

Perugia, Italy. April 4-5, 2014

14th CIRIAF National Congress

Energy, Environment and Sustainable Development

A Mathematical Model For Evaluating Energy Consumptions In Life Cycle Assessment.

F. C. Campione¹, D. Milone^{2*}, G. Moncada Lo Giudice³, S. Pitruzzella¹.

¹ Scuola Politecnica - Università di Palermo, Viale delle Scienze ed. 14, Palermo 90128, Italy

² DEIM - Dipartimento Di Energia, Ingegneria Dell'informazione e Modelli Matematici, Università di Palermo, Palermo 90128, Italy

³ Università La Sapienza Roma, Piazzale Aldo Moro 5, 00185 Roma

* daniele.milone@unipa.it

Abstract: This paper takes up the ecobalance topic giving prominence to a calculation procedure of necessary energy consumptions for the production of a product in the different phases of a whole life cycle. Are used to identify all stages of the life cycle are determined and simplified formulas for the calculation of specific energy consumption. Is also examined a case where the components of the final product are up to 8. The model is valid for any type of product and through operations research (ie, placing constraints on the variables) you could get to optimal solutions minimizing the objective function.

Keywords: Life cycle assessment, energy consumptions (EC), product

1. Introduzione

Il metodo maggiormente diffuso per valutare il “comportamento” ambientale o “ecobilancio” di un prodotto o di un servizio durante l'intero processo di vita è il Life Cycle Assessment (LCA).

Naturalmente per una corretta valutazione è importante avere l'esatta conoscenza dei reali processi produttivi, magari attraverso uno schema a blocchi, dove ad ogni fase del ciclo di vita si rappresentano i flussi di massa e di energia “reali”.

L'ecobilancio è inteso quindi come una contabilità degli input e degli output di ogni fase del ciclo di vita di un prodotto (o di un servizio).

Diventa importante quindi la prima fase di inventario dove vengono inseriti i diversi flussi delle successive fasi.

Esistono anche criteri per l'inclusione/esclusione di alcune fasi, ma con tali operazioni si rischia di andare incontro ad errori sostanziali che falsificherebbero la determinazione della LCA.

Un criterio di esclusione potrebbe essere quello di eliminare flussi di massa e/o di energia proporzionalmente molto piccoli, oppure quello di eliminare flussi sotto una soglia non ritenuta più significativa al contributo dell'impatto.

E' fondamentale altresì la definizione di una Unità Funzionale di Riferimento (UFR) poiché i dati acquisiti dovranno essere riferiti ad essa (p.es. CO₂ per singolo prodotto o CO₂ per m³ o kg di prodotto).

Generalmente tale UFR si definisce in base al servizio offerto e non all'unità di misura (può però capitare che le due cose coincidano); infatti due prodotti analoghi possono avere la stessa funzione, mentre la stessa funzione (prestazione) può essere soddisfatta da due prodotti diversi.

2. Sviluppo del modello

Nel modello presentato sono state introdotte tutte le voci che contribuiscono ad accrescere il consumo energetico finale per unità di prodotto, escludendo i flussi necessari alla costruzione dei macchinari, nonché i consumi energetici necessari per l'estrazione, la lavorazione, etc. del combustibile utilizzato nelle diverse fasi, e fissando un solo luogo di produzione per il prodotto principale.

Nel nostro modello pertanto non avrà più senso parlare di UFR in quanto ci si riferirà alla produzione di un singolo prodotto ed al suo bilancio energetico totale.

Un prodotto generico è costituito da n componenti (materiali) ognuno dei quali è presente in esso secondo una certa quantità.

$$P = n_1[kg]c_1 + n_2[kg]c_1 + \dots n_w[kg]c_w \quad (1)$$

In cui:

n_1, n_2, \dots, n_w rappresentano le quantità di massa omogenea presente nel prodotto;

c_1, c_2, \dots, c_w rappresentano i materiali (componenti) di cui è costituito il prodotto;

Per la identificazione del modello si sono identificate le seguenti fasi:

- **Fase A** Calcolo dei Consumi energetici nella fase di estrazione delle materie prime (**CE_A**)
- **Fase AB** Calcolo dei Consumi energetici nella fase di trasporto dall'estrazione alla trasformazione (**CE_{AB}**)
- **Fase B** Calcolo dei Consumi energetici nella fase di trasformazione delle materie prime (**CE_B**)
- **Fase BC** Calcolo dei Consumi energetici nella fase di trasporto dalla trasformazione delle materie prime alla produzione del prodotto finito (**CE_{BC}**)
- **Fase C** Calcolo dei Consumi energetici nella fase di produzione del prodotto finito (**CE_C**)
- **Fase CD** Calcolo dei Consumi energetici nella fase di trasporto del prodotto finito alla vendita (**CE_{CD}**)
- **Fase D** Calcolo dei Consumi energetici nella fase di vendita (**CE_D**)
- **Fase DE** Calcolo dei Consumi energetici nella fase di trasporto dalla vendita al consumo (**CE_{DE}**)
- **Fase E** Calcolo dei Consumi energetici nella fase di consumo (**CE_E**)
- **Fase EF** Calcolo dei Consumi energetici nella fase di trasporto dal consumo allo smaltimento (**CE_{EF}**)
- **Fase F** Calcolo dei Consumi energetici nella fase di smaltimento (**CE_F**)

4. Descrizione delle fasi

4.1 Fase A *Calcolo dei Consumi energetici nella fase di Estrazione delle materie prime (CE_A)*

In questa fase vi sono due possibili situazioni: la prima prevede che per ottenere n_1 kg. del componente c_1 debbo estrarre m_1 kg. di sostanza x_1 , la seconda prevede invece che per avere n_1 kg. del componente c_1 debbo estrarre, m_1 kg. di sostanza x_1 più m_2 kg. di sostanza x_2 , può anche essere necessario che per avere n_3 kg. del componente c_1 debbo estrarre più chilogrammi di diverse sostanze etc.

Possiamo quindi affermare che:

$$t_i = m_j \geq n_i \quad (2)$$

in cui i e $j = 1, 2, \dots, k$

ovvero

$$t_i = \sum_{j=k+1}^{w+\alpha} m_j \geq n_i \quad (3)$$

in cui $i = k+1, k+2, \dots, w$ e $j = k+1, \dots, w+\alpha$

$$CE_A = \sum_{j=1}^{w+\alpha} CE_{ESTR} m_j = \sum_{i=1}^w CE_{ESTR} t_i \quad [J/\text{pezzo}] \quad (4)$$

Nella tabella 1 che segue viene riportata una delle infinite situazioni che si possono verificare per un prodotto costituito da $w = 8$ componenti

Tab.1 (calcolo dei consumi energetici nella fase A)

$t_1 = m_1 \geq n_1$
$t_2 = m_2 \geq n_2$
$t_3 = m_3 \geq n_3$
$t_4 = m_4 \geq n_4$
$t_5 = m_5 \geq n_5$
$t_6 = m_6 + m_7 + m_8 \geq n_6$
$t_7 = m_9 + m_{10} \geq n_7$
$t_8 = m_{11} + m_{12} + m_{13} + m_{14} + m_{15} \geq n_8$
Quindi nel caso specifico in esame si avrà:
$t_i = m_j \geq n_i$ per $i = 1, 2, 3, 4, 5$ $j = 1, 2, 3, 4, 5 \Rightarrow k = 5$
$t_i = \sum_{j=6}^{15} m_j \geq n_i$
$i = 6, 7, 8$
$j = 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15$
$w = 8$
$w + \alpha = 15$

4.2 Fase AB *Calcolo dei Consumi energetici nella fase di trasporto dall'estrazione alla trasformazione (CE_{AB})*

Per quanto riguarda gli "spostamenti" dei materiali da una fase all'altra, può succedere che all'uscita della fase di estrazione i materiali possano essere o trasformati (e in questo caso vi sarà il passaggio

diretto alla fase B) oppure mandati direttamente alla lavorazione (quindi la fase intermedia B viene saltata). In tutti i casi però si fa l'ipotesi che in entrata alla fase C (fase di produzione del prodotto principale) vi sia la quantità di componente elementare n_i "scremata" già a monte dalla quantità di materiale (m_i).

Appare del tutto evidente che non si ha una sola sede fisica di estrazione A, né una sola sede di lavorazione B.

Il consumo energetico nella fase di trasporto AB sarà quindi il seguente:

$$CE_{AB} = \sum_{i=1}^{w_2} \left(CE \phi_i * \frac{1}{\eta_i} * b_{IAB} * \frac{t_i}{S_i} \right) \text{ [J/pezzo]} \quad (5)$$

dove:

w_2 = quota parte di w di componenti elementari che vanno da A a B

ϕ_i = potere calorifico del combustibile usato nel trasporto [J/kg]

η_i = consumo specifico di combustibile usato nel trasporto [km/kg]

b_{IAB} = numero di chilometri per andare dai centri di estrazione a quelli di trasformazione [km]

t_i = quantità di materia prima utilizzata nella fase di trasformazione per il prodotto in questione [kg/pezzo]

S_i = quantità massima di materia prima trasportabile in un solo viaggio [kg]

dove evidentemente $\frac{t_i}{S_i} \neq 0$

4.3 Fase B *Calcolo dei Consumi energetici nella fase di trasformazione delle materie prime (CE_B)*

Tale fase di trasformazione entra in gioco solo per alcune materie prime che debbono subire un'ulteriore lavorazione (tipo chimico) per arrivare al prodotto finito da usare nell'assemblaggio del prodotto (pezzo) principale.

E' quindi evidente che le materie prime possono sia "passare" per la fase intermedia B sia andare direttamente alla fase C, pertanto dalla fase A, in entrata alla fase C, avremo un numero di componenti elementari w_1 , mentre dalla fase B un numero di componenti elementari w_2 ; è evidente che $w = w_1 + w_2$.

E' utile evidenziare che il modello prevede che in ingresso alla fase C (fase di produzione) la quantità di materia sia quella esattamente occorrente per il prodotto finito (quindi in questa fase si eliminano gli scarti solidi di produzione che invece sono stati considerati nelle fasi precedenti). Tale ipotesi non rispecchia chiaramente la realtà dei fatti, ma nel computo dei consumi energetici totali ciò non porta a degli errori, poiché l'assegnazione di questi consumi energetici è già stata fatta a monte della fase di produzione.

4.4 Fase BC *Calcolo dei Consumi energetici nella fase di trasporto dalla trasformazione delle materie prime alla produzione del prodotto finito (CE_{BC})*

All'uscita dalle diverse fasi di B si hanno w_2 componenti elementari.

Si può allora dire che il consumo energetico nella fase di trasporto BC sarà:

$$CE_{BC} = \sum_{i=1}^{w_2} \left(\phi_i * \frac{1}{\eta_i} * b_{IBC} * \frac{n_i}{n_{toti}} \right) \text{ [J/pezzo]} \quad (6)$$

dove:

w_2 = quota parte di w di componenti elementari che vanno da B a C

ϕ_i = potere calorifico del combustibile usato nel trasporto [J/kg]

η_i = consumo specifico di combustibile usato nel trasporto [km/kg]
 b_{IBC} = numero di chilometri per andare dai centri di trasformazione a quelli di produzione [km]
 n_{tot_i} = quantità di componente elementare di base che posso trasportare in un solo viaggio [kg]
 n_i = kg. di componente elementare di base del prodotto che mi servono in totale [kg/pezzo]
 $n_{tot_i} = \gamma n_i$
 con evidentemente $\gamma \neq 0$.

4.5 Fase C *Calcolo dei Consumi energetici nella fase di produzione del prodotto finito (CEC)*

Nella fase di produzione del prodotto il consumo energetico sarà dato dalla somma dei cicli di produzione specifica del prodotto e quindi:

$$CE_c = CE_1 + CE_2 + CE_3 + \dots + CE_n \quad [J/\text{pezzo}] \quad (7)$$

4.6 Fase CD *Calcolo dei Consumi energetici nella fase di trasporto del prodotto finito alla vendita (CE_{CD})*

All'uscita dalla fase C il prodotto è finito. Si può quindi scrivere:

$$CE_{cd} = \frac{\phi * \frac{1}{\eta} * b_{CD}}{P_{TOT}} \quad [J/\text{pezzo}] \quad (8)$$

dove:

ϕ = potere calorifico del combustibile usato nel trasporto [J/kg]
 η = consumo specifico di combustibile usato nel trasporto [km/kg]
 b_{CD} = numero di chilometri per andare dai centri di produzione a quelli di vendita [km]
 P_{TOT} = numero prodotti trasportati in un singolo viaggio.

4.6 Fase D *Calcolo dei Consumi energetici nella fase di vendita (CE_D)*

Generalmente i consumi energetici in questa fase sono limitatissimi e sostanzialmente dovuti alla manutenzione e alle prove.

Possono così esprimersi:

$$CE_D = CE_{Manut.} + CE_{Prova} \quad [J/\text{pezzo}] \quad (9)$$

4.7 Fase DE *Calcolo dei Consumi energetici nella fase di trasporto dalla vendita al consumo (CEDE)*

In questo caso avverrà il trasporto di un singolo prodotto per cui potremo scrivere:

$$CE_{DE} = \phi * \frac{1}{\eta} * b_{DE} \quad [J/\text{pezzo}] \quad (10)$$

dove:

ϕ = potere calorifico del combustibile usato nel trasporto [J/kg]
 η = consumo specifico di combustibile usato nel trasporto [km/kg]
 b_{DE} = numero di chilometri per andare dai centri di vendita a quello di consumo [km]

4.8 Fase E *Calcolo dei Consumi energetici nella fase di consumo (CE_E)*

Per questa fase si ripropone il caso della fase C, dove entra in gioco la specificità del prodotto in esame; Potremo quindi dire:

$$CE_E = \frac{CE_{En. elettrica} + CE_{En. termica} + CE_{En. meccanica} + CE_{combustibile} + CE_{ausiliari}}{d} * d_{TOT}^* \quad (11)$$

dove:

d = giorno

d_{TOT}^* = numero giorni di vita media del prodotto.

4.9 Fase EF Calcolo dei Consumi energetici nella fase di trasporto dal consumo allo smaltimento (CE_{EF})

All'uscita dalla fase E ho il singolo prodotto. Si può quindi scrivere:

$$CE_{EF} = \frac{\phi * \frac{1}{\eta} * b_{EF}}{P_{Tot}} \quad [J/\text{pezzo}] \quad (12)$$

dove:

ϕ = potere calorifico del combustibile usato nel trasporto [J/kg]

η = consumo specifico di combustibile usato nel trasporto [km/kg]

b_{EF} = numero di chilometri per andare dal punto di smaltimento al punto di trattamento [km]

P_{Tot} = numero prodotti trasportati in un singolo viaggio.

4.10 Fase F Calcolo dei Consumi energetici nella fase di smaltimento (CE_F)

In questa fase è possibile individuare tre ipotesi di smaltimento: discarica, incenerimento, riciclaggio. Ognuna di queste tre alternative presenta delle caratteristiche peculiari.

4.10.1 Smaltimento in discarica

Lo smaltimento in discarica prevede l'interramento del prodotto con recupero energetico del solo biogas. Raggruppando, per semplicità, tutte le voci dei consumi energetici dovute ad operazioni tipiche del processo in discarica (esempio: compattazione, ricoprimento giornaliero e periodico etc.), distinguendole in operazioni ausiliarie e tenendo altresì conto dello smaltimento del percolato prodotto, con riferimento al singolo prodotto si può scrivere:

$$CE_{F1} = CE_{ausiliari} - RE_{biogas} + CE_{Smalt.percolato} \quad [J/\text{pezzo}] \quad (13)$$

4.10.2 Smaltimento tramite termocombustione (incenerimento)

Lo smaltimento tramite incenerimento prevede l'ossidazione e la successiva combustione del rifiuto. Raggruppando, analogamente come nel caso della discarica, le voci dovute ad operazioni tipiche del processo in operazioni ausiliarie, si può scrivere:

$$CE_{F2} = CE_{ausiliari} - \varepsilon v \quad [J/\text{pezzo}] \quad (14)$$

dove:

ε = potere calorifico del pezzo [J/pezzo]

v = rendimento di trasformazione

4.10.3 Smaltimento tramite recupero

Lo smaltimento con parziale recupero dei materiali utilizzati nel ciclo produttivo dà luogo alla formula:

$$CE_{F3} = \sum_{i=1}^w \delta_i q_i \quad [J/\text{pezzo}] \quad (15)$$

dove:

δ_i = consumo energetico per effettuare il recupero di un kg di materiale [J/kg]

q_i = numero di kg recuperati sul totale n_i [kg]

$q_i \leq n_i$.

E' evidente che tale metodo potendo riutilizzare parte della materia prima si può ottenere un risparmio nel costo di estrazione e di trasformazione e, in alcuni casi specifici, anche di lavorazione. Ciò è molto importante anche se non si evidenzia nel modello di calcolo, poiché esso si occupa soltanto dei consumi energetici di un singolo ciclo di vita.

5. Conclusioni

Il modello in questione cerca di “contabilizzare” tutti i flussi di energia relativo ad un singolo ciclo di vita di un prodotto specifico. Le ipotesi iniziali pongono dei limiti fisici al sistema, poiché se si andasse a ritroso si entrerebbe in cicli di vita paralleli tipici di alcuni prodotti ausiliari al processo in questione (esempio classico quello della vernice, che dispone ovviamente di un proprio ciclo di vita ma partecipa alla formazione di altri prodotti; altro esempio tipico è quello degli imballaggi per i quali si eseguono studi appropriati analizzando il loro proprio ciclo di vita).

Il modello presentato invece punta al bilancio di un singolo prodotto generico e si propone di poter eseguire confronti tra prodotti soltanto però in caso di parità nelle condizioni iniziali, e sotto certe ipotesi di partenza. Se, per esempio, vogliamo confrontare due elettrodomestici dal punto di vista dei consumi energetici dobbiamo innanzitutto contabilizzare i flussi di energia in tutte le singole fasi del ciclo di vita, e in seguito potremo attuare il confronto soltanto se le capacità dei due elettrodomestici fossero le stesse (in generale, se l'unità funzionale di riferimento fissata è la stessa).

L'unità funzionale di riferimento entra quindi in gioco soltanto nei confronti tra prodotti omologhi, ma non è utilizzata in questo modello che si occupa dello studio del singolo ciclo di vita di un prodotto specifico.

C'è infine da dire che in presenza di un processo noto e in presenza di dati certi si può far ricorso alla ricerca operativa per ottimizzare un modello come quello presentato.

6. Bibliografia

1. Milone, D. Milone, F. C. Campione, S. Pitruzzella - Urban Waste as Resource for Sustainable Environment - Applied Mechanics and Materials Vol. 394 (2013) pp 304-308 doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.394.304
2. Ahbe S., Braunschweig A., Muller-Wenk R. (1991). Methodologie des ecobilans sur la base de l'optimisation écologique. Publié par l'Office fédéral de l'environnement, des forest et du paysage, Berna 1991.
3. APME, PWMI (1991). Weighing up the Environmental balance. 1991 pp. 1-10

4. Berg N.W. van den. (1994). *Beginning LCA; a guide into Environmental Life Cycle Assessments*. Centrum voor Milieukunde, National Onderzoekprogramma Hergebruik van Afvalstoffen, Leiden, Netherlands
5. Eduljee G., Dyke P., Cains P.W. (1995). PCCD/PCDF releases from various waste management strategies. *Warmer bulletin* 46. pp 22-23
6. V. Franzitta, D. Milone, M. Trapanese, A. Viola, V. Di Dio, S. Pitruzzella - Energy and Economic Comparison of Different Conditioning System among Traditional and Eco-sustainable Building. - *Applied Mechanics and Materials* Vol. 394 (2013) pp 289-295 doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.394.289
7. Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC). (1991). *A Technical Framework for Life-Cycle Assessments*. SETAC Foundation for Environmental Education Inc. Washington, DC