

Studio di un modello teorico di misurabilità della sostenibilità dei cicli energetici chiusi

L'elemento sfidante e innovativo della ricerca scientifica e tecnologica nel settore della sostenibilità ambientale è quello che riguarda i "cicli energetici chiusi" delle risorse. L'obiettivo di realizzare cicli chiusi porta a una chiara definizione di sostenibilità e fornisce anche una chiave per la misurazione qualitativa della sostenibilità. In particolare, il livello di sostenibilità di un sistema può essere misurato analizzando la sua capacità di evitare il consumo di risorse. Lo scopo del presente lavoro, attuando alcuni elementi dell'LCA, è individuare degli indicatori caratteristici delle sostenibilità ambientale ed economica. Nel presente lavoro si elabora un modello analitico in grado di descrivere e rappresentare le diverse attività che caratterizzano un ciclo energetico chiuso.

STUDY OF A THEORETICAL MODEL OF MEASURABILITY SUSTAINABILITY OF ENERGY CYCLE CLOSED

The challenging and innovative scientific and technological research in the field of environmental sustainability has to do with the "closed energy cycles" of resources. The objective of creating closed cycles leads to a clear definition of sustainability and also provides a key to the qualitative measurement of sustainability. In particular, the level of sustainability of a system can be measured by analyzing its ability to avoid the consumption of resources. The purpose of this work by implementing some elements of the LCA is to identify the characteristic indicators of environmental and economic sustainability. In this section we develop an analytical model able to describe and represent the different activities that characterize a closed energy cycle.

INTRODUZIONE

L'elemento sfidante e innovativo della ricerca scientifica e tecnologica nel settore della sostenibilità ambientale è quello che riguarda i "cicli energetici chiusi" delle risorse. L'obiettivo di realizzare cicli chiusi porta a una chiara definizione di sostenibilità e fornisce anche una chiave per la misurazione qualitativa della sostenibilità. In particolare, il livello di sostenibilità di un sistema può essere misurato analizzando la sua capacità di evitare il consumo di risorse. La condizione ottimale per la sostenibilità è quella per cui il consumo energetico è pari a zero. È possibile dimostrare l'applicazione e la fattibilità del criterio di sostenibilità per un ciclo chiuso mostrando la sua fattibilità nel settore energetico.

CICLI ENERGETICI

La nostra società, utilizzando i combustibili fossili, si è sempre basata su sistemi energetici aperti. È bene sottolineare che¹ il ciclo dei combustibili fossili (carbone, petrolio e gas naturale) ha avuto inizio centinaia di milioni di anni fa mediante reazioni chimico fisiche tra organismi e carbonio atmosferico. La nostra società, in rapida crescita, da subito ha avuto bisogno di risorse energetiche facilmente reperibili e pronte all'uso e in questa direzione le risorse fossili hanno costituito un ottimo elemento. Si evidenzia che il tempo di riformazione del carbonio fossile è immensamente maggiore del periodo di uso e consumo². L'era dei cicli produttivi aperti sta conoscendo il suo epilogo a vantaggio di cicli energetici complessi che si basano sul riuso e il riciclo dei materiali. In

particolare, sono implementati cicli secondari che producono energia e gradualmente consumano materie per restituire come rifiuti prodotti in grado di essere riutilizzati. L'obiettivo di quest'approccio è giungere ai cicli energetici chiusi. Si tratta dell'unico modo per realizzare uno sviluppo sostenibile.

Un ciclo tecnologico, finalizzato alla fornitura di un vettore energetico, ottenuto da un sistema energetico rinnovabile, è composto da una serie di attività, che possono essere schematizzate³ nel seguente elenco:

- A) Production
- B) Transport
- C) Storage
- D) Energy Transformation
- E) Waste formation and disposal (water, air, ground)
- F) Partial material recycling and product reuse

APPLICAZIONE DELL' LCA A SISTEMI ENERGETICI CHIUSI

L'LCA, oggi codificata nella norma ISO 14040⁴, consiste in un procedimento oggettivo di valutazione dei carichi energetici e ambientali relativi a un prodotto, processo o attività che prende in considerazione l'intero ciclo di vita dell'attività, passando dall'estrazione e trasformazione delle materie prime, fabbricazione del prodotto, trasporto, uso e dismissione finale⁵. Il processo di LCA si fonda sul principio⁶ in base al quale un prodotto viene seguito e analizzato in ogni fase della sua vita, in quanto ogni azione associata a una fase può avere riflessi su fasi precedenti

¹Orecchini F A "measurablè" definition of sustainable development based on closed cycles of resources and its application to energy systems. *Sustain Sci* (2007) 2:245 - 252

²World Energy Council 2000

³Orecchini F, Naso V (2003) *La società no oil (No oil society)*. Orme Editor, Milan, Italy

⁴Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC)

⁵ISO, 1997. *Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework (ISO 14040:1997)*. International Standard Organization, June 1997, Brussels, pp. 1-6

⁶Approccio, detto "dalla culla alla culla" (from cradle to cradle)

o successive. Dal punto di vista procedurale, uno studio di LCA si articola in quattro fasi principali, ognuna delle quali composta da una precisa sequenza di passi operativi:

1. Definizione degli scopi e degli obiettivi
2. Analisi di inventario
3. Valutazione degli impatti ambientali
4. Interpretazione e analisi dei risultati

Il concetto di sviluppo sostenibile si inserisce nella metodologia esposta e si articola in quattro dimensioni:

- sostenibilità ambientale: capacità di mantenere nel tempo qualità e riproducibilità delle risorse naturali, di preservare la diversità biologica e di garantire l'integrità degli ecosistemi;
- sostenibilità economica: capacità di generare in modo duraturo reddito e lavoro e di raggiungere un'eco-efficienza intesa come uso razionale delle risorse disponibili e come riduzione dello sfruttamento delle risorse non rinnovabili;
- sostenibilità sociale: capacità di garantire l'accesso a beni considerati fondamentali (sicurezza, salute, istruzione) e a condizioni di benessere (divertimento, serenità, socialità), in modo equo all'interno delle comunità odierne e anche tra la generazione attuale e quelle future;
- sostenibilità istituzionale: capacità di assicurare condizioni di stabilità, democrazia, partecipazione, informazione, formazione e giustizia.

Alla luce di quanto esposto in precedenza, si propone di impiegare alcuni indicatori al fine di misurare la sostenibilità di un ciclo energetico chiuso.

1. Costi del ciclo produttivo

Indicatore principale: costi in € legati al ciclo energetico (I_e)

2. Uso sostenibile del territorio

Indicatore principale: Produzione di fonte rinnovabile per metro quadrato (I_p)

3. Produzione energetica

Indicatore principale: Produzione energetica legata al ciclo produttivo (I_e)

Lo scopo del presente lavoro è individuare degli indicatori caratteristici delle prime due tipologie di sostenibilità:

- ambientale;
- economica.

MODELLO TEORICO

Nel presente paragrafo si elabora un modello analitico in grado di descrivere e rappresentare le diverse attività descritte in precedenza. Nella Figura 1 viene rappresentato il ciclo produttivo. Si osserva che le diverse attività possono essere raggruppate in tre classi, caratteristiche rispettivamente di:

- produzione superficiale (S);
- produzione rinnovabile (R);
- produzione energetica (E).

La prima classe S rappresenta la quantità di combustibile fossile o rinnovabile ottenibile da una determinata superficie.

La seconda classe R descrive tutte le fasi di lavorazione del combustibile al fine di ottenere la produzione di energia ed è caratterizzata dalle seguenti sottofasi:

- Transport;
- Storage;
- Waste formation and disposal (water, air, ground);
- Partial material recycling and product reuse.

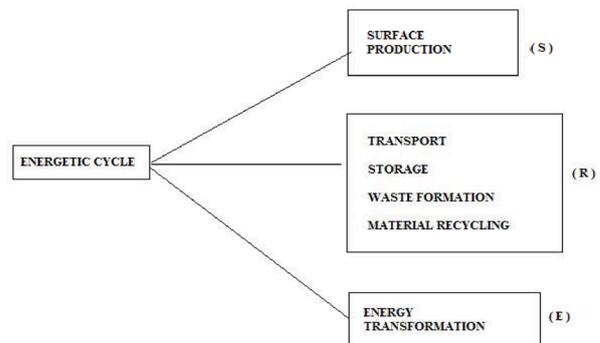


FIGURA 1 - Ciclo energetico

La terza classe E rappresenta l'energy transformation ed è rappresentativa della produzione finale di energia da un combustibile fossile o rinnovabile prodotto nella prima attività S.

Per analizzare l'intero ciclo energetico si avranno a disposizione tre unità rappresentative del sistema in esame, ciascuna delle quali in ingresso alla classe del processo energetico:

- unità di energia [kWh];
- unità di produzione rinnovabile [kg];
- unità di costi sostenuti [€].

Attuando un modello vettoriale, ciascuna attività viene descritta da un vettore di dimensioni (1x1) e una matrice di dimensione (1 x n), dove con n si indica il numero delle diverse componenti relative all'attività in esame. Tutti i coefficienti che caratterizzano le matrici sono funzione della tipologia del combustibile (legno, vignaccia, cippato nel caso di biomassa; petrolio, gas o carbone nel caso di combustibile fossile). Si evidenzia inoltre che gli stessi possono avere segno positivo o negativo in funzione del fatto che vengono ceduti dal sistema all'esterno.

Analizzando la classe S, avremo le seguenti grandezze vettoriali:

$$\vec{s} = \vec{S}\vec{x} \text{ dove } \vec{x} \text{ è il vettore superficie [m}^2\text{]}$$

\vec{S} è la matrice di produzione superficiale con le seguenti caratteristiche:

$$\vec{S} = \begin{pmatrix} s_{11} \\ s_{21} \\ s_{31} \\ s_{41} \\ s_{51} \\ s_{61} \end{pmatrix}$$

dove:

- s_{11} è il coefficiente di produzione di energia per superficie [kWh/m²];
- s_{21} è il coefficiente di produzione di nitrati per superficie [kg/m²];
- s_{31} è il coefficiente di produzione di CO₂ per superficie [kg/m²];
- s_{41} è il coefficiente di produzione in peso del terreno per superficie [kg/m²], rappresentativo della produttività specifica del territorio;
- s_{51} è il coefficiente di costi di produzione di fonte rinnovabile per superficie [€/m²];
- s_{61} è il coefficiente di produzione di acqua per superficie [m³/m²].

Se, ad esempio, consideriamo lo sviluppo di energia da un sistema fotovoltaico, i coefficienti saranno:

s_{11}^{FV} è il coefficiente di produzione di energia per superficie di pannello ed è caratteristico della specifica tipologia di modulo (ad esempio, c-Si, CdTe);

s_{21}^{FV} , s_{31}^{FV} sono coefficienti di produzione di nitrati, di CO₂ per superficie di pannello e sono rappresentativi dei processi di lavorazione e di

produzione della specifica tipologia di modulo. Pertanto, verrà preso in esame il concetto di kg equivalente;

$s_{31}^{FV} = 0$ in quanto non è prevista una produttività in peso per unità di superficie del fotovoltaico. In tal caso può essere impiegato il rapporto kg/m² specifico per la tipologia di modulo impiegato;

s_{31}^{FV} è il coefficiente relativo ai costi di produzione del pannello fotovoltaico per unità di superficie. Anche questo coefficiente è caratteristico della specifica tipologia di modulo (ad esempio, c-Si, CdTe);

$s_{61}^{FV} = 0$ in quanto non è prevista una produzione di acqua dalla tecnologia fotovoltaica.

Per la classe R, avremo le seguenti grandezze vettoriali:

$$\vec{r} = \vec{R}\vec{p} \quad (1)$$

dove \vec{p} è il vettore peso [kg], la matrice R è data dalla relazione

$$\vec{R} = (\vec{T} + \vec{ST} + \vec{W} + \vec{M})$$

La matrice \vec{R} è riferita specificamente al peso della sostanza prodotta ed è composta dalle matrici caratteristiche delle seguenti attività:

- \vec{T} , transport;
- \vec{ST} , storage;
- \vec{W} , waste;
- \vec{M} , partial material recycling and product reuse.

Si analizzano di seguito le singole matrici:

\vec{T} è la matrice di trasporto di combustibile con le seguenti caratteristiche:

$$\vec{T} = \begin{pmatrix} t_{11} \\ t_{21} \\ t_{31} \end{pmatrix}$$

dove:

- t_{11} è il coefficiente di energia per il trasporto [kWh/kg];
- t_{21} è il coefficiente di produzione di CO₂ nel trasporto. Si tratta di un fattore adimensionale, espresso in percentuale, rappresentativo del rapporto "kg di CO₂ /kg di sostanza" relativo al prodotto in esame e al territorio di riferimento;
- t_{31} è il coefficiente di costi di trasporto di combustibile [€/kg].

\vec{ST} è la matrice di storage con le seguenti caratteristiche:

$$\vec{ST} = \begin{pmatrix} st_{11} \\ st_{21} \\ st_{31} \\ st_{41} \end{pmatrix}$$

dove:

- st_{11} è il coefficiente di energia richiesta per lo storage [kWh/kg];
- st_{21} è il coefficiente di produzione di CO₂ nello storage. Si tratta di un fattore adimensionale, espresso in percentuale, rappresentativo del rapporto "kg di CO₂ /kg di sostanza" relativo al prodotto in esame e al tipo di deposito dove si effettua lo storage;
- st_{31} è il coefficiente di costi da sostenere per lo storage [€/kg];
- st_{41} è il coefficiente rappresentativo dello spazio richiesto per effettuare lo storage [m²/kg].

\vec{W} è la matrice di waste con le seguenti caratteristiche:

$$\vec{W} = \begin{pmatrix} w_{11} \\ w_{21} \\ w_{31} \end{pmatrix}$$

- w_{11} è il coefficiente di determinazione dell'acqua per il waste. Si tratta di un fattore adimensionale, espresso in percentuale, rappresentativo del rapporto "kg di acqua /kg di sostanza lavorata" relativo al prodotto in esame e al tipo di processo effettuato per avere il waste;

- w_{21} è il coefficiente di produzione di quantità del waste. Si tratta di un fattore adimensionale, espresso in percentuale, rappresentativo del rapporto "kg di waste /kg di sostanza lavorata" relativo al prodotto in esame e al tipo di processo effettuato per avere il waste;
 - w_{31} è il coefficiente di costi di produzione di waste [€/kg] ed è specifico dei processi di lavorazione effettuati per ottenere il waste;
- \vec{M} è la matrice di materiale di riciclo con le seguenti caratteristiche:

$$\vec{M} = \begin{pmatrix} m_{11} \\ m_{21} \\ m_{31} \end{pmatrix}$$

dove:

- m_{11} è il coefficiente di energia richiesta durante la fase del riciclo [kWh/kg];
 - m_{21} è il coefficiente di produzione di materiale da riciclare. Si tratta di un fattore adimensionale, espresso in percentuale, rappresentativo del rapporto "kg di materiale riciclato /kg di sostanza" relativo al prodotto in esame e al tipo di processi effettuati per avere il riciclo;
 - m_{31} è il coefficiente di costi da sostenere per la fase del riciclo [€/kg].
- Applicando la relazione (1) e sommando coefficienti omogenei delle diverse matrici, si ottiene la relazione:

$$\vec{r} = \begin{pmatrix} t_{11} + st_{11} + m_{11} \\ t_{21} + st_{21} + w_{11} + w_{21} + m_{21} \\ t_{31} + st_{31} + w_{31} + m_{31} \\ st_{41} \end{pmatrix} \vec{p} \quad (2)$$

Per la classe E, avremo le seguenti grandezze vettoriali:

$\vec{e} = \vec{E}\vec{z}$ dove \vec{z} è il vettore energia [kWh].

\vec{E} è la matrice di trasformazione energetica con le seguenti caratteristiche:

$$\vec{E} = \begin{pmatrix} e_{11} \\ e_{21} \\ e_{31} \\ e_{41} \\ e_{51} \\ e_{61} \end{pmatrix}$$

dove:

- e_{11} è il coefficiente di trasformazione di energia di input, nel caso di processi di trasformazioni cogenerative. Si tratta di un fattore adimensionale, espresso in percentuale, rappresentativo del rapporto "kWh in ingresso al processo/kWh lavorati" relativo del tipo di processo energetico effettuato;
- e_{21} è il coefficiente di trasformazione di energia di output, nel caso di processi di trasformazioni cogenerative. Si tratta di un fattore adimensionale, espresso in percentuale, rappresentativo del rapporto "kWh in uscita al processo/kWh lavorati" relativo del tipo di processo energetico effettuato;
- e_{31} è il coefficiente di produzione di CO₂, espresso in [kg/kWh], ottenuta nel processo di trasformazione del combustibile per ottenere energia;
- e_{41} è il coefficiente di produzione di nitrati, espresso in [kg/kWh], ottenuta nel processo di trasformazione del combustibile per ottenere energia;
- e_{51} è il coefficiente di costi di trasformazione energetica [€/kWh];
- e_{61} è il coefficiente di produzione di acqua, espresso in [m³/kWh], ottenuta nel processo di trasformazione del combustibile per ottenere energia.

In uscita al ciclo produttivo energetico avremo il vettore \vec{u} , dato dalla relazione:

$$\vec{u} = \vec{s} + \vec{r} + \vec{e} = \vec{S}\vec{x} + \vec{R}\vec{p} + \vec{E}\vec{z}$$

Applicando le relazioni precedenti e la relazione (2), si avrà la relazione finale:

$$\vec{u} = \begin{pmatrix} s_{11} \\ s_{21} + s_{31} + s_{41} \\ s_{51} \\ s_{61} \end{pmatrix} \vec{x} + \begin{pmatrix} t_{11} + st_{11} + m_{11} \\ t_{21} + st_{21} + w_{11} + w_{21} + m_{21} \\ t_{31} + st_{31} + w_{31} + m_{31} \\ st_{41} \end{pmatrix} \vec{p} + \begin{pmatrix} e_{11} + e_{21} \\ e_{31} + e_{41} \\ e_{51} \\ e_{61} \end{pmatrix} \vec{z} \quad (3)$$

Da ciascuna riga della (3) si ricavano le relazioni relative agli indicatori ambientali oggetto dello studio. Pertanto avremo:

Indicatore per unità di energia [kWh]:

$$I_E = s_{11}\vec{x} + (t_{11} + st_{11} + m_{11})\vec{p} + (e_{11} + e_{21})\vec{z} \quad (4)$$

Indicatore per unità di produzione rinnovabile [kg]:

$$I_P = (s_{21} + s_{31} + s_{41})\vec{x} + (t_{21} + st_{21} + w_{11} + w_{21} + m_{21})\vec{p} + (e_{31} + e_{41})\vec{z} \quad (5)$$

Indicatore per unità di costi sostenuti nell'intero ciclo [€]:

$$I_C = (s_{51})\vec{x} + (t_{51} + st_{51} + w_{51} + m_{51})\vec{p} + (e_{51})\vec{z} \quad (6)$$

APPLICAZIONE DEL MODELLO

Nel caso dell'esame di un sistema fotovoltaico avremo che alcune fasi descritte in precedenza sono nulle. Ad esempio, la fase di storage e di trasporto non esistono, in quanto il sistema non prevede la produzione di massa di combustibile (come nel caso delle biomasse per esempio), invece risulta significativa la fase di produzione di materiale riciclato. Per la fase di waste, risulterà utile valutare il concetto di kg_{eq} che si ottiene dai processi di lavorazione per ottenere un pannello fotovoltaico. Se il sistema è realizzato con pannelli tipo c-Si, la (3) diventa:

$$\vec{u}_{cSi}^{FV} = \begin{pmatrix} s_{11}^{FV} (kWh) \\ s_{21}^{FV} (kg_{eq}) + s_{31}^{FV} (kg_{eq}) + s_{41}^{FV} (0) \\ s_{51}^{FV} (\text{€}) \\ s_{61}^{FV} (0) \end{pmatrix} \vec{x}_{cSi}^{FV} + \begin{pmatrix} t_{11}^{FV} (0) + st_{11}^{FV} (0) + m_{11}^{FV} (kWh) \\ t_{21}^{FV} (0) + st_{21}^{FV} (0) + w_{11}^{FV} (0) + w_{21}^{FV} (\%) + m_{21}^{FV} (\%) \\ t_{31}^{FV} (0) + st_{31}^{FV} (0) + w_{31}^{FV} (\text{€}) + m_{31}^{FV} (\text{€}) \\ st_{41}^{FV} (0) \end{pmatrix} \vec{p}_{cSi}^{FV} + \begin{pmatrix} e_{11}^{FV} (0) + e_{21}^{FV} (\%) \\ e_{31}^{FV} (0) + e_{41}^{FV} (0) \\ e_{51}^{FV} (\text{€}) \\ e_{61}^{FV} (0) \end{pmatrix} \vec{z}_{cSi}^{FV} \quad (7)$$

Tenendo in considerazione il materiale con cui i pannelli sono composti, avremo che la (7) diventa:

$$\vec{u}_{cSi}^{FV} = \begin{pmatrix} s_{1Si}^{FV} (kWh) \\ (s_{2Si}^{FV} + s_{3Si}^{FV})(kg_{eq}) \\ s_{5Si}^{FV} (\text{€}) \end{pmatrix} \vec{x}_{cSi}^{FV} + \begin{pmatrix} m_{1Si}^{FV} (kWh) \\ (w_{2Si}^{FV} + m_{2Si}^{FV})(\%) \\ (w_{3Si}^{FV} + m_{3Si}^{FV})(\text{€}) \end{pmatrix} \vec{p}_{cSi}^{FV} + \begin{pmatrix} e_{5Si}^{FV} (\text{€}) \\ e_{cSi}^{FV} \end{pmatrix} \vec{z}_{cSi}^{FV}$$

Dalle relazioni (4), (5) e (6) avremo i seguenti indicatori:

Indicatore per unità di energia [kWh]:

$$I_{ESi}^{FV} = s_{1Si}^{FV} \vec{x}_{cSi}^{FV} + m_{1Si}^{FV} \vec{p}_{cSi}^{FV} \quad (4')$$

Indicatore per unità di produzione rinnovabile [kg]:

$$I_{PSi}^{FV} = (s_{2Si}^{FV} + s_{3Si}^{FV}) \vec{x}_{cSi}^{FV} + (w_{2Si}^{FV} + m_{2Si}^{FV}) \vec{p}_{cSi}^{FV} \quad (5')$$

Indicatore per unità di costi sostenuti nell'intero ciclo [€]:

$$I_{CSi}^{FV} = s_{5Si}^{FV} \vec{x}_{cSi}^{FV} + (w_{3Si}^{FV} + m_{3Si}^{FV}) \vec{p}_{cSi}^{FV} + e_{5Si}^{FV} \vec{z}_{cSi}^{FV} \quad (6')$$

Per determinare il valore degli indicatori, consideriamo un impianto FV da 3kWp realizzato con moduli c-Si, alla latitudine di Roma. Avremo come dati di ingresso:

- energia prodotta alla latitudine dell'impianto: 1.340 kWh/anno per KWP installato;

- superficie occupata: se 220 Wp occupano circa 1 m², l'impianto complessivamente occuperà una superficie di circa 13,6 m²;
 - peso: se 220 Wp pesano circa 20Kg, l'impianto complessivamente peserà 272,72 kg;
 - costi per riciclo (c-Si): 135 €/t³;
 - energia richiesta per riciclo 1,1 kWh/Kg;
- Si ottengono così gli andamenti degli indicatori ambientali rispetto alla potenza dell'impianto FV in esame:

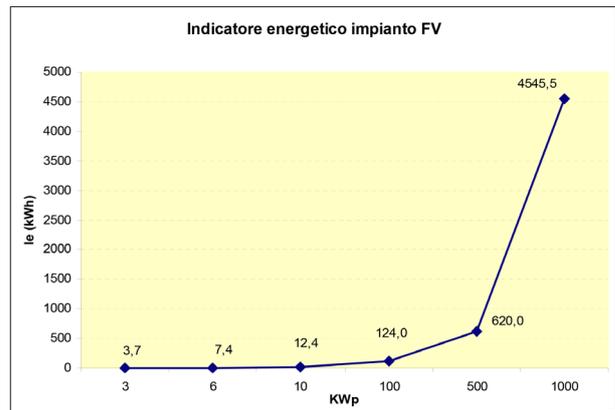


FIGURA 2 - Andamento dell'indicatore energetico in funzione della potenza

REFERENCES

1. Orecchini F, Naso V (2003) *La società no oil (No oil society)*. Orme Editor, Milan, Italy.
2. United nations World Commission on Enviroment and Development (1987) *Brundtland report*. United Nations Publications, New York
3. A. Franco, N. Giannini; *Perspectives for the use of biomass as fuel in combined cycle power plants*. *International Journal of Thermal Sciences* (44) 2005 pagg. 163-177.
4. G. Riva; *Vinacce esauste e loro componenti quali biomasse rispondenti ai requisiti del DPCM 8.3.2002 Comitato Termotecnico Italiano - Energia ed Ambiente*. Milano, luglio 2005
5. P. McKendry; *Energy production from biomass: overview of biomass*. *Bio-source Technology* (83) 2002 pagg. 37-46.
6. P. McKendry; *Energy production from biomass: gasification technologies*. *Bio-source Technology* (83) 2002 pagg. 55-63.
7. P. McKendry; *Energy production from biomass: conversion technologies*. *Bio-source Technology* (83) 2002 pagg. 47-54.
8. P.H. Steinwall; *Integration of biomass gasification and evaporative gas turbine cycles*. *Energy Conversion and Management* vol. 38, 1997 pagg. 1665-1670.
9. ISO, 1997. *Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework (ISO 14040:1997)*. International Standard Organization, June 1997, Brussels. pp.16.
10. ISO, 1998. *Environmental management - Life cycle assessment - Goal and scope definition and inventory analysis (ISO 14041:1998)*.
11. International Standard Organization, October 1998, Brussels. pp. 27. *ISO, Environmental Management - Life Cycle Assessment, International Standardisation Office, Norms 14040 - 14043, 1997-2000.*

⁷ Study on the development of a take back and recovery system for photovoltaic products funded by Bmu - november 2007