per unità funzionale) che sarebbero derivate dalla fonte di energia elettrica sostituita.	n.d.	$E_{SE,elec}$
E_D	Emissioni specifiche e risorse consumate (per unità funzionale) derivanti dallo smaltimento dei rifiuti in fase di fine vita del materiale analizzato.	n.d.	E_D
E_D^*	Emissioni specifiche e risorse consumate (per unità funzionale) derivanti dallo smaltimento dei rifiuti in fase di fine vita del materiale da cui viene ricavato il contenuto riciclato R_1 .	n.d.	E_D^*
Qs	Qualità del materiale secondario	n.d.	Qs
Qp	Qualità del materiale primario (verGINE)	n.d.	Qp
$A = Qs/Qp$	fattore di allocazione o di downcycling	A	Qs/Qp

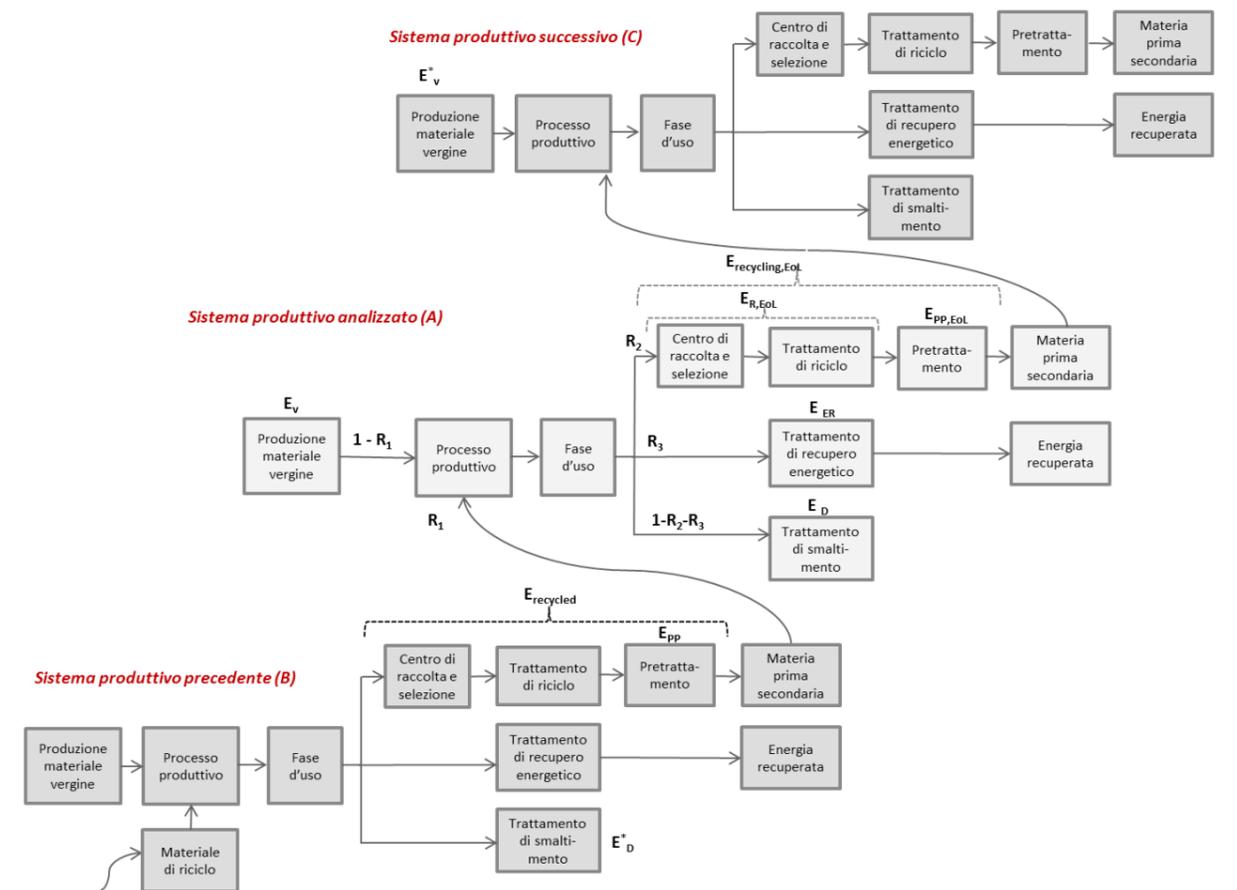


Figura 1 - Diagramma di flusso di un generico processo produttivo A che riceve in input materiale vergine e materiale di riciclo e che, in output, presenta tutte le possibili opzioni di fine vita

riuso/riciclo, anche situazioni di recupero energetico. È stato necessario suddividere in più componenti i termini $E_{recycling,EoL}$ e $E_{recycled}$ della PEF per rendere confrontabili le formule dei quattro approcci analizzati.

In figura 1 è data una rappresentazione grafica di un generico caso di riciclo di tipo *open loop*, utile per meglio chiarire in un unico schema i termini riportati nella tabella 1. I termini sono assegnati in riferimento al sistema produttivo analizzato (denominato A).

Ai fini di questo lavoro sono trattati solo gli aspetti che riguardano i confini del sistema analizzato e il loro rapporto con sistemi produttivi esterni: gli impatti relativi alle altre fasi interne al ciclo di vita del prodotto analizzato (es. processo produttivo indicato con E_{proc} in figura 2, distribuzione del prodotto, fase d'uso) non sono qui considerate in quanto non presentano alcun problema di allocazione e di End-of-Life (EoL) fra sistemi diversi.

In figura 2 è riportato un esempio grafico utile a comprendere il significato del termine $E_{recycling,EoL}$ e delle sue componenti ai fini della discussione che segue. L'esempio è relativo ai processi di riciclo dell'acciaio (per cui $Q_s = Q_p$ e $E_{pp} = 0$) e della carta. Nel caso della carta, il cuore del processo di riciclo corrisponde al *pulper* in cui avviene lo spappolamento della carta da macero recuperata dai centri di raccolta e selezione. La pasta da macero in uscita dal *pulper*, tuttavia, non è ancora idonea ad essere utilizzata come materia prima secondaria in un nuovo processo produttivo. Affinché possa essere utilizzata nel normale processo di produzione al pari della pasta da carta preparata dal legno vergine, infatti, deve subire un ulteriore pretrattamento: devono essere eliminati i materiali estra-

nei come plastica, vetro, ferro, colle, paraffina, ecc. la cui presenza crea problemi alla produzione e condiziona la qualità (fase di epurazione), e deve essere rimosso l'inchiostro nel caso in cui sia necessario produrre carte con un buon grado di bianco (fase di disinchiostrazione).

Nel caso dell'acciaio, invece, al rottame ottenuto dal processo di riciclaggio non è richiesto alcun ulteriore pretrattamento prima dell'invio al forno elettrico in acciaieria. Essendo, quindi, $E_{pp,EoL} = 0$, $E_{recycling,EoL}$ coincide con $E_{R,EoL}$.

3 DESCRIZIONE DEI METODI ANALIZZATI

3.1 Approccio modellistico della ISO/TS 14067

La ISO/TS 14067 indica due diverse formule nell'*Annex C*: la prima è relativa al caso di riciclo ad anello chiuso (*closed loop*) o modellabile come tale, la seconda al caso di riciclo ad anello aperto (*open loop*).

Caso 1: *closed loop*

Il riciclaggio ad anello chiuso si riferisce a quelle situazioni in cui il materiale generato all'interno del sistema produttivo considerato è riciclato nuovamente nel medesimo sistema produttivo, ma si applica anche ai sistemi ad anello aperto "nel caso in cui il materiale recuperato non mostri cambiamenti nelle proprietà intrinseche rispetto alla materia prima vergine".

Questo concetto non è tradotto in equazioni nella ISO/TS 14067 e quindi, si presta all'interpretazione. Tuttavia,

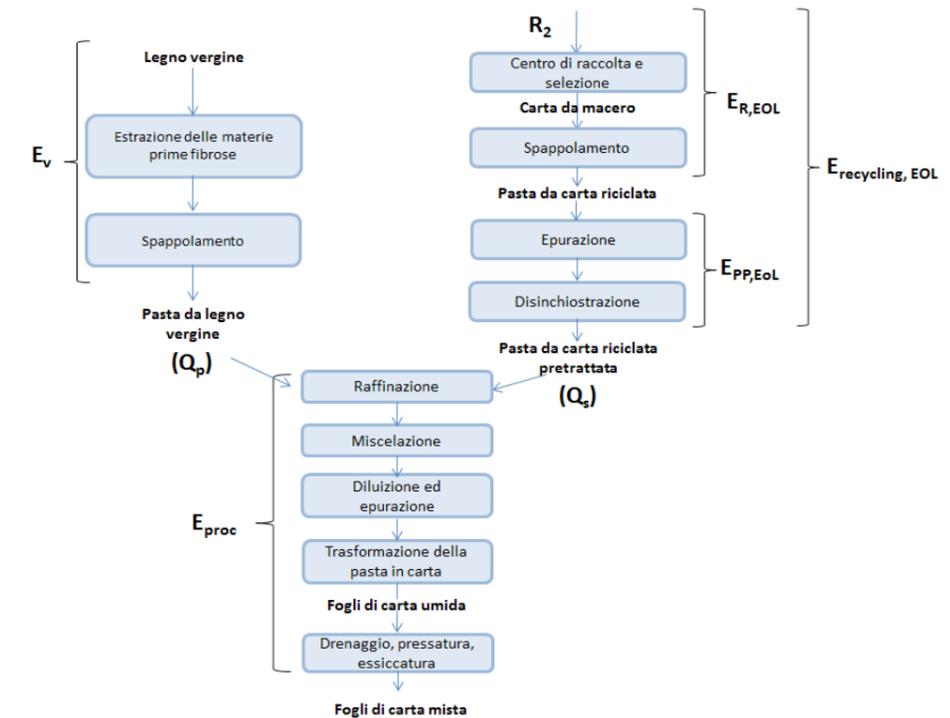
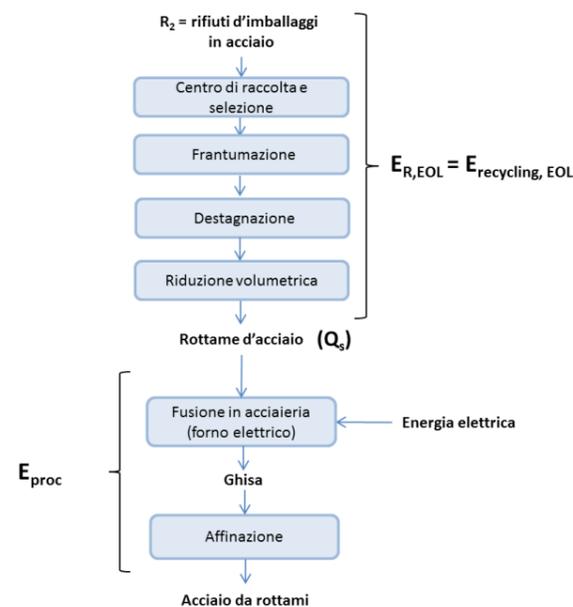


Figura 2 - Significato dei termini $E_{R,EoL}$ ed $E_{PP,EoL}$ che compongono $E_{recycling,EoL}$ nel caso del riciclo dell'acciaio (alla pagina precedente) e della carta (qui sopra)

la ISO indica con E_{pp} le «emissioni di gas serra legate al pretrattamento del materiale riciclato, al fine di soddisfare i requisiti di qualità del materiale primario sostituito». Se le proprietà intrinseche del materiale riciclato fossero già equiparabili a quelle della materia prima vergine, non sarebbe necessario applicare alcun pretrattamento del materiale riciclato, cioè il termine E_{pp} sarebbe nullo (cfr. caso dell'acciaio in figura 2) e, contemporaneamente, il fattore di *downcycling* $A (= Q_s/Q_p)$ sarebbe =1.

Nella discussione che segue, perciò, perché un riciclo di tipo *open loop* sia considerabile come *closed loop*, definiamo qui che deve essere verificato il seguente sistema di condizioni:

- $A = 1$
- $E_{pp} = 0$

In questi casi, utilizzando i termini indicati in tabella 1, la ISO suggerisce di utilizzare la seguente formula (in cui, infatti, il termine E_{pp} non compare):

$$E(A) = E_V - R_2 \cdot E_V + E_{EoL} \quad [\text{Eq. 1}]$$

dove $E(A)$: emissioni e risorse consumate connesse all'acquisizione delle materie prime e alle operazioni di fine vita in riferimento al "sistema produttivo analizzato A" (cfr. figura 3).

Perché si possa effettuare il confronto fra le diverse for-

mule di seguito analizzate è necessario esplicitare il termine E_{EoL} (come fatto anche in Allacker et al., 2014) e aggiungere l'espressione relativa al recupero energetico (nella norma, infatti, è scritto che il recupero energetico può essere assimilato al riuso/riciclo).

La formula suggerita dalla ISO in caso di *closed loop* può quindi essere riscritta come segue:

$$E(A) = \frac{E_V}{a} + \frac{R_2 \cdot E_{recycling,EoL}}{b} - \frac{R_2 \cdot E_V}{c} + \frac{R_3 \cdot E_E}{d} - \frac{R_3 \cdot LHV \cdot X_{ER,th/el} \cdot E_{SE,th/el}}{e} + \frac{(1 - R_2 - R_3) \cdot E_D}{f} \quad [\text{Eq. 2}]$$

dove:

- a = impatti legati all'input di materiale vergine e riciclato, trattato quest'ultimo come se fosse materiale vergine;
- b = impatti legati al fine vita del materiale destinato a riciclo/riuso (R_2);
- c = crediti legati alla mancata produzione di materiale vergine grazie al fatto che la frazione R_2 è mandata a riciclo/riuso;
- d = impatti che avvengono durante il processo di recupero energetico;
- e = crediti legati alla mancata produzione dell'energia E_{SE} (termica e/o elettrica) grazie al fatto che la frazione R_3 è mandata a recupero energetico;
- f = impatti legati allo smaltimento del materiale che

non è inviato a riciclo/riuso/recupero energetico;

- $E_{EOL} = b + d + f$

Come indicato nell'introduzione, nel caso di *closed loop* la ISO adotta quindi l'approccio 0-100, in cui il credito da riciclo è assegnato al sistema che genera il materiale secondario, mentre non è riconosciuto nessun credito ambientale al contenuto di materiale riciclato nel prodotto (R_1 non compare nella formula, quindi l'impatto complessivo non diminuisce all'aumentare di R_1).

Caso 2: open loop

Il riciclaggio ad anello aperto si riferisce a quelle situazioni in cui il materiale generato all'interno del sistema produttivo considerato è riciclato in sistemi produttivi esterni e il materiale subisce un cambiamento nelle sue proprietà intrinseche. Ciò significa che il materiale riciclato, rispetto alla materia prima, può avere una composizione chimica diversa, una struttura diversa (ad esempio la lunghezza delle fibre di carta riciclata), o presentare delle impurità, per cui è necessario un pre-trattamento ($E_{pp} > 0$), e/o il materiale secondario è utilizzato per produrre un prodotto diverso da quello da cui deriva.

La ISO/TS 14067 considera il riuso/riciclo come un processo condiviso fra più sistemi e come tale richiede un processo di allocazione. Riprende quindi la gerar-

chia di soluzioni indicata della ISO 14044 secondo cui si dovrebbe in primo luogo evitare l'allocazione; se ciò non fosse possibile si dovrebbe seguire una procedura di allocazione basata sui principi fisici, in alternativa sul valore economico, infine sul numero degli usi successivi del materiale. La ISO indica poi una possibile interpretazione di questa disposizione.

L'allocazione fra il sistema produttivo analizzato (qui denominato A) che genera il materiale R_2 destinato a riuso/riciclo e il sistema successivo che lo utilizza (qui denominato C), può essere evitata suddividendo gli impatti legati al riciclo in una componente a carico del sistema produttivo analizzato A (impatti connessi alle operazioni di fine vita sul materiale R_2 , cioè $E_{R,EOL}$), e in una componente a carico del sistema produttivo successivo (C) che utilizza il materiale R_2 (impatti legati alle operazioni di pretrattamento del materiale riciclato, necessarie affinché il materiale riciclato soddisfi gli stessi requisiti di qualità della materia prima che sostituisce, cioè $E_{PP,EOL}$); cfr. figura 3.

L'allocazione fra il sistema produttivo che inizialmente si fa carico delle emissioni associate all'estrazione e alla lavorazione della materia prima vergine e i sistemi produttivi successivi che utilizzano il materiale riciclato può essere affrontata tenendo conto

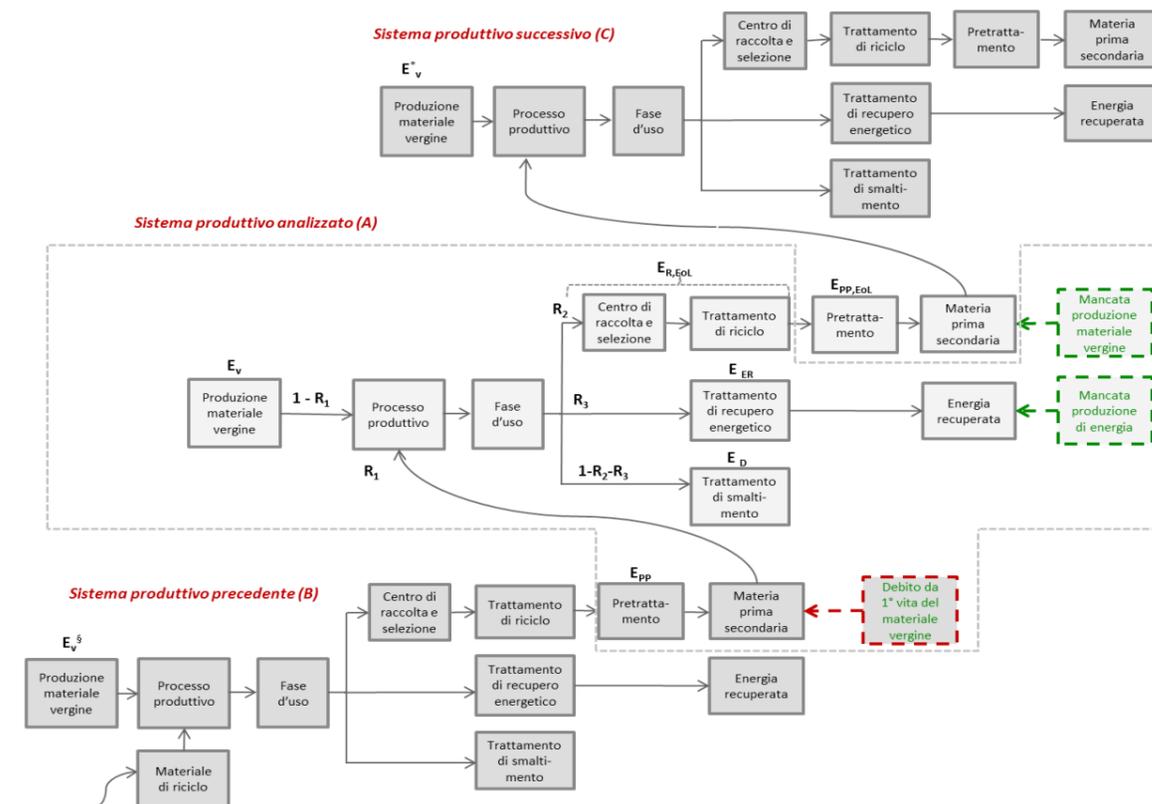


Figura 3 - Confini del sistema da adottare nel caso di riciclo open loop secondo la ISO/TS 14067

che, quando un materiale riciclato entra in un sistema produttivo, si porta dietro un debito ambientale nel caso in cui sia stato riconosciuto un credito al sistema che l'ha generato (cfr. termine a' nell'Eq. 3).

Per tenere conto del fatto che il materiale di riciclo (utilizzato o generato) può avere una diversa qualità rispetto alla materia prima che questo sostituisce, viene introdotto il fattore di allocazione $A=Q_s/Q_p$, detto anche fattore di *downcycling*, che si applica sia ai crediti sia ai debiti ambientali associati al riciclo. Nel caso di *open loop*, utilizzando i termini indicati in tabella 1, la ISO/TS 14067 dà quindi la seguente formula:

$$E(A) = \frac{(1-R_1) \cdot Ev + R_1 \cdot E_{pp}}{a} + R_1 \cdot A \cdot \frac{E_v^s}{a'} + E_{EOL} - R_2 \cdot A \cdot \frac{E_v}{c} \quad [\text{Eq. 3}]$$

(si veda l'Eq. 2 per quanto riguarda l'espressione del termine E_{EOL}).

La norma specifica poi che l'equazione sopra riportata si applica soltanto nel caso in cui il fattore di *downcycling* del materiale di riciclo (R_1) in input al sistema produttivo analizzato è identico a quello del materiale destinato al riciclo (R_2) che lascia il sistema stesso. Se così non fosse, la norma indica che la formula necessita di essere estesa usando due diversi fattori di *downcycling*. Per tradurre questa generica indicazione in una equazione, si riporta qui una possibile formulazione estesa dell'Eq. 3 in cui sono esplicitati i due diversi fattori di *downcycling*.

$$E(A) = (1-R_1) \cdot Ev + R_1 \cdot E_{pp} + R_1 \cdot \frac{Q_{s,1}}{Q_{p,1}} \cdot E_v^s + E_{EOL} - R_2 \cdot \frac{Q_{s,2}}{Q_{p,2}} \cdot E_v \quad [\text{Eq. 4}]$$

dove:

- E_v^s è il termine che rappresenta le emissioni specifiche/risorse consumate (per unità funzionale) per l'acquisizione e il pretrattamento (*cradle-to-gate*) del materiale vergine da cui si è ottenuto R_1 attraverso un processo di tipo *open loop* (cfr. figura 3 e Wolf e Chomkamsri, 2014). Come per E_v^* , se questa informazione non è disponibile è possibile ipotizzare che $E_v^s = E_v$, come se avesse avuto luogo il riciclaggio *closed loop*.
- $Q_{s,1}$ e $Q_{s,2}$ sono i prezzi di mercato rispettivamente di R_1 e R_2 ;
- $Q_{p,1}$ e $Q_{p,2}$ sono i prezzi di mercato della materia prima da cui deriva R_1 e della materia prima sostituita da R_2 , non necessariamente identiche in caso di *open loop*.

Aggiungendo il recupero energetico ed esplicitando il termine E_{EOL} , l'Eq. 4 sopra riportata equivale alla seguente: dove:

$$E(A) = \frac{(1-R_1) \cdot Ev + R_1 \cdot E_{pp}}{a} + R_1 \cdot \frac{Q_{s,1}}{Q_{p,1}} \cdot \frac{E_v^s}{a'} + R_2 \cdot E_{R,EOL} - R_2 \cdot \frac{Q_{s,2}}{Q_{p,2}} \cdot E_v + R_3 \cdot E_{ER} - R_3 \cdot LHV \cdot X_{ER,th/el} \cdot E_{SE,th/el} + (1-R_2-R_3) \cdot E_D \quad [\text{Eq. 5}]$$

- a = impatti legati all'input di materiale vergine ($1-R_1$) e riciclato (R_1);
- a' = debito legato a R_1 , cioè impatti legati all'acquisizione del materiale vergine che non sono allocati interamente alla prima vita del materiale, ma che sono in parte assegnati alla frazione R_1 , in proporzione ad $A_1 = Q_{s,1}/Q_{p,1}$;
- b = impatti legati al fine vita del materiale destinato a riciclo/riuso (R_2);
- c = credito legato alla mancata produzione di materiale vergine grazie al fatto che R_2 è mandato a riciclo; il credito è proporzionale ad $A_2 = Q_{s,2}/Q_{p,2}$;
- d = impatti che avvengono durante il processo di recupero energetico;
- e = credito legato alla mancata produzione dell'energia E_{SE} (termica e/o elettrica) grazie al fatto che la frazione R_3 è mandata a recupero energetico;
- f = impatti legati allo smaltimento del materiale che non è inviato a riciclo/riuso/recupero energetico;
- $E_{EOL} = b + d + f$

Si fa notare che, in caso di *closed loop* o di riciclo modellizzabile come tale (e nel caso in cui, per semplicità, non ci sia recupero energetico dopo l'uso), cioè quando valgono le seguenti ipotesi:

- $E_{pp} = 0$
- $A_1 = A_2 = 1$
- $E_v^s = E_v^* = E_v$
- $R_3 = 0$

l'Eq. 5 per l'*open loop* coincide con l'Eq. 1 per il *closed loop*, infatti:

$$E(A) = (1-R_1) \cdot Ev + R_1 \cdot Ev + R_2 \cdot E_{R,EOL} - R_2 \cdot Ev + (1-R_2) \cdot E_D = (1-R_2) \cdot Ev + R_2 \cdot E_{R,EOL} + (1-R_2) \cdot E_D \quad [\text{Eq. 5b}]$$

L'Eq. 5, quindi, può essere vista come una formula generale, valida sia in caso di *open loop* che di *closed loop*. Si sottolinea che si può giungere a questa conclusione soltanto se, al fine di considerare un riciclo *open loop* al pari di un riciclo *closed loop*, si intende che devono essere soddisfatte contemporaneamente le condizioni $A=1$ ed $E_{pp}=0$. Allacker et al. (2014) non giungono a questa conclusione, probabilmente perché, non essendo la ISO/TS 14067 chiara in merito, considerano $A=1$ una condizione sufficiente a tale scopo.

Se da una parte l'Eq. 5 premia il contenuto di materiale riciclato nel prodotto analizzato (nell'ipotesi di $E_{pp} < E_v$ il valore assunto dal blocco a è inversamente proporzionale al valore di R_1), d'altra parte la presenza del debito assegnato a R_1 sembra penalizzare il contenuto di materiale riciclato nel prodotto (il blocco a' è tanto più grande quanto più R_1 è alto e quanto più è buona la sua qualità $Q_{s,1}$).

Questo debito, tuttavia, è necessario per la chiusura del bilancio di massa quando si allarga il confine di analisi, cioè quando si guardano insieme sia il sistema produttivo A in questione sia il sistema produttivo esterno B in figura 3. Infatti, nell'ipotesi semplificativa in cui B usi 100% materiale vergine, non ci sia recupero energetico, B invii a riciclo $R_2(B) = R_1(A)$, la formula della ISO vista da B è:

$$E(B) = \underbrace{E_v^s}_{a(B)} - R_1(A) \cdot \underbrace{\frac{Q_{s,1}}{Q_{p,1}} \cdot E_v^s}_{c(B)} + R_1(A) \cdot E_{R,EOL(B)} + (1 - R_2) \cdot E_{D(B)} \quad [\text{Eq. 6}]$$

Se il sistema produttivo che riceve R_1 , cioè il sistema A, non si facesse carico del credito c assegnato al sistema produttivo che genera R_1 , non sarebbe rispettato il bilancio di massa per questi due sistemi visti insieme (infatti $a'(A) \equiv c(B)$). Tutto questo vale anche per il sistema produttivo esterno C che riceve R_2 come input.

A titolo di esempio, in tabella 2 è riportato un possibile calcolo relativo al riciclo della carta nel caso semplificato (che non ha la pretesa di essere rappresentativo di un processo reale) in cui si produce dapprima carta vergine ($n=I$). Questa viene poi recuperata come carta mista per produrre carta riciclata ($n=II$), la quale, a sua volta, è recuperata come carta da macero da raccolta differenziata per produrre nuovamente materiali in carta riciclata ($n=III$). Questi ultimi, infine, sono inviati interamente in discarica.

Tabella 2 - Esempio di applicazione dell'equazione 5 in caso di riciclo della carta

n	Materie in input alle cartiere	$Q_{s,1}$ (€/t)	$Q_{s,2}$ (€/t)	Q_p (€/t)	R_1 (-)	R_2 (-)	Eq. 5	Ev (%)
I	Paste di legno vergine: cellulosa gregge soda fibra lunga	442	42	442	0	1	$E = Ev + E_{EOL} - Q_{s,2}/Q_p \cdot Ev$	90,5%
II	Carta da macero di qualità ordinaria: carte e cartoni misti	42	7	442	1	1	$E = E_{pp} + E_{EOL} + (Q_{s,1}/Q_p - Q_{s,2}/Q_p) \cdot Ev$	7,9%
III	Carta da macero da raccolta differenziata	7	0	442	1	0	$E = E_{pp} + E_{EOL} + Q_{s,1}/Q_p \cdot Ev$	1,6%
								100%

In questo semplice scenario valgono le seguenti ipotesi:

- $Q_p = Q_{p,1} = Q_{p,2}$ = prezzi di mercato della pasta di legno vergine;
 - $Ev = Ev^s = Ev^*$ = impatti specifici legati all'estrazione della pasta di legno vergine;
 - $R_1 = 0$ per $n = I$; $R_1 = 1$ per $n = II$ e per $n = III$;
 - $R_2 = 1$ per $n = I$ e per $n = II$; $R_2 = 0$ per $n = III$.
- I dati relativi ai prezzi delle materie prime e secondarie in tabella 2 sono tratti da Di Franco et al. (2004) e, per ipotesi, è stato assunto che $Q_{s,1}(n+1) = Q_{s,2}(n)$. Come si può vedere dai risultati riportati in tabella, applicando più volte l'Eq. 5, risulta che l'impatto legato all'ac-

quisizione iniziale della materia prima è assegnato per il 90,5% alla carta vergine ($n=I$), per il 7,9% alla carta riciclata al primo riciclo ($n=II$), e per il restante 1,6% alla carta riciclata al secondo riciclo ($n=III$). Il debito assegnato a R_1 , quindi, riflette il fatto che il materiale di recupero non è considerato come un rifiuto, bensì come una risorsa e, quindi, su di esso ricadono parte degli impatti della prima vita del prodotto, in proporzione al fattore di *downcycling*. Il caso relativo a $n=II$ in tabella, inoltre, mette in risalto come la percentuale di Ev allocata al prodotto analizzato sia proporzionale alla differenza fra $Q_{s,1}$ e $Q_{s,2}$, cioè alla perdita di qualità causata dal processo produttivo in questione sul materiale.

Approccio modellistico della PEF (Raccomandazione 2013/179/EU)

La filosofia su cui si basa la PEF è caratterizzata da due punti principali:

- l'energia recuperata dal materiale a fine vita è tutta a vantaggio del sistema analizzato;
- i crediti legati al riuso/riciclo sono solo al 50% a vantaggio del sistema analizzato e lo stesso vale per i debiti (approccio 50-50).

Tenendo presente questi due punti cardine e osservando la figura 4 è più semplice comprendere la formula di calcolo fornita dalla PEF (Eq. 7) in cui si possono identificare i sei blocchi di seguito discussi.

$$E(A) = \underbrace{\left(1 - \frac{R_1}{2}\right) \cdot Ev + R_1 \cdot \frac{E_{recycled}}{2}}_{a^*} + \underbrace{R_2 \cdot \frac{E_{recycling,EOL}}{2}}_b + \underbrace{\left(\frac{R_2}{2} \cdot \frac{Q_s}{Q_p} \cdot Ev^*\right)}_c + \underbrace{R_3 \cdot E_{ER}}_d + \underbrace{R_3 \cdot LHV \cdot X_{ER,th/el} \cdot E_{SE,th/el}}_e + \underbrace{\left(1 - \frac{R_2 - R_3}{2}\right) \cdot E_D - \frac{R_1}{2} \cdot E_D^*}_{f^*} \quad [\text{Eq. 7}]$$

- a^* = impatti legati all'input di materiale vergine ($1-R_1$) e riciclato (R_1) al processo produttivo analizzato. Il termine a^* può essere riscritto come segue:

$$a^* = Ev - R_1 \cdot Ev + \frac{R_1}{2} \cdot Ev + R_1 \cdot \frac{E_{recycled}}{2} \quad [\text{Eq. 8}]$$

$$= \left(1 - R_1\right) \cdot Ev + R_1 \cdot \frac{E_{recycled}}{2} + R_1 \cdot \frac{Ev}{2}$$

dove i termini a e a' hanno lo stesso significato descritto nel caso della ISO/TS 14067. $E_{recycled}$ è diviso per 2 perché nella PEF gli impatti legati al materiale destinato a riciclo sono assegnati per il 50% al sistema produttivo che usa il materiale riciclato in input (in questo caso il sistema analizzato A) e per il 50% al sistema produttivo che genera il materiale di riciclo (in questo caso il sistema precedente B). Lo stesso vale per Ev nel termine a' , allocato per il 50% al sistema A e per il 50% al sistema B. Si fa notare che il termine Ev^s non esiste nella PEF; per cui implicitamente la PEF considera sempre valida la condizione $Ev = Ev^s$ in a' .

- b = impatti legati al fine vita del materiale destinato a riciclo/riuso (R_2). Anche in questo caso, $E_{recycling,EOL}$ è diviso per 2 perché nella PEF gli impatti legati al materiale destinato a riciclo sono assegnati per il 50% al sistema che usa il materiale riciclato in input (in questo caso il sistema C) e per il 50% al sistema che genera il materiale di riciclo (in questo caso il sistema analizzato A).
- c = credito legato alla mancata produzione di materiale vergine grazie al fatto che la frazione R_2 è mandata a riciclo/riuso. Anche in questo caso il credito è diviso per 2 (oltre che proporzionale al fattore di *downcycling* Q_s/Q_p), perché la PEF adotta l'approccio 50-50 anche per allocare i benefici fra il sistema produttivo analizzato A che genera R_2 e il sistema produttivo successivo C che lo utilizza.
- d = impatti che avvengono durante il processo di recupero energetico.
- e = crediti legati alla mancata produzione dell'energia E_{SE} (termica e/o elettrica) grazie al fatto che la frazione R_3 è mandata a recupero energetico. In questo caso il credito è interamente allocato al sistema che genera il flusso R_3 (sistema analizzato A).
- f^* = emissioni da smaltimento del materiale che non è inviato a riciclo/riuso/recupero energetico. Il termine f^* può essere riscritto come segue:

$$f^* = E_D - R_2 \cdot \frac{E_D}{2} - R_3 \cdot E_D - R_1 \cdot \frac{E_D^*}{2}$$

$$= \left(1 - R_2 - R_3\right) \cdot E_D - R_1 \cdot \frac{E_D^*}{2} + R_2 \cdot \frac{E_D}{2} \quad [\text{Eq. 9}]$$

dove il termine f ha lo stesso significato descritto nel caso della ISO/TS 14067 (impatti legati allo smaltimento del materiale che non è inviato a riciclo/riuso né a recupero energetico). I termini f' e f'' invece, risultano meno intuitivi. Se il sistema B in figura 4 non destinasse la frazione R_1 al sistema analizzato A, tale frazione sarebbe smaltita; seguendo la logica della PEF, i benefici (impatti evitati) legati al mancato smaltimento di R_1

(cioè E_D^*) sono allocati per il 50% al sistema B e per il 50% al sistema A (termine f'). Tutto questo vale anche per il sistema produttivo esterno C in figura 4 che riceve R_2 come input da A: al fine di ottenere un corretto equilibrio fisico fra i sistemi interconnessi, infatti, deve essere introdotto il termine f'' che, a prima vista, sembra penalizzare il sistema A per il fatto che destina R_2 a riciclo anziché a smaltimento. Questo debito, tuttavia, è necessario per la chiusura del bilancio di massa quando si allarga il confine di analisi, cioè quando si guardano insieme sia il sistema produttivo A in questione, sia il sistema produttivo successivo C. Infatti, ricordando che $R_1(C) = R_2(A)$, e nell'ipotesi semplificativa in cui C invii il 100% del materiale a smaltimento dopo l'uso (cioè $R_2(C) = R_3(C) = 0$), la formula della PEF dal punto di vista del sistema C è:

$$E(C) = \left(1 - \frac{R_2(A)}{2}\right) \cdot E_v^s + R_2(A) \cdot \frac{E_{recycled}}{2} + E_D(C) - \underbrace{\left(\frac{R_2(A)}{2} \cdot E_D\right)}_{f'(C) = f''(A)} \quad [\text{Eq. 10}]$$

Se il sistema produttivo A che consegna R_2 a C non si facesse carico del credito $f'(C)$ assegnato al sistema C che evita che R_2 sia mandato dal sistema A a smaltimento, non sarebbe rispettato il bilancio di massa per questi due sistemi visti insieme.

Nel complesso, l'Eq. 7 prescritta dalla PEF può essere riscritta come segue:

$$E(A) = Ev + E_D + R_1 \cdot \left(\frac{E_{recycled}}{2} - \frac{Ev}{2} - \frac{E_D^*}{2}\right) + R_2 \cdot \left(\frac{E_{recycling,EOL}}{2} - \frac{Q_s}{Q_p} \cdot \frac{Ev^*}{2} - \frac{E_D}{2}\right) + R_3 \cdot \left(E_{ER} - LHV \cdot X_{ER,th/el} \cdot E_{SE,th/el} - E_D\right) \quad [\text{Eq. 11}]$$

In questo modo viene messo in evidenza quanto segue.

(1) Il fatto che il processo produttivo A utilizzi R_1 di riciclo invece che materia prima vergine comporta che:

- gli impatti legati alle operazioni di raccolta, selezione, pretrattamento e trasporto di R_1 sono ripartiti in parti uguali fra il processo produttivo che genera R_1 e quello che utilizza R_1 ;
- si evitano gli impatti legati alla produzione di una quantità di materiale vergine pari alla frazione R_1 (i benefici derivanti dal mancato utilizzo di materiale vergine sono ripartiti in parti uguali fra il processo produttivo che genera e quello che utilizza R_1);
- si evitano gli impatti legati allo smaltimento di R_1 (i benefici derivanti dal mancato smaltimento di R_1 sono ripartiti in parti uguali fra il processo produttivo che genera e quello che utilizza R_1).

(2) Il fatto che il processo produttivo A invii R_2 a riciclo invece che a smaltimento comporta che:

- gli impatti legati alle operazioni di consegna, selezione, pretrattamento e trasporto di R_2 sono ripartiti in parti uguali fra il processo produttivo che genera e quello che utilizza R_2 ;
 - si evitano gli impatti legati alla produzione di R_2 materiale vergine (i benefici derivanti dal mancato utilizzo di materiale vergine sono ripartiti in parti uguali fra il processo produttivo che genera e quello che utilizza R_2);
 - si evitano gli impatti legati allo smaltimento di R_2 (i benefici derivanti dal mancato smaltimento di R_2 sono ripartiti in parti uguali fra il processo produttivo che genera e quello che utilizza R_2).
- (3) Il fatto che il processo produttivo A invii R_3 a recupero energetico invece che a smaltimento comporta che:
- si evitano gli impatti legati alla produzione della stessa quantità di energia altrimenti ottenuta secondo il mix

Si fa notare che, nel caso di *closed loop* (e nel caso in cui, per semplicità, non ci sia recupero energetico dopo l'uso del prodotto analizzato), cioè nel caso valgano le seguenti ipotesi:

$$\begin{cases} E_{pp} = 0 \\ A_1 = A_2 = 1 \\ E_{v^s} = E_{v^*} = E_v \\ E_{recycled} = E_{recycling,EOL} = E_R \\ E_D = E_D^* \\ R_3 = 0 \end{cases}$$

la formula della PEF diventa:

$$E(A) = \left(1 - \frac{R_1}{2} - \frac{R_2}{2}\right) \cdot E_v + \left(\frac{R_1}{2} + \frac{R_2}{2}\right) \cdot E_R + \left(1 - \frac{R_1}{2} - \frac{R_2}{2}\right) \cdot E_D$$

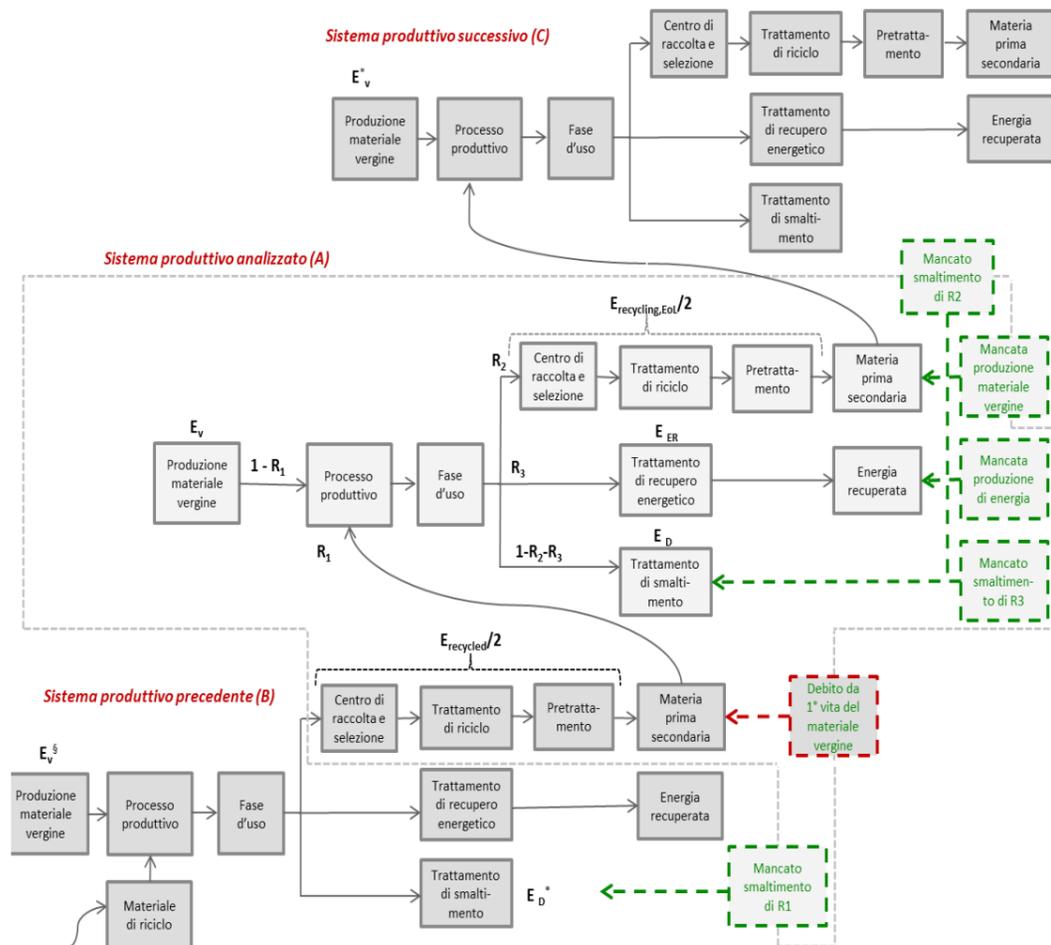


Figura 4 - Confini del sistema da adottare nel caso della PEF Guide. Sono incluse tutte le fasi di acquisizione e di produzione del materiale di riciclo, ma entrambe sono conteggiate al 50%, così come i crediti legati al mancato smaltimento di R_1 e R_2 .

- energetico nazionale (o altro);
- si evitano gli impatti legati allo smaltimento di R_3 ;
- i benefici legati a questi impatti evitati sono attribuiti interamente al produttore che genera R_3 .

Questa formula coincide con quella data dalla ISO/TS 14067 nel caso di *closed loop* (Eq. 1) soltanto nel caso in cui $R_1 = R_2$.

Approccio modellistico di Wolf e Chomkamsri

Come spiegato nell'introduzione, durante la fase pilota di valutazione della PEF saranno testate altre formule, in aggiunta a quella indicata nella Raccomandazione 2013/179/EU. Fra le ulteriori formule avanzate (CE, 2014b), è interessante analizzare la formula integrata illustrata nel *white paper* di Wolf e Chomkamsri (2014) e presentata al già citato *workshop* europeo (CE, 2014).

$$E(A) = \underbrace{(1 - R_1) \cdot E_v}_{a} + \underbrace{R_1 \cdot \frac{Q_{S,1}}{Q_{p,1}} \cdot E_v^s}_{a'} + \underbrace{R_2 \cdot E_{recycling,EOL}}_b + \underbrace{R_2 \cdot \frac{Q_{S,2}}{Q_{p,2}} \cdot E_v^s}_{c} + \underbrace{R_3 \cdot E_{ER}}_d - \underbrace{R_3 \cdot LHV \cdot X_{ER,th/el} \cdot E_{SE,th/el}}_e + \underbrace{(1 - R_2 - R_3) \cdot E_D}_f \quad [Eq. 12]$$

dove i termini a, a', b, c, d, e, f hanno lo stesso significato descritto nel caso della ISO e della PEF. La formula integrata è equivalente all'Eq. 5, cioè alla ISO/TS 14067 nella sua formulazione estesa qui avanzata in caso di *open loop*, ma adotta una diversa suddivisione fra i sistemi interconnessi (cfr. figura 5): in un'ottica *cradle-to-cradle* l'intera filiera del riciclo del materiale R_1 è allocata al sistema precedente che genera R_1 , incluso l'eventuale

pretrattamento E_{pp} (quindi nessun impatto è allocato al sistema A per l'utilizzo di R_1 nel blocco a); allo stesso modo l'intera filiera del riciclo del materiale R_2 ($E_{recycling,EOL}$) è allocata al sistema produttivo analizzato A che genera R_2 . Anche in questo caso, se avviene un riciclo ad anello chiuso, l'Eq. 12 coincide con quella data dalla ISO/TS 14067 per il *closed loop* (Eq. 1), indipendentemente dai valori assunti da R_1 e R_2 .

Approccio modellistico dell'International EPD System

L'International EPD System non indica espressamente una formula per gestire casi di riciclo, riuso e recupero energetico, ma spiega a parole come impostare l'analisi. In particolare, il *General Program of Instructions* (GPI) indica quanto segue.

- Se è presente un materiale di riciclo in ingresso al sistema analizzato, su di esso ricadono gli impatti dovuti alla fase di trasporto dalla piattaforma di raccolta al centro di riciclaggio, il processo di riciclaggio e il trasporto dall'impianto di riciclaggio al sito in cui è utilizzato (International EPD System, 2013).
- Se è presente un materiale inviato al riciclo in uscita

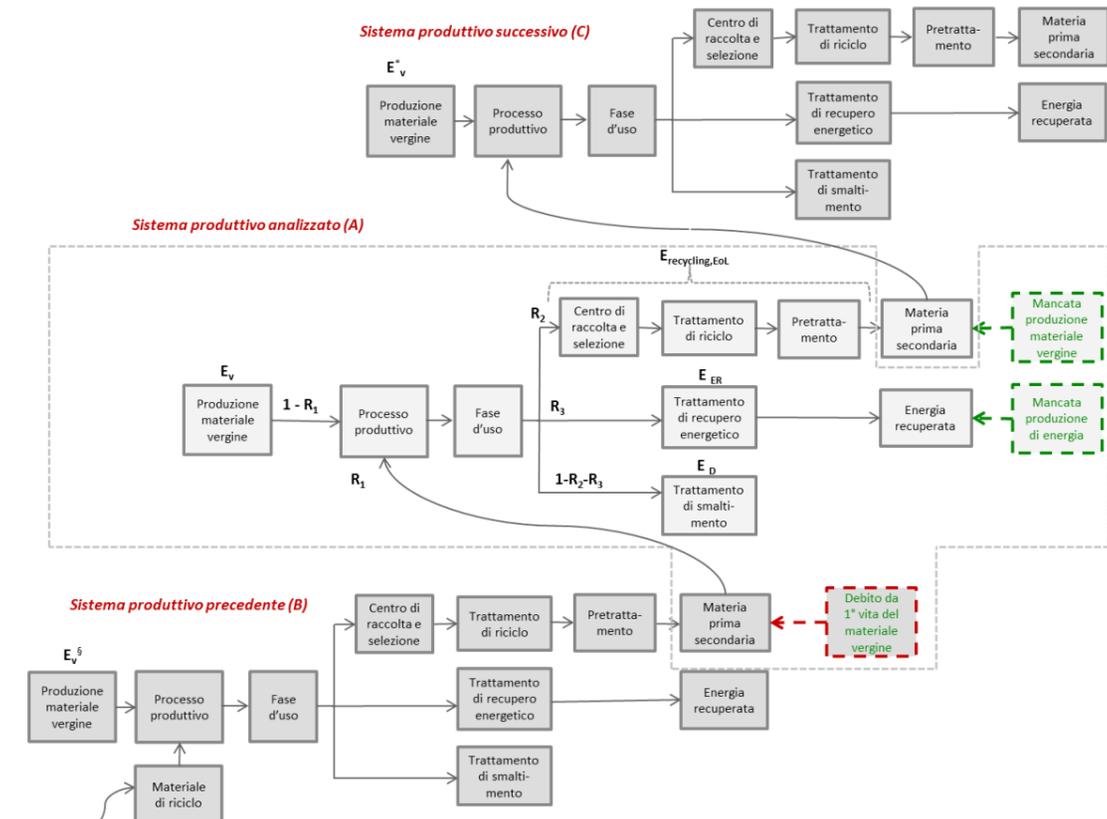


Figura 5 - Confini del sistema da adottare nel caso della formula integrata di Wolf e Chomkamsri (2014)

dal sistema analizzato, su di esso ricadono gli impatti relativi al trasporto del materiale che verrà riciclato fino alla piattaforma di raccolta (International EPD System, 2013).

Il sistema, inoltre, adotta il principio di allocazione “chi inquina paga”, o *zero burden assumption*, cioè gli impatti relativi alla prima vita del materiale non ricadono sulle successive vite del materiale riciclato (International EPD System, 2013).

Infine, nell’ambito dell’International EPD System, gli impatti evitati grazie al fatto che una frazione del materiale, al termine della vita del prodotto, è destinata a riciclo/riuso o a recupero energetico anziché a smaltimento, se stimati, vanno dichiarati separatamente e non possono essere sottratti all’impatto totale risultante (International EPD System, 2013: 38).

Il sistema, quindi, segue l’approccio 100-0 introdotto nelle premesse.

In base alla lettura della metodologia descritta è possibile identificare i confini del sistema da adottare come riportato in figura 6: i crediti legati alla mancata produzione di materiale vergine e di energia grazie al fatto che le frazioni

R_2 e R_3 sono destinate a riciclo/riuso e a recupero energetico sono esterni al confine del sistema.

In base alla lettura della metodologia descritta, inoltre, è possibile scrivere la seguente formula:

$$E(A) = \underbrace{(1 - R_1) \cdot E_V}_{a} + \underbrace{R_1 \cdot E_{recycled}^*}_{b} + \underbrace{R_2 \cdot E_{TR,EOL}}_{c} + \underbrace{R_3 \cdot E_{ER}}_{d} + \underbrace{(1 - R_2 - R_3) \cdot E_D}_{f} \quad [\text{Eq. 13}]$$

dove i termini a, b, d, f hanno lo stesso significato già descritto nei casi precedenti.

Il termine $E_{recycled}^*$ è indicato con un asterisco nell’Eq. 13 perché, formalmente, dalla lettura del GPI esso non include i possibili impatti legati alle attività svolte alla piattaforma di raccolta e selezione (cfr. figura 6) e non è quindi identico al termine $E_{recycled}$ definito in tabella 1.

$E_{TR,EOL}$ è un termine che rappresenta le emissioni specifiche e le risorse consumate (per unità funzionale) nella fase di fine vita del materiale destinato a riciclo/riuso R_2 , derivanti in questo

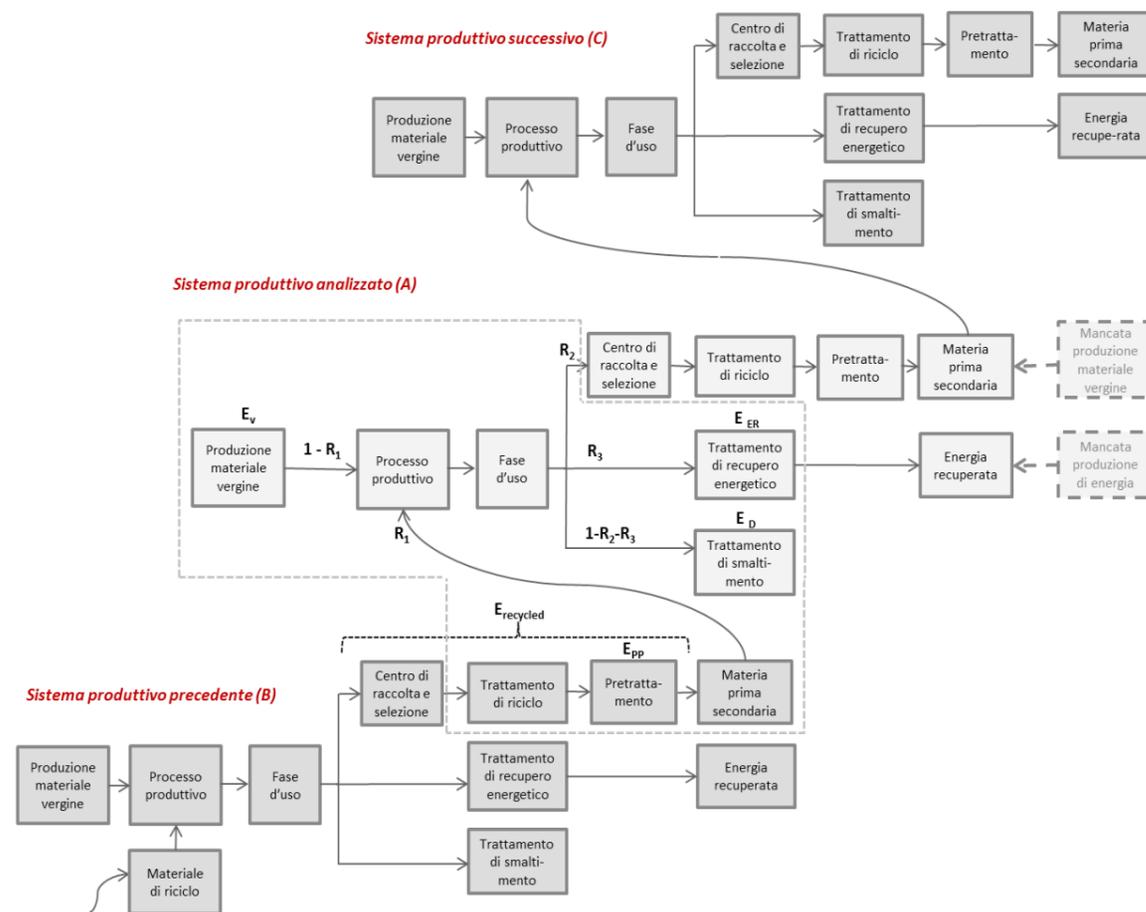


Figura 6 – Confini del sistema da adottare secondo l’International EPD System

caso soltanto dal trasporto fino alla piattaforma di raccolta del materiale destinato al riciclo. $E_{TR,EOL}$ è quindi un sottoinsieme del termine $E_{recycling,EOL}$ definito in tabella 1.

3 RISULTATI

Per mettere a confronto in modo più immediato i diversi approcci è utile definire un’unica equazione (Eq. 14) ed evidenziare le diverse formulazioni dei termini nei quattro schemi analizzati. I blocchi a, a’, b, c, d, e, f, f’, f’’ sono messi a confronto in tabella 3.

$$E(A) = a + a' + b + c + d + e + f + f' + f'' \quad [\text{Eq. 14}]$$

dove, come discusso nei paragrafi precedenti:

- a = impatti legati all’input di materiale vergine e riciclato al processo produttivo analizzato;
- a’ = debito legato alla prima vita del materiale di riciclo in input (R_1);
- b = impatti legati al fine vita del materiale destinato a riciclo/riuso dopo l’uso (R_2);
- c = credito legato al materiale destinato a riuso/riciclo dopo l’uso (R_3);
- d = impatti che avvengono durante il processo di recupero energetico (da R_3);
- e = credito legato al recupero energetico (da R_3);
- f = impatti legati al fine vita del materiale destinato allo smaltimento;
- f’ = credito legato al mancato smaltimento del materiale di riciclo in input (R_1);
- f’’ = termine necessario alla chiusura del bilancio di massa in presenza di f’.

I termini f’ e f’’ sono presenti soltanto nel caso della PEF poiché è l’unica metodologia che adotta l’approccio 50-50. In aggiunta, nel caso dell’International EPD System non sono presenti neanche il blocco a’ (perché il programma adotta la *zero burden assumption*) e i blocchi c ed e (poiché i crediti, se stimati, devono essere dichiarati separatamente e non possono essere sottratti all’impatto totale risultante).

4 DISCUSSIONE

Al fine di valutare in modo sistematico i diversi metodi analizzati, questi sono stati confrontati sulla base di un comune set di criteri di valutazione:

1. chiarezza e trasparenza: la metodologia indica espressamente ogni parametro riportato nella formula, limitando il rischio di errori di interpretazione;
2. intuitività: la formula è tale da poter essere compresa con immediatezza;

3. facilità pratica: la formula risulta semplice da applicare all’atto pratico (es. non si riscontrano particolari difficoltà nell’assegnare il valore ai parametri).

4. applicabile in caso di *closed loop*: la formula si può applicare in caso di *closed loop*;

5. applicabile in caso di *open loop*: la formula si può applicare in caso di *open loop*;

6. debito da prima vita: la formula alloca al materiale di riciclo parte degli impatti legati alla prima vita del materiale (cioè il materiale recuperato è considerato come una risorsa);

7. contenuto di riciclato: la formula promuove il contenuto di materiale riciclato nel prodotto;

8. credito da riciclo EoL: la formula riconosce un credito relativo al riciclo/riuso del prodotto dopo l’uso;

9. credito da recupero energetico: la formula riconosce un credito relativo al recupero di energia dal prodotto dopo l’uso;

10. *downcycling*: la formula tiene conto della perdita di qualità del materiale di riciclo rispetto alla materia prima (sia sui debiti in input che sui crediti in output).

Il confronto è riportato in tabella 4. Si specifica che i criteri 1, 2 e 3 non si prestano a una valutazione oggettiva e, quindi, il giudizio espresso in tabella è soggettivo.

Per quanto riguarda il primo criterio, si sottolinea che l’International EPD System non indica una formula di calcolo, ma nel GPI descrive chiaramente quali sono i confini del sistema da adottare in caso di *open loop*, utilizzando a supporto anche un diagramma di flusso relativo alla sezione di fine vita, pertanto è stato assegnato “sì” al criterio “Chiarezza e trasparenza”.

La ISO/TS 14067, invece, nell’Annex C riporta diverse formule ma non dice espressamente che queste rappresentano casi particolari di un’unica formula generale. Inoltre, nella ISO non è esplicitato il termine E_{EOL} utilizzato nelle formule e non si trovano un esempio o un diagramma di flusso utili per chiarire il significato del termine E_{pp} in modo univoco. La ISO, infine, specifica che l’equazione da utilizzare in caso di *open loop* (qui la Eq. 3) necessita di essere estesa nei casi in cui il materiale di riciclo in input e quello destinato al riciclo in output siano caratterizzati da un diverso fattore di allocazione A, ma non indica espressamente la formula da utilizzare in questi casi. All’Eq. 5 proposta in questo lavoro si è assegnato “sì” al criterio “Chiarezza e trasparenza” perché, nell’analisi precedente, si è cercato di colmare queste lacune presenti nella ISO/TS 14067, in modo da ridurre il margine di interpretazione.

Sia la PEF che Wolf e Chomkhamtri (2014) indicano chiaramente il significato di ogni termine e, nel *white paper* a supporto della formula integrata, questi ultimi riportano anche un diagramma di flusso per facilitare la comprensione dei confini del sistema adottati.

In riferimento al secondo e al terzo criterio, adottando

Tabella 3 - Confronto fra i diversi blocchi che costituiscono le formule analizzate

	ISO/TS 14067 [Eq. 3]	ISO/TS 14067 "estesa" [Eq. 5]	PEF [Eq. 7]	Formula integrata [Eq. 12]	International EPD System [Eq. 13]
Input di materie prime	a	$(1 - R1) \cdot Ev + R1 \cdot E_{pp}$	$(1 - R1) \cdot Ev + R1 \cdot \frac{E_{recycled}}{2}$	$(1 - R1) \cdot Ev$	$(1 - R1) \cdot Ev + R1 \cdot E_{recycled}^*$
	a'	$R1 \cdot \frac{Q_s \cdot E_v}{Q_p}$	$R1 \cdot \frac{E_v}{2}$	$R1 \cdot \frac{Q_{s1} \cdot E_v^s}{Q_{p1}}$	n.a.
Output a riciclo	b	$R2 \cdot E_{R,EOL}$	$R2 \cdot \frac{E_{recycling,EOL}}{2}$	$R2 \cdot E_{recycling,EOL}$	$R2 \cdot E_{TR,EOL}$
	c	$-R2 \cdot \frac{Q_s \cdot E_v}{Q_p}$	$-\frac{R2 \cdot Q_s}{2} \cdot Ev^*$	$-R2 \cdot \frac{Q_{s2} \cdot Ev^*}{Q_{p2}}$	n.a.
Output a recupero energetico	d	$R3 \cdot E_{ER}$	$R3 \cdot E_{ER}$	$R3 \cdot E_{ER}$	$R3 \cdot E_{ER}$
	e	n.a.	$-R3 \cdot LHV \cdot X_{ER,th/el} \cdot E_{SE,th/el}$	$-R3 \cdot LHV \cdot X_{ER,th/el} \cdot E_{SE,th/el}$	n.a.
Output a smaltimento	f	$(1 - R2 - R3) \cdot E_D$	$(1 - R2 - R3) \cdot E_D$	$(1 - R2 - R3) \cdot E_D$	$(1 - R2 - R3) \cdot E_D$
	f'	n.a.	$-R1 \cdot \frac{E_D^*}{2}$	n.a.	n.a.
	f''	n.a.	$R2 \cdot \frac{E_D}{2}$	n.a.	n.a.

Tabella 4 - Valutazione delle formule analizzate sulla base dei 10 criteri individuati

Criterio di valutazione	ISO/TS 14067 [Eq. 3]	ISO/TS 14067 "estesa" [Eq. 5]	PEF [Eq. 7]	Formula integrata [Eq. 12]	International EPD System [Eq. 13]
1. Chiarezza e trasparenza	no	sì	sì	sì	sì
2. Intuitività	sì	sì	no	sì	sì
3. Facilità pratica	no	no	no	no	sì
4. Applicabile in caso di <i>closed loop</i>	sì ⁽¹⁾	sì ⁽¹⁾	sì	sì	sì
5. Applicabile in caso di <i>open loop</i>	sì	sì	sì	sì	sì
6. Debito da prima vita	sì	sì	sì	sì	no
7. Contenuto di riciclato	sì ⁽²⁾	sì ⁽²⁾	sì	sì ⁽²⁾	sì
8. Credito da riciclo EoL	sì	sì	sì	sì	no
9. Credito da recupero energetico	no	sì	sì	sì	no
10. <i>Downcycling</i>	sì	sì	sì	sì	n.a.

⁽¹⁾ Applicabile se, al fine di considerare un riciclo *open loop* al pari di un riciclo *closed loop*, si intende che devono essere soddisfatte contemporaneamente le condizioni $A=1$ ed $E_{pp}=0$.

⁽²⁾ Solo nel caso di *open loop*

l'approccio 100-0 l'International EPD System risulta sicuramente il metodo più intuitivo, oltre che il più facile da mettere in pratica. Viceversa l'approccio 50-50 della PEF appare come il meno intuitivo, sia per quanto riguarda la gestione del fine vita dei flussi inviati a smaltimento (termini f, f', f''), sia per quanto riguarda la scelta di adottare di *default* un'equa ripartizione dei benefici e degli impatti fra i sistemi interconnessi (approccio 50-50). Dal punto di vista della facilità pratica, tutte le metodologie eccetto l'International EPD System presentano delle difficoltà perché il calcolo dei crediti legati al riciclo o al recupero energetico richiede di applicare l'espansione del sistema: assegnare i valori numerici ai diversi termini può quindi risultare difficoltoso e arbitrario perché richiede di identificare il materiale o la fonte energetica sostituita e di recuperare dei dati non prontamente disponibili da parte di chi effettua l'analisi. I prezzi di mercato che rientrano nel fattore di *downcycling*, inoltre, possono essere soggetti a variazioni nel tempo e difficili da reperire.

Relativamente al quarto e al quinto criterio, tutte le formule confrontate risultano applicabili sia in caso di *closed loop* che di *open loop* (come mostrato nella sezione *Materiali e metodi*).

L'International EPD System, adottando l'approccio 100-0, non alloca al materiale di riciclo nessun impatto legato alla prima vita del materiale; al contrario, tutti gli altri approcci considerano il materiale di recupero come una risorsa e, quindi, ad esso allocano parte degli impatti legati alla prima vita del materiale.

Tutti i metodi premiano il contenuto di materiale riciclato nei prodotti (fintanto che il processo di riciclo comporta emissioni minori rispetto all'estrazione della materia prima vergine), ad eccezione della ISO e della formula integrata nel caso in cui il riciclo *open loop* sia modellato come *closed loop* (cioè quando il materiale riciclato presenta le stesse caratteristiche del materiale vergine senza che ci sia bisogno di sottoporlo ad ulteriori pretrattamen-

ti). In questi casi, infatti, la formula integrata e quella della ISO equivalgono a quella indicata dalla ISO/TS 14067 per il *closed loop* (Eq. 1). Ciò significa che non è riconosciuto nessun credito al contenuto di materiale riciclato nel prodotto poiché, come indicato nelle premesse per l'approccio 0-100, utilizzare un materiale secondario in un processo produttivo significa semplicemente che un altro sistema produttivo avrà bisogno di materia prima vergine.

Per quanto riguarda il credito relativo al riciclo/riuso dopo l'uso, tutti i metodi riconoscono un credito alla riciclabilità del prodotto tranne l'International EPD System, secondo cui tale beneficio, se calcolato, non può essere sottratto al risultato ma deve essere riportato come una informazione a parte.

Lo stesso vale nel caso del recupero energetico, che non è espressamente incluso neanche nelle formule indicate nell'*Annex C* della ISO/TS 14067.

Tutte le metodologie che riconoscono debiti e crediti legati al riciclo dei materiali (quindi tutte eccetto l'International EPD System) tengono conto della perdita di qualità del materiale di riciclo rispetto alla materia prima (*downcycling*).

5 CONCLUSIONE

Anche se nella ISO 14044 sono state definite alcune regole generali per gestire i problemi di allocazione che sorgono durante le analisi LCA, esistono molti approcci diversi per modellare il riuso, il riciclo e il recupero energetico dei materiali. Questo articolo ha avuto l'obiettivo di analizzare e confrontare soprattutto dal punto di vista teorico le diverse equazioni avanzate dalle recenti norme tecniche. Sono stati identificati 10 criteri di valutazione su cui basare il confronto. In linea con quanto si legge nella letteratura scientifica, si può concludere che non esiste una for-

mula perfetta per gestire i casi di riciclo/riuso e recupero energetico dei materiali.

Dal punto di vista pratico, la scelta di adottare una formula di calcolo piuttosto che un'altra avrà risvolti importanti soprattutto nei casi in cui questi problemi di allocazione riguardano non solo il recupero degli imballaggi, ma anche il prodotto stesso oggetto di analisi LCA (es. prodotti in legno, pannelli termoisolanti in poliestere, ecc.).

L'approccio dell'International EPD System è il più semplice da mettere in pratica. Quando si va ad applicare l'espansione del sistema, infatti, ci si scontra con le difficoltà che essa comporta ed è inevitabile ottenere dei risultati affetti da un certo livello di arbitrarietà. Eliminando la possibilità di applicare l'espansione del sistema, è più facile confrontare le prestazioni ambientali dei prodotti le cui EPD sono pubblicate sul sito del programma. D'altra parte, l'approccio dell'International EPD System vieta di includere nei confini del sistema i crediti legati al riciclo/riuso e al recupero energetico: l'adozione di misure di mitigazione degli impatti ambientali che vanno in questa direzione, quindi, non avrà un riflesso sul risultato dell'analisi LCA.

Per quanto riguarda la PEF, essa rappresenta sicuramente un'iniziativa di grande interesse da tenere in considerazione, ma la metodologia generale è ancora in fase di validazione e discussione, in particolare per quanto riguarda la formula di calcolo qui discussa. L'approccio 50-50 adottato dalla PEF, infatti, è stato oggetto di critiche tanto che la stessa Commissione Europea incoraggia a testare approcci di calcolo alternativi nella fase pilota (CE, 2014b). Fra questi, si è scelto di analizzare la formula integrata di Wolf e Chomkamsri (2014). Questa, come già discusso nel relativo paragrafo, è equivalente alla Eq. 5, cioè alla ISO/TS 14067 nella sua formulazione estesa qui avanzata in caso di *open loop*, ma adotta una suddivisione iniziale fra i sistemi a monte e a valle del sistema analizzato leggermente diversa rispetto a quanto suggerito dalla ISO/TS 14067 e potrebbe risultare di più facile implementazione all'interno dei software di LCA.

Ad oggi, quindi, nonostante si tratti di una norma relativa alla sola *carbon footprint*, il riferimento normativo internazionale più solido a cui fare riferimento per gestire i casi di riciclo/riuso e recupero energetico sembra essere la ISO/TS 14067, in particolare nella sua formulazione estesa qui presentata dove sono espressamente formulati sia i termini relativi al fine vita e al possibile recupero energetico dai materiali, sia la possibilità di avere un fattore di allocazione relativo al materiale di riciclo in input diverso da quello del materiale destinato a riciclo in output (necessità evidenziate, ma non meglio formulate nell'*Annex C* della ISO).

6 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- AFNOR (2011) BP X 30-323-0 Principes généraux pour l'affichage environnemental des produits de grande consommation. AFNOR, Paris.
- Allacker K, Mathieux F, Manfredi S et al. (2014) Allocation solutions for secondary material production and end of life recovery: Proposals for product policy initiatives. *Resources, Conservation and Recycling* 88: 1-12.
- Allegrini E, Vadenbo C, Boldrin A, Fruergaard Astrup T (2015) Life cycle assessment of resource recovery from municipal solid waste incineration bottom ash. *Journal of Environmental management* 151: 132-143.
- Atherton J. (2006) Declaration by the Metals Industry on Recycling Principles. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 12 (1): 59-60.
- Bedo I (2014) Consumer Information in the EU Environmental Footprint Process & Worldwide. PEF World Forum webinar, 16th of September.
- Bergsma G. e Sevenster M. (2013) End-of-life best approach for allocating recycling benefits in LCAs of metal packaging. CE Delft publication No 13.8231.02, Delft.
- BSI (2011) PAS 2050:2011 - Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services. British Standards Institution, London.
- CE (2013) Raccomandazione della Commissione, del 9 aprile 2013, relativa a relativa all'uso di metodologie comuni per misurare e comunicare le prestazioni ambientali nel corso del ciclo di vita dei prodotti e delle organizzazioni – Allegato II. *Gazzetta ufficiale dell'Unione europea*, serie L N.124 del 4 maggio 2013.
- CE (2014) Workshop on End of Life (EoL) formulas in the context of the Environmental Footprint pilot phase, 6th of October, Brussel.
- CE (2014b) Guidance for the implementation of the EU PEF during the EF pilot phase - Version 4.0. Disponibile su: http://ec.europa.eu/environment/eussd/smgp/pdf/Guidance_products.pdf
- Cederstrand P, Riise E e Uihlein A (2014) Evaluation of recycling and allocation methods for paper. SCA, The Swedish Life Cycle Center report No 2014:1, Göteborg.
- Di Franco N, Landolfo PG e Marciani L (2004) Nuova filiera per la valorizzazione della carta da macero. Analisi tecnico-economica di una nuova filiera per la produzione di pasta disinchiostata. Disponibile su: <http://www.bologna.enea.it/matform/Prot/Landolfo.pdf>
- Ekvall T e Tillman A (1997) Open-loop recycling: Criteria for allocation procedures. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 2(3): 155-162.
- Frees N (2008) Crediting Aluminium Recycling in LCA by Demand or by Disposal. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 13(3): 212-218.
- Frischknecht R (2010) LCI modelling approaches applied on recycling of materials in view of environmental sustainability, risk perception and eco-efficiency. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 15(7): 666-671.
- International EPD System (2013) General Program Instructions (version 2.01).
- ISO (2006) ISO 14044:2006 Environmental management - Life cycle assessment – Requirements and guidelines.
- ISO (2013) ISO/TS 14067:2013 Greenhouse gases - Carbon footprint of products - Requirements and guidelines for quantification and communication.
- NCASI (2012) Methods for open-loop recycling allocation in life cycle assessment and carbon footprint studies of paper products. National Council for Air and Stream Improvement, Inc. Technical Bulletin No.1003. Research Triangle Park, NC.
- Pernigotti D (2013) La carbon footprint alla luce della nuova norma UNI ISO/TS 14067. Milano: Edizioni Ambiente.
- UNI (2012) UNI EN 15804:2012 - Sustainability of construction works - Environmental product declarations - Core rules for the product category of construction products.
- Werner F e Scholz R (2002) Ambiguities in decision-oriented Life Cycle Inventories The Role of mental models. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 7(6): 330-338.
- Wolf M e Chomkamsri K (2014) The “Integrated formula” for modelling recycling, energy recovery and reuse in LCA. maki Consulting and P.P.P. Intertrader White paper: The “Integrated formula”, Berlin.

RINGRAZIAMENTI

La ricerca è stata finanziata dal progetto TRIBOULET per conto di Regione Lombardia. Si ringraziano Matteo Zanchi, Giovanni Dotelli, Jacopo Famiglietti, Francesca Recanati e Annarosa de Luca per gli spunti di riflessione forniti durante il progetto.