

LCA applicata alle tecnologie alimentate da energia solare: peculiarità e limiti metodologici

Autori: Maurizio Cellura¹, Sonia Longo¹, Marina Mistretta²

¹Dipartimento dell'Energia – Università di Palermo

¹Dipartimento Patrimonio Architettonico e Urbanistico – Università Mediterranea di Reggio Calabria

Email Coordinatore: mcellura@dream.unipa.it

Abstract

La Life Cycle Assessment (LCA) rappresenta una metodologia valida ed affidabile per la valutazione degli impatti energetico-ambientali connessi al ciclo di vita delle tecnologie alimentate da fonti rinnovabili di energia. Il lavoro di seguito presentato focalizza l'attenzione sui sistemi alimentati da energia solare. Gli autori, dopo un'analisi degli studi di letteratura inerenti la LCA applicata ai sistemi solari termici e fotovoltaici, descrivono le principali questioni metodologiche connesse alla valutazione delle prestazioni energetico-ambientali di tali tecnologie.

1. Introduzione

L'impiego delle tecnologie alimentate da fonti rinnovabili di energia (Renewable Energy Technologies – RETs) rappresenta un'opportunità per la riduzione delle emissioni di gas climalteranti della dipendenza da fonti fossili e per la promozione della sicurezza dell'approvvigionamento energetico [Ardente et al., 2009].

L'impiego delle RETs è fondamentale per favorire il *decoupling* tra la crescita economica e il massiccio impiego delle risorse naturali e consentire il passaggio ad un'economia a basse emissioni di carbonio, come evidenziato dalla strategia della Commissione europea "Energia 2020", che mira all'incremento del 20% della quota di energie rinnovabili entro il 2020 [CE, 2011].

Al fine di stimare i reali benefici energetico-ambientali connessi all'utilizzo delle RETs, i progettisti e i decision-makers devono adottare un approccio "life cycle thinking", che consente di valutare le prestazioni delle tecnologie in esame lungo l'intero ciclo di vita, dall'approvvigionamento delle materie prime, alle fasi di installazione, uso, manutenzione e fine vita. In tale contesto, la metodologia Life Cycle Assessment (LCA) rappresenta uno strumento affidabile e di elevata rilevanza scientifica per la definizione dell'eco-profilo delle RETs.

2. LCA dei sistemi solari termici e fotovoltaici

Gli studi di LCA delle tecnologie ad energia solare presenti nella letteratura scientifica risultano spesso di difficile comparazione a causa di differenti assunzioni e scelte metodologiche relative a: definizione dell'Unità Funzionale (UF) e dei confini del sistema, uso di differenti dati di input, modellizzazione delle tecnologie in differenti località e con specifiche condizioni climatiche,

differenti assunzioni sulla vita utile e sul fine vita della tecnologia in esame. Allo scopo di garantire trasparenza, affidabilità e comparabilità dei risultati degli studi di LCA applicata alle RETs è quindi necessario rivolgere particolare attenzione alla comunicazione dei dati e delle informazioni ambientali [Ardente et al., 2009].

Tra gli indici di prestazione energetico-ambientale impiegati per la divulgazione delle informazioni sul ciclo di vita delle RETs, particolarmente interessanti sono alcuni indici di payback energetico ed ambientale, definiti rispettivamente *Energy Payback Time* (E_{PBT}) ed *Emission Payback Time* (EM_{PBT}). L' E_{PBT} rappresenta il tempo di utilizzo di una RET affinché l'energia primaria prodotta uguagli l'energia addizionale spesa per la produzione, installazione, manutenzione e smaltimento dell'impianto [Beccali et al., 2012]. L' EM_{PBT} , ed in particolare il *CO₂ Payback Time* (CO_{2PBT}) rappresenta il tempo necessario di utilizzo di una RET, affinché le emissioni di una sostanza inquinante evitate grazie all'impiego della tecnologia in esame uguagliano gli impatti connessi alla produzione, installazione, manutenzione e smaltimento della stessa [Beccali et al., 2012].

L'analisi di alcuni studi di LCA ha evidenziato che gli indici E_{PBT} e CO_{2PBT} risultano inferiori a 3 anni per i sistemi solari termici [Wagner, 1995; Andresen et al., 2001; Ardente et al., 2005a; Battisti, Corrado, 2005a]. Un'ampia *range* di variazione, tra 1 e 19 anni, è stato invece osservato per gli impianti fotovoltaici, i cui benefici energetico-ambientali dipendono da differenti variabili, tra cui: la tecnologia delle celle fotovoltaiche, le condizioni climatiche del luogo in cui viene installato l'impianto, la presenza/assenza di un sistema ad inseguimento solare o di un sistema di accumulo (configurazione *stand alone*) [Fthenakis, Anselma, 2006; Garcia-Valverde et al., 2009; Bayod-Rùjula et al., 2011; Laleman et al., 2011]. Indici di payback inferiori a 1 anno sono stati stimati per i sistemi termici-fotovoltaici a concentrazione [Cellura et al., 2011a].

3. LCA applicata alle tecnologie ad energia solare: questioni metodologiche

L'analisi degli studi di letteratura della LCA applicata alle RETs ha evidenziato che i risultati possono essere caratterizzati da un'elevata variabilità, a causa sia delle differenti proprietà dei sistemi in esame, sia di differenti approcci metodologici adottati nell'analisi. Sebbene la metodologia LCA sia regolata dagli standard della serie ISO 14040 [ISO, 2006a; ISO, 2006b], gli analisti, al fine di stimare le prestazioni energetico-ambientali delle RETs devono affrontare varie questioni metodologiche [Cellura et al., 2011b], alcune delle quali sono descritte di seguito.

3.1. Definizione dell'Unità Funzionale

L'UF è un importante parametro di riferimento per la raccolta dei dati e per la comparabilità di differenti studi riferiti ad una stessa categoria di prodotto.

Tuttavia, la scelta dell'UF negli studi di LCA non è sempre immediata. Ad esempio, per i collettori solari termici e fotovoltaici, possono essere selezionate tre differenti UF [Ardente et al., 2005b]:

- Unità di area del pannello. Questa scelta può influenzare la presentazione dei risultati dell'analisi, in quanto all'aumentare della superficie del collettore diminuiscono gli impatti specifici.
- Unità di impianto. L'utilizzo di questa UF non consente di comparare gli impatti di differenti tecnologie (ad esempio collettori solari con impianto a circolazione naturale e con impianto a circolazione forzata, pannelli fotovoltaici con differenti tipologie di celle).
- Unità di energia prodotta. Questa UF dipende dalle assunzioni sulla fase d'uso della tecnologia ed in particolare dalle caratteristiche meteorologiche del luogo in cui la tecnologia viene installata. L'analisi della letteratura scientifica mostra che quest'ultima UF è quella maggiormente utilizzata. Spesso infatti gli impatti vengono riferiti all'unità di kWh termico o elettrico prodotto dall'impianto.

3.2. Variabilità geografica

La variabilità geografica è, probabilmente, la principale fonte di incertezza nei risultati degli studi di LCA applicata alle RETs, per differenti motivi.

Innanzitutto, l'output energetico dei sistemi solari (elettricità o calore) dipende dall'input di energia solare e, quindi, dalla localizzazione dell'impianto. Gli analisti dovrebbero, quindi, descrivere in dettaglio le ipotesi riguardanti la fase d'uso della tecnologia in esame, soprattutto quando l'eco-profilo della stessa è riferito all'unità di energia prodotta. Durante lo studio dovrebbe inoltre essere effettuata un'analisi di sensibilità, per stimare la variazione di energia prodotta in differenti condizioni climatiche. A tal proposito, è stato condotto un interessante studio sui benefici energetico-ambientali connessi all'applicazione della tecnologia del solar cooling [Beccali et al. 2012]. Gli autori hanno mostrato l'importanza di una dettagliata analisi della fase d'uso della tecnologia, al fine di ottenere risultati affidabili sui reali benefici connessi all'applicazione della stessa. Tali benefici, infatti, sono fortemente influenzati sia dalle condizioni climatiche del sito di installazione che dal mix energetico del Paese in cui la tecnologia viene impiegata. In dettaglio si è rilevato che minore è l'aliquota di energia prodotta da fonti rinnovabili nel mix energetico di un Paese, maggiore è la "convenienza" dell'uso delle RETs in sostituzione di impianti convenzionali.

Infine, la variabilità geografica influenza gli impatti connessi all'approvvigionamento delle materie prime ed alla fabbricazione delle RETs. Tali impatti dipendono infatti dall'aliquota di energia rinnovabile impiegata nel mix energetico del luogo in cui viene prodotto l'impianto. Tuttavia, gli eco-profilo delle materie prime impiegate nella produzione delle RETs e del mix energetico in cui viene prodotto l'impianto sono talvolta mancanti o incompleti. Per fronteggiare tali problemi, gli analisti spesso utilizzano dati medi tratti da

database di inventario o da studi di letteratura, che possono non essere rappresentativi del sistema in esame.

3.3. Qualità dei dati

L'affidabilità e la validità degli studi di LCA è connessa all'impiego di dati di input caratterizzati da un elevato livello di qualità e completezza, che tuttavia non sono sempre disponibili. L'utilizzo di dati di qualità non adeguata può infatti indurre ad una identificazione scientificamente poco affidabile delle criticità ambientali del processo indagato [Ardente et al., 2008]. La qualità dei dati può essere espressa attraverso una serie di informazioni riguardanti i seguenti aspetti [ISO, 2006b]: rappresentatività temporale; rappresentatività geografica; rappresentatività tecnologica; precisione, completezza e rappresentatività statistica; consistenza e riproducibilità dei metodi utilizzati all'interno dell'LCA; fonti dei dati e loro significatività; incertezza dell'informazione.

I problemi connessi alla disponibilità di dati caratterizzati da un elevato livello di qualità influenzano generalmente tutti gli studi di LCA, ma essi risultano particolarmente significativi per le tecnologie che utilizzano materie prime rare, i cui eco-profili non sono generalmente disponibili nei database di inventario.

Un'attenzione particolare dovrebbe essere rivolta alle 14 "materie prime critiche" (critical raw materials – CRMs) identificate di recente dalla Commissione Europea. Alcune di queste (ad esempio l'antimonio, l'indio e il gallio) sono comunemente usate per produrre le celle fotovoltaiche [EC, 2010], mentre altre (come il berillio, il germanio, la grafite, il platino e il tantalio) sono utilizzate per i componenti elettronici inclusi negli impianti. Un'indagine riguardante la disponibilità di dati di inventario delle CRMs, ha evidenziato che:

- Vi sono pochissimi studi sull'eco-profilo delle CRMs, con la sola eccezione del magnesio.
- Sui database specializzati per gli inventari di ciclo di vita [Ecoinvent Centre, 2011; PE Europe GMBH, 2011] sono disponibili informazioni su alcune CRMs, ad eccezione dell'antimonio, del berillio, del germanio, del niobio e del tungsteno.
- I dati disponibili sono generalmente caratterizzati da un basso livello di qualità. Essi, infatti, spesso si riferiscono a studi non recenti o a stime approssimative.
- In molti casi i dati di inventario delle CRMs sono confidenziali e la loro divulgazione è intenzionalmente limitata.

La mancanza di dati sulle CRMs potrebbe rappresentare un limite per lo sviluppo di futuri studi sulle RETs e, in particolare, sugli impianti fotovoltaici.

Analoghe considerazioni possono essere fatte per altre materie prime potenzialmente rilevanti poiché largamente impiegate nelle tecnologie rinnovabili emergenti (ad esempio l'uso del tellurio nelle celle fotovoltaiche

CdTe e in altri componenti elettronici) e di cui non si hanno dati affidabili sugli impatti energetico-ambientali.

3.4. Periodo di riferimento dell'analisi

Un altro parametro significativo negli studi di LCA delle RETs è il periodo di riferimento dell'analisi, coincidente con la vita utile della tecnologia, che per gli impianti solari è comunemente assunta pari a circa 20 – 30 anni.

Poiché differenti assunzioni sulla vita utile possono sensibilmente influenzare i risultati finali della LCA, è sempre consigliabile effettuare un'analisi di sensibilità.

Il periodo di riferimento considerato, inoltre, influenza il decadimento delle prestazioni dei sistemi, dovuta al logorio dei componenti. Tale decadimento dovrebbe essere stimato, per quanto possibile, attraverso test e/o simulazioni.

È opportuno evidenziare che l'incertezza dell'analisi è tanto maggiore quanto più lungo è il periodo di vita utile preso in esame. Questa considerazione è particolarmente rilevante per le RETs caratterizzate da veloci cambiamenti tecnologici, come ad esempio gli impianti fotovoltaici la cui tecnologia può risultare obsoleta già dopo pochi anni.

3.5. Approccio metodologico: attribuzionale e consequenziale

Nella redazione di uno studio LCA si possono seguire due differenti tipi di approccio: attribuzionale e consequenziale [Weidema, 2003].

Il primo descrive i potenziali impatti energetico-ambientali di un prodotto/servizio nel suo intero ciclo di vita; il secondo è essenzialmente finalizzato ad identificare i potenziali effetti indotti da scenari previsionali a medio e lungo termine sulle dinamiche di mercato e sui modelli di comportamento dei consumatori.

Nell'ambito delle RETs l'importanza di tale scelta è ancor più evidente, in virtù delle profonde ripercussioni che l'impiego delle tecnologie rinnovabili induce su altre filiere produttive in termini ambientali, economici e sociali.

La scelta del tipo di approccio da utilizzare dipende comunque dall'obiettivo della LCA. Ad esempio, nel caso degli impianti fotovoltaici, gli obiettivi dello studio possono essere i seguenti [Anselma et al. ,2009]:

- stimare gli impatti ambientali di un impianto già installato (analisi dello stato attuale – approccio attribuzionale);
- comparazione di sistemi fotovoltaici o di tecnologie per la produzione di energia elettrica (analisi previsionale di breve periodo – approccio attribuzionale/consequenziale);
- politiche energetiche di lungo termine, comparazione con sistemi fotovoltaici che saranno sviluppati in futuro o con tecnologie future per la produzione di elettricità (analisi previsionale di lungo periodo – approccio consequenziale).

3.6. Trattamenti di fine vita

L'analisi del fine vita negli studi di LCA è generalmente un lavoro complesso, affetto da diverse incertezze. È infatti difficile stimare, considerato l'attuale livello di conoscenza, come gli impianti solari termici e fotovoltaici saranno smaltiti tra 20 o 30 anni.

Attualmente sono stati effettuati solo pochi studi relativi allo smaltimento/riciclo degli impianti termici e fotovoltaici. In particolare, i processi di riciclo di tali tecnologie non sono ancora maturi o non sufficientemente diffusi. Inoltre, quando viene effettuato un processo di riciclo, i materiali riciclati dovrebbero essere considerati come co-prodotti del sistema e gli impatti ambientali dovrebbero essere coerentemente allocati¹.

Le difficoltà nell'analisi del fine vita delle RETs sono evidenti, anche considerando il fatto che gli impianti solari, in particolare quelli fotovoltaici, sono costituiti da componenti complessi difficili da riciclare [Fthenakis, 2000] e incorporano differenti sostanze tossiche (come il cadmio e l'arsenico) che dovrebbero essere trattate con attenzione [Menezes, 2001].

Molti degli studi di LCA sugli impianti solari escludono l'analisi degli scenari di fine vita (o semplicemente assumono uno smaltimento in discarica dell'impianto senza considerare alcun processo di recupero), poiché le tecnologie solari termiche e fotovoltaiche sono caratterizzate da un lungo ciclo di vita e i dati di inventario attualmente disponibili sul fine vita sono datati, riferiti a differenti contesti geografici e spesso non sono rappresentativi del sistema analizzato [Battisti, Corrado, 2005b]. Alcuni esempi di introduzione dei processi di recupero nella LCA di impianti fotovoltaici sono stati recentemente pubblicati [McDonald, Pearce, 2010; Zhong et al., 2011]. Tuttavia, gli scenari di riciclo sono stati focalizzati solo sul recupero di componenti quali l'acciaio, l'alluminio e la plastica o su altri materiali caratterizzati da un elevato valore economico.

Poche informazioni, invece, sono attualmente disponibili per gli impatti e i benefici connessi al recupero delle CRM o di sostanze pericolose.

Sulla base delle precedenti considerazioni il fine vita risulta ancora una delle fasi più incerte nella LCA delle RETs. Si raccomanda pertanto agli analisti di investigare attentamente differenti scenari di smaltimento/riciclo tramite un'analisi di sensibilità e di riferirsi, per quanto possibile, ad informazioni aggiornate ed attendibili fornite dalle imprese che si occupano dei processi di fine vita.

4. Conclusioni

L'analisi degli studi di letteratura riguardanti la LCA applicata ai sistemi solari termici e fotovoltaici ha evidenziato che gli indici E_{PBT} e CO_{2PBT} risultano inferiori a 3 anni per la prima tecnologia e variabili da 1 a 19 anni per la seconda.

¹ Per ulteriori dettagli sulle procedure di allocazione, è possibile consultare [EC-JRC-IES, 2010]

L'elevato range di variabilità dei risultati è dovuto a differenti approcci metodologici adottati nelle analisi (UF, confini del sistema, ecc.), alla variabilità geografica dei dati, alla disponibilità e qualità dei dati, alle diverse assunzioni sulla vita utile ed ai diversi trattamenti di fine vita.

Una corretta valutazione dei benefici energetico-ambientali delle RETs deve quindi essere effettuata attraverso l'identificazione delle criticità metodologiche della LCA, analizzando in particolare l'incertezza dei dati e stimando la variabilità dei risultati mediante l'applicazione di un'analisi di sensibilità.

In conclusione, al fine di ottenere dei reali benefici energetico-ambientali connessi all'uso delle RETs, è fondamentale effettuare una progettazione accurata dell'impianto, supportata da simulazioni affidabili e dettagliate sulle condizioni di esercizio, le quali influenzano in maniera rilevante le prestazioni energetico-ambientali della tecnologia in esame.

È necessario, inoltre, che la fase di progettazione degli impianti sia effettuata da un gruppo di lavoro interdisciplinare, che coinvolga anche un analista LCA in grado di orientare l'eco-design delle RETs e di garantire dei risultati scientificamente affidabili lungo l'intero Life Cycle Project.

5. Bibliografia

Andresen, I, Thyholt, M, Geissler, S, Rappl, B 2001, 'Sustainable Use of Aluminium in Buildings. Overview of Research Studies', European Aluminium Association.

Ardente, F, Beccali, G, Cellura, M, Lo Brano, V 2005a, 'Life cycle assessment of a solar thermal collector', *Renewable Energy*, vol.30, pp. 1031-1054.

Ardente, F, Beccali, G, Cellura, M, Lo Brano, V 2005b, 'Life cycle assessment of a solar thermal collector: sensitivity analysis, energy and environmental balances', *Renewable Energy*, vol.30, pp. 109-130.

Ardente, F, Beccali, G, Cellura, M, Longo, S, Marvuglia, A 2008, 'Requisiti di qualità dei dati negli studi di life cycle assessment (LCA) e nelle dichiarazioni ambientali di prodotto (DAP)', presentato all' 8° Congresso Nazionale Ciriap, Perugia, 4-5 Aprile.

Ardente, F, Cellura, M, Longo, S 2009, 'LCA applicata alle tecnologie alimentate da fonti rinnovabili di energia', articolo presentato al Convegno scientifico della Rete Italiana LCA, Palermo, 11-12 June.

Battisti, R, Corrado, A 2005a, 'Environmental assessment of solar thermal collectors with integrated water storage', *Journal of Cleaner Production*, vol.13, pp. 1295-1300.

Battisti, R, Corrado, A 2005b, 'Evaluation of technical improvements of photovoltaic systems through life cycle assessment methodology', *Energy*, vol. 30, pp. 952-967.

Bayod-Rùjula, A, Lorente-Lafuente, AM, Cirez-Oto, F 2011, 'Environmental assessment of grid connected photovoltaic plants with 2-axis tracking versus fixed module', *Energy*, vol.36, pp. 3148-3158.

Beccali, M, Cellura, M, Longo, S, Nocke, B, Finocchiaro, P 2012, 'LCA of a solar heating and cooling system equipped with a small water-ammonia absorption chiller', *Solar Energy*, DOI: 10.1016/j.solener.2012.02.010, in press.

- CE – Commissione Europea, 2011, 'Energia 2020 Una strategia per un'energia competitiva, sostenibile e sicura, SEC (2010) 1346'.
- Cellura, M, Grippaldi, V, Lo Brano, V, Longo S, Mistretta, M 2011a, 'Life cycle assessment of a solar PV/T concentrator system', paper presented to Life Cycle Management Conference LCM 2011, Session: LCM in the Energy Sector II, Berlin, 28-31 August.
- Cellura, M, Longo, S, Mistretta, M 2011b, 'Sensitivity analysis to quantify uncertainty in Life Cycle Assessment: the case study of an Italian tile', *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, vol.15, Issue 9, pp. 4697-4705.
- EC - European Commission, 2010, 'Report of the Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials'.
- EC - JRC - IES - European Commission, 2010, 'International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - General guide for Life Cycle Assessment - Detailed guidance', First edition, EUR 24708 EN, Luxembourg, Publications Office of the European Union.
- Ecoinvent Centre, 2011, 'Database ecoinvent data v2.2', Swiss Centre for Life Cycle Inventories (www.ecoinvent.ch/).
- Fthenakis, MV 2000, 'End-of-life management and recycling of PV modules', *Energy Policy*, vol. 28, pp. 1051-1058.
- Fthenakis, V, Anselma, E 2006, 'Photovoltaics energy payback times, greenhouse gas emissions and external costs: 2004 - early 2005 status', *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol.14, pp. 275–280.
- García-Valverde, R, Miguel, C, Martínez-Bèjar, R, Urbina, A 2009, 'Life cycle assessment study of a 4.2 kWp stand-alone photovoltaic system', *Solar Energy*, vol. 83, pp. 1434-1445.
- Alsema, E, Fraile, D, Frischknecht, R, Fthenakis, V, Held, M, Kim, HC, Pölz, W, Raugei, M, de Wild Scholten, M 2009, 'Methodology Guidelines on Life Cycle Assessment of Photovoltaic Electricity', International Energy Agency - Photovoltaic Power Systems Programme, Report IEA-PVPS T12-01:2009
- ISO - International Organization for Standardization, 2006a, 'ISO 14040 - Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework'.
- ISO - International Organization for Standardization, 2006b, 'ISO 14044 - Environmental management: life cycle assessment. Requirements and guidelines'.
- Laleman, R, Albrecht, J, Dewulf, J 2011, 'Life Cycle Analysis to estimate the environmental impact of residential photovoltaic systems in regions with a low solar irradiation', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol.15, pp. 267-281.
- McDonald, NC, Pearce, JM 2010, 'Producer responsibility and recycling solar photovoltaic modules', *Energy Policy*, vol. 38, pp. 7041–7047.
- Menezes, S 2001, 'Electrochemical approach for removal, separation and retrieval of CdTe and CdS films from PV module waste', *Thin Solid Films*, vol. 387, pp. 175-178.
- PE Europe GMBH, 2011, 'Software GaBi, ver. 4.4', (www.gabi-software.com/).
- Wagner, HJ 1995, 'Ermittlung des Primaerenergieaufwandes und Abschaetzung der Emissionen zur Herstellung und zum Betrieb von ausgewaehlten Absorberanlagen zur Schimmbadwasserwaermung und von Solarkollektoranlagen zur Brauchwassererwaermung', VDI Berichte, Reihe 6, n.325.
- Weidema, BP 2003, 'Market information in life cycle assessment', Danish Environment Protection Agency, Copenhagen, Denmark, pp. 1–147.
- Zhong, ZW, Song, B, Loh, PE 2011, 'LCAs of a polycrystalline photovoltaic module and a wind turbine', *Renewable Energy*, vol.36, pp. 2227-2237.