

Analisi ambientale ed economica degli scenari di fine vita degli impianti fotovoltaici ed eolici

Carlo ambrosino¹

¹Affiliation not available

Abstract

Le risorse del pianeta sono limitate dato che la produzione di energia avviene attraverso fonti non rinnovabili che utilizzano risorse naturali come i Combustibili fossili, Carbone, Petrolio, Gas naturali, Uranio e Plutonio. Esse si generano molto lentamente, perciò una volta terminate non saranno nuovamente disponibili in tempi brevi. L'utilizzo di tali fonti porta con sé problemi di carattere ambientale come l'incremento delle emissioni di CO₂, assottigliamento dell'ozonosfera, cambiamenti climatici e la produzione di scorie radioattive con conseguenze sulla salute. Negli ultimi anni è stata prestata particolare attenzione alle energie alternative. Ad oggi, l'energia eolica e solare sono le principali fonti di energia rinnovabile su cui sono stati effettuati enormi investimenti negli ultimi anni. Tuttavia, il ciclo di vita di questi impianti è stimato in media circa 20 anni e molti di loro non sono più funzionali. Tali impianti devono essere smaltiti o migliorati sostituendo e riciclando le varie componenti usurate, spingendoci, sempre di più, nel verso dei principi dell'economia circolare. L'articolo consiste nell'illustrare un'analisi economica-ambientale svolta su alcuni impianti eolici e solari, confrontandoli fra di loro. Si descrivono i vari scenari possibili, in cui sono stati applicati i principi del riutilizzo e del riciclo.

Introduzione

La carenza di combustibili fossili e la crisi petrolifera globale stanno portando molte autorità energetiche nazionali a passare dai combustibili tradizionali ad altri rinnovabili. D'altra parte, in diversi paesi occidentali - a causa di una crescente consapevolezza ambientale - l'accettazione da parte del pubblico delle centrali elettriche tradizionali (ad esempio, carbone o olio combustibile) è in costante diminuzione, principalmente a causa delle loro significative pressioni ambientali. Le attività dei decisori devono essere supportate da strumenti oggettivi, che devono essere progettati per essere in grado di selezionare la migliore alternativa al fine di raggiungere alcuni obiettivi prefissati ¹. L'estrazione e la trasformazione delle risorse contribuisce a circa la metà delle emissioni totali di gas serra e oltre il 90% alla perdita di biodiversità e stress idrico. In questo contesto, la Commissione Europea si è impegnata a raggiungere l'obiettivo della neutralità climatica entro il 2050 attraverso l'emissione del "Green Deal" (Green Deal europeo), necessario per migliorare l'efficienza delle risorse e garantire così la sostenibilità ambientale e limitare i cambiamenti climatici. I principali obiettivi del Green Deal europeo sono l'uso efficiente delle risorse attraverso la transizione verso un'economia pulita e circolare, il ripristino della biodiversità e la riduzione dell'inquinamento ²³.

Negli ultimi 30 anni si è visto come il mondo si sta orientando sempre di più verso l'utilizzo di energie rinnovabili e sostenibili per raggiungere gli obiettivi dello **Sviluppo Sostenibile**. La politica di utilizzo del suolo urbano deve perseguire obiettivi di sviluppo sostenibile⁴. Questi obiettivi non sono solo economici ma anche sociali, culturali e ambientali. In questi ultimi anni l'evoluzione della transizione energetica è avvenuta in maniera più significativa rispetto agli anni precedenti, di fatto, le **energie rinnovabili** si sono spostate al centro del panorama energetico globale. Negli ultimi 20 anni si è visto dai vari report **IRENA** e **IEA** come l'eolico e il solare hanno decisamente

rubato la scena a tutte le altre tecnologie rinnovabili; insieme hanno realizzato il 90% del totale installato nel 2020.

Lo studio ha individuato la capacità, in termini di GW, di tutte le fonti energetiche installate, in particolare dell'eolico e del solare.

Il Fotovoltaico

Uno studio presentato dall'articolo ⁵ illustra i materiali coinvolti nelle quattro tecnologie fotovoltaiche più comuni: Silicio Cristallino (c-Si), Silicio amorfo (a-Si), Cadmio-Tellurio (CdTe), Diselenurio-Indio-Rame-Gallio (CIGIS). Il pannello fotovoltaico più comune e più venduto sul mercato utilizza celle in silicio cristallino (c-Si). La composizione standard di un pannello è costituita da: una cornice in alluminio, una lastra di vetro temprato che funge da protezione meccanica anteriore per le celle fotovoltaiche, un sottile strato di Etilene Vinile Acetato (indicato con la sigla EVA), la cui funzione è quella di fissare le celle al vetro di copertura e garantire un buon isolamento dielettrico, celle in silicio, un secondo strato di EVA grazie al quale le celle vengono fissate alla chiusura, una *superficie posteriore di supporto*, costituita da un rivestimento sintetico più economico come il Polivinilfluoruro (PVF), commercialmente noto come Tedlar. Nello studio prima citato, il riciclo di silicio, indio, gallio e altre materie prime da moduli fotovoltaici (vetro, alluminio, rame, argento, germanio ed altri) ha un alto potenziale: oltre il 95% viene indicato come tasso di riciclo raggiungibile, senza perdite economiche o addirittura come profitto ⁵.

L' Eolico

I dispositivi utilizzati per la produzione di energia dal vento, detti usualmente “aerogeneratori” o “turbine eoliche”, sono classificate in base all'orientamento dell'asse del rotore in due macrocategorie: asse orizzontale ed asse verticale. Una turbina eolica ad asse orizzontale della VESTAS è

composta da vari materiali a seconda dei modelli e dai produttori nonché dalle esigenze del cliente. Per gli impianti Onshore (da terra), viene utilizzato cemento armato in acciaio per le fondazioni, mentre per gli Offshore monopile in acciaio.

Gli inventari aggregati per i materiali infrastrutturali (turbine, fondazioni, sottostazioni, cablaggio) sono presentati nella tabella 2 dell'articolo di ⁶ prendendo in riferimento un impianto onshore (G2&D3) ed uno offshore (G4&D6). Nei nomi degli impianti la lettera corrisponde alle tecnologie del generatore a trasmissione diretta (D) e orientata (G) e al numero di capacità delle turbine (MW).

Il Fine ciclo vita

Vengono ipotizzati quattro scenari per il fine vita del fotovoltaico e dell' eolico:

- **SMONTAGGIO:** In quest'attività avvengono le operazioni di smontaggio dei moduli fotovoltaici, degli inverter, dei quadri elettrici, dei trasformatori e dei cavi. Negli aerogeneratori, invece, tale operazione richiede l'impiego di gru, strade e piazzole per poi essere demolite nelle fasi successive e ripristinare il terreno allo stato vegetativo originario.
- **TRASPORTO:** per il fotovoltaico si sono ipotizzati 2 percorsi con l'impiego di automezzi pesanti con capacità pari a 16 tonnellate: il primo per i centri di raccolta RAEE con una distanza pari a 50 km, il secondo per i centri di trattamento di riciclo e recupero. Per l'eolico si sono ipotizzati 3 percorsi con l'impiego di automezzi pesanti superiori a 24 tonnellate: per discarica con una distanza pari a 50 km; per impianto di rigenerazione con distanza pari a 100 km; per Centro di riciclo e recupero con una distanza pari a 100 km.
- **RIUSO:** per il fotovoltaico le attività di riuso riguardano l'upgrading di una quota dei pannelli dismessi nel periodo considerato, che si assume nella percentuale del 5%; per l'eolico la rigenerazione delle turbine.
- **RICICLO e RECUPERO:** per il fotovoltaico si è considerato il processo FRELP che è un

trattamento upcycle ossia ad elevato contenuto tecnologico, in grado di garantire output di maggior valore. Per l'eolico si sono sviluppate due ipotesi: la prima prevede il riciclo di materiali come acciaio, alluminio e rame (92% di recupero) e la discarica e l'incenerimento, in uguali percentuali, per quanto riguarda le pale eoliche ([Vestas 2019](#)); la seconda ipotesi prevede il riciclo e il recupero di tutti i materiali anche quelli delle lame eoliche previo trattamento meccanico e termico ⁷.

Per ogni scenario, si sono valutati gli aspetti:

- **Sociali:** è stata utilizzata la metodologia dell'Employment Factor. Tale stima utilizza il coefficiente EF, che misura l'intensità occupazionale della tecnologia, espressa nel numero di occupati all'anno per MW installato. Ad Ogni scenario corrisponde a un coefficiente diverso ([ENEA](#)).
- **Economici:** tali effetti nel Fotovoltaico vengono valutati sulla base del documento ENEA e di due piani di dismissione relativi ad un impianto fotovoltaico da 19,22 MWp sito nel comune di Ferrandina (Matera) e ad un altro da 2,19 MWp sito nel comune di Collesalveti (Livorno). Per la turbina eolica, invece, è stato considerato il piano di dismissione del parco eolico da 71,4 MW sito nel comune di Montemilone e di un altro da 45 MW nel comune di VENOSA. Il modello della turbina VESTAS VP-150 da 4,2 MW è stato preso come riferimento per lo studio.
- **Ambientali:** sono stati presi in considerazione i gas climalteranti anidride carbonica (CO₂), particolato (PM_{2,5}) e composti organici volatili (NMVOC), rispettivamente per le categorie di pressioni ambientali cambiamento climatico, formazione di particolato, formazione di fotochimica dell'ozono. Ci si è riferiti ai dati ISPRA SINANET per le emissioni nella fase di trasporto, mentre per le fasi di trattamento e di smontaggio sono state utilizzate dati di letteratura dagli articoli ^{8 9101112}.

Sintesi fine vita del fotovoltaico

Si riporta l'esito della valutazione complessiva:

- **Aspetto sociale:** il maggior contributo è dato dal riuso (1,47 dipendenti/MW), e dal trasporto (0,98 dipendenti/MW).
- **Aspetto Economico:** all'interno dell'ipotesi qui considerata, lo scenario con i ricavi più elevati è quello della fase di riuso e rigenerazione che contribuirebbe in misura significativa a fornire il maggior contributo (236.476 /MW), seguito dai ricavi della vendita di materiali riciclati (21.207 /MW), considerando anche i sistemi di trattamento più innovativi e performanti che consentono alte percentuali di recupero e con un certo grado di purezza dei materiali recuperati. Lo scenario più costoso è lo smontaggio dei pannelli fotovoltaici, che si stima con costi di circa 29.454 /MW, dovuti alle quote dei salari dei lavoratori e al costo delle discariche, seguito dal trasporto a causa del gran numero di carichi di autocarri pesanti (12.582 /MW).
- **Aspetto Ambientale:** la maggior parte dell'impatto del fine vita è dovuto alle operazioni di trasporto e ai trattamenti di riciclo che consistono in incenerimento e recupero dei metalli. In generale, gli impatti di un processo di riciclaggio in upcycle sono inferiori rispetto ai processi di trattamento generici (incenerimento, discarica), per l'esaurimento abiotico (minerali), per il recupero di materiali importanti come silicio metallico, rame e argento e per il risparmio energetico.

Sintesi fine vita dell' Eolico

Si riporta l'esito della valutazione complessiva dei tre effetti relativi al fine vita di una turbina eolica Vestas V-150 da 4,2 MW, nonostante l'analisi abbia diversi elementi di incertezza.

- **Aspetto Sociale:** il maggior contributo è dato dallo smontaggio (18 dipendenti/turbina), seguito dal processo di riciclaggio (18 dipendenti/turbina) e dal trasporto (16 dipendenti/turbina).
- **Aspetto Economico:** lo scenario in cui vengono generati i ricavi è quello del riutilizzo per l'eolico, dovuto alla vendita di turbine rigenerate, per un guadagno di 624.000 /MW. Lo scenario più costoso è lo smontaggio del parco eolico, in cui si stimano costi di circa 165.964 /MW, a causa di più voci, seguito dal trasporto (9.919 /MW) e dal riciclaggio (7.836 /MW).
- **Aspetto Ambientale:** la maggior parte dell'impatto della fase di dismissione è dovuto alle operazioni di trasporto, e di riciclo a causa dei processi di incenerimento e recupero dei metalli e soprattutto alla discarica per uso del suolo occupata dalle lame.

Discussione dei risultati

Analizzati gli scenari di fine vita del fotovoltaico e dell'eolico, si sono messi a confronto le due fonti di energia rinnovabile dal punto di vista economico, sociale ed ambientale. Si sono normalizzati i valori **economici** passando da /turbina per l'eolico e da /t per il fotovoltaico, a al MW.

- **Effetti Economici:** lo scenario in cui abbiamo i ricavi è il **riuso** per l'eolico, dovuto dalla vendita delle turbine rigenerate, dove si presenta un guadagno pari a 624.000 /MW contro il guadagno nello stesso scenario per il fotovoltaico, che è pari a 236.476 /MW .

Un altro guadagno nel fotovoltaico lo possiamo trovare nel **trattamento** pari a 21.207 /MW, dovuto al recupero dei materiali e dell'energia.

Lo scenario più costoso, invece, è risultato lo **smontaggio** dell'eolico la cui spesa si aggira sui 165.964 /MW, dovuto alle molteplici voci di costo. Mentre, per il fotovoltaico è pari a 29.454 /MW, dovuto alle sole quote del salario degli operai e al costo di conferimento in discarica.

Relativamente al **trasporto** il costo maggiore si ha per il fotovoltaico , determinato dal gran numero

di carichi degli autocarri pesanti.

Sommando i valori economici degli scenari di fine vita si ha che l'eolico ha un guadagno maggiore del fotovoltaico rispettivamente 440.281/MW e 215.646 /MW.

- **Effetti Sociali:** Allo stesso modo sono stati sommati i numeri degli addetti alle varie fasi, rapportati al MW. Si riscontra che il fine vita dell'eolico necessita di un maggior numero di figure lavorative (14,05 occupati/MW) rispetto al fotovoltaico(2,95 occupati/MW).
- **Effetti Ambientali:** sono stati presi in considerazione i gas climalteranti anidride carbonica (CO₂), particolato(PM_{2,5}) e i composti organici volatili (NMVOC), rispettivamente per le categorie di pressioni ambientali: Cambiamenti climatici, Formazione di particolato, Formazione di fotochimica di Ozono

Per ogni scenario di fine vita è stata stimata la quantità in kg dei singoli gas prima citati, per l'eolico rapportandosi ad una turbina VESTAS VP 150 da 4,2 MW e per il fotovoltaico ad una tonnellata di pannelli.

Dopo aver normalizzato i dati al MW si è passati al confronto in cui lo scenario con la maggiore pressione ambientale è il **trasporto** in entrambi le fonti energetiche, di gran lunga superiore nel fotovoltaico.

Nell'eolico una quota significativa è rappresentata anche dal **trattamento** e in piccola parte ugualmente nel fotovoltaico, relativamente alla formazione fotochimica di ozono.

Sommando i dati relativi a tutti gli scenari si riscontra, come si osserva dai seguenti grafici, che le pressioni ambientali dovute al fine del fotovoltaico (77%) sono di gran lunga superiori a quelle dovute al fine vita dell'eolico (23%).

Conclusioni

Dallo studio dell'analisi del fine vita del fotovoltaico si nota che la gestione del flusso di rifiuti fotovoltaici può essere risolta con il riutilizzo e la rivendita di pannelli usati o rigenerati traendone così anche un profitto. Questo permette di allungare la vita utile del pannello ma rimanda il problema della gestione dei rifiuti. Al giorno d'oggi gli impianti di riciclo sono composti da tecnologie a basso consumo ma con un rendimento delle materie riciclate non abbastanza efficiente da poter promuovere l'economia circolare.

Una soluzione è stata già presentata dalla azienda SASIL con il progetto FRELP, un processo ad alto consumo energetico ma con alti rendimenti del prodotto in uscita. Implementando tale soluzione, ottenendo materiali riciclati più puri è possibile promuovere la produzione di fotovoltaici riciclati per il futuro gestendo così facilmente il flusso di rifiuti del fotovoltaico.

Riguardo al fine vita dell'eolico, i problemi della dismissione sono dovuti principalmente alle dimensioni delle turbine eoliche e ai materiali compositi delle lame che non sono altamente riciclabili. Generalmente le lame eoliche vengono portate ad incenerimento senza trarre benefici ambientali o in discarica, anche se in molti paesi come la Germania è vietato tale processo. Lo smaltimento delle pale eoliche in discarica comporterebbe il riempimento di tutte le discariche e quindi l'occupazione di suoli molto estesi.

La soluzione per evitare questi processi può essere il riutilizzo in altri settori delle lame. Si può separarle tagliandole in varie parti per poi riutilizzarle nel campo dell'edilizia e dell'arredo.

Altre soluzioni può essere il riuso delle fibre di vetro (prodotte dalla macinazione delle lame) che miscelate con il calcestruzzo, aumenterebbe la resistenza meccanica di quest'ultimo.

References

- 1.Scannapieco, D., Naddeo, V. & Belgiorno, V. Sustainable power plants: A support tool for the analysis of alternatives. *Land Use Policy* **36**, 478–484 (2014).
- 2.Naddeo, V. & Korshin, G. Water energy and waste: The great European deal for the environment. *Science of The Total Environment* **764**, 142911 (2021).
- 3.Hasan, S. W., Liu, H., Naddeo, V., Puig, S. & Yip, N. Y. Editorial: Environmental technologies for the sustainable development of the water and energy sectors. *Water Science and Technology* **81**, iii–iv (2020).
- 4.Nesticò, A., Elia, C. & Naddeo, V. Sustainability of urban regeneration projects: Novel selection model based on analytic network process and zero-one goal programming. *Land Use Policy* **99**, 104831 (2020).
- 5.Paiano, A. Photovoltaic waste assessment in Italy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **41**, 99–112 (2015).
- 6.Bonou, A., Laurent, A. & Olsen, S. I. Life cycle assessment of onshore and offshore wind energy- from theory to application. *Applied Energy* **180**, 327–337 (2016).
- 7.Fonte, R. & Xydis, G. Wind turbine blade recycling: An evaluation of the European market potential for recycled composite materials. *Journal of Environmental Management* **287**, 112269 (2021).
- 8.Huang, B. *et al.*. Environmental influence assessment of China’s multi-crystalline silicon (multi-Si) photovoltaic modules considering recycling process. *Solar Energy* **143**, 132–141 (2017).
- 9.Latunussa, C. E. L., Ardente, F., Blengini, G. A. & Mancini, L. Life Cycle Assessment of an innovative recycling process for crystalline silicon photovoltaic panels. *Solar Energy Materials*

and Solar Cells **156**, 101–111 (2016).

10.Ardente, F., Latunussa, C. E. L. & Blengini, G. A. Resource efficient recovery of critical and precious metals from waste silicon PV panel recycling. *Waste Management* **91**, 156–167 (2019).

11.Lunardi, M., Alvarez-Gaitan, J., Bilbao, J. & Corkish, R. Comparative Life Cycle Assessment of End-of-Life Silicon Solar Photovoltaic Modules. *Applied Sciences* **8**, 1396 (2018).

12.Faircloth, C. C., Wagner, K. H., Woodward, K. E., Rakkwamsuk, P. & Gheewala, S. H. The environmental and economic impacts of photovoltaic waste management in Thailand. *Resources Conservation and Recycling* **143**, 260–272 (2019).

Figure Captions

Figure 1. fotovoltaico ed eolico (fonte:voestalpine.com)

Figures



Figure 1: fotovoltaico ed eolico (fonte:voestalpine.com)