

IL FINE VITA DEL FOTOVOLTAICO IN ITALIA

Implicazioni socio-economiche ed ambientali

di Patrizia Corrias, Bruna Felici, Umberto Ciorba



Il fine vita del fotovoltaico in Italia
implicazioni socio-economiche ed ambientali

Patrizia Corrias, Umberto Ciorba, Bruna Felici

2021 ENEA

Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e
lo sviluppo economico sostenibile

ISBN: 978-88-8286-402-6

Copertina: Paola Carabotta

Revisione editoriale: Giuliano Ghisu

Stampa: Laboratorio tecnografico ENEA – Centro Ricerche Frascati

Sommario

Introduzione	7
1. Il settore del fotovoltaico in Italia.....	8
2. Importanza strategica del recupero e riutilizzo delle Materie Prime Seconde. Il valore delle materie tra produzione, import ed export e riciclo.....	12
3. Principali obiettivi e schema di analisi per lo studio del fine vita degli impianti FV	17
3.1 MW installati al 2018 e MW da installare al 2030	18
3.2 Presenza tecnologica e composizione dei pannelli	18
3.3 Dai MW alle tonnellate: quantitativi delle dismissioni al 2050	23
3.4 Recupero delle Materie Prime Seconde: quantitativi e valore	25
4. La fase di dismissione	29
5. Processi di trattamento.....	31
6. Una ipotesi per il trattamento dei pannelli dismessi in Italia	35
6.1 Procedura d'analisi	35
6.2 Aspetti economici, occupazionali, ambientali della fase di dismissione	37
6.2.1 Disinstallazione impianti.....	38
6.2.2 Riutilizzo dei pannelli dismessi.....	39
6.2.3 Trasporto ai centri di trattamento	39
6.2.4 Trattamento: Riciclo e Recupero.....	40
6.3 Un quadro d'insieme.....	42
Conclusioni	44
Allegato 1 - Il metodo dell'Employment Factor per il calcolo dell'occupazione.....	46
Allegato 2 - Elementi di dettaglio degli aspetti economici	48
Allegato 3 - Elementi di dettaglio degli aspetti ambientali	51
Allegato 4 - Il finanziamento del sistema di gestione dei RAEE	53
Bibliografia	55

INDICE FIGURE E TABELLE

FIGURA 1 - POTENZA E NUMEROSITÀ DEGLI IMPIANTI FOTOVOLTAICI IN ITALIA NEL PERIODO 2008-2018.....	8
FIGURA 2- CONFRONTO TRA RAEE DEL 2018 E STIME ANNUE DI RAEE/FV IL DECENNIO 2033-2042	11
FIGURA 3 - EVOLUZIONE PREVISTA DELLA DOMANDA UE PER LE MATERIE PRIME DEL SETTORE FOTOVOLTAICO	12
FIGURA 4 - MATERIE PRIME UTILIZZATE NELLE TECNOLOGIE DEL SOLARE FOTOVOLTAICO	13
FIGURA 5 - SOLARE FV: RISCHI DI APPROVVIGIONAMENTO E ATTORI CHIAVE	14
FIGURA 6 - MATERIE PRIME RICICLABILI (T), IMPORT/EXPORT DI “RIFIUTI” E SCARTI DA E PER L’ITALIA	15
FIGURA 7 - SCHEMA DI ANALISI PER LO STUDIO DEL FINE VITA DEGLI IMPIANTI FOTOVOLTAICI	17
FIGURA 8 - ANDAMENTO DELLA PRESENZA DELLE TECNOLOGIE FOTOVOLTAICHE DAL 1980 AL 2025	19
FIGURA 9 - PRESENZA PERCENTUALE DI VETRO NEI PANNELLI FOTOVOLTAICI NEGLI ANNI 2010, 2014 E 2030.....	21
FIGURA 10 - VARIAZIONE COMPOSIZIONE PERCENTUALE DELLA MASSA TOTALE DEL PANNELLO AL C-Si	21
FIGURA 11 - VARIAZIONE COMPOSIZIONE PERCENTUALE DELLA MASSA TOTALE DEL PANNELLO CdTe	22
FIGURA 12 - VARIAZIONE COMPOSIZIONE PERCENTUALE DELLA MASSA TOTALE DEL PANNELLO CIGS	22
FIGURA 13 - PROIEZIONE TEMPORALE DEL RAPPORTO PESO/POTENZA DEL PANNELLO PV	24
FIGURA 14 - COMPOSIZIONE DEI PANNELLI A SILICIO CRISTALLINO (AD ESCLUSIONE DELLA COMPONENTE VETRO)	28
FIGURA 15 - LA CATENA DEL VALORE DEL FOTOVOLTAICO IN OTTICA DI ECONOMIA CIRCOLARE	29
FIGURA 16 - CATENA DEL VALORE DEL FOTOVOLTAICO: LA FASE DI DISMISSIONE	30
FIGURA 17 - DIAGRAMMA DI FLUSSO RELATIVO AL TRATTAMENTO DEI RIFIUTI DA FOTOVOLTAICO	33
FIGURA 18 - CATENA DEL VALORE DELLA TECNOLOGIA DEL FOTOVOLTAICO SILICIO CRISTALLINO.....	35
FIGURA 19 - FASE DI DISMISSIONE DELLA CATENA DEL VALORE FV.....	36
FIGURA 20 - SCHEMA DI ANALISI PER LA VALUTAZIONE ECONOMICA, OCCUPAZIONALE, AMBIENTALE DEGLI IMPIANTI .	37
TABELLA 1 - OBIETTIVI DI CRESCITA DELLA POTENZA (MW) DA FONTE RINNOVABILE AL 2030	9
TABELLA 2 - CONTRIBUTO MATERIE RECUPERATE SULLA DOMANDA DI MATERIE PRIME IN EUROPA: (EOL-RIR)	16
TABELLA 3 - IL FOTOVOLTAICO IN ITALIA: STORICO INSTALLATO E CUMULATO ANNUO (1992-2030)	18
TABELLA 4 - COMPOSIZIONE TECNOLOGICA DELL’INSTALLATO FV 1992 - 2017, PREVISIONI DAL 2018 AL 2025	20
TABELLA 5 - PERCENTUALI PER IL CALCOLO DEL FINE VITA ANTICIPATO DEI PANNELLI	23
TABELLA 6 - QUANTITATIVI DI TONNELLATE DI FV DA DISMETTERE PER DECENNIO E PER TECNOLOGIA	24
TABELLA 7 - QUANTITATIVI ANNUI DELLE MATERIE RECUPERATE PER TECNOLOGIA	26
TABELLA 8 -TONNELLATE DI MATERIE RECUPERATE (C-Si, CdTe, CIGS).....	27
TABELLA 9 - VALORE ECONOMICO DELLE MATERIE RECUPERATE	27
TABELLA 10 - VALORE ECONOMICO DELLE MATERIE RECUPERATE €/T	28
TABELLA 11 - TRATTAMENTO DEI RIFIUTI FV FRELP-SASIL PER IL C-Si: DATI INVENTARIO DEL CICLO DI VITA	34
TABELLA 12 - ASPETTI AMBIENTALI DEL TRATTAMENTO: POTENZIALI IMPATTI.....	42
TABELLA 13 - SINTESI DELLE PRINCIPALI CONCLUSIONI DELL’IPOTESI DI REALIZZAZIONE IMPIANTI DI TRATTAMENTO .	43

TABELLA 14 - DATI NEL MERCATO DEL SETTORE FV IN GERMANIA E ITALIA RELATIVO AL 2012	46
TABELLA 15 - OCCUPAZIONE CALCOLATA SULLA BASE DELL'EF DEL SETTORE FV IN ITALIA	46
TABELLA 16 - CONFRONTO TRA COEFFICIENTE EF	47
TABELLA 17 – MATERIE PRIME SECONDE RICAVATE DALLA DISMISSIONE DI 1 T DI PANNELLI C-SI.....	48
TABELLA 18 - COSTI MATERIALI DI INPUT E DELLO SMALTIMENTO DI RIFIUTI / T DI PANNELLI C-SI DISMESSI	49
TABELLA 19 - COSTO DEL TRASPORTO DEI PANNELLI PER UN IMPIANTO DI TRATTAMENTO DA 7000 T/ANNO.....	50
TABELLA 20 - ULTERIORI IPOTESI PER LA STIMA DEL COSTO DEL TRASPORTO	50
TABELLA 21 - POTENZIALI IMPATTI PER IL TRATTAMENTO DI 1000 KG DI RIFIUTI FV	52

Abstract

The study focuses on the decommissioning of photovoltaic systems in Italy. This is a very critical issue, given the ambitious decarbonisation objectives of the European Union for which the Integrated National Plan for Energy and Climate (PNIEC) plays an important role. With this plan, Italy, together with the other Member States, has set its targets for 2030 aiming to develop and spread the production from renewable sources, with a central role reserved for wind and photovoltaic. Italy, which in 2011 was one of the leading countries in the world for energy production from solar panels, must carefully evaluate the effects of further growth expected in the coming decades. This means planning policies and management measures for the end of life of a sector that will produce large quantities of waste and secondary raw materials over time. The study aims to estimate quantity, economic costs, employment and environmental impacts related to the phase of decommissioning of photovoltaic plants and then develop a hypothesis for the construction of treatment centers located on the national territory. The reference framework is part of the circular economy model, of which principles and terms are shared, and above all the objective of revising production and consumption patterns in order to reduce the use of natural resources.

Keywords: PV, dismission, Circular economy, value chain

Lo studio affronta il tema della dismissione degli impianti fotovoltaici giunti a fine vita in Italia. Si tratta di un tema di grande criticità, considerati gli obiettivi ambiziosi di decarbonizzazione dell'Unione Europea per i quali un ruolo importante è svolto dal Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima (PNIEC). Con questo piano l'Italia, unitamente agli altri Stati membri, ha fissato i suoi obiettivi al 2030 puntando allo sviluppo e alla diffusione delle fonti rinnovabili con un ruolo centrale riservato alla produzione da eolico e fotovoltaico. Per l'Italia, che nel 2011 era su scala mondiale tra i principali paesi per produzione energetica da pannelli solari, la valutazione degli effetti di una ulteriore crescita prevista nei prossimi decenni porta a programmare politiche e misure di gestione del fine vita di un settore che produrrà nel tempo ingenti quantitativi di rifiuti e di materie prime seconde. Lo studio punta a stimare quantitativi, costi economici, impatti occupazionali ed ambientali relativi alla fase di dismissione degli impianti fotovoltaici per poi sviluppare una ipotesi di realizzazione di centri per il trattamento dislocati sul territorio nazionale. Il quadro di riferimento è collocato nell'ambito del modello di economia circolare, della quale si condividono principi e termini e soprattutto l'obiettivo di rivedere i modelli di produzione e consumo per ridurre l'uso delle risorse naturali.

Parole chiave: FV, dismissione, Economia Circolare, catena del valore.

Patrizia Corrias, Umberto Ciorba, Bruna Felici
ENEA, Unità Studi Analisi e Valutazioni

*Gli autori ringraziano il dr. **Massimiliano De Mei**, del Laboratorio Tecnologie e Processi per le Bioraffinerie e la Chimica Verde, ENEA, per l'analisi dei dati e l'approfondimento degli aspetti ambientali.*

Introduzione

Gli impegni legati ai piani nazionali di contrasto ai Cambiamenti Climatici prevedono una decisa crescita dell'utilizzo di produzione energetica da rinnovabili, in particolare da eolico e fotovoltaico.

L'Italia, uno dei paesi che negli ultimi anni si è distinto per la produzione da fotovoltaico, dovrebbe più che triplicare l'installazione lungo l'intero territorio sulla base degli scenari del Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima (di seguito PNIEC) approvati a gennaio 2020 dal governo italiano¹.

Se da un lato tale accelerazione va nella direzione di svincolare la crescita del paese dalla dipendenza delle fonti fossili, dall'altro l'utilizzo massiccio delle materie prime nella produzione dei pannelli costituirà una sfida significativa per il modello delle 4 erre dell'economia circolare, Ridurre-Riusare-Riciclare-Recuperare, che si fonda sul più efficiente utilizzo delle risorse, dalla fase di produzione a quello di fine vita del prodotto².

Il modello di economia circolare, con le sue strategie per ridurre l'impiego, per il riutilizzo ed il riciclo delle risorse, coniuga la dimensione ambientale con quella economica, rappresentata dal contenimento dei costi per acquisire materie sempre più rare e preziose.

L'analisi prende spunto dalle implicazioni legate alla crescita delle installazioni fotovoltaiche con impatti sull'intero ciclo di vita della tecnologia, dalla fase di produzione dei pannelli, le cui materie prime vengono considerate critiche per problemi di approvvigionamento e di concorrenza internazionale, alla fase di dismissione per la gestione delle grandi quantità di rifiuti elettronici previsti nei prossimi decenni³.

Verrà presentata una metodologia per la stima dei quantitativi prodotti dal fine vita degli impianti presenti sul territorio italiano che prenderà in considerazione anche l'evoluzione tecnologica e la variazione nel tempo della composizione dei pannelli.

L'analisi dei quantitativi verrà utilizzata per effettuare le successive valutazioni legate alle attività di recupero delle Materie Prime Seconde, il cui valore ha subito una forte oscillazione dovuta all'emergenza COVID-19.

Nella seconda parte del rapporto, verrà effettuata una stima degli impatti ambientali, sociali ed economici, nell'ipotesi di realizzazione di alcuni centri di gestione e trattamento delle componenti provenienti dagli impianti dismessi, che nel giro di un decennio graveranno in misura diversa sul sistema di raccolta dei RAEE nelle varie regioni italiane.

1. PNIEC - MATTM, MISE, MIT, "Energia e Clima 2030 Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima" (2019).

2. Tali azioni corrispondono di fatto ai criteri di priorità nella gestione dei rifiuti di cui all'art. 179 del D.Lgs. 152/2006.

3. Si vedano i dati riportati in Global E-waste Statistics Partnership "The Global E-waste Monitor 2020 Quantities, flows and the circular economy potential".

1. Il settore del fotovoltaico in Italia

Lo sviluppo del settore fotovoltaico in Italia è stato caratterizzato da un andamento disomogeneo negli anni sia per crescita che per diffusione territoriale. La *Figura 1*, evidenzia, il decennio 2008-2018 durante il quale si è consolidata e diffusa la tecnologia sul territorio nazionale, soprattutto per opera dei meccanismi di incentivazione⁴ denominati Conto Energia.

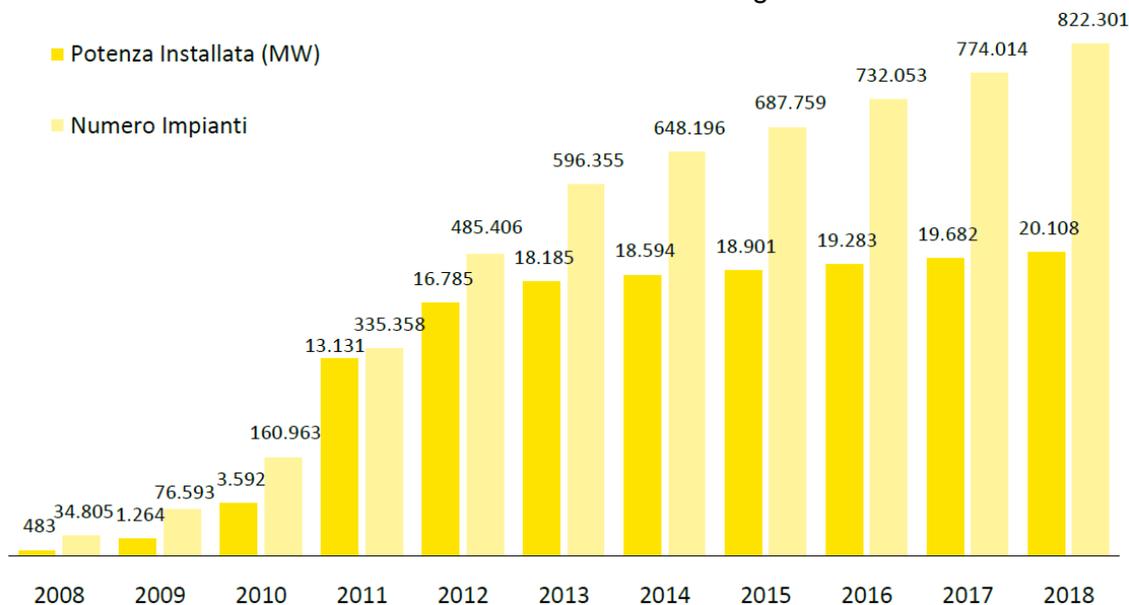


Figura 1 - Potenza e numerosità degli impianti fotovoltaici in Italia nel periodo 2008-2018

(fonte: GSE 2019)

È da notare in particolar modo l'impennata del triennio 2008-2011, che ha portato l'Italia ad essere nel 2012 il secondo paese nel mondo per *total installed capacity*, subito dopo la Germania⁵.

Relativamente al 2018 la potenza cumulata di 20.108 MW risulta distribuita su oltre 822 mila impianti. Tra le caratteristiche del fotovoltaico (FV) italiano è da segnalare la grande prevalenza degli impianti di piccola taglia, che hanno una potenza inferiore o uguale a 20 kW⁶. Questi rappresentano il 90% del totale degli impianti, ma il 21% della potenza complessiva. Dal 2013, dopo il triennio 2008-2011, la crescita è proseguita soprattutto nel segmento delle piccole installazioni del settore domestico che, a fine 2018, conta oltre 670 mila impianti.

La distribuzione del numero degli impianti vede la prevalenza delle regioni del nord Italia con il 55% circa del totale, mentre nel Centro è installato circa il 17% e nel Sud il restante 28%.

4. *I meccanismi di incentivazione hanno determinato la crescita abnorme del settore che ha pesato per oltre 10 miliardi di euro/anno sulla bolletta energetica dei consumatori italiani. D'altra parte, ciò ha anche determinato benefici ambientali (es. riduzione di 18 milioni di tonnellate di CO₂), occupazionali ed economici (tra cui la riduzione di importazioni di combustibili fossili per 2,5 miliardi l'anno) e di sicurezza energetica (Strategia Energetica Nazionale, 2013) Fabiani S., INEA, "L'evoluzione del fotovoltaico in Italia. Analisi critica e prospettive alla luce del regime di incentivazione con il 'conto energia'" - Un focus nel settore agricolo" (2013), pag.13.*

5. *IEA PVPS Report "A Snapshot of Global PV 1992-2012 Preliminary information from the IEA PVPS Programme" (p.7).*

6. *Sono definiti di piccola e media taglia gli impianti inferiori ai 200 MW.*

Se si guarda alla potenza complessiva, la distribuzione risulta essere del 45% al nord, 22% al centro e 33% al sud. Tale effetto è dovuto ai grandi impianti che si trovano soprattutto nelle regioni del centro sud⁷.

Oltre al triennio di picco, il sistema nazionale di gestione dei RAEE dovrà fare i conti con il PNIEC e le significative installazioni (Tabella 1), oltre 30 GW, per il settore del fotovoltaico al 2030 innanzitutto su edificato, tettoie, parcheggi, aree di servizio ecc. Rimane tuttavia importante, per il raggiungimento degli obiettivi al 2030⁸, la diffusione anche di grandi impianti fotovoltaici a terra, privilegiando però zone improduttive, non destinate ad altri usi, quali le superfici non utilizzabili a uso agricolo⁹.

Fonte	2016	2017	2025	2030
Idrica	18.641	18.863	19.140	19.200
Geotermica	815	813	920	950
Eolica	9.410	9.766	15.950	19.300
di cui off shore	0	0	300	900
Bioenergie	4.124	4.135	3.570	3.760
Solare	19.269	19.682	28.550	52.000
di cui CSP	0	0	250	880
Totale	52.258	53.259	68.130	95.210

Tabella 1 - Obiettivi di crescita della potenza (MW) da fonte rinnovabile al 2030

(fonte: PNIEC)

Ai fini di un'efficiente gestione della fase del fine vita del fotovoltaico¹⁰ è necessario in primo luogo partire da una attenta ricostruzione dello storico dell'installato sul territorio nazionale, suddiviso per tecnologie e collocazione territoriale, per poi pervenire alla stima dei quantitativi dei componenti degli impianti. Solo conoscendo tali dati è quindi possibile effettuare una valutazione degli impatti delle fasi di raccolta, smaltimento e trattamento dei pannelli FV che nei prossimi decenni insisteranno sul sistema di gestione nazionale dei rifiuti elettronici (RAEE).

Il sistema di gestione dei rifiuti per il FV in Italia è regolato dal D.Lgs. 49/2014¹¹, in attuazione della Direttiva Europea 2012/19, il quale disciplina la gestione e lo smaltimento dei Rifiuti di Apparecchiature Elettriche ed Elettroniche - RAEE.

I rifiuti derivanti dalla dismissione dei pannelli fotovoltaici possono provenire da impianti domestici, che hanno una potenza nominale inferiore a 10 kW, o da impianti professionali, con potenza nominale superiore o uguale a 10 kW¹².

7. *La Regione Puglia ha il primato della potenza installata e la maggiore dimensione media degli impianti (GSE, Rapporto Statistico Solare Fotovoltaico 2018, 2019).*

8. *PNIEC, p. 57.*

9. *Il PNIEC non raggiungerà gli obiettivi senza l'uso di terreni agricoli. QualEnergia, Giovanni S., "Agro-fotovoltaico: condizioni essenziali e vantaggi per gli operatori agricoli ed energetici" (2020)*

10. *Si assume una durata di vita di circa 25 anni (Granata, Pagnanelli et al., 2014).*

11. *Durante la redazione del presente rapporto, il 26 settembre 2020 è entrato in vigore il Decreto legislativo 3 settembre 2020, n. 118 che definisce nuove regole sia nella fase di gestione che di finanziamento dei fine vita dei RAEE da fotovoltaico.*

12. *DM 185/07.*

Ai fini della gestione dei rifiuti va sottolineata la novità del Decreto che ha introdotto il principio di responsabilità del Produttore, vale a dire l'onere del finanziamento e della gestione di un sistema di riciclo dei prodotti diventati rifiuti, da parte di chi immette per primo (produce, importa o commercializza con il proprio marchio) il prodotto stesso sul territorio italiano.

Il sistema dei RAEE prevede anche altri attori che svolgono un ruolo nella chiusura del ciclo di vita dei prodotti: i Cittadini possono conferire gratuitamente i propri RAEE presso i Centri di Raccolta Comunali o presso il punto vendita; i Distributori organizzano un servizio di ritiro gratuito contestualmente alla consegna di un analogo prodotto appena acquistato; i Comuni si occupano dei Centri di Raccolta dei RAEE destinati a cittadini e distribuzione.

Al 2018 la rete di raccolta nazionale contava 4.883 centri di conferimento o "siti" gestiti da diversi soggetti e 962 impianti di trattamento di cui 59 accreditati che possiedono adeguati requisiti riguardanti la qualità del processo e il rispetto di rigorose procedure di salvaguardia ambientale¹³.

Relativamente ai quantitativi annui, nel 2018 sono state raccolte circa 421 mila tonnellate di RAEE totali. Di questi, circa 81 mila tonnellate, il 20% del totale, è rappresentato dall'insieme del dismesso da fotovoltaico e delle apparecchiature domestiche. Sebbene in costante crescita, tali quote risultano tuttavia inferiori agli obiettivi di raccolta annua introdotti con la Direttiva Europea 2012/19.

La Direttiva stabiliva che a partire dal 1° gennaio 2016 gli obiettivi corrispondessero al 45% considerando il rapporto tra il peso totale dei RAEE raccolti e il peso delle AEE immesse sul mercato nei tre anni precedenti. Dal 2019 tale obiettivo è salito al 65%, distante dal risultato italiano del 2018 con meno del 43%¹⁴. Da rilevare invece la crescita del tasso di recupero, la percentuale dei RAEE che entrano nell'impianto di riciclaggio sul totale raccolto, che ha raggiunto quota 89%¹⁵; risulta invece piuttosto bassa la percentuale di "preparazione al riutilizzo", che nel 2015 corrispondeva al 1%. Va detto che la Direttiva europea non ha dato chiare indicazioni né fornito spinta propulsiva alle attività di riuso dal momento che ha dato un obiettivo aggregato per i RAEE "preparati per il riuso e il riciclo".

Nella seconda parte del lavoro si porrà attenzione alle attività legate al riuso che possono contribuire a creare una filiera più robusta per il fine vita dei pannelli fotovoltaici, implementando l'occupazione e il mercato di "seconda mano" dalle attività di rigenerazione dei pannelli.

Per avere un'idea dell'entità delle dismissioni che l'Italia si troverà ad affrontare nei prossimi anni, è necessario fornire una breve anticipazione delle conclusioni relative ai quantitativi. Sulla base dei dati raccolti si stima che il prossimo decennio sarà particolarmente critico per l'alto numero di impianti a fine vita, che potrebbero produrre complessivamente circa 1.708 mila tonnellate di RAEE/FV (*Figura 2*), pari a sei volte i quantitativi raccolti nel 2018 di tutto il comparto RAEE.

13. Centro di Coordinamento RAEE "Gestione RAEE 2018" (2019).

14. *Idem*.

15. Fondazione per lo Sviluppo Sostenibile, Fise Unicircular e Unione Imprese Economia Circolare, "L'Italia del Riciclo 2019" (2020).

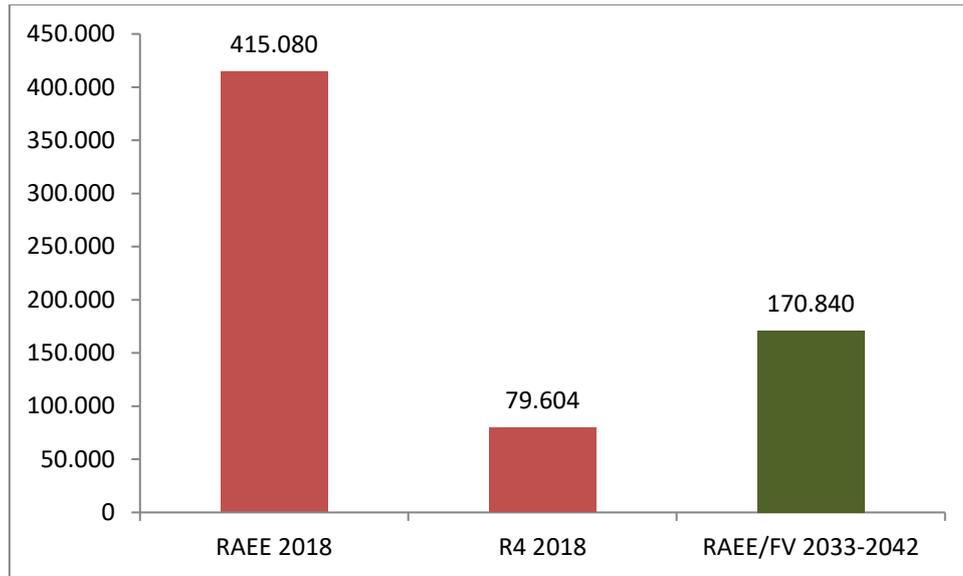


Figura 2 - Confronto tra RAEE del 2018 e stime annue di RAEE/FV il decennio 2033-2042

(elaborazione ENEA su dati del Centro di Coordinamento RAEE e del GSE)

2. Importanza strategica del recupero e riutilizzo delle Materie Prime Seconde. Il valore delle materie tra produzione, import ed export e riciclo

Il passaggio da un'economia tradizionale, lineare, a un'economia circolare richiede, tra le sfide principali da affrontare, la conservazione di risorse importanti all'interno del sistema paese e l'aumento del recupero delle materie prime essenziali. Ciò è fondamentale specialmente per un paese povero di risorse come l'Italia, dove reperire materie prime a basso costo assume una importanza strategica.

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, secondo alcuni studi di letteratura. Inoltre i moduli al silicio di nuova produzione hanno bisogno di molta più energia per essere prodotti rispetto ai moduli di uguale capacità che utilizzano materiali riciclati, rendendo quindi la produzione di quest'ultimo tipo più competitiva e conveniente (Hahne e Gerhard, 2010).

Secondo gli scenari di Solar Power Europe 2017 e commissionati dalla Commissione Europea¹⁶, si stima in notevole incremento dal 2030 la domanda UE di alcune materie prime "fotovoltaiche" (Blagoeva et al., 2016). In *Figura 3* si illustrano le previsioni di crescita del fabbisogno di indio, gallio e silicio secondo tre scenari nei quinquenni dal 2020 al 2030. All'aumento del fabbisogno di materie contribuiscono l'incremento di installazioni rinnovabili, previsto nei piani dei singoli paesi, e gli ambiziosi piani nelle rinnovabili di altre grandi economie, soprattutto Cina ed USA, che contribuiranno in modo determinante alla competizione per l'accaparramento delle stesse materie e ad accrescere così il rischio per la loro disponibilità.

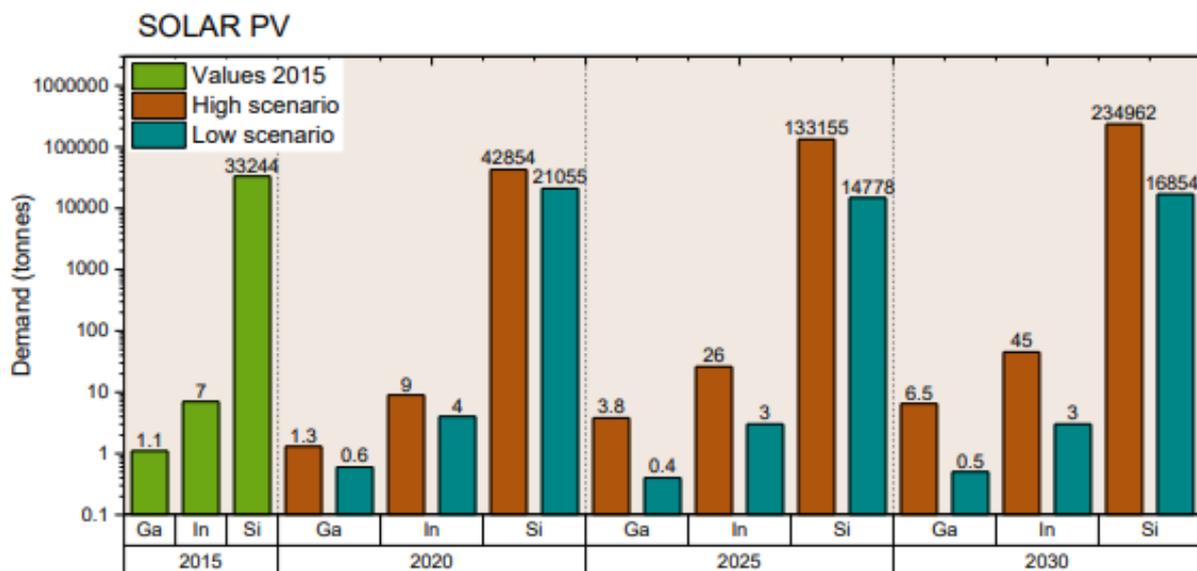


Figura 3 - Evoluzione prevista della domanda UE per le materie prime del settore fotovoltaico

(fonte: Mathieu et al. 2017)

16. Mathieux, F et al. (2017).

L'UE è uno dei maggiori consumatori di metalli non ferrosi (alluminio, rame, zinco, ...), essenziali per diversi settori (trasporti, aerospaziale, edilizia, energia ed elettronica), di cui l'alluminio rappresenta la quota maggiore. In base alla elevata importanza economica per l'UE e alla vulnerabilità dovuta a interruzioni dell'approvvigionamento dei materiali, la Commissione ha definito una lista delle Materie Prime Critiche-MPC (CRM – Critical Raw Material-list)¹⁷.

Il piano d'azione dell'UE per l'economia circolare¹⁸ mira ad azioni specifiche nel settore delle materie prime critiche e tra le sfide principali da affrontare nel passaggio a un'economia più circolare, indica proprio l'aumento del loro recupero.

Nel presentare la lista delle MPC aggiornata al 2020, la Commissione Europea ha indicato un piano di azioni necessarie per conseguire un approvvigionamento sicuro e sostenibile e per rafforzare la resilienza e l'autonomia strategica aperta dell'UE¹⁹; contestualmente, ha presentato uno studio²⁰ in cui sono state analizzate, per le tecnologie e i settori strategici individuati, le prospettive di fabbisogno delle materie prime critiche ed i rischi di approvvigionamento al 2030 e al 2050, al fine di perseguire gli obiettivi di neutralità climatica dell'UE (preCOVID-19) per il 2050. Lo studio sottolinea il contributo marginale dell'UE in ogni fase della catena di approvvigionamento del fotovoltaico (l'Unione Europea fornisce il 6% delle materie prime utilizzate negli impianti fotovoltaici, *Figura 4*).

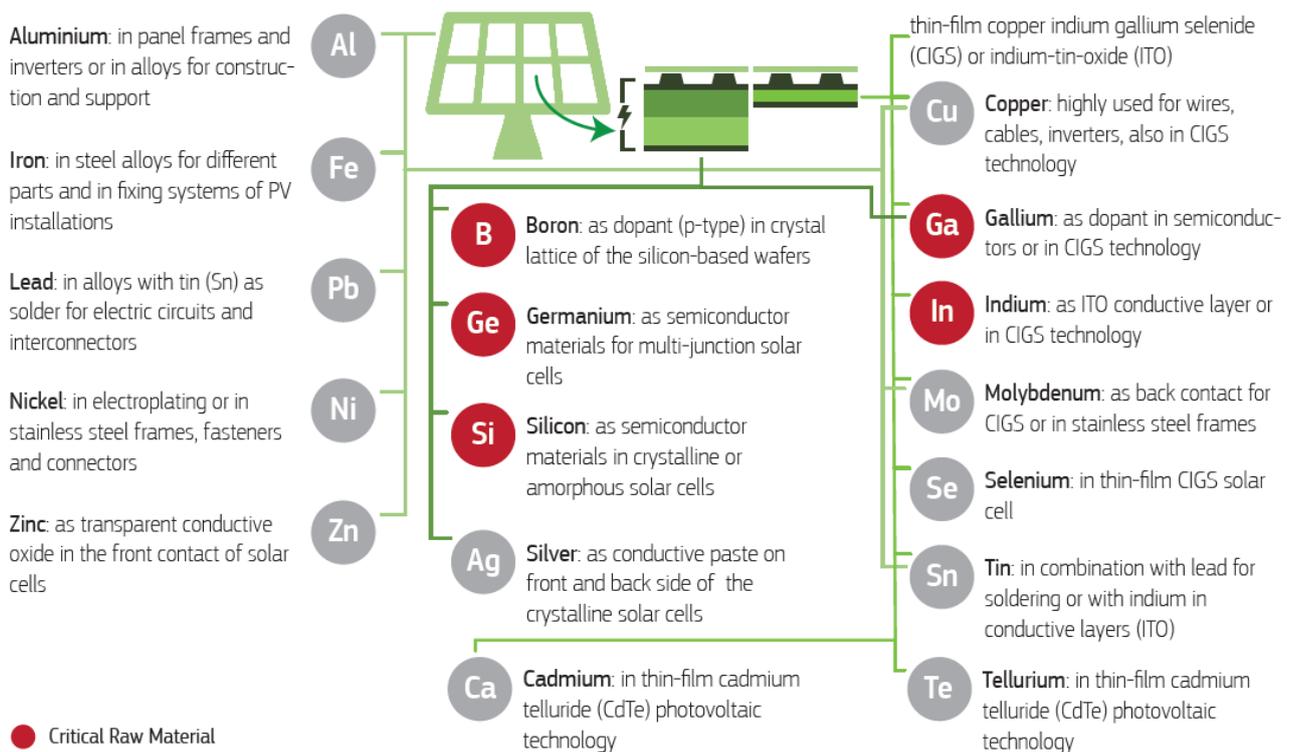


Figura 4 - Materie prime utilizzate nelle tecnologie del solare fotovoltaico

(fonte: European Commission, 2020c)

17. Commissione Europea, "Affrontare le sfide relative ai mercati dei prodotti di base e alle materie prime", COM/2011/0025 final.

18. Commissione Europea, "Un nuovo piano d'azione per l'economia circolare per un'Europa più pulita e più competitiva", COM/2020/98 final.

19. Commissione Europea, "Resilienza delle materie prime critiche: tracciare un percorso verso una maggiore sicurezza e sostenibilità", COM/2020/474 final.

20. European Commission, "Critical materials for strategic technologies and sectors in the EU - a foresight study", 2020.

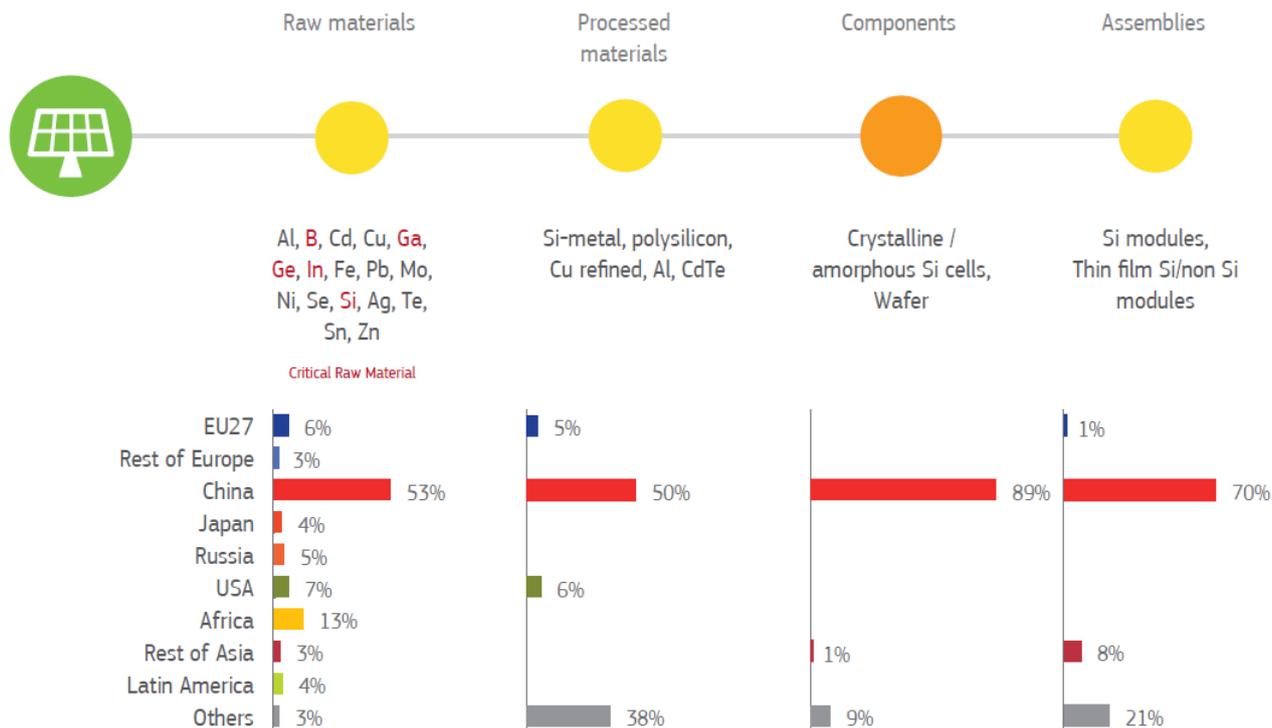


Figura 5 - Solare FV: rischi di approvvigionamento e attori chiave

(fonte: European Commission, 2020c)

Il ruolo della Cina è predominante e quasi monopolistico in tutte le fasi ma soprattutto in quella dei componenti (89%), con la conseguenza di un elevato rischio di approvvigionamento per i paesi europei, dove l'insufficiente capacità di produzione di celle solari sembra essere appunto l'anello più debole della catena del valore del solare fotovoltaico (Figura 5).

Tra le proposte del piano d'azione, si suggerisce pertanto di migliorare e aumentare le opportunità di produzione nazionale poiché la capacità di produzione dell'UE di celle in silicio cristallino nel 2019, ha rappresentato solo lo 0,3%, in particolare in Italia, Germania e Francia (Bloomberg NEF, 2020).

Relativamente alla **produzione** di metalli e prodotti metallici, l'UE ha perso la sua quota di mercato mondiale, soprattutto a causa del continuo spostamento della produzione verso paesi con prezzi dell'energia e costi delle tutele sociali e ambientali più basse.

Il deficit di produzione è parzialmente compensato dalle crescenti importazioni e, in minima parte, dall'utilizzo di materie prime seconde, come illustra il grafico della successiva Figura 6 che mette a confronto l'andamento del commercio (import, export) delle materie prime riciclabili in Italia e in Germania.

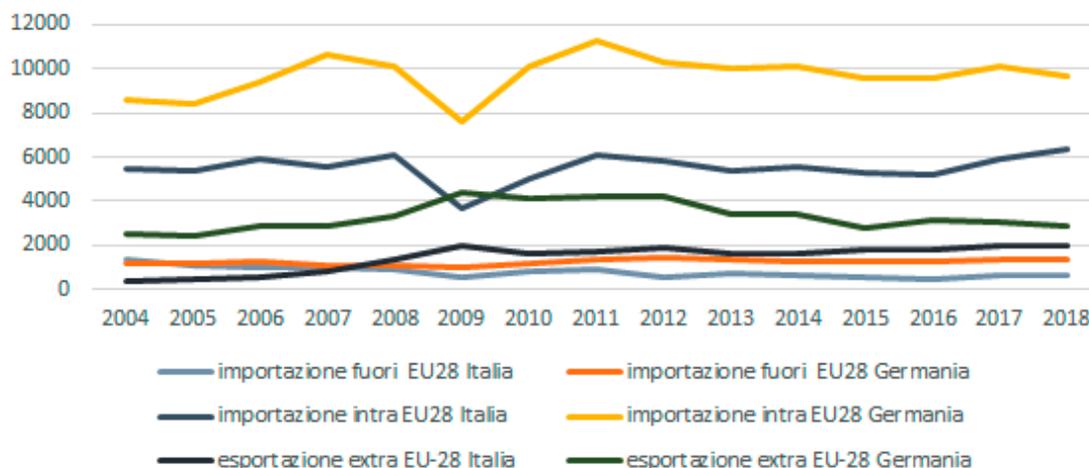


Figura 6 - Materie prime riciclabili (t), import/export di “rifiuti” e scarti da e per l’Italia
(elaborazione ENEA su dati Eurostat, Italia – Germania, in migliaia di tonnellate, ottobre 2019)

Nella *Figura 6* si evidenzia un calo dell’import extra Unione Europea soprattutto in coincidenza con l’inizio della crisi economica del 2008, mentre l’import tra paesi UE si mantiene stabile, fatta eccezione per il periodo della crisi, e in leggera crescita dal 2016. Da rilevare invece il costante aumento delle esportazioni di “rifiuti” e scarti verso paesi non UE, soprattutto per l’Italia dove dalle 366.000 tonnellate di scarti esportati nel 2004 si è passati a circa 2.000.000 nel 2018, con notevole perdita di valore e di materie.

Le **esportazioni** nette di rifiuti e scarti, quindi la considerevole quantità di risorse che lascia l’Europa, non offre alcuna garanzia che i rifiuti esportati siano trattati in base alle stesse norme UE o almeno in base a norme che prevedano livelli minimi di ambiente, qualità, salute e sicurezza, come sottolineato in un recente report (2020) da UNICEF e PURE Earth²¹, e non contribuisce all’aumento della circolarità dell’economia europea. A livello globale, circa l’80% dei rifiuti elettronici viene spedito, spesso illegalmente, in paesi a basso e medio reddito, in cui migliaia di lavoratori informali, spesso compresi i bambini, raccolgono, smantellano e/o bruciano i rifiuti elettronici per ottenere metalli e materiali preziosi.

L’**importazione** europea delle materie prime è stata oggetto di attenzione anche da parte della IEA. In un recente articolo²² sottolinea la frenata dei nuovi investimenti nel settore minerario, a seguito del perdurare della crisi economica accentuata dalla pandemia COVID19, che minaccia di mettere a rischio la sicurezza delle forniture di parecchi minerali.

21. UNICEF, Pure Earth, "The toxic truth: Children’s exposure to lead pollution undermines a generation of future potential", 07/2020. Il riciclo di batterie al piombo informale e non conforme agli standard è una delle principali fonti di inquinamento da piombo nei bambini che vivono nei paesi a basso e medio reddito.

22. Sostenere la transizione energetica verso le fonti rinnovabili è fondamentale per la decarbonizzazione, proprio alcune delle materie a rischio sono utilizzate per la costruzione di impianti a energia rinnovabile. La IEA suggerisce ai singoli paesi da un lato di monitorare il rapporto domanda/offerta dei diversi elementi “critici” per la transizione energetica, optando per contratti di lungo termine e stringendo alleanze strategiche con i paesi produttori e, dall’altro, di aumentare gli investimenti in ricerca e sviluppo per il riciclo e recupero dei minerali dalle tecnologie “a fine vita”, in modo da ridurre la dipendenza dalle importazioni. IEA, Clean energy progress after the Covid-19 crisis will need reliable supplies of critical minerals (2020).

Relativamente al **recupero/riciclo**, i dati indicano che l'uso circolare delle materie prime nell'economia dell'UE è relativamente basso (inferiore al 10%) e che potrebbe essere migliorato estendendo la durata di vita dei prodotti - ad esempio attraverso la riparazione e il riutilizzo - o aumentando i tassi di riciclo di materiali e prodotti.

La Commissione Europea ha affermato che nell'UE, sebbene il tasso di riciclo dei rifiuti elettronici sia tra i punti di forza in molti paesi (su 9 milioni di tonnellate di rifiuti di apparecchiature elettriche ed elettroniche prodotte circa il 30% viene raccolto e riciclato), il recupero delle materie prime critiche da questi rifiuti elettronici è inferiore all'1%. Lo sfruttamento di queste "miniere urbane", ovvero il recupero di materie prime dai rifiuti urbani attraverso il riciclo, potrebbe soddisfare gran parte della domanda dell'UE di materie prime essenziali.

A conferma dello scarso contributo del riciclo alla domanda di materie prime critiche (*end-of-life recycling input rates* EOL-RIR) nell'UE, i dati di criticità UE del 2017 evidenziano che, ad eccezione di un limitato numero di materiali, le materie prime seconde rappresentano generalmente una piccola parte degli input nei processi di produzione (Tabella 2) e che ciò dipende dalla momentanea indisponibilità di tecnologie idonee e dalla scarsa sostenibilità economica del processo di recupero dovuta agli attuali limitati quantitativi di rifiuti fotovoltaici da trattare.

	Materie	% EOL-RIR
Ga	Gallio	0
In	Indio	0
Si met.	Silicio metallico	0
Si sab.	Silicio sabbioso	0
Se	Selenio	1
Te	Tellurio	1
Al	Alluminio	12
Cu	Rame	17
Sn	Stagno	32
Zn	Zinco	31
Ag	Argento	55
Pb	Piombo	75
<i>Materie Prime Critiche</i>		
<i>Materie di importanza economica</i>		

Tabella 2 - Contributo materie recuperate sulla domanda di materie prime in Europa: (EOL-RIR)

(elaborazione ENEA su dati Deloitte Sustainability 2015/2017)

3. Principali obiettivi e schema di analisi per lo studio del fine vita degli impianti FV

L'analisi proposta è sintetizzata nello schema in *Figura 7*. L'obiettivo è di proporre strumenti metodologici per stimare i quantitativi delle dismissioni in Italia che avverranno nei prossimi anni a partire dal decennio 2030-2040, cioè allo scadere dei 25 anni²³ dalle prime installazioni effettuate in Italia negli anni novanta, sul quale insiste il picco di installazioni del triennio 2008-2011. A tali numeri, come si è visto, sono destinati a sommarsi quelli derivanti dall'attuazione del PNIEC.

I risultati dell'analisi forniranno la base per una prima valutazione sull'impatto occupazionale, economico ed ambientale nell'ipotesi di realizzazione di impianti di trattamento in Italia, di cui si parlerà nella seconda parte del rapporto.

L'analisi verte sulle tecnologie fotovoltaiche del silicio cristallino e del film sottile (CdTe e CIGS).

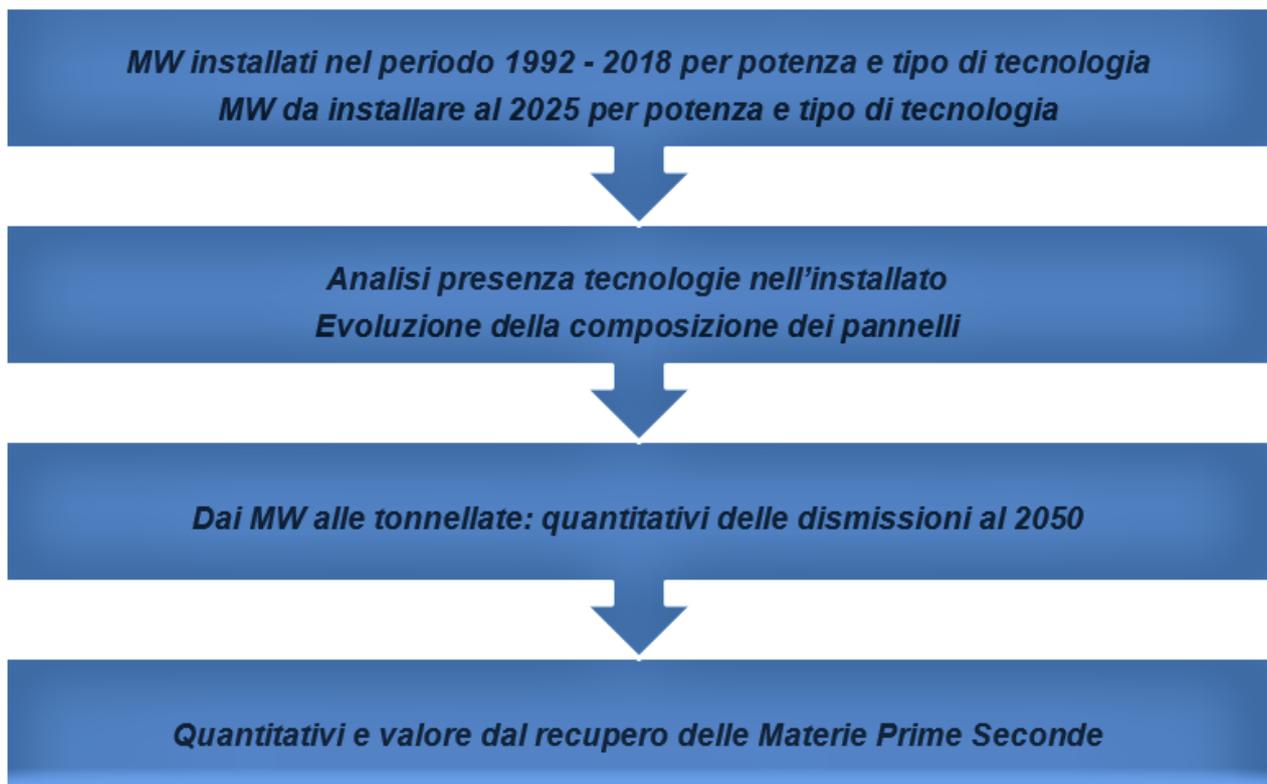


Figura 7 - Schema di analisi per lo studio del fine vita degli impianti fotovoltaici

23. Cfr la nota 10.

3.1 MW installati al 2018 e MW da installare al 2030

La Tabella 3 fornisce la ricostruzione dei MW installati e cumulati annui relativi al periodo 1992-2030.

Anno	MW inst	MW cum	Anno	MW inst	MW cum	Anno	MW inst	MW cum
1992	8,5	8,5	2005	6,8	39,4	2018	426	20108
1993	3,6	12,1	2006	13	52	2019	1000	21108
1994	2	14,1	2007	27	79	2020	1000	22108
1995	1,7	15,8	2008	353	432	2021	1000	23108
1996	2,1	17,9	2009	712	1144	2022	1000	24108
1997	0,7	18,6	2010	2326	3470	2023	1000	25108
1998	1	19,6	2011	9303	12773	2024	1000	26108
1999	0,8	20,4	2012	3916	16689	2025	1000	27108
2000	0,5	20,9	2013	1496	18185	2026	4500	31608
2001	1	21,9	2014	409	18594	2027	4500	36108
2002	2	23,9	2015	298	18892	2028	4500	40608
2003	4	27,9	2016	391	19283	2029	4500	45108
2004	4,7	32,6	2017	399	19682	2030	4500	49608

Tabella 3 - Il fotovoltaico in Italia: storico installato e cumulato annuo (1992-2030)

(elaborazione ENEA su dati GSE)

Con riguardo al periodo 1992-2018 le informazioni si basano sui dati della produzione reale forniti dal GSE²⁴.

Per il periodo successivo al 2018 sono stati utilizzati i dati provenienti dagli scenari contenuti nel PNIEC che l'Italia ha trasmesso alla Commissione Europea.

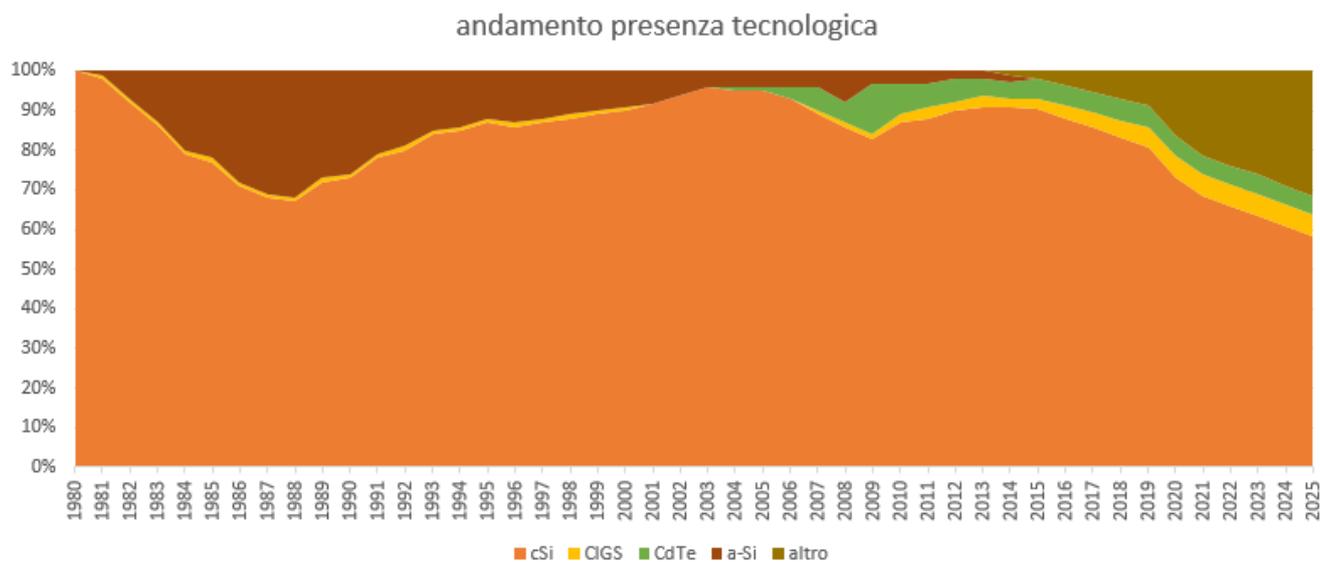
Nel settore elettrico il contributo principale è atteso dal fotovoltaico con 50 GW al 2030, corrispondente ad un incremento di 30 GW rispetto alla potenza cumulata del 2018. In sostanza si tratta di prevedere un incremento medio annuo di 1000 MW per il 2025, seguito da una decisa accelerazione tra il 2025 e il 2030 con un tasso medio di crescita pari a +4,5 GW/anno.

3.2 Presenza tecnologica e composizione dei pannelli

Una volta ricostruito l'andamento delle installazioni in Italia, è stato effettuato il calcolo della ripartizione nell'utilizzo delle tecnologie con caratteristiche diverse, in termini di progettazione e di presenza di materiali, e che è determinante per la scelta del trattamento di fine vita dei pannelli.

Il totale dei MW installati è stato ripartito, per anno, per la presenza delle tecnologie maggiormente utilizzate in quegli anni: c-Si, CdTe, CIGS.

24. Il GSE, Gestore italiano dei Servizi Energetici e autore dei rapporti statistici annuali sugli usi energetici delle fonti rinnovabili in Italia, www.gse.it/dati-e-scenari.



altro: solare a concentrazione (CPV), FV Organico e celle fotoelettrochimiche (OPV), c-Si avanzato, CIGS alternativo (ad esempio con Sn e Zn in sostituzione di In e Ga), celle solari a base di metalli pesanti (es. perovskite) e celle avanzate III-V

Figura 8 - Andamento della presenza delle tecnologie FV dal 1980 al 2025

(elaborazione ENEA, dati Fraunhofer 2017 e IRENA 2016)

Per la ripartizione sono stati utilizzati i dati Fraunhofer (2017) e Irena (2016)²⁵, riportati in *Figura 8*.

Si rileva che la tecnologia al c-Si rimane prevalente per tutto il periodo preso in esame ma gli scenari di Irena evidenziano per le nuove installazioni una decisa crescita delle tecnologie a film sottile (CdTe e CIGS). In tal caso, l'ipotetica maggior presenza di nuove tecnologie comporta la necessità di effettuare una valutazione del fine vita mirata specificamente alle tecnologie di trattamento, attualmente disponibili o in fase di sperimentazione, che determinano un diverso impatto sia dal punto di vista economico (materie critiche, materie preziose) che ambientale (materie tossiche).

25. Fraunhofer per i dati storici, Irena per quelli previsionali.

Anno	Totale		c-Si		CdTe		CIGS	
	MW inst	MW cum	%	MW	%	MW	%	MW
1992	8,5	8,5	80	7	0	0	1	0,09
1993	3,6	12,1	84	3	0	0	1	0,04
1994	2	14,1	85	2	0	0	1	0,02
1995	1,7	15,8	87	1	0	0	1	0,02
1996	2,1	17,9	86	2	0	0	1	0,02
1997	0,7	18,6	87	1	0	0	1	0,01
1998	1	19,6	88	1	0	0	1	0,01
1999	0,8	20,4	89	1	0	0	1	0,01
2000	0,5	20,9	90	0	0	0	1	0,01
2001	1	21,9	91	1	0	0	0	0
2002	2	23,9	93	2	0	0	0	0
2003	4	27,9	95	4	0	0	0	0
2004	4,7	32,6	95	4	1	0,05	0	0
2005	6,8	39,4	94	6	1	0,07	0	0
2006	13	52	93	12	3	0,38	0	0
2007	27	79	89	24	6	1,6	1	0,3
2008	353	432	86	304	5	18	1	4
2009	712	1144	83	591	13	93	1	7
2010	2326	3470	87	2024	8	186	2	47
2011	9303	12773	88	8187	6	558	3	279
2012	3916	16689	90	3524	6	235	2	78
2013	1496	18185	91	1361	4	60	3	45
2014	409	18594	92	376	4	16	2	8
2015	298	18892	89	265	5	15	3	8
2016	391	19283	86	336	5	20	3	12
2017	399	19682	83	331	5	20	4	15
2018	426	20108	80	341	5	22	4	18
2019	1000	21108	76	760	5	52	5	48
2020	1000	22108	73	730	5	52	5	53
2021	1000	23108	71	710	5	52	5	54
2022	1000	24108	68	680	5	51	6	56
2023	1000	25108	65	650	5	51	6	57
2024	1000	26108	62	620	5	50	5	54
2025	1000	27108	59	590	5	50	6	56

Tabella 4 - Composizione tecnologica dell'installato FV 1992 - 2017, previsioni dal 2018 al 2025

*(elaborazione ENEA su dati Fraunhofer per i valori storici ed IRENA per i valori previsionali.
In grigio il periodo di maggiore installazione)*

Ricostruita la ripartizione delle tecnologie, si è quindi proceduto al calcolo del peso delle materie per ciascuna tecnologia (Tabella 4) che sarà poi utilizzato per stimare i quantitativi di recupero delle materie prime seconde e il potenziale valore derivante dal riutilizzo o dalla vendita nel corrispondente mercato.

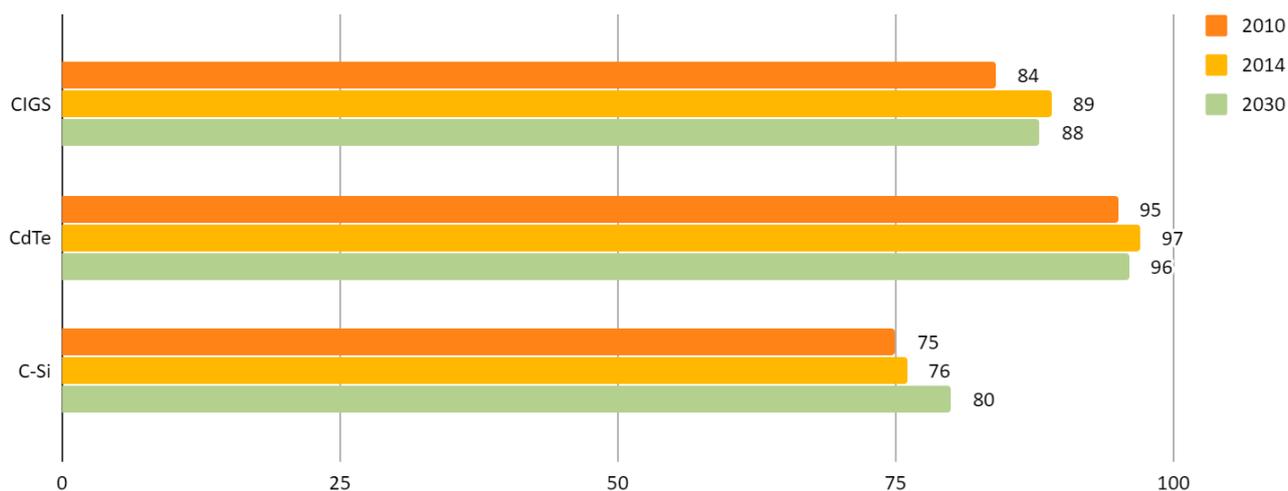


Figura 9 - Presenza percentuale di vetro nei pannelli fotovoltaici negli anni 2010, 2014 e 2030

La *Figura 9* si focalizza sulla presenza del vetro nelle tre tecnologie nel periodo tra il 2010 e il 2030. Nel pannello al c-Si il peso del vetro aumenta considerevolmente raggiungendo nel 2030 l'80% del peso complessivo (si consideri che nel 2003 era del 63%). Maggiore risulta essere invece la presenza del vetro nei pannelli a film sottile: più del 90% per i CIGS e ancora maggiore per i CdTe con il 96%.

La *Figura 10* rappresenta l'evoluzione dei materiali nella composizione del pannello in silicio cristallino al netto della componente vetro. Si rileva negli anni la significativa riduzione della componente di alluminio utilizzata principalmente per le cornici, la diminuzione costante di argento e la crescita della presenza di rame che triplica in peso dal 2003.

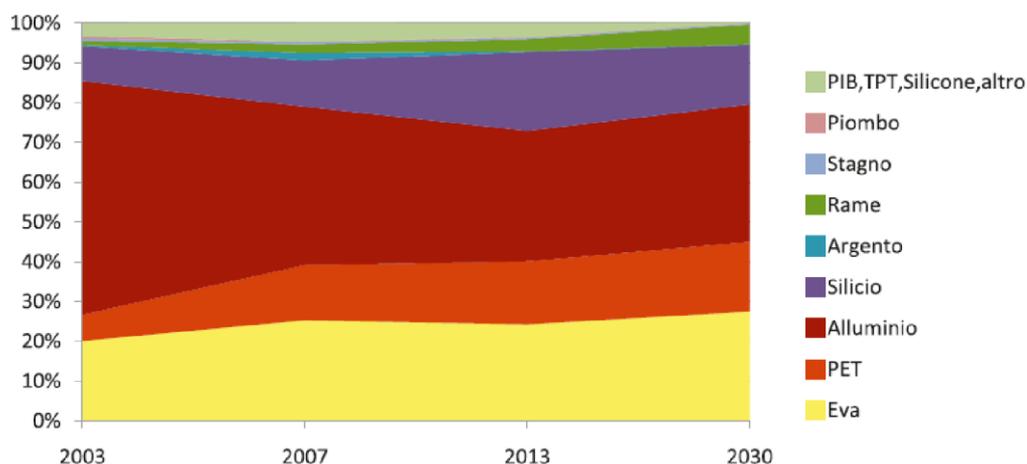


Figura 10 - Variazione composizione percentuale della massa totale del pannello al c-Si

(elaborazione ENEA su fonti varie²⁶)

26. Wambach 2010; IEA PVPS, Wambach (2017); IRENA, IEAPVPS 2016.

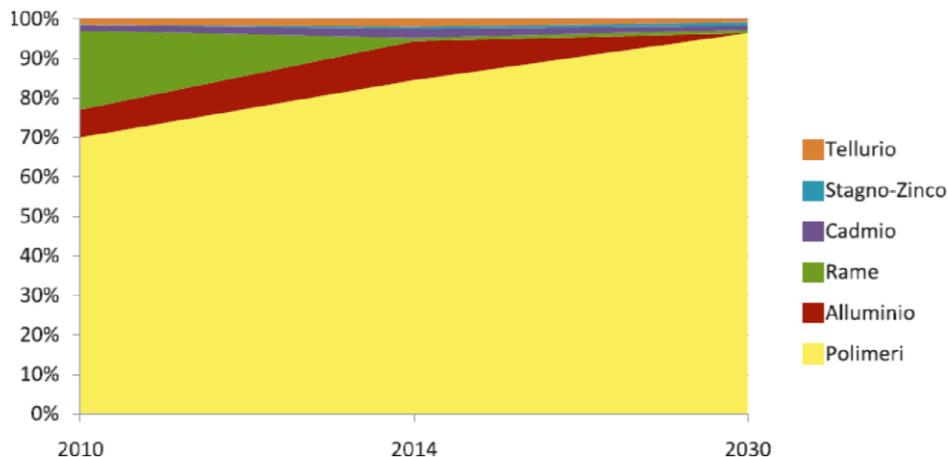


Figura 11 - Variazione composizione percentuale della massa totale del pannello CdTe
(elaborazione ENEA su fonti varie²⁷)

Nei pannelli a tecnologia CdTe, *Figura 11*, si riscontra una sensibile diminuzione dell'impiego di alluminio e rame. Diminuiscono anche le percentuali di cadmio e tellurio mentre si nota l'aumento di zinco e stagno ed una notevole crescita del peso dei polimeri.

Nel caso dei pannelli a tecnologia CIGS, *Figura 12*, si nota la sostanziale crescita del peso dei polimeri e la riduzione in rame e alluminio. Costante la crescita di indio e selenio, che triplicano negli anni il peso, e del gallio che passa dallo 0,01% allo 0,08%.

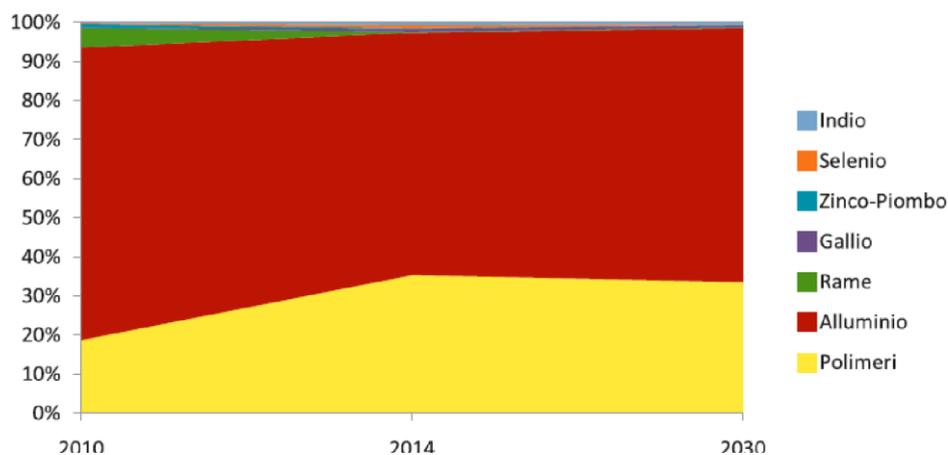


Figura 12 - Variazione composizione percentuale della massa totale del pannello CIGS
(elaborazione ENEA su fonti varie²⁸)

27. Paiano 2015, Irena 2016.

28. Idem.

3.3 Dai MW alle tonnellate: quantitativi delle dismissioni al 2050

Il calcolo dei quantitativi da dismettere si fonda su informazioni disponibili e su alcuni assunti ipotetici. Mentre infatti si conosce il parco dell'installato a una certa data, ben più difficile è la proiezione degli scenari futuri che in parte si fonda su aspetti di policy energetica, ancora in fase di avvio, e in parte sulla durata presunta dei pannelli, convenuta a 25 anni²⁹.

Agli impianti da dismettere a 25 anni, occorrerebbe aggiungere il numero di pannelli che si presume possa raggiungere precocemente il fine vita a causa di fattori diversi, ad esempio a causa di rotture durante il trasporto o l'installazione o per problemi tecnici o di cattiva installazione. Una stima percentuale fornita da Irena in termini di MW dei pannelli con fine vita anticipato, indipendentemente dal tipo di tecnologia utilizzata, si ritrova nella *Tabella 5*.

Tempi	Quantitativi e cause fine vita anticipato
Subito	0,5% dei MW installati nell'anno a causa di danneggiamenti durante la fase di trasporto e installazione
Entro 2 anni	0,50% dei pannelli installati a causa di cattive installazioni
Dopo 10 anni	2% dei pannelli installati
Dopo 15 anni	4% dei pannelli installati a causa di problemi tecnici

Tabella 5 - percentuali per il calcolo del fine vita anticipato dei pannelli

(fonte: IRENA, IEAPVPS, 2016)

Si tratta di percentuali che possono determinare un incremento significativo del dismesso e che, secondo alcune stime più recenti³⁰, sono destinate ad aumentare soprattutto a causa dei guasti precoci degli inverter. Sebbene gli inverter abbiano una durata di 10 anni e il 5% degli impianti installati abbia raggiunto questa soglia, quelli che mostrano anche guasti prematuri corrispondono a circa 1%. In cifre, per l'Europa, significa che 16 GW di installato quest'anno subirà guasti agli inverter avendo superato i dieci anni, cifra che crescerà a 100 GW nel 2025 con l'invecchiamento del parco solare.

Secondo i dati forniti dal GSE al 31 dicembre 2019³¹, il 94% delle modifiche ha riguardato la sostituzione dei componenti, inverter, moduli e altri componenti e contatori. La maggior parte degli interventi di *rewamping* hanno riguardato impianti del II (2007-2010) e IV (2011-2012) Conto Energia, periodo del boom del FV in Italia, che ha visto anche impianti installati con scarsa attenzione alla qualità dei componenti e alla progettazione.

Per questa analisi, tuttavia, si è deciso di tenere fuori i fattori di incremento del dismesso potenziale derivante dalle rotture in itinere, rimandandola a un successivo approfondimento³².

29. *Diversi studi ipotizzano durate maggiori, di 30 – 40 anni, cfr. IRENA, IEAPVPS, 2016.*

30. *in "Global annual solar PV repairs and maintenance market to hit \$ 9bn" articolo in Smart Energy International (06/2020) ed in PV Magazine, "Premature inverter failure – 4.2 GW of capacity will be affected this year, says analyst" (06/2020).*

31. *GSE, Rapporto delle attività 2019, 2020.*

32. *Tale analisi comporterebbe l'aggiustamento delle quote di installato annuo aumentate delle quote dalle rotture in itinere.*

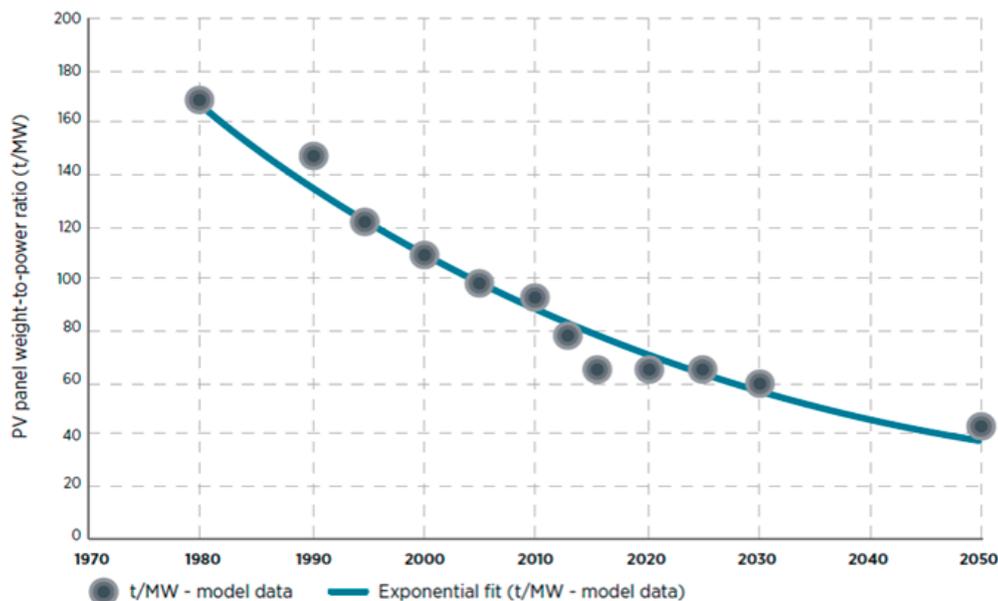


Figura 13 - Proiezione temporale del rapporto peso/potenza del pannello PV

(fonte:IRENA, IEAPVPS, 2016)

Si è pertanto passati direttamente al calcolo della conversione dei MW in tonnellate equivalenti utilizzando le informazioni fornite da Irena IEA (2016) e relative al rapporto peso/potenza (t/MW) di un pannello variabile nel corso del tempo (Figura 13).

Tale rapporto ha subito una significativa evoluzione grazie alle innovazioni introdotte nelle singole tecnologie FV (maggiore efficienza, meno materia, minor peso), le quali hanno determinato la forte riduzione del peso medio³³ dei pannelli, che risulta dimezzato nel periodo 1980-2012 (da 170 a 80 tonnellate per MW).

Le stime Irena prevedono per il 2050 un'ulteriore riduzione che porterebbe il peso medio del pannello a circa 40 tonnellate per MW. Sulla base di tali indicazioni e con l'obiettivo di giungere a dati più verosimili all'andamento reale, si è scelto di procedere al calcolo dei quantitativi considerando la variazione del dato negli anni e non la sua media. La Tabella 6 riporta i dati sui quantitativi da dismettere raggruppati per decennio e mostra che il culmine sarà raggiunto nel periodo 2031-2040, seguito dal decennio nel quale gli attuali scenari PNIEC determineranno un andamento più contenuto e normalizzato.

Periodo dismissione	c-Si		CdTe		CIGS		TOTALE	
	MW	t	MW	t	MW	t	MW	t
2021 2030	15	2.273	0	11	0	6	16	2.290
2031 2040	16.668	1.459.309	1.183	104.118	476	41.554	18.326	1.604.981
2041 2050	5.748	392.216	418	28.318	421	28.301	6.588	448.835

Tabella 6 - Quantitativi di tonnellate di FV da dismettere per decennio e per tecnologia

33. Calcolato sulla media dei dati disponibili circa il peso dei diversi tipi di pannelli di maggior produzione e sulla loro potenza nominale.

Secondo le stime, il parco fotovoltaico installato dal 1992 potrebbe produrre poco meno di 2.213.000 tonnellate di rifiuti totali (2.370.000 circa compresi i precoci), di cui 2.058.000 tonnellate circa per le tecnologie c-Si, CIGS e CdTe, mentre le restanti tonnellate di rifiuto FV sono attribuibili ad altre tecnologie³⁴.

Nel decennio di maggior produzione 2031-2040 il totale dei rifiuti prodotti ammonterebbe a circa 1.651.400 tonnellate, di cui 1.605.000 circa riconducibili alle tre tecnologie considerate nello studio (1.500.000 tonnellate circa solo per il c-Si).

3.4 Recupero delle Materie Prime Seconde: quantitativi e valore

La stima dei quantitativi dei pannelli che saranno dismessi al 2050 permette la valutazione dei quantitativi recuperabili dai processi di trattamento dei rifiuti fotovoltaici, ovvero il recupero delle Materie Prime Seconde (MPS) che costituiscono il nucleo dell'economia circolare. Il riciclaggio delle MPS assicura che i materiali di scarto, dopo essere stati trasformati, possano essere venduti e dare luogo alla produzione di nuovi prodotti, nella stessa o in altre filiere.

Per il computo delle tonnellate potenzialmente recuperabili del fotovoltaico giunto a fine vita, si è proceduto considerando le percentuali di massimo recupero indicate dalle tecnologie di trattamento conosciute. Queste prevedono l'impiego di diversi processi, meccanico, termico e chimico, descritti nel paragrafo 5.

Le percentuali provengono sia dalle informazioni relative ad alcuni dei più grandi operatori del mercato internazionale come la First Solar, ad impianti di trattamento sperimentale³⁵ e, in assenza di fonti dirette, alla letteratura più recente³⁶.

L'applicazione dei dati di recupero ha consentito di ricostruire i quantitativi delle materie recuperate: la *Tabella 7* illustra che per la sola tecnologia c-Si, nel decennio 2031-2040, a fronte di un input di materia pari a circa 1.373.000 tonnellate, si producono, secondo le stime, 1.332.000 tonnellate di MPS, 86.346 tonnellate di altre materie (es. pib, tpt, silicone) e circa 41.000 tonnellate di quantitativi a smaltimento (escluse le tonnellate di materiale residuo derivante dai processi di trattamento -liquidi, fanghi, ceneri).

34. *Solare a concentrazione (CPV), FV organico e celle fotoelettrochimiche (OPV), c-Si avanzato, CIGS alternativo (ad esempio con stagno e zinco in sostituzione di indio e gallio), celle solari a base di metalli pesanti (es. perovskite) e celle avanzate III-V.*

35. *FRELP, Dufflou et al. 2018.*

36. *Huang 2017, Sica 2017, Deng 2019.*

Anno inst	TOTALE			c-Si						CdTe						CIGS						
	Anno dism	MW inst	t	MW	t	Input materie **	Output materie**	Altro (t)*	Discarica° (t)	MW	t	Input materie**	Output materie**	Altro (t) *	Discarica° (t)	MW	t	Input materie**	Output materie**	Altro (t) *	Discarica° (t)	
2006	2031	13	1.213	12	1128	1058	1027	70	31	0,38	36	36	33	0	3,73	0	0	0	0	0	0	0
2007	2032	27	2.592	24	2307	2162	2098	145	65	1,62	156	156	140	0	16	0	26	26	24	0	2,37	
2008	2033	353	33.535	304	28840	27050	26243	1791	807	18	1677	1677	1505	0	172	4	335	335	305	0	31	
2009	2034	712	66.216	591	54959	51585	50048	3375	1537	93	8608	8608	7726	0	882	7	662	662	602	0	61	
2010	2035	2326	209.340	2024	182126	171065	165975	11061	5091	186	16747	16747	15030	0	1717	47	4187	4188	3804	-1	383	
2011	2036	9303	818.664	8187	720424	677150	657024	43274	20126	558	49120	49175	44134	-55	5040	279	24560	24569	22276	-9	2284	
2012	2037	3916	336.776	3524	303098	285090	276628	18008	8462	235	20207	20252	18176	-45	2076	78	6736	6738	6099	-3	636	
2013	2038	1496	125.664	1361	114354	107696	104514	6658	3182	60	5027	5043	4527	-17	517	45	3770	3772	3408	-2	362	
2014	2039	409	33.538	376	30855	29059	28200	1796	859	16	1342	1346	1208	-5	138	8	671	673	607	-2	64	
2015	2040	298	23.840	265	21218	21048	20248	170	800	15	1199	1203	1080	-4	123	8	608	610	550	-2	58	
totale		18.853	1.651.378	16.668	1.459.309	1.372.963	1.332.005	86.348	40.960	1.183	104.119	104.243	93.559	-126	10.685	476	41.555	41.573	37.675	-19	3.881	

* i valori negativi dipendono dalle composizioni percentuali assunte e indicate dalla letteratura

° i quantitativi da smaltire non comprendono le tonnellate di materiale residuo derivante dai processi di trattamento (liquidi, fanghi e ceneri)

Altro = altre materie (ad esempio pib,tpt, silicone)

** valore in tonnellate

Tabella 7 - Quantitativi annui delle materie recuperate per tecnologia

I quantitativi del “recuperato” sono stati poi ripartiti per le singole materie, come illustrato nella successiva *Tabella 8*, ricostruita in segmenti temporali quinquennali.

Risalta il balzo del periodo 2036-2040 con quantitativi più che quadruplicati rispetto al precedente periodo.

ANNO Dism	t. totali	Materie di importanza economica									Materie Prime Critiche		
		Vetro	Polimeri	Cadmio	Alluminio	Argento*	Rame	Tellurio	Selenio**	Stagno, piombo**, zinco	Silicio	Indio	Gallio
2017-2020	2.112	1082	139	0	380	2	7	0	0	4	54	0	0
2021-2025	588	320	20	0	112	1	2	0	0	1	16	0	0
2026-2030	1.868	1141	69	0	333	4	7	0	0	4	53	0	0
2031-2035	312.896	225233	11311	18	25226	763	1972	18	1	383	9630	1	1
2036-2040	1.338.482	977220	48376	53	101999	1787	8674	51	17	1368	49112	10	13
2041-2045	234.346	157300	14389	8	14520	56	1416	7	8	189	7331	5	8
2046-2050	322.000	189722	16651	9	16708	56	1799	7	14	184	7495	8	14
totale	2.212.292	1552018	90955	88	159278	2669	13877	83	40	2132	73691	23	36

*prezioso, **tossico

Tabella 8 – Ripartizione delle materie recuperate (c-Si, CdTe, CIGS) in tonnellate

(elaborazione ENEA su fonti varie)

ANNO dism	t. totali	Materie di importanza economica									Materie Prime Critiche		
		Vetro	Polimeri	Cadmio**	Alluminio	Argento*	Rame	Tellurio	Selenio**	Stagno, Piombo**, Zinco	Silicio	Indio	Gallio
2017-2020	2.112	1731386		0	608.662	1.187.364	521.623	0	202	32.995	42.857	894	666
2021-2025	588	511767		0	179.997	351.272	149.474	0	56	9.158	12.679	249	185
2026-2030	1.868	1825562		20	532.551	1.868.743	574.034	543	0	32.578	42.691	0	0
2031-2035	312.896	360372925		47.776	40.360.963	397.005.130	157.766.269	1.301.490	49.818	4.104.218	7.704.111	220.471	164.286
2036-2040	1.338.482	1563551874		140.826	163.198.346	929.427.430	693.922.014	3.667.853	659.101	13.323.780	39.289.582	2.684.362	4.073.051
2041-2045	234.346	251680098		20.969	23.232.465	29.264.769	113.264.098	468.864	333.740	1.842.746	5.864.865	1.329.276	2.641.399
2046-2050	322.000	303555683		22.926	26.732.456	28.974.109	143.924.326	534.590	568.271	1.856.157	5.996.392	2.263.404	4.497.603
totale	2.212.292	2.483.229.295		232.516	254.845.440	1.388.078.817	1.110.121.838	5.973.340	1.611.189	21.201.632	58.953.177	6.498.655	11.377.190

*prezioso, **tossico

Tabella 9 - Ripartizione delle materie recuperate (c-Si, CdTe, CIGS) in valore economico

(elaborazione ENEA su fonti varie)

Traducendo le quantità in valore economico, si ottiene un quadro piuttosto convincente dei vantaggi economici ottenibili dalla gestione del fine vita del fotovoltaico (Tabella 9). Il valore economico delle attività di riciclo e/o vendita delle MPS è significativo, perché permette di compensare la scarsità e la criticità di alcune materie determinanti per l'applicazione tecnologica, le quali a loro volta, sono dipendenti dalle forti oscillazioni delle borse internazionali delle commodity.

Altro aspetto da evidenziare è il rapporto tra il peso e il valore economico delle materie (Tabella 10): a piccole concentrazioni di materiale recuperato spesso corrisponde il maggior valore economico, come nel caso dell'argento nella tecnologia al silicio, dove allo 0,25% di presenza corrisponde il 95,2% del valore economico del recuperato (Figura 14). Ciò significa che processi di trattamento più performanti hanno ritorni economici maggiori e che è opportuno utilizzare gli anni a disposizione per predisporre una policy nazionale utile ad avviare una filiera dedicata che prenda in considerazione costi e benefici complessivi.

Tipo materiale	Nome	% recupero max	Valore €/kg
Prezioso	Ag	94	490
Tossico	Cd	95	2,6
	Pb	93	1,9
	Se	80	39,84
Critico	Ga	99	318,5
	In	75	282,1
	Si	95	0,8
Altri	Al	99	1,6
	Cu	96	5,3
	Sn	99	15
	Zn	90	2,4
	Te	95	72
	Vetro	98	1,6*
	Polimeri	80	

* il valore è relativo a "scarti" di vetro; i valori delle altre materie recuperate è riferito ai prezzi in vigore per le materie prime (11/2019)

Tabella 10 - Valore economico delle materie recuperate €/t
(elaborazione ENEA su fonti varie³⁷)

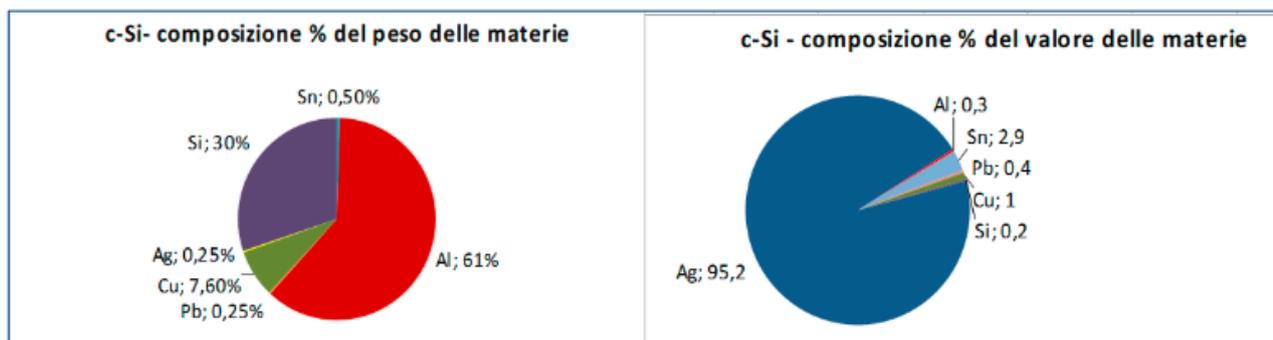
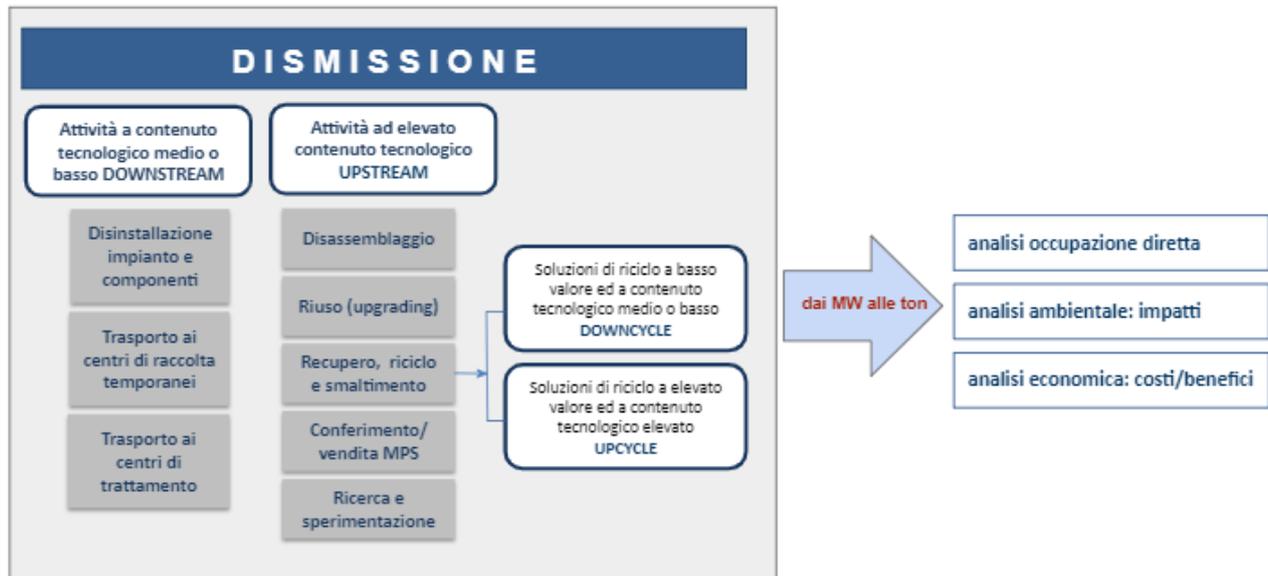


Figura 14 - Composizione dei pannelli a silicio cristallino (ad esclusione della componente vetro)

37. Quotazione materie prime al 13/11/2019 LME London <https://www.lme.com/Metals>; metal bulletin <https://www.metalbulletin.com/non-ferrous/minor-metals>; U.S. Department of the Interior U.S. Geological Survey "Mineral Commodity Summaries 2019".



LEGENDA	
Riutilizzo/Riuso:	UPGRADING di pannello e/o componenti per il suo riutilizzo
Riciclo:	reintroduzione di materiali recuperati nello stesso ciclo produttivo di origine
Recupero:	operazioni per ottenere materie prime seconde per l'utilizzo in filiere/cicli diversi da quello di origine
Recupero energia e/o calore:	produzione di energia e calore dai processi di trattamento e/o dagli scarti
Smaltimento:	depositi in discariche

Figura 16 - Catena del valore del fotovoltaico: la fase di dismissione

La *Figura 16* illustra le fasi finali della catena del valore che mettono in evidenza i processi di trattamento quali soluzioni cruciali per il recupero, riciclaggio e smaltimento dei pannelli a fine vita. Ai fini del presente studio si è tenuto conto di quei processi di trattamento *upcycle*, ossia soluzioni di riciclo ad elevato contenuto tecnologico così da ottenere i migliori risultati di recupero in termini di valore. Il prevalere della tecnologia a silicio cristallino che, come si è visto nella prima parte, caratterizza la maggior parte dei quantitativi da dismettere nei prossimi anni, ha orientato lo studio su una specifica tecnologia di trattamento attualmente esistente in Italia, anche se in forma sperimentale, che adotta un processo *upcycle* ed i cui dati di processo risultano disponibili. Si tratta del sistema FRELP per il trattamento dei pannelli a silicio cristallino che prevede un processo meccanico, termico e chimico dei pannelli dismessi e che permette di ottenere elevate percentuali di recupero finale.

5. Processi di trattamento

I processi in fase di studio per il trattamento dei pannelli a fine vita sono molteplici e alcuni sono già operativi, come nel caso della *FIRST SOLAR*, produttrice di pannelli a film sottile, che ha sviluppato una rete per il recupero e il trattamento dei pannelli a fine vita, da cui recuperare le MPS da reimmettere poi nel proprio ciclo produttivo.

Le tipologie di processo dipendono dal tipo di tecnologie con cui sono fabbricati i pannelli che si andranno a recuperare. I processi attraverso i quali vengono trattati i pannelli a fine vita possono essere di tre tipi:

- A. Trattamento meccanico. Comporta la rimozione del telaio e della scatola di giunzione, la triturazione e la selezione dei materiali che può avvenire con metodi diversi;
- B. Trattamento termico. Comporta la decomposizione del materiale incapsulante e delle altre sostanze polimeriche: la cornice ed il vetro sono riciclati mentre le celle devono passare per processi chimici;
- C. Trattamento chimico. Utilizzo di sostanze chimiche (leaching - lisciviazione) che permette di recuperare la componente dei metalli.

Il trattamento può anche comprendere l'insieme dei tre processi, in questo caso ci si riferisce a processi *upcycle* ossia a quel tipo di trattamento ad elevato contenuto tecnologico, in grado di garantire output di maggior valore.

Nel 2017, il gruppo francese *VEOLIA* ha vinto il bando di gara indetto da PV Cycle France, ottenendo un contratto di 4 anni per il trattamento dei moduli fotovoltaici a fine vita. Con un investimento di oltre un milione di euro, l'impianto, prima linea di trattamento dei RAEE in Europa dedicata esclusivamente al riciclaggio dei pannelli solari per la tecnologia del silicio cristallino, sarà in grado di gestire per i prossimi anni la crescita dei volumi sul mercato francese. Ulteriore obiettivo della francese *VEOLIA* è quello di riprodurre altre unità operative nella stessa Francia, ma anche all'estero, come ad esempio in Germania, in Italia, per arrivare a riciclare il 65% dei pannelli solari europei, od anche in Cina ed in Giappone. L'impianto nel primo anno di attività (2018) ha lavorato circa 2000 tonnellate di materiale, ma a pieno regime l'obiettivo è quello di trattare 4.000 tonnellate/anno, con un tasso di recupero del 95%, incluso il 90% nel recupero di materiali. Il trattamento di un singolo pannello dura circa 1/1,30, minuti mentre il numero degli occupati nell'impianto è indicato tra le 10 e le 19 unità lavorative. Al progetto ha contribuito anche l'azienda *La Mia Energia*³⁸ di Frosinone, la quale ha realizzato il macchinario che, con un processo esclusivamente meccanico, separa i vari materiali (impianto mobile Mo.Re.De.)

Negli ultimi anni anche in Italia sono state condotte sperimentazioni e studi su riciclo e recupero da parte di università, centri di ricerca e aziende private. Il progetto *FRELP* è una di queste sperimentazioni per lo sviluppo di una linea di trattamento - meccanico, fisico e chimico - di moduli al silicio cristallino con la finalità di ottimizzare il recupero delle materie prime seconde.

FRELP – *SASIL* (Full Recovery End of Life Photovoltaic), attivato nel 2013 all'interno del programma europeo LIFE in una partnership tra *SASIL* Srl, la Stazione Sperimentale del Vetro di

38. Società consortile a responsabilità limitata senza scopo di lucro, fondata nel 2009 da PMI, nata come E.S.Co. è oggi organismo di Ricerca, riconosciuto dal MIUR ed ente accreditato dal GSE come Consorzio Nazionale per il recupero e riciclo dei moduli fotovoltaici a fine vita e Sistema Collettivo per la gestione dei RAEE professionali sull'intero territorio nazionale.

Murano e PV Cycle, ha l'obiettivo di creare un prototipo industriale di impianto di trattamento e recupero dei materiali che compongono i pannelli fotovoltaici giunti a fine vita, in grado di permettere il recupero integrale del pannello, ossia un riutilizzo del 98/99% delle materie prime originali. Dopo un primo fermo delle attività nel 2015³⁹, il progetto nel 2016 ha ripreso ad operare, con il nome di FRELP by SUN a guida Tialpi (società partecipata da SASIL Srl attraverso la Minerali Industriali Srl) e con alcune modifiche al progetto iniziale. A fine 2019 risulta completato il prototipo che riproduce la I fase, sulla II fase sono stati effettuati dei test con risultati promettenti per quanto riguarda una riproduzione interna di un ciclo industriale, mentre la III e la IV fase sono state testate in laboratorio.

Il processo si articola in quattro fasi. La I fase del processo è costituita da un trattamento meccanico automatizzato che consiste nella separazione della cornice di alluminio, del connettore e della base di vetro ed è la più importante da un punto di vista del peso perché permette il recupero dell'88% del volume totale (70% vetro e 18% alluminio). La II fase si concentra sul cosiddetto sandwich (plastica e silicio metallico) a partire da un trattamento termico che separa il silicio metallico dalla plastica e che permette di recuperare i conduttori in alluminio. La III e la IV fase intervengono, infine, sul restante 4% di silicio che ancora si trova in forma grezza e che al suo interno contiene argento e rame. Questi vengono recuperati tramite processi chimici che trattano il "wafer" fotovoltaico ridotto in polvere. Se da un lato le prime due fasi, le più economiche da un punto di vista dell'investimento, da sole consentono il recupero di circa il 90% del peso dei materiali, è solamente con le successive fasi che, sebbene richiedano un investimento più elevato, si assicura la maggior remunerazione dell'investimento, restituendo materie prime di maggior valore.

39. il volume minimo di circa 5.000 tonnellate all'anno, necessario allo sviluppo del processo anche economicamente sostenibile, raggiungeva a fatica in quel periodo le 1.000 t/anno.

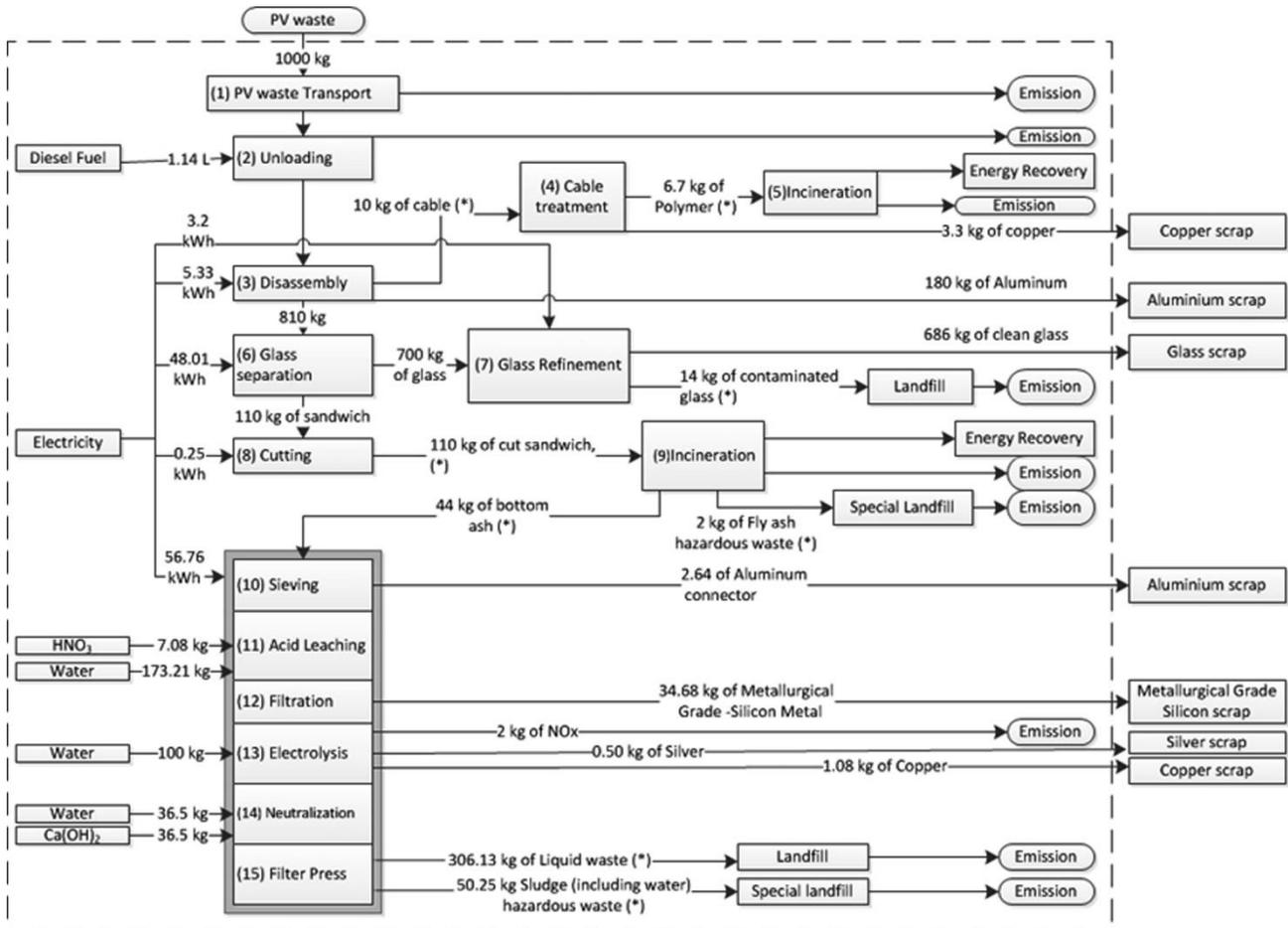


Figura 17 - Diagramma di flusso relativo al trattamento dei rifiuti da fotovoltaico

(fonte: Latunussa C.L. et al.2016a)

La documentazione che descrive, analizza e quantifica i diversi processi alla base del trattamento di recupero FRELP (Figura 17 e Tabella 11) ha consentito di effettuare alcune valutazioni utili nell'ipotesi di realizzazione di uno o più impianti di trattamento basati sul modello sviluppato. Secondo le stime e i business plan elaborati da SASIL, il quantitativo annuo di pannelli FV da trattare per rendere sostenibile il processo è di circa 7.000 t/anno, quantitativo che entro i prossimi anni⁴⁰ verrà sicuramente raggiunto.

In base ai due business-plan elaborati da SASIL, uno per la fase I e uno per le fasi II, III, IV, risulta che con un tale quantitativo il processo sarebbe sostenibile.

Il ritorno economico della fase I, completamente sperimentata a livello di prototipo, potrebbe essere realizzato già con un quantitativo di sole 2.000 t/anno di pannelli, pari ad un turno di lavoro. Il ritorno economico delle fasi II, III, IV richiede invece un minimo di 7.000 t/anno di pannelli, in quanto il ciclo di lavorazione è previsto in continuo, 24 ore su 24.

40. Dalle nostre stime la quota di 7000 tonnellate da lavorare sarà raggiunta nel 2032.

Input/Output	Quantità	Unità	Note
Input			
dismesso FV	1000	kg	
elettricità	113,55	kWh	richiesta in vari processi del trattamento tipo: disassemblaggio, separazione del vetro, taglio, separazione, lisciviazione acida, elettrolisi
carburante	1,14	L	scarico
acqua	309,71	kg	consumo di acqua per lisciviazione acida, elettrolisi e processi di neutralizzazione
HNO ₃ acido nitrico	7,08	kg	processi di lisciviazione acida
Ca(OH) ₂ Idrossido di calcio	36,5	kg	neutralizzazione delle soluzioni acide
Output, materie recuperate			
scarti di Al	182,65	kg	
scarti di vetro	686	kg	
scarti di rame	4,38	kg	
MG Silicio (silicio metallico di grado metallurgico)	34,68	kg	
Ag	0,5	kg	
Output, recupero energetico			
elettricità	248,84	MJ	prodotta dall'incenerimento dell'incapsulante, dei fogli back-sheet e dei polimeri estratti dai cavi
energia termica	502,84	MJ	prodotta dall'incenerimento dell'incapsulante, dei fogli back-sheet e dei polimeri estratti dai cavi
Output, rifiuti in discariche			
vetro contaminato	14	kg	deposito in discarica
ceneri (rifiuti pericolosi)	2	kg	deposito in discariche speciali
rifiuti liquidi	306,13	kg	deposito in discarica
fanghi (rifiuti pericolosi)	50,25	kg	contenenti residui metallici, deposito in discariche speciali
Output, emissioni in aria			
NO _x (ossidi di azoto)	2	kg	emissioni da elettrolisi

Tabella 11 - Trattamento dei rifiuti FV FRELP-SASIL per il c-Si: dati Inventario del Ciclo di Vita

(elaborazione ENEA, fonte Latunussa C.L. et al. 2016a)

La tecnologia SASIL permetterebbe di disgiungere la fase I dalle altre fasi. Ciò consentirebbe, soprattutto per motivi di logistica, di posizionare sul territorio più impianti per la fase I, e concentrare in un solo polo l'attività per le fasi II, III, IV che richiedono un maggiore investimento e hanno un maggior impatto ambientale⁴¹.

41. F. Aleotti (2018).

6. Una ipotesi per il trattamento dei pannelli dismessi in Italia

L'analisi mostra l'entità delle sfide che l'Italia dovrà affrontare nel prossimo futuro in tema RAEE, con particolare riguardo ai RAEE-FV che, dal 2033 e per circa un decennio, si manterranno su elevati quantitativi da smettere annualmente e che corrispondono a circa 170 mila tonnellate annue, di cui oltre 150 mila saranno relative alla tecnologia al silicio cristallino.

La stima dei quantitativi e le soluzioni tecnologiche per il trattamento del fine vita dei pannelli fotovoltaici, descritte nel capitolo 5, forniscono il quadro d'insieme sul quale è costruita la presente proposta.

Trasformare i rifiuti in una risorsa per il settore del fotovoltaico vuol dire implementare la filiera per il trattamento dei rifiuti elettronici, utilizzando i centri di raccolta esistenti e già ampiamente distribuiti lungo il territorio e ipotizzando la creazione di centri diffusi per il trattamento e il recupero delle materie prime seconde.

L'ipotesi si fonda sulla replica della tipologia di impianto sperimentale FRELP che opera per quantitativi annuali di 7000 tonnellate di RAEE fotovoltaici.

Nei paragrafi successivi verranno descritti i principali risultati dell'analisi economica, occupazionale e ambientale per poi giungere ad una valutazione d'insieme della proposta indicata.

6.1 Procedura d'analisi

Sebbene l'andamento del parco dell'installato da fotovoltaico mostri forti variazioni sia nel tempo che nella distribuzione geografica, l'analisi parte dall'assunzione che il flusso di materiale da smaltire debba essere costante. Il periodo di riferimento considerato è il decennio 2033-2042 che rappresenta il periodo con il maggior quantitativo di tonnellate di moduli da smettere. I moduli considerati sono quelli di prima generazione, in silicio cristallino, che rappresenta la tecnologia più diffusa in Italia del periodo di riferimento. Sulla base dell'ipotesi di utilizzo di impianti del tipo FRELP per trattare le tonnellate totali annue del decennio 2033-2042, si stima siano necessari 22 impianti con una capacità di 7000 tonnellate di RAEE fotovoltaici ciascuno.

Si è valutata la media annua di pannelli da smaltire (totale materiale da smaltire / numero di anni)

In questa parte è stata utilizzata la *catena del valore* secondo la ricostruzione riportata in Figura 18, che sintetizza le principali fasi del ciclo di vita della tecnologia fotovoltaica.

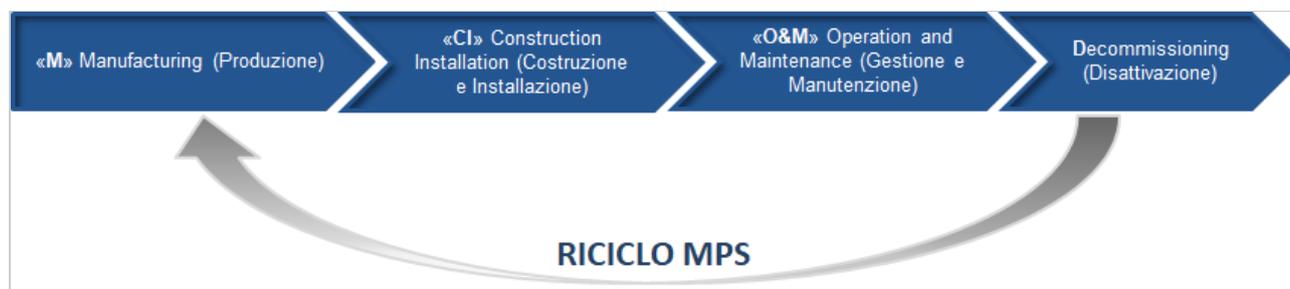


Figura 18 - Catena del valore della tecnologia del fotovoltaico al silicio cristallino

Il modello è stato già impiegato per uno studio⁴² incentrato sull'analisi occupazionale delle fasi di produzione, costruzione/installazione e gestione/manutenzione (*Figura 18*) di seguito brevemente descritte:

- *manufacturing* che riguarda le attività connesse alla produzione dei moduli fotovoltaici, comprese le attività di ricerca e sperimentazione;
- *construction and installation* che comprendono le operazioni di progettazione, costruzione e installazione di un impianto, le attività di assemblaggio degli inverter e delle varie componenti accessorie (BOS Balance of System) fino alla consegna dell'impianto.
- *operation and maintenance*, caratterizzate da attività di manutenzione e gestione degli impianti, prevalentemente di natura tecnica che consentono alle centrali e agli impianti di produrre energia nel rispetto delle norme e dei regolamenti vigenti.

Per quanto riguarda la fase di **dismissione** la *Figura 19* e la successiva descrizione illustrano il contenuto delle attività prese in esame nello sviluppo dell'ipotesi indicata.

La dismissione di un impianto prende avvio con le attività di disinstallazione delle componenti ed il trasporto del materiale dismesso ai centri di raccolta temporanei⁴³.

L'ipotesi prevede che, tra le attività realizzabili nei centri di raccolta, possano essere implementate anche le **attività di riuso** dei pannelli che sono ancora in buono stato di conservazione.



Figura 19 - Fase di dismissione della catena del valore FV

42. Felici et al. (2015).

43. Ai fini della proposta non verrà considerato il trasporto dei moduli al centro di raccolta sia per gli impianti domestici che per quelli professionali dal momento che la normativa distingue modalità procedurali diverse in relazione al periodo di installazione dell'impianto.

Si assume che possa essere rigenerato circa il 5% del dismesso annuo, sulla base delle indicazioni raccolte dalla letteratura tecnica per la quale, al termine di 25 anni, è possibile effettuare il riutilizzo di alcuni pannelli con un intervento di sostituzione leggera delle parti più usurate⁴⁴. La rigenerazione dei pannelli in tal caso potrebbe alimentare il mercato di seconda mano fornendo, a costi assai ridotti, dei prodotti ancora validi ed utilizzabili anche come misure di sostegno verso soggetti in difficoltà nell'accesso ai servizi energetici⁴⁵.

I restanti pannelli sono destinati ai centri di trattamento. Le azioni di questa fase si limitano alle **attività di trasporto** dai centri di raccolta temporanei ai centri di trattamento.

Una volta giunti a destinazione, si prevede che i pannelli siano sottoposti ad **attività di trattamento meccanico, termico e chimico** che consentano il massimo recupero delle Materie Prime Seconde. Il grado di sviluppo tecnologico⁴⁶ consente di prevedere attività di recupero e di vendita delle MPS, particolarmente redditizie soprattutto per le materie critiche e preziose⁴⁷, e di recupero di eventuale produzione di energia elettrica e termica.

6.2 Aspetti economici, occupazionali, ambientali della fase di dismissione

Sulla base di quanto sopra descritto, lo schema seguente illustra la sequenza di analisi utilizzata.

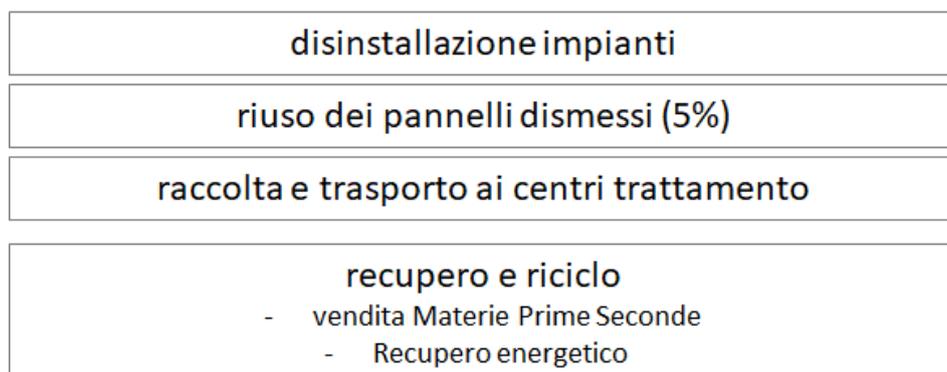


Figura 20 - Schema di analisi per una stima economica, occupazionale, ambientale della fase di dismissione

Per gli *aspetti occupazionali* sono stati utilizzati come riferimento i dati sperimentali FRELP e quelli dell'impianto francese VEOLIA operante dal 2018. Inoltre, si è fatto ricorso alla metodologia dell'Employment Factor⁴⁸ già utilizzata per l'analisi del settore fotovoltaico in Italia⁴⁹. La metodologia ha l'obiettivo di pervenire ad una stima dell'Employment Factor (da qui indicati come coefficienti EF), coefficiente che misura l'intensità occupazionale della tecnologia, espressa in

44. Per un approfondimento si rimanda al capitolo 2 del report IRENA, IEAPVPS, 2016 e alla nota 29.

45. L'Osservatorio Europeo sulla povertà energetica (EPOV) riferisce che in Italia nel 2016 il 16% della popolazione non riusciva a riscaldare adeguatamente la propria abitazione, contro una media UE dell'8,7%, e quasi il 9% si trovava in difficoltà con il pagamento delle bollette, rispetto a una media UE dell'8,1%.

46. Si veda il Capitolo 5 nel quale è descritta la tecnologia FRELP – SASIL in fase di sviluppo e sperimentazione.

47. Si veda in particolare il paragrafo 4.4.

48. Per l'analisi della metodologia originaria si veda Kammen D.M. et al. (2004).

49. Felici, B. et al. 2015.

numero degli occupati/anno per MW installati. Ad ogni attività corrisponde un differente coefficiente; per i coefficienti EF aggiornati al 2018 si rimanda all'Allegato 1.

Per gli *aspetti economici* sono stati utilizzati i dati del centro di trattamento sperimentale FRELP, i risultati presentati in letteratura e la consultazione dei borsini delle materie on line.

Per gli *aspetti ambientali* si è fatto ricorso ai dati ISPRA SINANET per le emissioni nella fase del Trasporto ed ai risultati della letteratura specialistica del settore per le fasi Trattamento e Riuso⁵⁰.

La maggior parte degli studi di valutazione del ciclo di vita (LCA) dei moduli solari si concentra sulla loro produzione, con enfasi sui requisiti energetici che contribuiscono in maniera importante all'impatto ambientale. Ultimamente c'è stato un crescente interesse anche sulle ricadute ambientali dei processi di riciclo dei moduli fotovoltaici, valutando anche gli impatti di uno specifico processo di riciclo, oppure effettuando il confronto del processo di riciclo con altri scenari, come lo smaltimento in discarica e l'incenerimento. La letteratura specialistica recente (Huang et al. 2017, Latunussa et al. 2016, Ardente et al. 2019, Lunardi et al. 2018) è concorde nel ritenere che i processi di riciclo ad elevato contenuto tecnologico, sebbene producano anch'essi inquinamento, hanno effetti negativi decisamente inferiori rispetto, ad esempio, allo smaltimento in discarica.

Questo risultato è dovuto principalmente al riciclo e riutilizzo di parte delle materie prime, il che conferma l'importanza dei processi di riciclo di alto valore rispetto ad altre soluzioni di trattamento/smaltimento, che non possano riutilizzare o riciclare singoli componenti oppure che comportino impatti peggiori (incenerimento/discarica), principalmente a causa del maggior consumo di energia primaria rispetto ad altri processi.

6.2.1 Disinstallazione impianti

L'attività consiste nell'insieme delle operazioni di smontaggio degli impianti e trasporto del materiale presso i centri di raccolta temporanei che, come si è visto nel paragrafo 3, nel 2018 contava di 4.883 centri di conferimento per la raccolta dei RAEE.

Per gli *aspetti economici* sono stati considerati:

- ✓ i costi stimati sulla base del salario lordo annuo per il numero degli occupati;

Per gli *aspetti relativi all'occupazione*:

- ✓ è stato utilizzato il coefficiente EF corrispondente alla fase di CI (costruzione e installazione)⁵¹ ridotto ad un quarto del valore scorpendo alcune attività che non sono previste in questa sottofase (informazione ricavata dai dati empirici raccolti in rete). Per ottenere il numero degli occupati/anno è stato moltiplicato il coefficiente per i MW totali disinstallati e successivamente ricavata la media annua del periodo considerato.

Sintesi dei dati delle attività di dismissione

Aspetti economici	Costi
(€/t)	524
Potenziale occupazionale	ULA
(occupati/anno)	1913

50. Huang et al. 2017, Latunussa, et al. 2016, Ardente et al. 2019, Lunardi et al. 2018.

51. Allegato 1.

La stima dei dati economici relativi alla fase di disinstallazione degli impianti non ha tenuto conto dell'ammontare del contributo diretto alla corretta gestione dei RAEE, che riguarda tutte le fasi del fine vita, in quanto informazione poco dettagliata (vedi paragrafo finale 6.3 e l'Allegato 4).

6.2.2 Riuso dei pannelli dismessi

Le attività di riuso riguardano l'upgrading di una quota dei pannelli dismessi nel periodo considerato, che si assume nella percentuale del 5%.

Per gli *aspetti economici* si è proceduto a:

- ✓ calcolare i **costi** moltiplicando il salario lordo annuo per il numero degli occupati;
- ✓ calcolare i **ricavi** derivanti dalla vendita dei pannelli rigenerati, considerando una riduzione del 70% del costo di un pannello nuovo.

Per gli aspetti relativi *all'occupazione*:

- ✓ è stato utilizzato l'EF corrispondente alla fase di Manufacturing (produzione)⁵². La scelta deriva dalla considerazione che l'attività di smontaggio e sostituzione di alcune parti usurate, possa essere assimilata all'attività di produzione di pannelli nuovi, ma senza azioni di lavorazione sul silicio o di produzione dei wafer. Per tale motivo il valore dell'EF utilizzato per il calcolo degli occupati di questa sottofase è stato ridotto al valore di 1,6 per MW, contro il valore di 1,8 originario. Il numero degli occupati/anno è stato ottenuto moltiplicando il coefficiente per la percentuale dei MW disinstallati destinati a Riuso, per poi ricavare la media annua del periodo considerato.

Sintesi dei dati delle attività di Riuso

Aspetti economici (€/t)	Costi 760	Ricavi 3570
Potenziale occupazionale (occupati/anno)	ULA 139	

Il riutilizzo sembra essere un'opzione migliore rispetto alla discarica e agli scenari di incenerimento perché, oltre a ridurre fortemente gli impatti, i moduli FV riparati possono essere rivenduti in alternativa come pannelli usati ad un prezzo ridotto di circa il 70% del prezzo di vendita del prodotto nuovo, contribuendo a creare una buona opportunità per un mercato secondario significativo⁵³.

6.2.3 Trasporto ai centri di trattamento

La presenza dei 22 impianti con capacità di 7000 tonnellate anno ciascuno permetterebbe una dislocazione capillare su tutto il territorio e il contenimento delle distanze tra centri di raccolta e impianti di trattamento. In questo caso si può quindi ipotizzare una distanza media tra loro di 100 km.

52. Allegato 1.

53. Lunardi, M.M. et al (2018a).

Per gli aspetti *economici*:

- ✓ la stima dei costi tiene conto delle tonnellate di pannelli dismessi da trasportare, del numero dei carichi da effettuare ogni anno, delle spese per l'acquisto la gestione e la manutenzione dei mezzi di trasporto, dei consumi per il carburante e del salario dell'equipaggio.

Il risultato del calcolo corrisponde ad una stima di 42 €/t (per i dettagli si veda la tabella in appendice) in considerazione del fatto che per effettuare una media annua di 438 carichi ciascun impianto dovrebbe essere servito da due mezzi di trasporto.

Per gli aspetti *relativi all'occupazione*:

- ✓ Le ULA (Unità Lavorative Anno) sono calcolate ipotizzando 2 persone per mezzo di trasporto impiegato e complessivamente due mezzi per ciascun centro di trattamento.

Per gli aspetti *ambientali*:

- ✓ si è proceduto a una stima delle emissioni moltiplicando i km da percorrere per le emissioni specifiche dei veicoli pesanti (675,5 g/km, dati ISPRA SINANET)

Sintesi dei dati delle attività di raccolta e trasporto

Aspetti economici (€/t)	Costi 42
Potenziale occupazionale (occupati/anno)	ULA 88
Aspetti ambientali (t di CO ₂ /anno)	1300

Il trasporto può aggiungere impatti ambientali significativi a tutti gli scenari EoL analizzati nello studio Lunardi et al. (2018a). Nel considerare gli impatti sulla salute umana e sugli ecosistemi, il trattamento non dovrebbe trovarsi a più di 80 km da una discarica o da un impianto di incenerimento, affinché il riciclo risulti l'opzione migliore. Anche per quanto riguarda l'esaurimento delle risorse, il metodo di trasporto influisce in maniera determinante e si sostiene che, per una distanza di 100 km, il processo di riciclo risulti ancora come la migliore opzione ambientale.

Secondo Latunussa et al. (2016b) i potenziali impatti ambientali del trasporto di rifiuti fotovoltaici al sito, si evidenziano in particolare per impoverimento abiotico (carburanti fossili), esaurimento delle risorse abiotiche (minerali), tossicità con effetto non cancerogeno, radiazioni ionizzanti e riduzione dell'ozono.

6.2.4 Trattamento: Riciclo e Recupero

Per gli aspetti *economici*:

- ✓ I ricavi sono stati calcolati moltiplicando i quantitativi delle singole materie recuperate nel processo FRELP, per i corrispondenti prezzi. Vale la pena segnalare che, a differenza delle altre materie, per il vetro è stato utilizzato il prezzo dei rottami e non della Materia Prima Seconda, fattore che potrebbe comportare una sottostima dei ricavi. Si evidenzia inoltre come, secondo nostre valutazioni, il potenziale di MPS recuperabili possa essere anche superiore a

quanto stimato da FRELPA; si rimanda all'appendice per ulteriori dettagli e valutazioni. Assumendo tuttavia le ipotesi più conservative è possibile stimare un ricavo di 620 €/t.

- ✓ Nel computo dei costi, sono stati considerati: il mutuo per l'acquisto di macchinari e terreni, gli stipendi, il costo di materie e energia quali input nel processo di lavorazione dei pannelli, il costo del conferimento in discarica di alcuni output del ciclo di lavorazione.

L'insieme dei costi è stimato in 368 €/t nell'ipotesi più prudente.

Per un maggiore dettaglio si rimanda all'Allegato 2.

Per gli aspetti relativi all'occupazione:

- ✓ si stima l'insieme degli operatori di impianto, degli addetti alla gestione tecnico amministrativa e alla vendita di MPS. Sulla base della corrispondenza di tali attività e del livello tecnologico avanzato dei processi, sono stati considerati i dati dell'esperienza francese di Veolia che nel 2018 ha occupato 19 ULA (per 4.000 t/anno).

Per gli aspetti ambientali:

- ✓ si è fatto riferimento al report Latunussa et al. 2016, Ardente et al. 2019. Il risultato dell'analisi dei dati, illustrato nella tabella delle categorie di impatto ambientale, indica nella prima colonna i valori espressi per un impianto che lavora 7.000 t/anno e nella seconda quelli per i 22 impianti necessari a lavorare il totale dei quantitativi di rifiuti FV per anno.

Sintesi dei dati delle attività di Riciclo e Recupero

Aspetti economici (€/t)	Costi 368	Ricavi 620
Potenziale occupazionale (occupati/anno)	ULA 732	
Aspetti ambientali (attività di maggior impatto)	<i>recupero di metalli dalle ceneri</i> : l'onere per l'ambiente è causato dal consumo di elettricità e delle soluzioni acide ed influiscono su particolato, acidificazione, eutrofizzazione terrestre e marina, eutrofizzazione dell'acqua dolce, esaurimento delle risorse idriche e formazione di ozono fotochimico.	<i>incenerimento</i> : l'onere per l'ambiente risulta in particolare nella categoria di impatto dell'ecotossicità dell'acqua dolce e nell'effetto tossicità cancerogena per l'uomo dovuti in particolare allo smaltimento del materiale residuo (ceneri volanti) in discarica.

Categoria di impatto	Unità di misura	per impianto/ anno	per 22 impianti/ anno
Cambiamenti climatici	kg CO ₂ eq	1,79E+06	3,94E+07
Impoverimento ozono	kg CFC-11 eq	9,17E-02	2,02E+00
Tossicità umana, effetti cancerogeni	CTUh	1,53E-01	3,37E+00
Tossicità umana, effetti non cancerogeni	CTUh	6,65E-02	1,46E+00
Particolato	kg PM _{2,5} eq	3,92E+02	8,62E+03
Radiazioni ionizzanti HH	kg U235 eq	9,59E+04	2,11E+06
Radiazioni ionizzanti E (interim)	CTUe	2,97E-01	6,53E+00
Formazione fotochimica di ozono	kg NMVOC eq	1,66E+04	3,65E+05
Acidificazione	molc H+ eq	1,41E+04	3,10E+05
Eutrofizzazione terrestre	molc N eq	7,14E+04	1,57E+06
Eutrofizzazione acque dolci	kg P eq	2,59E+02	5,70E+03
Eutrofizzazione marina	kg N eq	6,30E+03	1,39E+05
Ecotossicità acque dolci	CTUe	8,40E+06	1,85E+08
Impoverimento risorse idriche	m ³ acqua eq	4,00E+05	8,80E+06
Impoverimento risorse abiotiche (minerali)	kg Sb eq	6,05E+00	1,33E+02
Impoverimento abiotico (carburanti fossili)	MJ	1,09E+07	2,40E+08

Tabella 12 - Aspetti ambientali del trattamento: potenziali impatti

Ipotizzando che la stessa filiera produttrice del rifiuto, ossia l'industria fotovoltaica, reimpieghi nel proprio ciclo produttivo le materie recuperate nel periodo 2033-2042, si stima una capacità produttiva di 2850 nuovi pannelli fotovoltaici (circa 720.000 euro) ad un costo decisamente inferiore rispetto ad una produzione con materie prime. Questo permetterebbe oltre che la sostituzione di Materie Prime, la riduzione dei costi in termini di ROI (Ritorno dell'investimento nella produzione) e soprattutto dei costi energetici, con un considerevole contributo all'abbattimento delle emissioni di carbonio. Sotto questo aspetto infatti Latunussa et al. 2016b stima che, in generale, il processo di recupero di MPS produce notevoli benefici ambientali rispetto alla produzione dello stesso quantitativo di materie prime.

6.3 Un quadro d'insieme

La *Tabella 13* illustra l'esito della valutazione economica occupazionale ed ambientale relativa al sistema di dismissione che comprende una rete di 22 impianti per il trattamento. Sebbene l'analisi presenti diversi elementi di incertezza, in assenza di consolidate conoscenze soprattutto sul piano dell'investimento economico, l'insieme delle valutazioni economica, ambientale ed occupazionale, relative al decennio 2033-2042, dimostra una complessiva convenienza economica, un significativo impatto occupazionale positivo e un impatto ambientale contenuto rispetto ad altri sistemi di trattamento downcycle.

Dal punto di vista economico, nell'ambito dell'ipotesi qui considerata, la fase di upgrading contribuirebbe in misura importante a fornire il maggiore apporto seguito dai ricavi della vendita delle Materie Prime Seconde, anche considerando i sistemi di trattamento più innovativi e performanti che consentano percentuali alte di recupero e con un certo grado di purezza delle materie recuperate.

Dal punto di vista occupazionale, il maggiore contributo si ha nelle operazioni di disinstallazione e smontaggio degli impianti distribuiti lungo tutta la penisola.

Dal punto di vista ambientale la maggior parte dell'impatto della fase dismissione è dovuta alle operazioni di trasporto ed ai processi di incenerimento e di recupero del metallo, che, nel sistema di trattamento considerato nello studio, comprende setacciatura, lisciviazione acida, elettrolisi e neutralizzazione. In generale, gli impatti di un processo di riciclo ad elevato contenuto tecnologico risultano inferiori se confrontati con i processi di trattamento generici (incenerimento, discarica), in particolare per l'esaurimento abiotico (minerali), per il recupero di importanti materie quali silicio metallico, rame e argento e per il risparmio energetico.

	Sintesi economica (€/t)	Sintesi occupazionale (persone/anno)	Sintesi potenziale impatto ambientale
1) disinstallazione	-524	1913	Medio
2) upgrading e vendita pannelli usati RIUSO	2810	140	Basso
3) trasporto ai centri trattamento	-42	88	Elevato
4a) trattamento meccanico/termico/chimico	-368		Elevato ma con forte compensazione
4b) vendita MPS e produzione energetica	620	732*	Medio
TOTALE	2496	2873	
* il valore comprende la somma delle fasi 4a e 4b			

Tabella 13 - Sintesi delle principali conclusioni dell'ipotesi di realizzazione impianti di trattamento

Nelle stime fin qui fatte e sintetizzate in *Tabella 13* non si è tenuto conto dei fondi disponibili, quale contributo diretto alla corretta gestione dei RAEE: il Fondo CDCRAEE, il fondo di garanzia presso il GSE, il fondo ecocontributo RAEE, il fondo di garanzia presso il MATTM e infine la tassa sui rifiuti (vedi Allegato 4). Questi fondi insieme partecipano a sostenere finanziariamente i diversi processi di cui si compone l'intero sistema di gestione dei RAEE: dagli aspetti di gestione amministrativa, procedurale e di controllo, a quelli più propriamente operativi (raccolta, trasporto, trattamento, smaltimento).

La conoscenza dell'ammontare dei fondi avrebbe consentito di effettuare una analisi degli aspetti costi/benefici più puntuale. In generale è però possibile affermare che sotto il profilo economico, in base alle nostre stime, pur senza l'intervento di fondi dedicati "diretti", il contributo "indiretto" fornito dalla vendita delle materie prime seconde e dei pannelli rigenerati, sembra offrire l'intera copertura dei costi e addirittura un cospicuo ricavo per gli operatori.

Conclusioni

In previsione di una crescita del settore fotovoltaico, che presumibilmente avverrà per effetto dell'attuazione del Piano Clima Energia, lo studio ha affrontato il tema della dismissione degli impianti giunti al termine del loro ciclo di funzionamento. Si tratta di un tema fortemente strategico a livello internazionale e per l'Italia di un probabile problema di gestione dei rifiuti elettronici. Nello studio evidenziamo che la filiera del riciclo-riuso dei pannelli fotovoltaici, con un volume di almeno 7000 t/anno di materiale dismesso, potrebbe generare profitti con le tecnologie in fase di implementazione. Se nei prossimi decenni, la filiera riuscisse a trattare tutti i pannelli dismessi a livello nazionale, si garantirebbero inoltre interessanti risvolti occupazionali.

Lo sviluppo della filiera descritta nello studio, si inserirebbe a pieno titolo nelle strategie adottate dalla Commissione Europea in tema di economia circolare, alle quali il nostro paese sta cercando di uniformarsi. Le presenti conclusioni sono state scritte nel periodo in cui venivano pubblicati due Decreti Legislativi, il n. 116 e il n. 118 del 3 settembre 2020, che riguardavano rispettivamente la gestione degli imballaggi e dei rifiuti di imballaggio e quella di RAEE e pile e accumulatori.

I due provvedimenti si armonizzano con il pacchetto di misure sull'economia circolare della Commissione Europea che, dal 2015, ha intrapreso un deciso percorso, anche finanziario, verso la riduzione degli scarti e il recupero di risorse dai rifiuti e, più in generale, verso il futuro approccio nella gestione dell'intero ciclo dei paesi europei.

L'approccio della Commissione è profondo e radicale: "Le risorse sono preziose e vanno conservate, sfruttandone al massimo il potenziale valore economico. L'economia circolare si prefigge di ridurre i rifiuti e proteggere l'ambiente, ma presuppone anche una profonda trasformazione del modo in cui funziona la nostra intera economia". Le parole del vicepresidente della Commissione Timmermans, sembrano spingere verso l'abbandono di un modello di sviluppo bulimico e privo di un approccio redistributivo.

Dal punto di vista economico e occupazionale l'economia circolare si inserisce in un trend che, nel solo settore estrattivo e di trasformazione delle materie prime in Europa, ha portato alla generazione di oltre 206 miliardi di euro di valore aggiunto e 3,4 milioni di posti di lavoro. Il piano d'azione per l'economia circolare⁵⁴ si propone di stimolare ulteriormente l'innovazione e l'occupazione relativa ai settori del riutilizzo e del riciclaggio, considerando che le attività di riparazione e di recupero dei materiali hanno sinora generato un valore pari a 103 miliardi di euro e 2,2 milioni di posti di lavoro.

Lo sviluppo dell'economia circolare presenta infine interessanti ricadute in relazione alla sicurezza degli approvvigionamenti delle materie prime. In particolare, la connessione tra RAEE e approvvigionamento delle materie prime contenute nelle nuove tecnologie energetiche è ben chiara alla Commissione Europea, come riportato nel Capitolo 2. Per l'Europa del Green Deal, un'alternativa reale alla concorrenza con Cina e USA, è rappresentata dall'economia circolare che, nel caso del settore del fotovoltaico, consente soluzioni tecnologiche soprattutto per il recupero e riutilizzo di materiali strategici, quali indio, gallio e silicio, per la produzione di nuove celle solari.

Questo rapporto contiene diversi elementi a sostegno dell'opportunità e dell'urgenza di predisporre sin da ora misure di intervento per la gestione del fine vita dei pannelli fotovoltaici.

54. European Commission "Circular Economy Action Plan: For a cleaner and more competitive Europe" (2020).

Una prima ragione sta nelle grandi quantità di materie da tempo presenti nel circuito della produzione energetica delle rinnovabili italiane che, nel volgere di pochi anni, dovranno essere prima dismesse e poi recuperate secondo la visione dell'economia circolare.

Si tratta di azioni di contenimento della grande pressione ambientale che interesserà in particolare alcune regioni italiane (Lombardia, Veneto, Emilia Romagna, Puglia) toccate dal grande exploit del fotovoltaico italiano nel triennio 2008-2011.

L'analisi dei quantitativi delle materie in dismissione consente di mettere a confronto i dati economici ed occupazionali di diverse strategie operative che possono prevedere la vendita delle materie prime seconde e/o il reimpiego nello stesso ciclo produttivo delle materie recuperate, con la conseguente opportunità di contribuire al rilancio del mercato fotovoltaico italiano.

Un discorso a parte va fatto per il mercato del riuso dei pannelli dismessi verso il quale, a nostro avviso, continua ad esserci ingiustificatamente ancora scarso interesse. L'analisi della letteratura indica, al contrario, la possibilità di poter disporre di un certo numero di pannelli funzionanti anche oltre il limite convenzionalmente fissato per il loro fine vita. Ciò rappresenterebbe un investimento significativo in una prospettiva ambientale, sociale ed economica.

L'analisi mostra infatti che sostenere la filiera dell'usato significa puntare in misura rilevante sull'occupazione ed al tempo stesso garantire ad una larga fascia della popolazione a basso reddito la possibilità di accedere al mercato delle rinnovabili a costi contenuti; infine, a mettere in campo interventi pubblici di contrasto alla povertà energetica.

Nella prospettiva ambientale va sottolineato il duplice vantaggio che si ottiene con il riciclo e con la preparazione per il riutilizzo dei RAEE, sia per i consumi energetici ridotti che per l'uso ridotto delle materie prime. Il riciclo consente inoltre di ridurre significativamente le emissioni di CO₂ conseguenti alle attività necessarie a monte per la fabbricazione di nuovi prodotti; ad esempio per acciaio e alluminio, si determinano rispettivamente il 58% e il 23% delle minori emissioni di CO₂ ed il 60% e il 14,6% dei risparmi di consumi energetici sul recupero da rottami (CONAI, 2018).

Il trattamento *upcycle*, cioè ad elevato contenuto tecnologico e di recupero, ha impatti ambientali fortemente inferiori rispetto ai processi *downcycle*, discarica ed incenerimento. I minori impatti dipendono infatti da consumi energetici inferiori e dal riutilizzo delle materie, rappresentando quest'ultimo invece, una perdita nel caso degli altri due processi.

Allegato 1 - Il metodo dell'Employment Factor per il calcolo dell'occupazione

L'Employment Factor è tra i metodi sviluppati negli ultimi anni per il calcolo dell'occupazione prodotta nel settore delle fonti rinnovabili.

Il metodo introdotto da Daniel Kammen⁵⁵ si poneva l'obiettivo di pervenire ad una stima degli occupati "Full Time Equivalent" (FTE) necessari per realizzare una unità di produzione energetica espressa in megawatt.

Una versione del metodo EF adattata all'analisi dell'occupazione nel fotovoltaico italiano si trova nel Rapporto Tecnico ENEA pubblicato nel 2015⁵⁶.

Lo studio del 2015 prendeva a riferimento la ricostruzione delle principali fasi della catena del valore della tecnologia fotovoltaica, per procedere con la costruzione dei relativi EF per l'Italia. In assenza di dati empirici sul mercato del lavoro italiano nel FV, si decise di utilizzare i dati esistenti per la Germania, paese dalle caratteristiche tecnologiche, di mercato e produttive in qualche modo comparabili a quelle italiane (*Tabella 14*).

Anno	Occupati	Imprese	MW inst	MW cum	Occupati	Imprese	MW inst	MW cum
2012	87.900	5.000	7.600	32.400	?	?	3.646	16.420

Tabella 14 - Dati nel mercato del settore FV in Germania e Italia relativo al 2012

Poiché le informazioni pubblicate dal German Federal Ministry of Economics and Technology provenivano dalle aziende del settore fotovoltaico in modo aggregato, occorre ricavare una scomposizione del dato, distinguendo tra occupati diretti e indiretti, e successivamente tra gli addetti delle diverse fasi della catena del valore, riguardanti gli occupati diretti. Per effettuare la scomposizione sono state utilizzate le informazioni dei principali istituti di ricerca o delle maggiori federazioni europee del settore⁵⁷.

Calcolati i coefficienti EF per la Germania, è stato applicato, sulla base delle caratteristiche del mercato, un fattore correttivo per adattare i coefficienti alla realtà italiana. Successivamente gli EF sono stati utilizzati per ricavare una stima del numero degli occupati nel settore relativamente al 2012 (*Tabella 15*). Per una descrizione più dettagliata della metodologia si rimanda alla pubblicazione Felici et al. 2015.

2012	Fasi	MW	EF Italia	Occupati
M	Silicio e wafer, moduli e celle, bos e inverter	3646	1,32	4813
CI	Distribuzione e installazione	3646	1,48	5396
O&M	Gestione e manutenzione	16690	0,09	1502
totale occupati diretti				11674

Tabella 15 - Occupazione calcolata sulla base dell'EF del settore FV in Italia

55. D. M. Kammen, K. Kapadia, and M. Fripp (2004) *Putting Renewables to Work: How Many Jobs Can the Clean Energy Industry Generate?* RAEI Report, University of California, Berkeley.

56. Felici et al. (2015), <http://hdl.handle.net/20.500.12079/6710>.

57. Europea Photovoltaic International Association (divenuta Solar Power Europe), Irena, EurObserver,...

A distanza di cinque anni si è ritenuto necessario verificare se i coefficienti EF rispondessero all'evoluzione di un settore in forte sviluppo. Tale esigenza si lega all'utilizzo dei coefficienti per le fasi di dismissione, che nel lavoro del 2015 non erano state prese in considerazione, ai fini del calcolo occupazionale. Tali fasi, come evidenziato all'interno del capitolo 6, sono associabili alle fasi M (Produzione) e CI (Costruzione e Installazione), rendendo lecito pertanto l'utilizzo ei coefficienti EF a questi riferiti.

Per il ricalcolo dei nuovi coefficienti si è proceduto utilizzando le informazioni provenienti dall'associazione Solar Power Europe, che riunisce i maggiori operatori europei del settore fotovoltaico⁵⁸ e i dati sull'occupazione tedesca dell'anno 2018. Questa è stata scomposta utilizzando le percentuali sul 'peso' occupazionale delle diverse fasi della catena del valore.

Nella *Tabella 16* riassuntiva è riportato il raffronto tra i dati del 2012 e del 2018 i quali riportano la composizione in percentuale delle componenti della catena del valore e i coefficienti EF.

Fasi Catena del Valore	2012	2018	EF 2012	EF 2018
M	50%	6%	1,32	1,8
CI	40%	56%	1,48	4,6
O&M	10%	38%	0,09	0,2
TOTALE	100%	100%	2,89	6,6

Tabella 16 - Confronto tra coefficienti EF

(fonti: Epia per il 2012 e Solar Power Europe per il 2018)

Nel complesso nel 2018 il contributo proveniente dalle fasi CI e O&M è maggiore del 2012 mentre la fase M, relativa alle attività di produzione dei moduli e componenti, risulta fortemente ridimensionata data anche la scarsa presenza di imprese italiane nel mercato fotovoltaico. Il coefficiente EF totale nel 2018 è quasi tre volte quello del 2012.

58. Solar Power Europe "Solar PV Jobs & Value Added in Europe" (2017).

Allegato 2 - Elementi di dettaglio degli aspetti economici

Secondo le nostre stime presentate nei paragrafi precedenti, nel periodo 2032-2043 dovranno essere dismessi prevalentemente pannelli c-Si, per un ammontare complessivo di 1.507.271 tonnellate.

	Unità di misura	Stime ENEA	FRELP - SASIL	Prezzi (€/kg)
Vetro	kg	741,1	686,0	0,006
Eva	kg	36,8		0,7
Pet	kg	2,7		0,7
Alluminio	kg	83,7	182,0	1,6
Silicio	kg	40,3	34,7	0,8
Argento	kg	1,7	0,5	490
Rame	kg	6,7	4,4	5,3
Stagno	kg	0,8		15
Piombo	kg	0,4		1,9
Energia elettrica	kWh		69,1	0,20
Energia termica	litri di gasolio equivalente		13,7	1,05

Tabella 17 - Materie prime seconde ricavate dalla dismissione di 1 t di pannelli c-Si

I ricavi

La *Tabella 17* confronta due diverse ipotesi relative alla quantità di MPS recuperabili per ogni tonnellata di pannelli c-Si dismessa. Le stime ENEA possono essere considerate come un potenziale teorico, ricavato dall'analisi della letteratura più recente relativa al riciclo dei pannelli c-Si. I dati FRELP sono ricavati da dati di laboratorio relativi alla specifica tecnologia utilizzata nell'impianto pilota. I prezzi delle MPS e dell'energia recuperata nel processo FRELP sono riportati nell'ultima colonna della tabella; utilizzando tali valori si ottiene un ricavo per tonnellata di input compreso tra 620€ (ipotesi FRELP, comprensiva della valorizzazione dei recuperi di energia) e 1077€ (ipotesi ENEA). Vale la pena segnalare che, a differenza delle altre materie, per il vetro è stato utilizzato il prezzo dei rottami e non della MPS, fattore che potrebbe comportare una sottostima dei ricavi per entrambe le ipotesi.

L'analisi dei costi di produzione può essere facilmente suddivisa tra:

- rata per il rimborso del mutuo per l'acquisto di macchinari e terreni,
- stipendi,
- costo di materie e energia quali input nel processo di lavorazione dei pannelli,
- costo del trasporto.

Costo dell'impianto e dei terreni

Attualmente, è possibile avanzare ipotesi di costo su impianti aventi una capacità di 4000-7000 tonnellate di input per anno (Veolia e FRELP-SASIL). Il costo di investimento dichiarato da Veolia è pari a 1 M€, mentre quello dichiarato da FRELP è di circa il doppio. Ipotizzando anche un costo del terreno pari 1M€, l'incidenza di un mutuo decennale, al tasso di interesse del 4% per l'acquisto di macchinari e terreni, si aggira tra i 53 e i 62 €/t.

Stipendi

Per quanto riguarda il costo del lavoro, sono disponibili stime differenti relativamente al numero di addetti per impianto. FRELP SASIL ipotizza 13.000 ore di lavoro nelle varie fasi del processo (equivalenti ad 8 addetti), non tenendo conto del personale amministrativo e della fase di commercializzazione.

Veolia stima 10/19 addetti nel suo impianto pilota. Utilizzando quindi i dati Veolia e ipotizzando un salario lordo medio di 40.000 € l'anno, otteniamo un'incidenza del costo del lavoro tra 100 e 190 €/t.

Input del ciclo di lavorazione

Il fabbisogno di materie ed energia quali input del processo sono riportati da FRELP SASIL nella *Tabella 18*. La tabella riporta anche gli output del processo che non possono essere valorizzati economicamente e il cui smaltimento richiede il pagamento di una tariffa. I dati sui costi degli input e delle tariffe di smaltimento sono ipotesi ENEA che portano a una stima di 116 € per tonnellata di pannelli dismessi.

	Quantità	u.d.m.	Prezzo €/u.d.m.	Costo (€)
INPUT				
elettricità	113,55	kWh	0,20	22
carburante	1,14	L	1,05	1
acqua	309,71	kg	0,002	1
acido nitrico	7,1	kg	1,6	11
idrossido di calcio	36,5	kg	0,9	33
OUTPUT				
NOx	2	kg		
rifiuti discarica	320	kg	0,11	35
rifiuti discarica speciale	52,25	kg	0,24	13

Tabella 18 - Costi materiali di input e dello smaltimento di rifiuti / t di pannelli c-Si dismessi
(processo FRELP-SASIL)

Il costo del trasporto

L'incidenza del costo del trasporto dei pannelli dai centri di raccolta agli impianti di lavorazione è infine stimata sulla base delle ipotesi che seguono.

Per smaltire la quantità di pannelli prevista nel periodo 2032-2043, servirebbero 22 impianti del tipo FRELP-SASIL. Ciò permetterebbe una dislocazione capillare su tutto il territorio e il contenimento delle distanze tra centri di raccolta e impianti di trattamento. In questo caso si può quindi ipotizzare una distanza media di 100 km.

Il costo del trasporto dei pannelli è stimato in 42 €/t sulla base di una serie di ipotesi riportate nella *Tabella 19* e *Tabella 20*.

	Impianto singolo
Materiale dismesso (t/anno)	7000
Numero carichi/anno	438
Mezzi	2
Costo mezzo (€)	130000
Equipaggio /mezzo di trasporto	2
Salario equipaggi (€)	204.000
Rata mezzi (€)	32.056
Spese varie mezzi (€)	30000
Spesa carburante complessiva (€)	28438
Totale costi di trasporto (€)	294.493,15
Costo per unità di input (€/t)	42

Tabella 19 - costo del trasporto dei pannelli per un impianto di trattamento da 7000 t/anno

Materiale trasportato per ogni carico (t)	16
Tasso di interesse mezzi	4%
Anni durata prestito	10
Assicurazione, bollo, manutenzione (€/mezzo)	15.000
Costo gasolio (€/l)	1,3
Consumo carburante (km/l)	4

Tabella 20 - Ulteriori ipotesi per la stima del costo del trasporto

Allegato 3 - Elementi di dettaglio degli aspetti ambientali

Per comprendere gli aspetti ambientali connessi ai processi di trattamento ad elevato recupero di materie si è fatto riferimento ai dati presentati in “Analysis of Material Recovery from Silicon Photovoltaic Panels” Latunussa et al. 2016⁵⁹. Lo studio descrive l'applicazione della metodologia di valutazione del ciclo di vita (LCA) del processo innovativo, sviluppato nell'ambito del progetto FRELP, attraverso la definizione del “peso” di 16 categorie di impatto (vedi *Tabella 21*), generati dal “system boundary”. Il “boundary system” dell'LCA inizia con la raccolta dei rifiuti FV e termina con la produzione di materiali riciclabili, comprendendo dunque le fasi di Trasporto e di Trattamento.

In generale lo studio ha mostrato che il riciclo dei rifiuti fotovoltaici è vantaggioso per tutte le categorie di impatto. Ciò è risultato evidente dal confronto tra gli impatti del trattamento FRELP di 1000 kg di FV dismesso e quelli della produzione di 1000 kg di pannelli fotovoltaici: il processo di recupero di MPS produce benefici ambientali in tutte le categorie di impatto, rispetto alle emissioni dovute alla produzione dello stesso quantitativo di nuovi pannelli. Inoltre, dal confronto col trattamento dei rifiuti fotovoltaici in impianti di riciclo generici (*downcycle*) di rifiuti RAEE, anche se il riciclo innovativo del FRELP ha mostrato impatti maggiori per la lavorazione, i vantaggi in termini di materiali riciclati sono molto più elevati. Infatti, rispetto al riciclo *downcycle*, il processo FRELP consentirebbe una riduzione di circa il 10-15% di diverse categorie di impatto (riscaldamento globale, tossicità umana-cancro, ecotossicità dell'acqua dolce e radiazioni ionizzanti). Benefici maggiori sono stati osservati per la tossicità umana non cancerogena, eutrofizzazione d'acqua dolce, potenziale di acidificazione, particolato e riduzione dell'ozono. In più, per il recupero di alcune frazioni attualmente perse (es. silicio e argento) e per la maggiore quantità e qualità di altre frazioni riciclate (alluminio, vetro e rame), i vantaggi del processo di riciclo FRELP, per quanto riguarda il potenziale di esaurimento abiotico, sono nettamente superiori rispetto a quelli dell'attuale trattamento del FV a fine vita in impianti generici di trattamento di rifiuti RAEE. In particolare, per l'alluminio si consegue un beneficio tale da ridurre del 10/50% gli impatti per la produzione di alluminio primario. In generale, nelle comparazioni effettuate nello studio, tutti i benefici ambientali per le categorie considerate risultano essere maggiori nel processo FRELP, soprattutto per l'esaurimento abiotico (minerali) e per il recupero di importanti materie quali silicio metallico, rame e in particolare argento.

In base ai risultati, lo studio ha evidenziato che la maggior parte di impatto del processo FRELP è dovuto ai trasporti ed ai processi di incenerimento e di recupero del metallo, che comprende setacciatura, lisciviazione acida, elettrolisi e neutralizzazione. I potenziali impatti ambientali del *trasporto* dei rifiuti FV al sito di trattamento sono dovuti in particolare all'esaurimento abiotico (fossile) e delle risorse abiotiche (minerale), alla tossicità umana con effetto non cancerogeno, alle radiazioni ionizzanti e alla riduzione dell'ozono. Il peso per l'ambiente correlato all'*incenerimento* si vede particolarmente nell'impatto sull'ecotossicità dell'acqua dolce e sulla tossicità umana-effetto cancerogeno. In queste due categorie, il massimo di impatto è il carico ambientale derivante dallo smaltimento del materiale residuo (ceneri volatili) in discarica.

59. Cynthia E. L. Latunussa, Lucia Mancini, Gian Andrea Blengini, Fulvio Ardente, David Pennington JRC technical report “Analysis of Material Recovery from Silicon Photovoltaic Panels” Life Cycle Assessment and Implications for Critical Raw Materials and Ecodesign - (2016a).

Critério di analisi dei dati per il loro utilizzo nello studio ENEA

L'analisi LCIA condotto nel report JRC ha evidenziato il peso di 16 categorie degli impatti generati dal "system boundary" stabilito, che comprende le attività di Trasporto e di Trattamento della fase Dismissione dello studio ENEA.

I due studi fanno riferimento agli stessi dati di input e di output relativamente al processo di Trattamento, mentre differiscono circa gli input delle attività di Trasporto.

Pertanto si è reso necessario scorporare dalle 16 categorie di potenziale impatto ambientale, per il processamento di 1000kg di fotovoltaico dismesso, la percentuale corrispondente alla fase TRASPORTO, modificando i valori delle 16 categorie di impatto. La tabella di seguito esprime il peso degli impatti generati nella fase di TRATTAMENTO per il processamento UPCYCLE di 1000kg di pannelli fotovoltaici c-Si dismessi.

Categoria di impatto	Unità di misura trattamento 1000 Kg rifiuti FV	
Cambiamenti climatici	kg CO ₂ eq	2,55E+02
Impoverimento ozono	kg CFC-11 eq	1,31E-05
Tossicità umana, effetti cancerogeni	CTUh	2,18E-05
Tossicità umana, effetti non cancerogeni	CTUh	9,50E-06
Particolato	kg PM _{2,5} eq	5,60E-02
Radiazioni ionizzanti HH	kg U235 eq	1,37E+01
Radiazioni ionizzanti E (interim)	CTUe	4,24E-05
Formazione fotochimica di ozono	kg NMVOC eq	2,37E+00
Acidificazione	molc H ⁺ eq	2,02E+00
Eutrofizzazione terrestre	molc N eq	1,02E+01
Eutrofizzazione acque dolci	kg P eq	3,70E-02
Eutrofizzazione marina	kg N eq	9,00E-01
Ecotossicità acque dolci	CTUe	1,20E+03
Impoverimento risorse idriche	m ³ acqua eq	5,71E+01
Impoverimento risorse abiotiche (minerali)	kg Sb eq	8,64E-04
Impoverimento abiotico (carburanti fossili)	MJ	1,55E+03

Tabella 21 - Potenziali impatti per il trattamento di 1000 kg di rifiuti FV

Allegato 4 - Il finanziamento del sistema di gestione dei RAEE

Sono di seguito indicati i fondi che caratterizzano il sistema di gestione dei RAEE previsti nei dlgs 49/2014, dm17/06/2016 e dm68/2017.

- il **fondo presso il CdCRAEE**, destinato per il 50% allo sviluppo di nuovi Centri di Raccolta, mentre il restante 50% è dedicato all'adeguamento/ammodernamento di quelli esistenti, con lo scopo di evitare cannibalizzazioni e predisporre al loro interno apposite aree adibite al "deposito preliminare alla raccolta" dei RAEE domestici, destinati alla preparazione per il riutilizzo. Tale fondo è costituito per il triennio 2019-2021 presso il centro di coordinamento dei sistemi collettivi e alimentato dai produttori di AEE (16 €/t per il 2020 e 17 €/t per il 2021) con un contributo annuo minimo garantito di 1,5 milioni euro annui (detto fondo non potrà in alcun modo eccedere la somma totale complessiva di 3 milioni di €/annuo);
- il **fondo di garanzia presso il GSE** utilizzato per le corrette operazioni di smantellamento dell'impianto, alimentato da quote fisse (10 €/pannello per 10 anni per i professionali e 12 €/pannello una tantum per i domestici) prelevate dagli incentivi concessi ai soggetti gestori degli impianti incentivati (fino al V conto energia) e restituite solamente a seguito della comprovata correttezza della procedura di smaltimento dei moduli fotovoltaici. Le quote non vengono restituite in caso di inadempienze o nel caso il soggetto gestore optasse per affidare al GSE le pratiche di smaltimento (qualora le stesse quote non fossero sufficienti, il GSE richiederà un ulteriore versamento a carico del soggetto gestore). La quota trattenuta dal GSE sarà utilizzata esclusivamente per coprire i costi relativi al prelievo dei RAEE fotovoltaici dal sito e, pertanto, non sono comprese le attività di smontaggio e imballaggio di tali pannelli, a carico del gestore, la logistica per trasferire il RAEE fotovoltaico dal sito produttivo all'impianto di trattamento (anche considerando eventuali ulteriori costi dovuti allo stoccaggio), il trattamento adeguato del RAEE, il recupero e lo smaltimento "ambientalmente compatibile" dei rifiuti prodotti dai pannelli fotovoltaici;
- il **fondo "ecocontributo RAEE"** necessario per adempiere, nell'anno solare di riferimento, agli obblighi di raccolta, trattamento, recupero e smaltimento dei RAEE fotovoltaici. È istituito presso i sistemi collettivi ed alimentato, per ogni modulo prodotto/impresso sul mercato, dalle imprese produttrici aderenti ai consorzi con un contributo annuo che varia in funzione dell'impresso sul mercato nell'anno precedente;
- il **fondo di garanzia MATTM** istituito presso il Ministero dell'ambiente per il finanziamento delle operazioni di ritiro e di trasporto dei RAEE storici domestici conferiti nei centri di raccolta e delle operazioni di trattamento adeguato, di recupero e di smaltimento ambientalmente compatibile dei medesimi. Tale fondo è a carico dei produttori presenti sul mercato nello stesso anno in cui si verificano i rispettivi costi, in proporzione alla rispettiva quota di mercato, calcolata in base al peso delle AEE immesse sul mercato per ciascun tipo di prodotto nell'anno solare di riferimento. La garanzia opera al fine di evitare che i costi della gestione di rifiuti "orfani" ricadano sulla società o sugli altri produttori. Infatti, il MATTM può escutare la garanzia finanziaria prestata dai soggetti obbligati quando i fondi per la gestione dei RAEE, prodotti dai medesimi soggetti, siano insufficienti, oppure nel caso che i rifiuti derivino da AEE immesse sul mercato da produttori che abbiano cessato la

loro attività (nel limite dell'importo massimo garantito). I fondi così ricavati sono destinati al CdC RAEE che li utilizza per la gestione dei RAEE: una sorta di intervento sostitutivo finalizzato a rafforzare l'obbligazione;

- la **tassa sui rifiuti** pagata dai cittadini, contribuisce direttamente ai costi per la gestione dei RAEE (dal cittadino all'impianto finale), in quanto il contributo RAEE (3) rappresenta sostanzialmente i costi sostenuti dai produttori per la logistica secondaria (dal Centro di raccolta comunale agli impianti di trattamento) e non l'intero costo del processo di recupero. La copertura dei costi complessivi del Sistema RAEE viene garantita infatti, in primo luogo, dai cittadini/consumatori, sia attraverso il pagamento dell'eco-contributo RAEE all'atto dell'acquisto delle apparecchiature elettriche ed elettroniche (visibile e/o invisibile), sia attraverso il pagamento delle tasse/tariffe municipali sui rifiuti. Questi pagamenti rappresentano due voci distinte e con destinazione d'uso molto diversa: la tariffa è a copertura della raccolta primaria (un tempo includeva anche lo smaltimento), mentre l'eco-contributo serve a finanziare le attività di ritiro presso i centri di raccolta su tutto il territorio nazionale, di trasporto e di trattamento dei prodotti elettrici ed elettronici giunti a fine vita⁶⁰.

60. Università Bocconi, in collaborazione con CdCRAEE, rapporto di ricerca "Valutazione del modello regolatorio ed organizzativo del sistema multiconsortile RAEE" (2018).

Bibliografia

- Aleotti F., Recupero di moduli fotovoltaici in silicio cristallino a fine vita: progetto "FRELP – Full Recovery End-of-Life Photovoltaic", Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica e Nucleare, Politecnico di Torino, 2018
- ANIE Rinnovabili, "Il futuro delle rinnovabili in Italia", 2016
- Ardente F., Latunussa C.E.L., Blengini G.A., "Resource efficient recovery of critical and precious metals from waste silicon PV panel recycling", 2019
- Baldé, C.P. et al. "The DutchWEEE Flows 2020, What happened between 2010 and 2018", 2020
- Bianchi D. (Ambiente Italia srl) "Economia Circolare in Italia: a che punto siamo?", 2019
- Bio Intelligence Service, "Study on photovoltaic panels supplementing the impact assessment for a recast of the WEEE directive", EU project European Commission DG ENV Final report, 2011
- Blagoeva D.T., Aves Dias P., Marmier A., Pavel C.C., "Assessment of potential bottlenecks along the materials supply chain for the future deployment of low-carbon energy and transport technologies in the EU. Wind power, photovoltaic and electric vehicles technologies, time frame: 2015-2030" EUR 28192 EN; <https://doi.org/10.2790/08169>
- Bloomberg NEF, "New Energy Outlook 2020", 2020
- Brunori C., Cafiero L., De Carolis R., Fontana D., Pietrantonio M., Trinca E., Tuffi R., "Tecnologie innovative per il recupero/riciclo di materie prime da RAEE: il Progetto Eco-innovazione Sicilia, Energia, Ambiente e Innovazione" Energia Ambiente Innovazione, ENEA, 2013
- Camera dei Deputati, "La programmazione energetica nel Clean energy package: I Piani nazionali per l'energia ed il clima", 2019
- Centro di Coordinamento RAEE – CDCRAEE, "GESTIONE RAEE 2018", 2019
- Centro di Coordinamento RAEE- CDCRAEE, "Rapporto annuale sulla gestione dei RAEE domestici". 2018
- Centro di Coordinamento RAEE – CDCRAEE, "Rapporto Annuale sul ritiro e trattamento dei rifiuti da apparecchiature elettriche ed elettroniche in Italia", 2017
- Centro di Coordinamento RAEE – CDCRAEE, "Rapporto Annuale sul ritiro e trattamento dei rifiuti da apparecchiature elettriche ed elettroniche in Italia", 2019
- Choi J., Fthenakis V., "Crystalline silicon photovoltaic recycling planning: macro and micro perspectives" Journal of Cleaner Production, Volume 66, 1 March 2014, Pages 443-449, 2014
- Circular Economy Network, "Rapporto sull'Economia Circolare in Italia", ENEA, 2019
- CONAI, CiAI, comieco, COREPLA, RICREA, GRUPPO CAP, Kyoto Club "L'economia circolare in Italia", 2018
- Cucchiella F., D'Adamo I., Rosa P., "End-of-Life of used photovoltaic modules: A financial analysis" Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 47, July 2015, Pages 552-561, 2015
- D'Adamo I., Miliacca M., Rosa P., "Economic Feasibility for Recycling of Waste Crystalline Silicon Photovoltaic Modules", International Journal of Photoenergy, 2017
- Deloitte Sustainability, British Geological Survey, Bureau de Recherches Géologiques et Minières, Netherlands Organisation for Applied Scientific Research "Study on the review of the list of Critical Raw Materials Criticality Assessments", 2017
- Deng R., Chang N.L., Ouyang Z., Chong C.M., "A techno-economic review of silicon photovoltaic module recycling", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 109, July 2019, Pages 532-550, 2019
- Direttiva 2012/19/UE del Parlamento europeo e del Consiglio, del 4 luglio 2012, sui rifiuti di apparecchiature elettriche ed elettroniche (RAEE) Testo rilevante ai fini del SEE
- Dlgs 14 marzo 2014, n. 49 Attuazione della direttiva 2012/19/UE sui rifiuti di apparecchiature elettriche ed elettroniche (RAEE)

Dlgs 3 settembre 2020 n.118, “Attuazione degli articoli 2 e 3 della direttiva (UE) 2018/849, che modificano le direttive 2006/66/CE relative a pile e accumulatori e ai rifiuti di pile e accumulatori e 2012/19/UE sui rifiuti di apparecchiature elettriche ed elettroniche”, GU n.227 del 12 settembre 2020

Deloitte Sustainability, British Geological Survey, Bureau de Recherches Geologiques et Minières, Netherland Organisation for Applied Scientific Research, “Study on the review of the list of Critical Raw Materials: Non-critical Raw Materials Factsheets” Commissione Europea, Directorate-General for Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs Raw Materials, 2017

Duflou J.R., Peeters J.R., Altamirano D., Bracquene E., Dewulf W., “Demufacturing photovoltaic panels: Comparison of end-of-life treatment strategies for improved resource recovery”, CIRP Annals, Volume 67, Issue 1, 2018, Pages 29-32, 2018

Notarnicola S., “Il recupero dei materiali risolve il problema del fotovoltaico a fine vita”, *Edizioni L'Informatore Agrario*, 2011

EPIA, “Fact Sheet Sustainability of Photovoltaic System”, Materials Availability, 2014, <https://www.solarpowereurope.org/category/facts/>

EurObserv'ER Report, “The State of Renewable Energies in Europe Edition 2019”, 2020

European Commission “Affrontare le sfide relative ai mercati dei prodotti di base e alle materie prime”, COM/2011/0025 final, 2011

European Commission JRC Science for policy report “Non-ferrous Metals Manufacturing: Vision for 2050 and Actions Needed - Foresight Series”, 2017b

European Commission, European Innovation Partnership (EIP) on Raw Materials, Directorate-General for Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs “Raw Materials Scoreboard 2018”, 2018;

European Commission JRC Science for policy report “Recovery of critical and other raw materials from mining waste and landfills: State of play on existing practices”, 2019

European Commission, “Un nuovo piano d'azione per l'economia circolare Per un'Europa più pulita e più competitiva” COM/2020/98 final, 2020

European Commission, “Resilienza delle materie prime critiche: tracciare un percorso verso una maggiore sicurezza e sostenibilità”, (COM(2020) 474 final, 2020

European Commission, Critical materials for strategic technologies and sectors in the EU - a foresight study, 2020c

Fabiani S. INEA “L'evoluzione del fotovoltaico in Italia. Analisi critica e prospettive alla luce del regime di incentivazione con il Conto Energia” – un focus nel settore agricolo”, 2013); per la visualizzazione http://dspace.crea.gov.it/bitstream/inea/788/1/Evoluzione_fotovoltaico_Fabiani.pdf

Felici B., Corrias P., Baldissara B., Amerighi O., Tricoli C., “L'impatto occupazionale delle fonti energetiche rinnovabili in Italia: il fotovoltaico. Un approccio bottom up sul metodo dell'employment factor, applicato alle fasi della catena del valore”, ENEA-RT-2015-15. 2015

FIRST SOLAR EU ReviewReportFinal “Assessment of performance, environmental, health and safety aspects of First Solar's CdTe PV technology”, 2017

First Solar, “Overview of First Solar's Module Collection and Recycling Program”, 2012

First Solar, “Sustainability Report” 2017

First Solar, “Sustainability Report”, 2018

First Solar “Sustainability Metrics”, 2019

First Solar “Overview of First Solar's Module Collection and Recycling Program”, 2012

FIRST SOLAR “Evolution of First Solar's Module Recycling Technology”, 2013

Fondazione per lo Sviluppo Sostenibile, Fise Unicircular e Unione Imprese Economia Circolare “L'Italia del Riciclo 2019”, 2020

Forti V., Baldé C.P., Kuehr R., Bel G., “The Global E-waste Monitor 2020: Quantities, flows and the circular economy potential. United Nations University (UNU)/United Nations Institute for Training and Research (UNITAR) – co-hosted SCYCLE Programme, International Telecommunication Union (ITU) & International Solid Waste Association (ISWA), Bonn/Geneva/Rotterdam, 2020

Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, ISE with support of PSE Conferences & Consulting GmbH "Photovoltaic Report", 2019

Hagendorf C., Ebert M., Raugeri M., Lincot D., BEngoechea J., Rodriguez M.J., Lagunas A.R., "Assessment of performance, environmental, health and safety aspects of First Solar's CdTe PV Technology", Fraunhofer Institute, Oxford Brookes University, CNRS, CENER, 2017

FRELPA PROJECT LIFE+12/ENV/IT000904, "Full Recovery end of Life Photovoltaic"
<https://www.sasil-life.com/wp-content/uploads/2018/05/Sasil-SrlFrelpa-per-convegno-Cosrab-economia-circolare.pdf>

Giacchetta G., Leporini M., Marchetti B., "Evaluation of the economic impact of a new high value process for the management of the end of life of thin film photovoltaic modules", International Journal of Productivity and Quality Management 15(4):528, <https://doi.org/10.1504/IJMQM.2015.069712>, 2015

Granata G, Pagnanelli F., Moscardini E., Havlik T., "Recycling of Photovoltaic Panels by Physical Operations, Solar Energy Materials & Solar Cells" 123 (239–248), 2014

GSE, "Rifiuti di Apparecchiature Elettriche ed Elettroniche RAEE. Istruzioni operative per la gestione e lo smaltimento dei pannelli fotovoltaici incentivati", Aprile 2019

GSE, "Rapporto Statistico sul Solare Fotovoltaico 2018", 2019

GSE, "Rapporto delle attività 2019", 2020

GSE, "Il PIANO ENERGIA E CLIMA: le MISURE per raggiungere gli obiettivi e I prossimi passi", 2019

GSE, "Rifiuti di Apparecchiature Elettriche ed Elettroniche RAEE Istruzioni operative per la gestione e lo smaltimento dei pannelli fotovoltaici incentivati (ai sensi dell'art. 40 del D.Lgs. 49/2014)", 2019

Huang B., Zhao J., Chai J., Xue B., "Environmental influence assessment of China's multi-crystalline silicon (multi-Si) photovoltaic modules considering recycling process", Solar Energy 143:132-141, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.12.038>, 2017

Hund K., La Porta D., Fabregas T.P., Laing T., Drexhage J., "Minerals for Climate Action: The Mineral Intensity of the Clean Energy Transition", International Bank for Reconstruction and Development/ The World Bank, 2020

Tae-Yoon Kim, Milosz Karpinski, "Clean energy progress after the Covid-19 crisis will need reliable supplies of critical minerals", articolo online <https://www.iea.org/articles/clean-energy-progress-after-the-covid-19-crisis-will-need-reliable-supplies-of-critical-minerals>, IEA, 2020

IEA PVPS Report "A Snapshot of Global PV 1992-2012 Preliminary information from the IEA PVPS Programme" Report IEA-PVPS T1-22:2013; per la visualizzazione:
http://www.iea-pvps.org/fileadmin/dam/public/report/statistics/PVPS_report_-_A_Snapshot_of_Global_PV_-_1992-2012_-_FINAL_4.pdf

IEA PVPS "Trends 2018 in Photovoltaic Applications" Report IEA PVPS T1-34:2018

IEA "Renewable Energy Market: Update Outlook for 2020 and 2021", 2020

Tilli F., Maugeri G. RSE) "National Survey Report of PV Power Applications in Italy 2018, Task 1 Strategic PV Analysis and Outreach", IEA, 2019

IEA "Technology Roadmaps - Solar Photovoltaic Energy 2014", 2014

Infobuild energia, Approfondimenti Energy & Strategy Group, Politecnico di Milano, "Le energie rinnovabili: scenari sviluppo al 2030", 2019

Intesa San Paolo "Commodity: dazi e rischi sulla crescita i temi da seguire", Mensile Materie Prime, Direzione Studi e Ricerche, Intesa San Paolo, 2019

IRENA and IEA-PVPS, "End-of-Life Management: Solar Photovoltaic Panels," International Renewable Energy Agency, 2016

IRENA, "Renewable energy benefits: Leveraging local capacity for solar PV, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. 2017

IRENA and CEM The socio-economic benefits of large-scale solar and wind: an econValue report', 2014

12th Meeting of the IRENA Council "Renewable Energy Benefits: Leveraging Local Industries", 2016

IRENA "Renewable Energy and Jobs Annual Review 2019", 2019

Kammen D.M., Kapadia K., Fripp M., "Putting Renewables to Work: How Many Jobs Can the Clean Energy Industry Generate?" RAEI Report, University of California, Berkeley, 2004

Latunussa C., Mancini L., Blengini G., Ardente F., Pennington D., "Analysis of material recovery from photovoltaic panels. EUR 27797", Luxembourg (Luxembourg): Publications Office of the European Union, <https://doi.org/10.2788/786252>, 2016a

Latunussa C., Ardente F., Blengini G., Mancini L., "Life Cycle Assessment of an innovative recycling process for crystalline silicon photovoltaic panels", Solar Energy Materials and Solar Cells, Volume 156, November 2016, Pages 101-111, 2016b

Lunardi M., Alvarez-Gaitan J.P., Bilbao J.I., Corkish R., "Comparative Life Cycle Assessment of End-of-Life Silicon Solar Photovoltaic Modules" Applied Sciences 8(8):1396, <https://doi.org/10.3390/app8081396>, 2018a

Lunardi M., Alvarez-Gaitan J.P., Bilbao J.I., Corkish R., "A Review of Recycling Processes for Photovoltaic Modules", Solar Panels and Photovoltaic Materials, <https://doi.org/10.5772/intechopen.74390>, 2018b

Mathieux, F., Ardente, F., Bobba, S., Nuss, P., Blengini, G., Alves Dias, P., Blagoeva, D., Torres De Matos, C., Wittmer, D., Pavel, C., Hamor, T., Saveyn, H., Gawlik, B., Orveillon, G., Huygens, D., Garbarino, E., Tzimas, E., Bouraoui, F. and Solar, S., "Critical Raw Materials and the Circular Economy – Background report. JRC Science-for-policy report", EUR 28832 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2017, ISBN 978-92-79-74282-8 <https://doi.org/10.2760/378123> JRC108710, 2017

MATTM, MISE, MIT, "Energia e Clima 2030 Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima" (2019); per la visualizzazione https://www.mise.gov.it/images/stories/documenti/PNIEC_finale_17012020.pdf

Padoan F.C.S.M., Altimari P., Pagnanelli F., "Recycling of end of life photovoltaic panels: A chemical perspective on process development" Solar Energy Volume 177, 1 January 2019, Pages 746-761, 2019

Paiano A., "Photovoltaic waste assessment in Italy", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 41, January 2015, Pages 99-112, 2015

Peng J., Yang H., "Review on life cycle assessment of energy payback and greenhouse gas emission of solar photovoltaic systems", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 19, March 2013, Pages 255-274, 2013

Energy & Strategy Group, "Renewable Energy Report, Politecnico di Milano, 2018,

Energy & Strategy Group, "Renewable Energy Report, Politecnico di Milano, 2019

Il progetto Photolife, "Process and automated pilot plant for simultaneous and integral recycling of different kinds of photovoltaic panels" LIFE13 ENV/IT/001033

PV Cycle, "Annual report", 2016

PV Cycle, "Annual report", 2017

PV Cycle, "Annual report", 2018

PV Magazine, "Premature inverter failure – 4.2 GW of capacity will be affected this year, says analyst" (06/2020) per la visualizzazione <https://www.pv-magazine-australia.com/2020/06/23/premature-inverter-failure-4-2-gw-of-capacity-will-be-affected-this-year-says-analyst>, 2020

QualEnergia, "PNIEC e rinnovabili: con gli strumenti sul tavolo traguardo fuori portata", <https://www.qualenergia.it/articoli/pniec-e-rinnovabili-con-gli-strumenti-sul-tavolo-traguardi-fuori-portata/>, 2019

Giovanni S., "Agro-fotovoltaico: condizioni essenziali e vantaggi per gli operatori agricoli ed energetici", per la visualizzazione <https://www.qualenergia.it/articoli/agro-fotovoltaico-condizioni-essenziali-e-vantaggi-per-gli-operatori-agricoli-ed-energetici/>, QualEnergia, 2020

Notarnicola S. a cura di, "Recupero e riciclo dei moduli fotovoltaici a fine vita" *Speciale tecnico*, QualEnergia, 2013

Notarnicola S. a cura di, "Recupero e riciclo dei moduli fotovoltaici. Atto secondo", *Speciale tecnico*, QualEnergia, 2015

QualEnergia, "Cosa rischiano le rinnovabili nel post-Covid: attenzione alle forniture di minerali", 2020

RSE, "Riflessioni sull'Energia. Fotovoltaico: power to the people?", 2016

Rix A., Steyl JDT., Rudman J., Terblanche U., van Niekerk JL., "First Solar's CdTe module technology – performance, life cycle, health and safety impact assessment", Centre for Renewable and Sustainable Energy Studies, Stellenbosch University, 2015

Seyring N., Kling M., Weißenbacher J., Hestin M., Lecerf L., Magalini F., Khetriwal D.S., Kuehr R., "Study on WEEE recovery targets, preparation for re-use targets and on the method for calculation of the recovery targets", BIPRO., BIO by Deloitte (BIO), United Nations University (UNU) Final Report, 2015

Sica D., Malandrino O., Supino S., Testa M., Lucchetti M.C., "Management of end-of-life photovoltaic panels as a step towards a circular economy" Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 82, Part 3, February 2018, Pages 2934-2945, 2018

Sica D., Malandrino O., "Il contributo alla sostenibilità della fase end of life della filiera fotovoltaica", Energia, ambiente e innovazione, n. 1/2017, <https://doi.org/10.12910/EAI2017-021>

Smart Energy International "Global annual solar PV repairs and maintenance market to hit \$9bn" (06/2020) per la visualizzazione <https://www.smart-energy.com/renewable-energy/massive-increase-in-solar-pv-in-need-of-repair-and-maintenance-study/>

Solar Power Europe "Solar PV Jobs & Value Added in Europe", per la visualizzazione <https://www.solarpowereurope.org/wp-content/uploads/2018/08/Solar-PV-Jobs-Value-Added-in-Europe-November-2017.pdf>, 2017

Stolz P., Frischknecht R., "Life Cycle Assessment of Photovoltaic Module Recycling" Swiss Federal Office of Energy SFOE, treeze Ltd, 2016

Tammaro M., Salluzzo A., Manzo S., Privato C., "Impatto ambientale dei rifiuti fotovoltaici", <https://doi.org/10.12910/EAI2014-58>, Energia, ambiente e innovazione, n. 2/2014

Teske, S., Morris, T., Nagrath, K (2020) "100% Renewable Energy: An Energy [R]evolution for ITALY, Report" prepared by ISF for Greenpeace Italy, June 2020

The Global E-Waste Statistics Partnership, "The Global E-waste Monitor 2020 Quantities, flows and the circular economy potential" (2020); per la visualizzazione <https://globalewaste.org/> (ultimo accesso luglio 2020)

Tilli F., Maugeri G., "National Survey Report of PV Power Applications in ITALY", IEA PVPS TASK 1, 2017

UNICEF, Pure Earth, "The Toxic Truth: Children's Exposure to Lead Pollution Undermines a Generation of Future Potential" ISBN: 978-92-806-5140-9, 2020

Università Bocconi, in collaborazione con CdCRAEE, rapporto di ricerca "Valutazione del modello regolatorio ed organizzativo del sistema multiconsortile RAEE", 2018

US. Geological Survey, "Mineral Commodity Summaries 2019", <https://doi.org/10.3133/70202434>, 2019

Wambach K., "Life Cycle Inventory of Current Photovoltaic Module Recycling Processes in Europe, Task12, Subtask 2, LCA Report IEA-PVPS, 2017

Wambach K., Schlenker S., Müller A., Konrad B., "A Voluntary Take Back Scheme and Industrial Recycling of Photovoltaic Modules", 2010

Xu Y., LI J., Tan Q., Peters A.L., Yang C., "Global status of recycling waste solar panels: A review", Waste Management Volume 75, May 2018, Pages 450-458, 2018

SITI WEB

Web site on Raw Material Information System (RMIS) <https://rmis.jrc.ec.europa.eu/>

<https://www.borsinorifiuti.com/2020/>

<https://www.lme.com/Metals>

<https://www.metalbulletin.com/non-ferrous/minor-metals>

Edito da ENEA

Servizio Promozione e Comunicazione

enea.it

Gennaio 2021

