



**UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI DI BARI
ALDO MORO**



Dipartimento Jonico in

“Sistemi Giuridici ed Economici del Mediterraneo: società, ambiente, culture”

**DOTTORATO DI RICERCA IN
DIRITTI, ECONOMIE E CULTURE DEL MEDITERRANEO**

CICLO 37°

**TESI DI DOTTORATO INDUSTRIALE
“Economia circolare nella catena del valore
dell’energia”**

Dottoranda: Gaia Saffioti

SUPERVISORE: Stella Lippolis

CO-SUPERVISORE: Alessandro Rubino

COORDINATORE: Pietro Alexander Renzulli

A.A. 2024/2025

Economia circolare nella catena del valore dell'energia

Indice

Indice delle abbreviazioni.....	5
Introduzione.....	7
1. Le politiche europee sull'economia circolare.....	10
1.1. Il concetto di economia circolare e i cinque pilastri	
1.2. Dalla tutela dell'ambiente all'uso efficiente delle risorse fino all'economia circolare	
1.3. Analisi comparata dell'anello mancante e del nuovo piano di azione	
1.3.1. Introduzione all'anello mancante del 2015	
1.3.2. Introduzione al nuovo piano d'azione del 2020	
1.3.3. Produzione e progettazione	
1.3.4. Consumi	
1.3.5. Rifiuti e risorse	
1.3.6. Catene di valore dei prodotti	
1.3.7. La circolarità come mitigazione dei cambiamenti climatici	
1.3.8. Energia	
1.3.9. Circolarità a servizio delle persone, delle regioni e delle città	
1.3.10. Monitoraggio	
1.4. Dal Patto verde europeo ad un piano industriale	
1.5. Pronti per il 55%	
1.6. RePowerEU	
1.7. Industria a zero emissioni	
1.8. Materie prime critiche	
1.9. Direttiva sui rifiuti di apparecchiature elettriche ed elettroniche	
1.10. Patto per l'industria pulita	
1.11. Economia circolare nella concorrenza	

1.11.1. Aiuti di Stato

1.11.2. Antitrust

2. Benefici per le utilities nel settore energetico.....56

2.1. Economia circolare e decarbonizzazione

2.2. Generatori eolici

2.2.1. Input sostenibili e materiali riciclati

2.2.2. Estensione della vita utile attraverso la progettazione modulare

2.2.3. Utilizzo condiviso del bene e prodotto come servizio

2.2.4. Valorizzazione del fine vita

2.2.5. Best practice

2.3. Moduli fotovoltaici

2.3.1. Input sostenibili e materiali riciclati

2.3.2. Estensione della vita utile attraverso la progettazione modulare

2.3.3. Utilizzo condiviso del bene e prodotto come servizio

2.3.4. Valorizzazione del fine vita

2.3.5. Best practice

2.4. Sistemi di accumulo e di ricarica

2.4.1. Input sostenibili e materiali riciclati

2.4.2. Estensione della vita utile attraverso la progettazione modulare

2.4.3. Utilizzo condiviso del bene e prodotto come servizio

2.4.4. Valorizzazione del fine vita

2.4.5. Best practice

2.5. Reti e infrastrutture

2.5.1. Input sostenibili e materiali riciclati

2.5.2. Estensione della vita utile attraverso la progettazione modulare

2.5.3. Utilizzo condiviso del bene e prodotto come servizio

2.5.4. Valorizzazione del fine vita

2.5.5. Best practice

2.6. Mobilità elettrica

2.6.1. Input sostenibili e materiali riciclati

2.6.2. Estensione della vita utile attraverso la progettazione modulare

2.6.3. Utilizzo condiviso del bene e prodotto come servizio

2.6.4. Valorizzazione del fine vita

2.6.5. Best practice

3. Economia circolare nella tecnologia del fotovoltaico.....105

3.1. PHOTORAMA

3.1.1. Panoramica del progetto

3.1.2. Concept

3.1.3. Metodologia

3.1.4. Business model

3.2. Valutazione del ciclo di vita (LCA)

3.2.1. Impostazione del modello, unità funzionale, scenari, limiti, confini

3.2.2. Analisi dell'inventario del ciclo di vita (LCI)

3.2.3. Valutazione degli impatti del ciclo di vita (LCIA)

3.2.4. LCI per ciascuno scenario

3.2.5. LCIA per ciascuno scenario

3.2.5.1.LCIA per moduli c-Si Al-BSF

3.2.5.2.LCIA per moduli CI(G)S

3.2.5.3.Interpretazione del ciclo di vita

3.3. Analisi di eco-efficienza

3.3.1. Indice ecologico

3.3.2. Costo del ciclo di vita (LCC)

3.3.3. Risultato dell'eco-efficienza

3.4. Analisi del sondaggio per accettazione sociale

3.4.1. Metodologia

3.4.2. Divulgazione

3.4.3. Dati demografici

3.4.4. Consapevolezza

3.4.5. Fattori trainanti e barriere

3.4.6. Stato dell'arte

Considerazioni conclusive.....182

Appendice - Analisi LCA intermedia 185

Bibliografia.....210

Indice delle abbreviazioni

Al-BSF	Campo di superficie posteriore di Alluminio
CEAP	Piano d'azione per l'economia circolare
CEA	Comunità Europea dell'Energia Atomica
CEE	Comunità economica europea
CEEAG	Linee guida per il clima, la tutela dell'ambiente e l'energia
CRM	Materia prima critica
CRMA	Regolamento sulle materie prime critiche
c-Si	Silicio cristallino
CI(G)S	Seleniuro di rame e indio (gallio)
CISAF	Quadro per gli aiuti di stato per un'industria pulita
CMUR	Tasso di utilizzo del materiale circolare
DG ENV	Direzione generale dell'Ambiente
EBA	Alleanza europea delle batterie
EoL	Fine del ciclo di vita
EREP	Piattaforma europea per l'efficienza delle risorse
EPR	Responsabilità estesa del produttore
ERMA	Alleanza europea sulle materie prime
EV	Veicolo elettrico
EVA	Etilene vinil acetato
GBER	Regolamento generale di esenzione per categoria
HBER	Regolamento di esenzione per categoria per gli accordi orizzontali
IPCEI	Importanti Progetti di Interesse Comune Europeo
IRA	<i>Inflation Reduction Act</i>

LCA	Valutazione del ciclo di vita
LCI	Inventario del ciclo di vita
LCIA	Valutazione dell'inventario del ciclo di vita
LCC	Costo del ciclo di vita
NZIA	Regolamento sull'industria a zero emissioni nette
PaaS	Prodotto come servizio
PEF	Impronta ambientale di prodotto
PEFCR	Regole sulle categorie dell'impronta ambientale del prodotto
PEI	Partenariato europeo per l'innovazione
PV	Fotovoltaico
RAEE	Rifiuti da apparecchiature elettriche ed elettroniche
SDG	Obiettivi per lo Sviluppo Sostenibile
TFUE	Trattato sul funzionamento dell'Unione europea
WtE	<i>Waste-to-Energy</i>

Introduzione

Nell'ultimo decennio, la transizione verso un'economia circolare è divenuta una priorità globale, con implicazioni significative soprattutto per il settore energetico, un ambito cruciale nella lotta contro il cambiamento climatico. In questo contesto, l'Unione Europea (UE) ha adottato una serie di iniziative politiche ed economiche per ridurre la dipendenza da materie prime critiche e promuovere la sostenibilità a lungo termine. La tesi del mio dottorato industriale si inserisce in questo quadro ambizioso e analizza il contributo dell'economia circolare nel settore energetico, con particolare attenzione alla catena del valore del fotovoltaico. Attraverso tre capitoli, l'elaborato esplora sia gli aspetti normativi e teorici, sia le implicazioni pratiche, tecnologiche ed economiche per le *utilities* e l'industria fotovoltaica.

Il primo capitolo introduce il concetto di economia circolare e analizza le principali politiche europee che ne favoriscono lo sviluppo. Le politiche europee sono infatti orientate a costruire un modello economico che non solo minimizzi gli sprechi, ma valorizzi ogni fase del ciclo di vita dei prodotti, passando dalla gestione dei rifiuti a un approccio olistico e sistemico. Nel tentativo di districarmi dalla fitta rete di normative che trattano direttamente o trasversalmente l'economia circolare e contribuiscono al suo sviluppo, in un quadro in costante evoluzione, ho valorizzato la mia esperienza maturata dall'anno 2019 al 2025 negli Affari Europei del Gruppo Enel. In questo contesto, particolare attenzione è dedicata alle proposte funzionali all'analisi dell'ultimo capitolo e dunque inerenti alla tecnologia del solare fotovoltaico. Il capitolo esplora i cinque pilastri dell'economia circolare– input sostenibili, estensione della vita utile, utilizzo condiviso, prodotto come servizio e valorizzazione del fine vita – e discute il ruolo chiave di questi principi nella promozione della sostenibilità e nella riduzione della dipendenza dell'UE dalle importazioni di materie prime critiche. Tale approccio normativo e strategico getta le basi per l'analisi dei benefici pratici che l'economia circolare può portare al settore energetico.

Il secondo capitolo approfondisce il legame tra economia circolare e decarbonizzazione, analizzando come le utilities del settore energetico possano trarre vantaggi economici e competitivi adottando modelli di business circolari. Qui, l'attenzione si focalizza su tecnologie energetiche specifiche per la decarbonizzazione come l'eolico, il solare

fotovoltaico, i sistemi di accumulo o *storage*, le infrastrutture energetiche e le infrastrutture di ricarica e alle loro opportunità relativamente ai cinque pilastri dell'economia circolare. Vengono illustrati esempi pratici di aziende energetiche che implementano principi circolari nei propri processi produttivi, adottando strategie di modularità, tecniche innovative di riciclo e manutenzione predittiva per ottimizzare il ciclo di vita dei componenti e ridurre l'impatto ambientale. L'adozione di queste strategie permette alle utilities di migliorare l'efficienza operativa e generare nuove opportunità di business, sostenendo al contempo gli obiettivi europei di riduzione delle emissioni di carbonio.

Il terzo capitolo si concentra infine sul progetto PHOTORAMA, un'iniziativa europea che mira a creare una filiera circolare per i moduli fotovoltaici. PHOTORAMA rappresenta una risposta concreta alle sfide di sostenibilità e riciclo dei materiali nel fotovoltaico, un settore in forte espansione e strategico per la transizione energetica. Il progetto, supportato dal programma Horizon 2020, di cui Enel Green Power è partner, ha l'obiettivo di sviluppare tecnologie avanzate di disassemblaggio e recupero di materiali critici, come silicio, indio e argento, dai moduli a fine vita. In questo capitolo, vengono discussi gli approcci tecnologici e gli impatti economici, ambientali e sociali previsti dal progetto, evidenziando il potenziale di PHOTORAMA nel promuovere una gestione responsabile dei materiali critici e dei rifiuti fotovoltaici e più in generale nella lotta al cambiamento climatico. In particolare, viene riportata una valutazione del ciclo di vita e un'analisi di ecoefficienza, sulla base di dati industriali forniti dai partner del progetto e del settore solare che consentono di mettere a confronto diverse tipologie di moduli fotovoltaici in due scenari, con risultati monitorati e convalidati per tutta la durata del progetto, dal 2020 al 2025. Infine, vengono presentati i risultati di un'indagine volta a valutare il livello di consapevolezza degli stakeholder riguardo alle pratiche attuali di gestione del fine vita dei pannelli fotovoltaici e di recupero delle materie prime critiche. Questi risultati hanno fornito le basi per una successiva campagna di sensibilizzazione finalizzata a rafforzare la comunicazione e la collaborazione tra i Paesi, nell'ambito delle iniziative che il progetto sosterrà.

I tre capitoli sono collegati da un filo conduttore comune ovvero la necessità di un approccio integrato e collaborativo per affrontare le sfide della sostenibilità nel settore energetico. Il percorso tracciato in questa tesi dimostra come l'economia circolare possa rappresentare non solo una risposta concreta ai problemi di approvvigionamento e

dipendenza da materie prime, ma anche un'opportunità strategica per la competitività delle aziende e per la transizione verso un modello energetico sostenibile e resiliente.

Capitolo 1

Le politiche europee sull'economia circolare

Nella stesura di questo capitolo, mi sono interrogata su quali fossero gli ambiti di intervento del modello circolare per le imprese e, nella moltitudine di iniziative legislative a livello europeo, come il regolatore supportasse il modello circolare a favore delle imprese, in particolar modo nel settore delle *utilities*. Per rispondere a queste domande ho adottato un approccio qualitativo, analizzando la letteratura accademica relativamente alla definizione di economia circolare, per poi individuare i cinque pilastri in cui le imprese del settore energetico possono intervenire per sviluppare il paradigma circolare. Ho proseguito con un'analisi documentale e tematica dell'ampia normativa sull'economia circolare per soffermarmi su quelle iniziative di più rilievo per un contesto aziendale che promuove l'utilizzo di tecnologie meno mature e a supporto delle fonti rinnovabili. Come obiettivo mi sono posta l'esame di come le politiche europee sull'economia circolare influenzano la sostenibilità del settore energetico e fotovoltaico.

Capitolo	Titolo	Domande di ricerca	Disegno di ricerca	Obiettivo di ricerca
01	Le politiche europee sull'economia circolare	Quali sono gli ambiti di intervento del modello circolare per le imprese? Quali politiche promuovono lo sviluppo circolare nel settore energetico?	Approccio qualitativo basato su un'analisi documentale e tematica della normativa sull'economia circolare	Esaminare come le politiche europee sull'economia circolare influenzano la sostenibilità del settore energetico e fotovoltaico
02	Benefici per le utilities nel settore energetico	In che modo l'adozione dei cinque pilastri può migliorare la sostenibilità e la competitività delle utilities nel settore energetico?	Approccio qualitativo con analisi di rapporti industriali, letteratura accademica e modelli ricorrenti e best practice per eolico, fotovoltaico, reti, stoccaggio e infrastrutture di ricarica	Esplorare i benefici economici e ambientali derivanti dall'applicazione dei cinque pilastri dell'economia circolare alle utilities energetiche
03	Economia circolare nella tecnologia del fotovoltaico	In che modo il progetto PHOTORAMA può contribuire a rendere la filiera del fotovoltaico più circolare e sostenibile in Europa?	Approccio misto, con utilizzo di un'analisi documentale, dati forniti dai partner del progetto e un'indagine empirica sull'accettazione sociale	Valutare l'efficacia delle tecnologie sviluppate da PHOTORAMA per il disassemblaggio e il recupero dei materiali critici dai moduli fotovoltaici

Figura 1. Le politiche europee sull'economia circolare: Metodologia di ricerca¹

Nel breve periodo compreso tra gli anni 2020 e 2025 la geopolitica mondiale ha subito una considerevole frammentazione e l'Unione europea (UE) è entrata in una “permacrisi” trovandosi a gestire una pandemia, i segni sempre più tangibili e misurabili del cambiamento climatico, la guerra di aggressione della Russia contro l'Ucraina e la crisi

¹ Salvo ove diversamente indicato, la fonte delle figure presenti in tutto l'elaborato è attribuibile all'autrice.

energetica. In questo contesto, le catene di approvvigionamento strategiche e la concorrenza tecnologica sono diventate una priorità politica per Bruxelles che ha dovuto fare i conti con la sua forte dipendenza da grandi potenze quali la Russia per quanto concerne le forniture di gas e la Cina per l'approvvigionamento di materie prime critiche. Per soddisfare questa duplice necessità, l'Unione europea ha adottato una serie di misure volte a costruire un'egemonia tecnologica a sostegno dell'industria interna e a rafforzare parallelamente quella che il Commissario per il mercato interno e i servizi della Commissione von der Leyen, Thierry Breton, ha definito “la diplomazia della filiera”². Tale impegno diplomatico è volto al mantenimento di un equilibrio tra il raggiungimento dell'indipendenza dai maggiori fornitori mondiali e al contempo il diniego di un isolamento drastico. Difatti, è di recente sviluppo la tessitura di nuovi legami commerciali con potenze occidentali come gli Stati Uniti e con attori regionali come i paesi africani e asiatici nonché la ridefinizione delle relazioni con alleati storici quali Turchia e Regno Unito.

Essendo la resilienza europea strettamente collegata alla padronanza di tecnologie innovative e cruciali per la transizione energetica e digitale, tra le priorità dell'agenda politica europea figura la necessità di creare catene di approvvigionamento sicure per le materie prime critiche. Per evitare future ritorsioni da paesi con cui l'UE ha un rapporto di dipendenza economica, Bruxelles si sta adoperando a rendersi più autonoma e ad investire sulla sua capacità industriale al fine di renderla più solida.

In particolare, nel settore energetico, per far fronte al taglio delle forniture di gas russo e al temporaneo aumento esorbitante dei prezzi del gas, sono stati adottati diversi piani, tra cui il RepowerEU adottato a maggio 2022 (cfr. 1.6), le misure coordinate di riduzione della domanda di gas dal 2022 al 2025, il piano d'azione per un'energia a prezzi accessibili del 2025, che promuovono la diversificazione delle forniture, sia in termini di paesi che di risorse, l'incremento di produzione di energia da altre fonti ove possibile rinnovabili, alti livelli di stoccaggio di gas, solidarietà energetica fra Stati Membri e risparmio energetico attraverso l'isolamento termico nell'edilizia e un controllo più rigido della temperatura negli edifici con il fine di evitare inutili sprechi.

Per quanto riguarda lo sviluppo di tecnologie verdi, sono stati approvati nell'estate del 2022, due programmi IPCEI (*Important Project of Common European Interest*)

² “Neither autarchy nor dependence – more European autonomy”, Blog of Commissioner Thierry Breton (25.8.2022).

sull'intera filiera dell'idrogeno e sui suoi usi industriali che hanno consentito agli Stati Membri promotori di assegnare risorse economiche alle aziende coinvolte consentendo l'aumento dell'offerta e della domanda industriale europea su larga scala di idrogeno, la decarbonizzazione dell'industria ad alta intensità energetica e il rafforzamento della sicurezza energetica. Un esempio analogo si è verificato con l'industria delle batterie, sulla quale l'UE ha precedentemente investito in maniera massiccia in 70 progetti tra cui 20 giga-factory con il supporto della *European Battery Alliance* e con l'auspicio di coprire entro il 2030 il 90% della domanda in Europa tenendo conto delle stime sull'aumento della mobilità elettrica e della necessità di produrre un adeguato numero di batterie pari a circa 30 milioni di unità. Riguardo la produzione di batterie, esiste tuttavia un problema legato al reperimento di materie prime quali il litio, il cobalto, il nichel e la grafite. Di queste materie, come anche per i motori a magneti permanenti per le turbine eoliche, l'UE si rifornisce quasi interamente dalla Cina che ha il pieno controllo del mercato e ne determina i costi. Un migliore e più autonomo accesso a questi mercati aiuterebbe a far fronte all'aumento della domanda di materie prime e al raggiungimento degli obiettivi di mobilità a zero emissioni e più in generale del Green Deal europeo.

La capacità di reperimento, separazione, raffinazione e riciclo delle materie prime critiche sono quindi al centro della strategia europea. Al momento l'UE predilige l'importazione da paesi terzi con conseguenti impatti negativi ambientali e sociali. L'estrazione mineraria è ad oggi un'alternativa quasi del tutto assente, complice la scarsa presenza di strumenti di esplorazione adeguati a trovare giacimenti sepolti in profondità sotto la superficie. Tuttavia, alcune nuove tecnologie consentirebbero l'estrazione ad un impatto ambientale molto basso congiuntamente a requisiti per un approvvigionamento sostenibile, circolare e socialmente responsabile. In particolare, sono di recente entrata in vigore il Regolamento che istituisce un quadro di misure per rafforzare l'ecosistema europeo di produzione delle tecnologie a zero emissioni nette (*Net-Zero Industry Act* o NZIA, cfr. 1.7) ed il Regolamento che istituisce un quadro atto a garantire un approvvigionamento sicuro e sostenibile di materie prime critiche (*Critical Raw Materials Act*, cfr. 1.8), in risposta all'*Inflation Reduction Act* statunitense e ai timori per il ruolo preponderante della Cina nelle catene di approvvigionamento delle tecnologie verdi.

Il Net-Zero Industry Act mira a garantire che almeno il 40% della domanda di tecnologia pulita in UE sia prodotta internamente entro il 2030, riducendo le autorizzazioni e

incentivando gli investimenti in alcune “tecnologie strategiche” tra cui il fotovoltaico, l’eolico, le batterie e le pompe di calore. Inoltre, secondo il piano, il contributo alla sostenibilità e alla resilienza delle forniture è una condizione fondamentale per aggiudicarsi gli appalti pubblici dell’UE per i progetti di tecnologia pulita con l’obiettivo di aumentare la sicurezza degli approvvigionamenti per la produzione di tecnologie pulite, limitando le importazioni da Cina e Russia. La proposta di legge, benché accolta in larga parte dalle principali associazioni del settore, tra cui SolarPower Europe, specialmente nel riconoscimento della necessità di diversificare la catena di approvvigionamento del fotovoltaico, a causa del ruolo critico che il solare svolge nella transizione energetica, è stata criticata per non supportare concretamente l’industria nella compensazione della riduzione delle forniture da aree geografiche dominanti nelle catene di approvvigionamento. Infatti, la costruzione di fabbriche solari in Europa necessita finanziamenti alla gestione più massicci, non garantiti dalla recente revisione della normativa aiuti di Stato con il *Temporary Crisis and Transition Framework* (TCTF) e il *General Block Exemption Regulation* (GBER). La richiesta da parte dei player del settore è dunque quella di costituire un veicolo finanziario specifico per la produzione solare europea, come un Fondo per la produzione solare o uno strumento azionario dedicato dell’UE, che copra sia i CAPEX che gli OPEX.

Il *Critical Raw Materials Act* (cfr. 1.8) definisce degli obiettivi di estrazione e lavorazione dei minerali strategici in Unione europea. L’importanza di questo documento risiede nel riconoscimento di una necessaria definizione dei criteri per l’identificazione di quelle materie prime critiche da considerarsi di particolare rilevanza strategica per le esigenze europee di transizione energetica, approvvigionamento ed importanza economica. Il provvedimento è funzionale all’implementazione della strategia solare europea (cfr. 1.8) che prevede una diffusione massiccia del fotovoltaico, al momento importato dalla Cina con elevate impronte di carbonio dovute all’estrazione del polisilicio.

In questo contesto di carenza di materie prime, forte dipendenza da altri paesi per il reperimento delle risorse, instabilità geopolitica con ripercussioni sulle catene di approvvigionamento strategiche e crescente aumento della domanda di tecnologie per la transizione energetica e digitale la cui produzione dipende da materie prime critiche, la promozione di soluzioni innovative di riciclaggio e più in generale un approccio all’economia circolare sono alla base di un’Europa più solida, forte e autonoma. Per economia circolare si intende il ripensamento del business lungo l’intera catena del valore

a partire dalle fasi di progettazione e approvvigionamento. La sua articolazione si fonda su cinque pilastri (cfr. 1.1) che definiscono i modelli di business di riferimento nelle varie fasi di vita:

1. Input sostenibili, ossia utilizzo di materie da rinnovabili, riuso o riciclo;
2. Estensione della vita utile attraverso la progettazione modulare e la manutenzione predittiva;
3. Sharing o utilizzo condiviso del bene;
4. Prodotto come servizio; ovvero la possibilità di fornire al cliente un servizio anziché un prodotto;
5. Valorizzazione del fine vita recuperando il valore del prodotto mediante *upcycling*, con questo termine intendendo un recupero migliorativo o un riciclo creativo, ovvero un processo di trasformazione di sottoprodotti, prodotti o materiali di scarto in nuovi materiali o prodotti percepiti come di maggiore qualità, come valore artistico o ambientale, oppure mediante riuso e riciclo.

Il primo capitolo, dopo una breve introduzione sul concetto di economia circolare, illustrerà le attuali politiche europee a sostegno della circolarità.

1.1. Il concetto di economia circolare e i cinque pilastri

Nel modello lineare della produzione industriale, gli input vengono estratti, lavorati, consumati e scartati secondo un sistema di “*take-make-dispose*”. Sebbene la linearità sia profondamente istituzionalizzata, l’industria, i governi e la ricerca manifestano un crescente interesse ad abbandonare questo modello lineare adottando un modello di economia circolare.

Esistono numerose definizioni del concetto di economia circolare, ma la più diffusa (Milios, 2018) è formulata dalla Ellen MacArthur Foundation ed è riportata di seguito tradotta in italiano:

“[...] un sistema industriale che è restaurativo o rigenerativo per scopo e progettazione. Sostituisce il concetto di fine vita con quello di restauro, si orienta verso l’uso di energie rinnovabili, elimina l’uso di sostanze chimiche tossiche che impediscono il riutilizzo e mira all’eliminazione dei rifiuti attraverso una progettazione migliore di materiali, prodotti, sistemi e, all’interno di questi, modelli di business.” (Ellen MacArthur Foundation, 2012, p.7)

Sebbene la definizione riesca a inquadrare il concetto e a conferirgli un’applicazione piuttosto generica, dal punto di vista di politiche pubbliche potrebbe essere difficile rendere operativi alcuni termini specialistici faticosi da concettualizzare quali ad esempio “restaurativo”, “rigenerativo” o “progettazione migliore” (Milios, 2018). A livello europeo, il concetto di economia circolare è riconducibile direttamente al nuovo piano d’azione per l’economia circolare per un’Europa più pulita e più competitiva (cfr. 1.3.2) che prosegue l’impegno del Piano d’azione per l’economia circolare (COM(2015) 614 o l’Anello mancante (cfr. 1.3.1.) per trasformare l’economia e generare nuovi vantaggi competitivi sostenibili. Nonostante nell’anello mancante non sia presente una definizione ufficiale di economia circolare, la si comprende sin dalle prime righe e risulta essere maggiormente fruibile rispetto a quella della Ellen MacArthur Foundation:

“La transizione verso un’economia più circolare, in cui il valore dei prodotti, dei materiali e delle risorse è mantenuto quanto più a lungo possibile e la produzione di rifiuti è ridotta al minimo, è una componente indispensabile degli sforzi messi in campo dall’Unione europea per sviluppare un’economia che sia sostenibile, rilasci poche emissioni di biossido di carbonio, utilizzi le risorse in modo efficiente e resti competitiva.” (COM(2015) 614 final p:1)

L'importanza dell'anello mancante è stata proprio nel definire il concetto di economia circolare e conseguentemente nel lanciare le prime politiche a sostegno di un modello circolare portando in auge il tema a livello europeo. Tuttavia, una rilettura odierna del testo ed un confronto con normative successive più mature, ne evidenziano l'approccio marcatamente focalizzato sul fine vita e dunque sulla gestione dei rifiuti anziché sull'intero ciclo di vita del prodotto. Oggi, l'economia circolare è riconosciuta dall'Unione Europea (UE) come una “*tendenza mondiale e irreversibile*” (COM(2019) 190 final p.11), è stata un pilastro essenziale nella strategia della Commissione Juncker (2014-2019), una componente chiave del Green Deal europeo (COM(2019) 640 final) e del Recovery Plan della Commissione Von der Leyen (2019-2024) e la protagonista del nuovo piano d'azione per l'economia circolare 2020 (COM(2020) 98 final e di seguito riportato anche con la dicitura “*Piano d'Azione 2020*”) nel quale, nel settore energetico, viene fatto un notevole passo avanti con il riconoscimento del nesso tra l'economia circolare e la decarbonizzazione ai fini del raggiungimento della neutralità climatica.

Considerando lo stato emergente della letteratura accademica sull'argomento all'epoca dell'anello mancante, la crescita impressionante e l'adozione del concetto da parte dell'UE è stato un fenomeno rilevante. Infatti, i confini del concetto di economia circolare sono ancora labili e diversi *stakeholders* cercano di influenzarne il significato e la comprensione con una varietà di approcci contrastanti alla circolarità. Scegliendo una singola visione sull'economia circolare e attuandola su larga scala con le sue politiche, l'UE determinerà il futuro e il significato della circolarità in Europa con importanti implicazioni per gli Stati membri e per i Paesi terzi (Calisto Friant, Vermeulen e Salomone, 2021). La visione di economia circolare che l'UE ha scelto di considerare è dunque quella di opportunità per disaccoppiare progressivamente il consumo di risorse dalla crescita economica, di ridurre la dipendenza dell'UE dalle materie prime importate e vergini e la sua vulnerabilità alla volatilità dei prezzi delle risorse, fornendo al contempo nuove opportunità di business.

Il paradigma circolare si basa su cinque pilastri che possono essere applicati distintamente oltre che in combinazione fra loro. Il primo pilastro prevede l'utilizzo di fonti energetiche e materiali rinnovabili o da riuso/riciclo affinché si riduca l'impatto ambientale. Il secondo pilastro ha lo scopo di andare oltre il termine della vita utile del prodotto e di progettare prodotti modulari e modulabili che facilitino la riparazione, l'aggiornamento e la rigenerazione. Il terzo pilastro ha come obiettivo un utilizzo efficiente attraverso la

creazione di strumenti e piattaforme di condivisione e collaborazione tra utenti e proprietari che permettano di ottimizzare i costi di beni e servizi e le risorse impiegate per produrli. Il quarto pilastro si prefigge di trasformare il prodotto in servizio e dunque di incoraggiare un nuovo concetto di proprietà condivisa. Grazie alle tecnologie digitali, le aziende possono offrire un unico servizio fruibile da un vasto pubblico, piuttosto che vendere lo stesso prodotto replicato per molteplici singoli, massimizzando il fattore di utilizzo e la vita utile. Il quinto pilastro è il ripensamento di nuovi cicli di vita, ovvero di soluzioni finalizzate a preservare il valore di un bene al termine di un ciclo di vita grazie a riuso, rigenerazione, upcycling o riciclo e reimmissione sul mercato, oppure il riutilizzo con fini diversi dall'impiego iniziale.



Figura 2. I cinque pilastri di un modello di sviluppo sostenibile³

1.2. Dalla tutela dell'ambiente all'uso efficiente delle risorse fino all'economia circolare

Un breve excursus storico ci aiuterà a capire dove si collocano le radici del concetto di economia circolare. La Comunità Economica Europea (CEE) e la Comunità Europea dell'Energia Atomica (CEEa o Euratom) furono istituite dai trattati di Roma del 1957, ma soltanto nel 1987 l'Atto Unico Europeo ha gettato le basi per una disciplina comunitaria della tutela ambientale. Venne infatti introdotto il Titolo VII dedicato alla salvaguardia dell'ambiente, alla protezione della salute umana e ad un utilizzo accorto e razionale delle risorse naturali (Atto Unico Europeo (1987)). Nel 1992 il Trattato di Maastricht ha poi introdotto per la prima volta il concetto di sviluppo sostenibile stabilendo che *“le esigenze connesse con la tutela dell'ambiente devono essere integrate nella definizione e nell'attuazione delle altre politiche comunitarie”* (Trattato sull'Unione europea (1992) p.29). Nel 1997, *“un elevato livello di tutela ambientale”* figura tra gli obiettivi prioritari dell'UE nel Trattato di Amsterdam (Trattato di Amsterdam (1997) p.42). Contemporaneamente, le Nazioni Unite si sono adoperate in uno sforzo globale di sensibilizzare l'opinione pubblica sul tema dell'ambiente in diverse occasioni, tra cui alla Conferenza di Stoccolma sull'Ambiente Umano del 1972, con il rapporto *‘Our Common Future’* del 1987 e al Summit della Terra tenutosi a Rio de Janeiro nel 1992 in occasione del quale sono stati raggiunti risultati senza precedenti nella storia della politica internazionale in tema ambientale. Al Summit della Terra si devono infatti la Convenzione quadro sui cambiamenti climatici da cui ha avuto origine il protocollo di Kyoto, la Dichiarazione di Rio sull'Ambiente e lo Sviluppo, l'Agenda 21 per lo Sviluppo Sostenibile, la Dichiarazione dei principi per la gestione sostenibile delle foreste e la Convenzione sulla diversità biologica.

Negli ultimi 25 anni, la strategia della politica delle risorse UE si è gradualmente orientata verso l'uso sostenibile delle risorse naturali, l'aumento dell'efficienza delle risorse nell'economia e l'incremento del riciclaggio e della prevenzione dei rifiuti, puntando contestualmente a livelli sostenibili di crescita economica. Di seguito un quadro che

³ Fonte: Enel. Sulla base di questi cinque pilastri, Enel X si è dotata di uno strumento per *misurare la circolarità* con il [Modello CirculAbility©](#) sviluppato per valutare le prestazioni del Gruppo, che è stato poi reso pubblico, a disposizione di tutte le aziende interessate.

illustra una cronologia delle iniziative adottate dall'UE negli ultimi 25 anni per affrontare il tema dell'efficienza delle risorse, con evidenziate **in grassetto** le iniziative sulle quali questo elaborato si soffermerà poiché di maggiore interesse per le utilities. Comprende sia atti giuridici quali regolamenti e direttive sia le comunicazioni. I regolamenti sono direttamente applicabili nei territori degli Stati membri e stabiliscono requisiti su aree per le quali l'UE ha competenze dirette e spesso esclusive, come i requisiti per la progettazione ecocompatibile e l'etichettatura dei prodotti. Le direttive stabiliscono obblighi vincolanti per gli Stati membri, come obiettivi, processi di raccolta dei dati e requisiti politici, ma devono essere recepite nella legislazione nazionale di ciascuno Stato membro per essere attuate. Le comunicazioni non hanno un effetto giuridico diretto; sono strumenti di cui si avvale la Commissione europea per informare e orientare gli Stati sulle azioni e sulle politiche che intraprenderà nel corso del mandato. Per quanto le comunicazioni non abbiano la stessa validità giuridica di regolamenti e direttive, risultano più complete e utili al lettore poiché offrono una visione strategica d'insieme che facilita nella comprensione della direzione politica della Commissione in carica.

Le comunicazioni

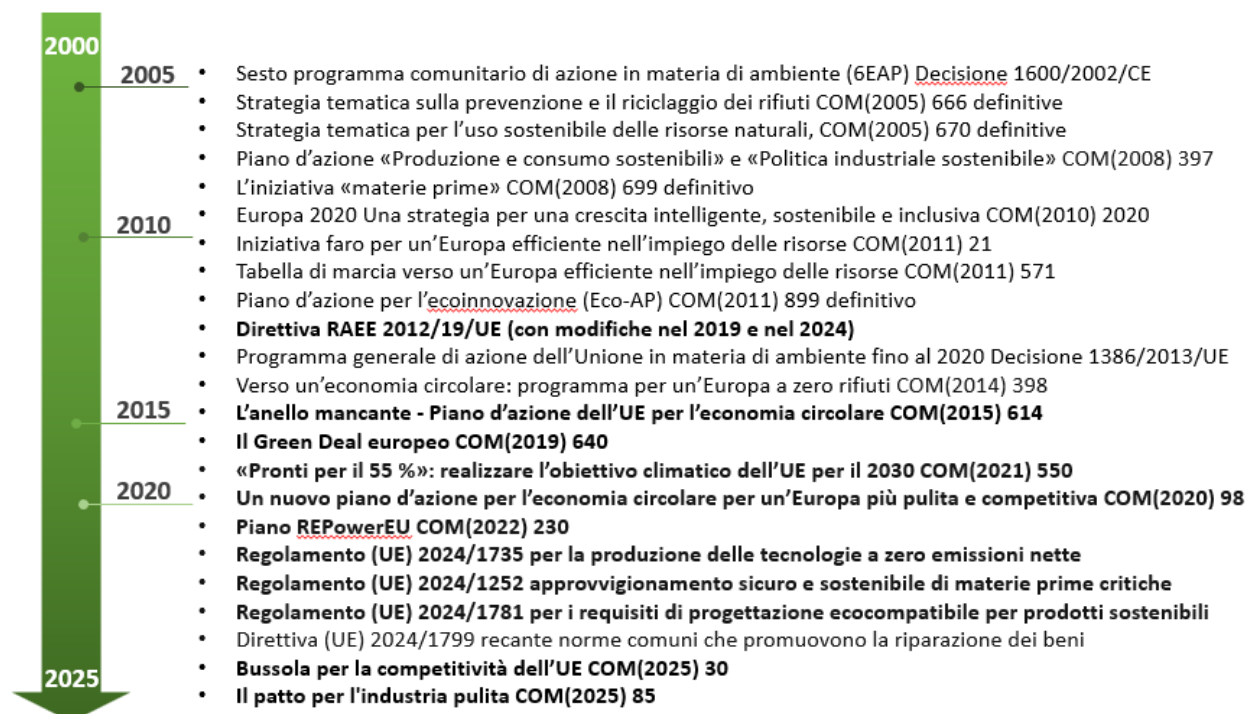


Figura 3. Cronologia delle iniziative europee in materia di efficienza delle risorse ed economia circolare.

Inizialmente, gli sforzi politici a livello europeo per promuovere l'efficienza delle risorse e un modello di produzione più sostenibile si sono concentrati sull'ultima fase del modello

lineare, ovvero sulla gestione dei rifiuti, il loro riciclaggio e riutilizzo. L'attenzione principale è stata posta sulle politiche a favore di una gestione efficiente ed efficace dei rifiuti, con obiettivi di miglioramento dei tassi di riciclaggio in Europa e conseguenti benefici derivanti da una maggiore circolazione delle risorse nell'economia, tanto che la prima normativa importante attribuibile all'economia circolare è stata la Direttiva RAEE (cfr. 1.9).

Nel contesto delle crescenti pressioni globali sulla disponibilità delle risorse, la dipendenza dell'Europa dalle importazioni di materie prime e la volatilità dei prezzi, la Commissione europea nel 2011, con una tabella di marcia verso un'Europa efficiente nell'impiego delle risorse ha espresso la necessità di adottare approcci circolari per garantire la sicurezza delle risorse e per rendere i rifiuti delle risorse riutilizzabili (COM(2011) 571 final). Un anno dopo viene lanciata dalla Direzione Generale per l'Ambiente (DG ENV), la *European Resource Efficiency Platform* (EREP), una piattaforma di co-creazione che riunisce stakeholders da diversi settori ed esperti tra cui diversi governi degli Stati Membri, esponenti dell'industria, università e associazioni.

Nel luglio 2014, la Commissione europea ha adottato un pacchetto sull'economia circolare costruito sulla base della tabella di marcia per l'efficienza delle risorse e comprensivo di una serie di iniziative come la revisione della legislazione sui rifiuti, un'iniziativa per l'edilizia sostenibile, un piano d'azione per le imprese, una comunicazione sull'occupazione verde e una relazione sui progressi della tabella di marcia (COM(2014) 398 final).

Più tardi nello stesso anno si è insediata la Commissione Juncker, ma al momento di stabilire le priorità politiche per il suo mandato, e a causa di una persistente convinzione erronea che l'economia circolare fosse una politica puramente ambientale e dunque inadeguata al raggiungimento delle priorità politiche, la strategia di economia circolare è stata abbandonata (Ellen MacArthur Foundation, 2020). Di conseguenza le proposte legislative sui rifiuti furono ritirate a dicembre 2014, ma, alcuni Stati membri, Organizzazioni non governative (ONG), eurodeputati ed esponenti di diversi importanti settori industriali hanno dimostrato un ampio sostegno all'economia circolare come *driver* di crescita economica e opportunità lavorative⁴. La strategia circolare ha ripreso

⁴ Open letter to President Juncker on the Circular Economy (2015) disponibile al link <https://www.municipalwasteeurope.eu/publications/open-letter-to-president-juncker-on-the-circular-economy-signed-by-15-organisations>.

poi vigore in qualità di generatrice di opportunità economiche e di posti di lavoro, crescita e investimenti (Bassot et al., 2019) e la sostenibilità ha condotto le politiche ambientali ed economiche della Commissione Juncker. Il vicepresidente della Commissione successivo, Frans Timmermans, ha assunto la responsabilità di sviluppare nuove proposte per il primo piano d'azione sull'economia circolare.

1.3. Analisi comparata dell'anello mancante e del nuovo piano di azione

1.3.1. Introduzione all'anello mancante del 2015

Il 2 dicembre 2015, la Commissione ha pubblicato la comunicazione “L'anello mancante – Piano d'azione dell'Unione europea per l'economia circolare”, il primo documento delle istituzioni europee nell'ambito specifico dell'economia circolare, diventata ufficialmente una priorità nella politica economica del mercato unico. Il piano d'azione contiene una serie di iniziative legislative volte a intraprendere una transizione dell'economia europea da un modello lineare ad uno circolare; tra queste le direttive riviste sui rifiuti urbani e di imballaggio e una direttiva sulla plastica monouso sviluppata come corollario della Strategia sulla plastica.

Sono inoltre presenti requisiti legali che obbligano gli Stati membri a implementare le azioni avviate a livello UE per aree selezionate, come ad esempio l'eco-innovazione, l'etichettatura ecologica, un ambiente non tossico, prodotti chimici, materie prime e fertilizzanti. L'importanza del piano risiede in parte nell'aver stimolato i singoli paesi a presentare ed implementare piani nazionali consentendo un'attuazione capillare.

L'obiettivo dell'anello mancante è quello di migliorare la competitività delle imprese europee proteggendo le industrie dalla potenziale scarsità di risorse e dalla volatilità dei prezzi, contribuendo a creare nuove opportunità commerciali e modi innovativi di produzione e di consumo. L'approccio circolare è promotore di nuovi posti di lavoro a tutti i livelli di competenza della forza lavoro e di opportunità di integrazione sociale. In particolare, gli attori economici, tra cui le imprese e i consumatori, sono identificati come i principali motori del processo di transizione, mentre le autorità locali, regionali e nazionali sono incoraggiate ad assumersi il ruolo di catalizzatori in questa transizione. L'UE svolge invece una funzione di supporto fondamentale, assicurando la presenza di un quadro normativo per lo sviluppo dell'economia circolare nel mercato unico.

Durante l'intero processo, la Commissione europea ha dato priorità al coinvolgimento dei settori pubblico e privato, delle ONG e della società civile, attraverso consultazioni

pubbliche e conferenze. Per promuovere lo scambio di buone pratiche e favorire la cooperazione, sono state create diverse piattaforme come la *European Circular Economy Stakeholder Platform*, lanciata nel 2017, e la *Circular Economy Finance Support Platform* per contribuire ad aumentare le conoscenze tra gli attori coinvolti nella transizione.

Il piano d'azione delinea 54 interventi politici lungo il ciclo di vita dei prodotti da intraprendere nel breve/medio periodo. A marzo 2019, a distanza di soli tre anni dall'adozione, tutte le 54 azioni erano state realizzate o erano in fase di attuazione (COM(2019) 190 final). Altre 4 proposte legislative sui rifiuti con obiettivi per lo smaltimento in discarica, il riutilizzo e il riciclaggio, sono state invece delineate ai fini di essere raggiunte entro il 2030 e il 2035, insieme a nuovi obblighi per la raccolta differenziata dei rifiuti tessili e biologici. Il piano d'azione copre diverse aree politiche, flussi di materiali e settori insieme a misure trasversali per sostenere questo cambiamento sistemico attraverso innovazione e investimenti. Alcune misure hanno incoraggiato l'adozione di strategie circolari a livello nazionale e regionale in tutta Europa, ad esempio, la legislazione sui rifiuti impone obiettivi giuridicamente vincolanti agli Stati membri dell'UE.

1.3.2. Introduzione al nuovo piano d'azione del 2020

Ponendo le basi per la circolarità, l'anello mancante ha permesso l'adozione di ulteriori politiche, come il patto verde europeo del 2019 (cfr. 1.4) e il piano d'azione per l'economia circolare 2020 o CEAP. L'UE ha progressivamente innalzato il suo livello di ambizione sul tema della circolarità ora considerato come un mezzo per raggiungere gli impegni climatici dell'UE e una transizione giusta, sostenibile e socialmente equa. Nel presentare la nuova strategia, ovvero il piano d'azione 2020, l'allora vicepresidente esecutivo per il Green Deal europeo, Frans Timmermans, ha dichiarato:

“Per raggiungere la neutralità climatica entro il 2050, per preservare il nostro ambiente naturale e per rafforzare la nostra competitività economica, è necessaria un'economia completamente circolare”.

Il piano d'azione per l'economia circolare (COM(2020) 98 final), è stato adottato nel 2020, nell'intento di raggiungere un'economia sostenibile a zero emissioni di carbonio, priva di sostanze tossiche e completamente neutra entro il 2050. A livello sovranazionale, il piano sviluppa una politica integrale per un'economia circolare, che copre un'ampia

gamma di settori, tra cui industria, smaltimento e trattamento dei rifiuti, prodotti chimici, plastica, imballaggi, efficienza delle risorse, sicurezza ambientale, che vengono poi trattate da strategie dedicate settoriali. La politica di transizione verso l'economia circolare è ancora in uno stato emergente, comprende obiettivi e misure variegati, che vengono attuati in modo differenziato. Ciò è complicato dal coinvolgimento di un numero relativamente elevato di Paesi, che giustifica la necessità di un monitoraggio, di una valutazione dei progressi complessivi e di un confronto dei cambiamenti con quelli individuali. Un adeguato monitoraggio è necessario per sviluppare e migliorare le politiche dell'UE, tenendo conto della rapida espansione delle aree di interesse e delle sfide.

Se l'anello mancante si concentrava principalmente sulla gestione dei rifiuti, il piano d'azione 2020 contiene una visione strategica per l'economia circolare lungo l'intera catena del valore con 35 nuove azioni da attuare entro fine 2025⁵ ai fini di trasformare entro questo decennio l'economia circolare in una forza trainante per raggiungere la neutralità climatica entro il 2050, garantendo al contempo la competitività a lungo termine dell'UE. Nell'introduzione della Comunicazione, l'UE si impegna a raddoppiare la percentuale di utilizzo dei materiali circolari entro il 2030. Illustra inoltre come l'applicazione dei principi dell'economia circolare contribuirà ad aumentare il PIL dell'UE del 0,5% entro il 2030 creando circa 700.000 posti di lavoro (Cambridge Econometrics, Trinomics e ICF, 2018). Tra i benefici figurano anche una dematerializzazione dell'economia nel mercato unico, una diminuzione della dipendenza dalle materie prime, un incremento di nuove imprese e di modelli innovativi che utilizzano blockchain, *Internet of Things* (IoT), prodotti come servizio (PaaS), una relazione più stretta con i clienti e l'intelligenza artificiale. Tra le iniziative principali, la prima menzionata è un quadro strategico per i prodotti sostenibili che prevede misure lungo tutto il ciclo di vita dei prodotti e dà priorità ai settori ad alta intensità di risorse e alle catene di valore dei prodotti chiave. Il piano prosegue il suo impegno nella riduzione dei rifiuti e nella promozione di un mercato interno per le materie prime secondarie e nel miglioramento di un quadro di monitoraggio efficace.

Il piano copre l'intero ciclo economico: la produzione, il consumo, la riparazione, la rigenerazione, la gestione dei rifiuti, le materie prime secondarie e comprende una serie

⁵ Al momento della scrittura di questo elaborato, non era disponibile un report sull'implementazione delle politiche del Piano d'azione 2020, al pari di quello sull'applicazione dell'anello mancante 2015 (cfr. COM(2019) 190 final).

di flussi di materiali, tra cui plastica, alimenti, materie prime critiche, edilizia, biomassa e materiali *bio-based*.

Nel prossimo paragrafo verrà comparato il contenuto dei due piani con particolare riferimento sull'evoluzione nei singoli campi delle politiche nel piano d'azione 2020.

1.3.3. Produzione e progettazione

L'anello mancante riconosce il ruolo fondamentale che ricopre la progettazione nell'economia circolare, sia per quanto riguarda la durabilità di un prodotto, ma anche la sua riparabilità e il suo smontaggio e più in generale il risparmio di risorse preziose. Riconosce tuttavia anche i limiti del mercato che, a causa di interessi non coincidenti tra produttori, utilizzatori e imprese di riciclaggio, necessiterebbe di incentivi. Al fine di promuovere una migliore progettazione, sono state dunque identificate delle specifiche obbligatorie di progettazione nel regolamento sulla progettazione ecocompatibile che superano il "solo" miglioramento dell'efficienza energetica e includono aspetti come la riparabilità, durabilità, possibilità di rimessa a nuovo e di riciclaggio e identificazione di determinati materiali o sostanze. Ancor prima della produzione o progettazione, la Commissione promuove genericamente un approvvigionamento delle materie prime a livello mondiale senza tuttavia definire degli obblighi vincolanti, come invece farà il Critical Raw Materials Act (cfr. 1.8). Infine, viene promossa la simbiosi industriale (cfr. 1.11.2), intesa come la possibilità di utilizzare i rifiuti o i sottoprodotti di un'industria in un'altra industria in qualità di fattori di produzione attraverso la delineazione di orientamenti.

Il piano d'azione 2020 pone ancora di più l'attenzione sulla fase di progettazione, riconoscendo che fino all'80% dell'impatto ambientale dei prodotti è determinato in questa fase. Di conseguenza, tra le iniziative chiave all'interno di un quadro strategico in materia di prodotti sostenibili, figura l'ampliamento dell'applicazione del Regolamento sulla progettazione ecocompatibile alla più ampia gamma possibile di prodotti. Gli aspetti da disciplinare sono molteplici e riguardano il miglioramento della durabilità, della riutilizzabilità e riparabilità dei prodotti, l'aumento dell'efficienza energetica e del contenuto riciclato, la presenza di sostanze chimiche pericolose, la lotta contro l'obsolescenza prematura, la riduzione dei prodotti monouso e delle impronte di carbonio e ambientale, la possibilità di riciclaggio, l'introduzione di un nuovo divieto sulla distruzione dei beni non venduti, la promozione della digitalizzazione e dei prodotti come servizi o di modelli simili in cui i produttori sono proprietari del prodotto e dunque

responsabili delle prestazioni e della gestione per l'intero ciclo di vita. Questa strategia dà priorità a categorie di prodotti facenti parte di catene del valore ad alto impatto come l'elettronica, le tecnologie per l'informazione e la comunicazione, i tessili, l'acciaio, il cemento e le sostanze chimiche. Oltre all'estensione dell'applicazione del Regolamento a più prodotti, sono stabiliti nuovi principi di sostenibilità e modalità e, per quanto riguarda i prodotti connessi all'energia, questi sono disciplinati dal nuovo piano di lavoro sulla progettazione ecocompatibile e l'etichettatura energetica 2020-2024 per singoli gruppi di prodotti. A sostegno del nuovo quadro è stato istituito uno spazio europeo dei dati sulle catene di valore e informazioni sui prodotti per le applicazioni circolari intelligenti (COM(2020) 67 final) ed è stata intensificata la cooperazione con le autorità nazionali.

Il quadro sui prodotti sostenibili mette in luce la necessità di rendere il consumatore più partecipe all'economia circolare e più consapevole, e si prefigge dunque l'obiettivo di:

- garantirgli informazioni esaustive circa la durata di vita, i servizi di riparazione e i pezzi di ricambio presso i punti di vendita;
- proteggerlo dal *greenwashing* o ecologismo di facciata e dall'obsolescenza prematura lavorando sui requisiti per i mezzi di informazione e i marchi di sostenibilità e sulla revisione del marchio Ecolabel UE;
- istituire un diritto alla riparazione e servizi di *upgrading*;
- proporre nuovi criteri obbligatori per gli appalti pubblici verdi⁶.

Ai fini di promuovere la circolarità nei processi produttivi, viene proposta, e realizzata nel 2024, la modifica della direttiva sulle emissioni industriali nella quale sono state inserite pratiche di economia circolare tra le migliori tecniche disponibili, verrà attuato un piano sulla bioeconomia e saranno promosse le tecnologie digitali che facilitano la tracciabilità e la mappatura delle risorse.

1.3.4. Consumi

Per quanto riguarda i consumi, l'anello mancante migliora il sistema di etichettatura per le prestazioni energetiche degli elettrodomestici e di altri prodotti connessi all'energia e per la progettazione ecocompatibile, introducendo requisiti in materia di durabilità e disponibilità di pezzi di ricambio e di informazioni sulla riparazione. Nell'ambito degli

⁶ Gli appalti verdi o acquisti verdi (*green public procurement*) sono procedure d'acquisto da parte delle amministrazioni pubbliche che incoraggiano e favoriscono lo sviluppo di prodotti e tecnologie a minor impatto ambientale.

appalti verdi sono invece stati elaborati nuovi criteri, tuttavia sempre adottabili su base volontaria. La Commissione sostiene inoltre, attraverso Orizzonte 2020 e i fondi della politica di coesione, i modelli aziendali e di consumo che comportano la condivisione di prodotti e infrastrutture, l'utilizzo di piattaforme informatiche e digitali e il consumo di servizi anziché prodotti. Orizzonte 2020 o *Horizon 2020* è stato il più grande programma di finanziamento europeo per la ricerca e l'innovazione, attivo dal 2014 al 2020, con un budget complessivo di circa €80 miliardi ed è il programma che ha fornito a PHOTORAMA le risorse necessarie per affrontare le sfide tecnologiche e ambientali del settore fotovoltaico, posizionandolo come un esempio pionieristico di economia circolare applicata alle energie rinnovabili. Il progetto Photorama sarà discusso nel terzo capitolo di questo elaborato (cfr. 3.1.1).

Il nuovo piano d'azione 2020 intende rafforzare la partecipazione dei consumatori all'economia circolare sia per quanto riguarda la fruizione di informazioni attendibili sui prodotti in merito a durata, riparazione e ricambio sia per quanto riguarda l'ecologismo di facciata e l'obsolescenza prematura. La Commissione si impegna inoltre ad istituire il diritto alla riparazione e a far sì che le imprese forniscano maggiori elementi a sostegno delle loro dichiarazioni ambientali. Infine, vengono proposti criteri ed obiettivi minimi obbligatori in materia di appalti pubblici verdi nella legislazione settoriale.

1.3.5. Rifiuti e risorse

Come già annunciato, l'anello mancante si concentra molto sui rifiuti, proponendo una revisione della legislazione dei rifiuti con il fine di aumentare i rifiuti urbani riciclati e diminuire quelli conferiti in discarica. Laddove è inevitabile la produzione di un rifiuto e non è possibile riciclarlo, la Commissione ne promuove il recupero del contenuto energetico attraverso la termovalorizzazione. Infine, il documento annuncia l'introduzione di norme comuni di qualità che hanno lo scopo di accrescere la fiducia nelle materie prime secondarie e nei materiali riciclati. Difatti, l'assenza di esse complica la comprensione dei livelli di impurità dei materiali non consentendone il riciclaggio. Per semplificare la circolazione delle materie prime seconde su tutto il territorio dell'Unione, la CE si è infine impegnata a sostenere la ricerca sui flussi di materie prime e a potenziarne il nuovo sistema di informazione.

Seppure il nuovo piano di azione supera la visione dell'anello mancante concentrata prevalentemente sui rifiuti, conserva la sezione ad essi dedicata e propone una serie di iniziative tra cui l'armonizzazione dei sistemi di raccolta differenziata, il riesame della

legislazione europea in materia di pile, imballaggi, veicoli fuori uso e sostanze pericolose nelle apparecchiature elettroniche, scambi in materia di economia circolare e di rifiuti tra i portatori di interesse e l'intensificazione della cooperazione tra città, regioni e stati membri. Per semplificare inoltre la creazione di un mercato delle materie prime secondarie competitivo con quello delle materie prime primarie, è prevista l'introduzione di obblighi concernenti il contenuto riciclato nei prodotti, lo sviluppo di ulteriori criteri che definiscano la cessazione della qualifica di rifiuto, il rafforzamento del ruolo della normazione e infine l'istituzione di un osservatorio del mercato per le materie secondarie fondamentali.

1.3.6. Catene di valore dei prodotti

L'anello mancante individua i settori prioritari da attenzionare in quanto particolarmente problematici dal punto di vista dell'economia circolare a causa delle loro catene del valore, della loro impronta ambientale e della dipendenza da materie provenienti da paesi extra UE. I settori prioritari sono:

- Plastica
- Rifiuti alimentari
- Materie prime essenziali
- Rifiuti di costruzione e demolizione
- Biomassa e prodotti biologici

In particolare, ai fini della pertinenza con questo elaborato, vale la pena notare come il lavoro della Commissione sulle materie prime essenziali abbia con successo portato alla delineazione del Critical Raw Materials Act (cfr. 1.8).

Il nuovo piano d'azione individua le principali catene di valore sulle quali intervenire con azioni mirate volte ad individuare gli ostacoli all'espansione dei prodotti circolari e alle modalità per superarli. Le principali catene sono:

- Elettronica e TIC
- Batterie e veicoli
- Imballaggi
- Plastica
- Prodotti tessili
- Costruzione e edilizia

- Prodotti alimentari, acque e nutrienti

Più nel dettaglio, per quanto concerne le batterie, ossia la catena più pertinente alle tematiche trattate da questo elaborato, la Commissione europea ha adottato nel luglio 2023 il nuovo Regolamento UE 2023/1542, che sostituisce la Direttiva sulle Batterie del 2006. Questo regolamento copre l'intero ciclo di vita delle batterie, dalla progettazione alla produzione, fino al riutilizzo e al riciclo. Si tratta di un quadro normativo armonizzato che introduce requisiti obbligatori per tutte le batterie immesse sul mercato dell'UE, inclusi gli aspetti inerenti alla dichiarazione dell'impronta di carbonio e requisiti minimi di contenuto riciclato per materiali critici come cobalto, litio, nichel e piombo; ai parametri di prestazione e durabilità, con obblighi di removibilità e sostituibilità per le batterie portatili e quelle utilizzate nei mezzi di trasporto leggeri (es. biciclette elettriche); al passaporto digitale delle batterie (*Battery Passport*), che migliora la trasparenza lungo la catena del valore; agli obblighi di due diligence per garantire un approvvigionamento etico delle materie prime; agli obiettivi di raccolta e riciclo, con tassi minimi fissati al 65% entro il 2025 e al 70% entro il 2030 per le batterie portatili, oltre a target più ambiziosi per il recupero del litio.

Inoltre, il regolamento prevede l'implementazione graduale di alcune disposizioni tra il 2024 e il 2027. Ad esempio, a partire dal febbraio 2024, sarà obbligatoria una progettazione che consenta la rimozione e sostituzione sicura delle batterie portatili utilizzando strumenti accessibili.

Considerato l'aumento previsto della domanda di batterie in Europa (stimata fino a 1 TWh annuo entro il 2030), il regolamento mira anche a rafforzare la competitività del settore europeo delle batterie. Sono stati annunciati circa 30 progetti di *gigafactory* con capacità combinata prevista di 1,3 TWh entro il 2030. Tuttavia, permangono sfide significative legate alla dipendenza dalle importazioni di materie prime critiche come litio e cobalto, nonché alla necessità di accelerare la costruzione delle fabbriche.

1.3.7. La circolarità come mitigazione dei cambiamenti climatici

Il nuovo piano d'azione, a differenza dell'anello mancante riconosce il nesso tra circolarità e riduzione dei gas a effetto serra e la necessità di rafforzare la sinergia tra le due per conseguire la neutralità climatica. Inoltre, il piano anticipa le intenzioni della Commissione di migliorare gli strumenti di modellizzazione per comprendere gli effetti

positivi dell'economia circolare sulla riduzione delle emissioni di gas serra e di promuovere la centralità del ruolo della circolarità nei piani nazionali per l'energia e il clima. Infine, per stimolare l'assorbimento del carbonio attraverso la natura o grazie ad una maggiore circolarità, la Commissione si impegna a sviluppare un quadro normativo per la certificazione degli assorbimenti di carbonio.

1.3.8. Energia

L'UE ha già raggiunto l'obiettivo del 2020 di ridurre le emissioni di gas serra del 20% rispetto ai livelli del 1990 e si sta impegnando a ridurle del 55% entro il 2030. Prima del Green Deal (cfr. 1.4), l'obiettivo era fissato al 40% ma successivamente è stato reso più ambizioso e modificato a 55% ai fini di raggiungere la neutralità climatica entro il 2050. L'economia circolare può svolgere un ruolo chiave in una transizione ecologica a zero emissioni di carbonio, poiché i processi di produzione e consumo rappresentano il 45% delle emissioni di gas serra e il restante 55% corrisponde alla fornitura di energia (Ellen MacArthur Foundation, 2019). I materiali riciclati generano meno emissioni di gas serra rispetto a quelli vergini (Aurez et al., 2016) e l'eliminazione del conferimento in discarica e la riduzione degli sprechi alimentari possono ridurre significativamente le emissioni di gas serra (Hawken, 2017). Inoltre, la riduzione della domanda di beni attraverso l'allungamento dei tempi di utilizzo e la trasformazione di stili di vita più sobri è fondamentale per ridurre le emissioni di gas serra.

Tuttavia, tra le catene del valore su cui si focalizzano l'anello mancante ed il piano d'azione, non è presente il settore delle energie rinnovabili, in particolare le tecnologie eolica e solare, fondamentali per la decarbonizzazione, la transizione energetica e il raggiungimento della neutralità climatica. Considerata l'enorme diffusione delle energie rinnovabili negli ultimi decenni, una volta che gli impianti rinnovabili avranno completato la loro vita utile, in Europa saranno generati a valle grandi volumi di materiali a fine vita. Le tecnologie per produrre energia rinnovabile da eolico e fotovoltaico si prestano a introdurre la circolarità lungo tutto il loro ciclo di vita in quanto possono essere facilmente riciclati o "ripotenziati" con nuovi componenti quando quelli vecchi terminano il loro ciclo di vita. I pannelli fotovoltaici che hanno terminato la loro vita utile possono essere rigenerati e infine riciclati, recuperando celle di silicio di alta qualità che permetterebbero di produrne di nuove. I componenti smantellati dei parchi eolici ripotenziati possono essere riciclati in larga misura, comprese le pale, l'acciaio e i metalli, recuperando terre rare e fibre di grande valore. Un quadro normativo chiaro per

promuovere la circolarità nel settore delle rinnovabili è quindi fondamentale per cogliere questa enorme opportunità ed evitare grandi quantità di rifiuti provenienti da componenti rinnovabili smantellati. Nel settore energetico si rendono inoltre necessari, nell'ambito della strategia meno rifiuti più valore, nuovi meccanismi di sostegno, ad esempio favorendo azioni volontarie per il riciclo delle pale eoliche, l'ottimizzazione degli imballaggi fotovoltaici, l'esecuzione di valutazioni LCA (*life-cycle-assessment*) e l'ottimizzazione del ciclo di vita dei prodotti, compresi i secondi utilizzi e la gestione del fine vita. Proprio su questo tema si concentrerà il caso studio analizzato nel terzo e ultimo capitolo di questo elaborato.

1.3.9. Circolarità a servizio delle persone, delle regioni e delle città

Come nell'ambito della decarbonizzazione la Commissione si è impegnata per una *Just transition*, così per l'economia circolare si è adoperata, nel piano d'azione 2020 a garantire che la transizione non lasci indietro nessuno. In questo contesto a sostegno delle competenze e della creazione di posti di lavoro verranno aggiornati l'Agenda per le competenze e verrà varato un Patto per le competenze. Un ruolo fondamentale nella transizione ecologica viene infine svolto dalle amministrazioni locali nei confronti delle quali sono rivolte alcune iniziative, tra cui quella urbana europea, e le iniziative “*Intelligent Cities Challenge*” e “Città e regioni circolari”.

La questione dell'economia circolare è rilevante anche per le isole e le regioni ultraperiferiche, che hanno un'elevata disponibilità di risorse rinnovabili ma dipendono dalle importazioni e producono un elevato ammontare di rifiuti a causa del turismo portando spesso all'esportazione dei rifiuti generati. Insieme alle città, le isole offrono condizioni promettenti per una diffusione accelerata della mobilità elettrica e delle iniziative di economia circolare nelle isole possono essere una soluzione alla loro spesso scarsa capacità di trattamento dei rifiuti.

La Commissione si adopererà per un migliore sfruttamento delle sinergie tra le politiche per il clima, l'energia e l'economia circolare per fare della circolarità un prerequisito per la neutralità climatica. Giocheranno un ruolo chiave l'analisi degli impatti della circolarità sulla mitigazione e l'adattamento ai cambiamenti climatici, il miglioramento degli attuali strumenti di modellazione per cogliere meglio i benefici dell'economia circolare sulla riduzione delle emissioni di gas serra sia a livello regionale che nazionale e l'inclusione della circolarità nelle future revisioni dei Piani nazionali per l'energia e il clima.

Il Piano conferma la volontà della Commissione di continuare a collegare i principali strumenti finanziari all'economia circolare e la *Circular Economy Finance Support Platform* continuerà a offrire indicazioni sul tema. Altrettanto importante sarà esplorare i modi migliori per integrare gli obiettivi dell'economia circolare nel contesto delle norme sulla rendicontazione non finanziaria e delle iniziative sulla corporate governance sostenibile e sulla contabilità ambientale in quanto possono fornire lo stimolo necessario al mercato dei capitali per accelerare la transizione verso un'economia veramente circolare e decarbonizzata. Oltre ad essere stata inserita tra le categorie di Aiuti di Stato nella nuova disciplina a favore di ambiente ed energia esenti dall'obbligo di notifica (cfr. 1.11.1), l'economia circolare è stata integrata tra i criteri di assegnazione del marchio di qualità Ecolabel ai prodotti finanziari e come obiettivo ambientale nella tassonomia europea (Regolamento UE 2020/852) che all'art. 13 elenca le condizioni per le quali si considera che un'attività economica dia un contributo sostanziale alla transizione verso un'economia circolare e sia dunque meritevole di rientrare nella classificazione degli investimenti ritenuti sostenibili dall'UE dal punto di vista ambientale.

1.3.10. Monitoraggio

Dal punto di vista dello sviluppo dell'economia circolare è fondamentale monitorare l'attuazione degli obiettivi e delle azioni intraprese a tutti i livelli. Il processo di monitoraggio è un compito difficile, soprattutto perché non esiste un unico insieme di indicatori generalmente accettabili o un unico indicatore, oppure perché esiste una grande varietà di indicatori, che può derivare da una diversa comprensione del concetto di economia circolare da parte dei singoli stakeholder.

Molte organizzazioni internazionali che attualmente si occupano di economia circolare hanno proposto le loro soluzioni per monitorare i progressi nell'implementazione dell'economia circolare, ad esempio l'OCSE, la Banca Mondiale, il WBCSD, l'AEA, la Ellen MacArthur Foundation e l'EASAC.

Alcuni Paesi dell'UE, come Paesi Bassi, Francia, Italia e Portogallo hanno creato propri indicatori, con l'effetto di complicare il confronto degli effetti delle attività legate all'economia circolare tra i singoli Paesi. Per tracciare la transizione verso la circolarità e monitorarne i progressi, la Commissione ha stabilito una serie di indicatori (COM(2018) 29 final), aggiornati nel 2023 (COM(2023) 306 final), per la maggior parte condivisi con il Quadro di valutazione dell'efficienza delle risorse e il Quadro di valutazione delle materie prime dell'UE. La maggior parte degli indicatori, tuttavia, ha il limite di non

prefiggersi obiettivi o azioni politiche, ed hanno dunque una funzione puramente informativa (Calisto Frint et al., 2021). Sono presenti cinque dimensioni principali che includono produzione e consumo, gestione dei rifiuti, materie prime secondarie, competitività e innovazione, e sostenibilità globale e resilienza. Gli indicatori sono in totale undici e tra i nuovi indicatori figurano l'impronta materiale, la produttività delle risorse, l'impronta di consumo, le emissioni di gas serra derivanti dalle attività produttive e la dipendenza dai materiali. Il quadro mira a misurare non solo i benefici diretti della circolarità, ma anche quelli indiretti, come la neutralità climatica e la resilienza economica. Inoltre, pone particolare attenzione sull'uso delle materie prime secondarie, che rappresentano ancora una percentuale limitata del consumo totale di materiali nell'UE pari solo al 12%.

Secondo un rapporto del 2024 della European Environment Agency, le attività legate all'economia circolare, come riparazione, riutilizzo e riciclaggio, hanno generato circa 170 miliardi di euro di valore aggiunto nell'UE, evidenziando una crescita rispetto ai 155 miliardi di euro stimati nel 2017 da Eurostat che aveva stimato l'impatto dell'anello mancante. Tra il 2012 e il 2023 si è registrato un aumento significativo dei posti di lavoro nei settori della riparazione, riciclo e riutilizzo. Si stima che il numero totale di posti di lavoro legati all'economia circolare in Europa abbia raggiunto circa 4 milioni, con una crescita costante dovuta all'espansione delle politiche circolari e agli investimenti in settori innovativi come il riciclo avanzato e la progettazione sostenibile (von Kolpinski and Kratzer, 2024). Il tasso di circolarità dell'UE, ovvero la percentuale di materiali recuperati e riciclati utilizzati nella produzione è aumentato dal 3,4% nel 2004 al 11,8% nel 2023, con un incremento dello 0,3% rispetto al 2022. Questo rappresenta il valore più alto mai registrato finora⁷. Tuttavia, è giusto sottolineare che questi aumenti non possono essere attribuiti esclusivamente all'adozione di politiche circolari, poiché vi sono altri fattori da prendere in considerazione tra cui il ruolo degli Stati membri, delle regioni e delle città nell'implementazione di iniziative circolari (Ellen MacArthur Foundation, 2020).

Di seguito è riportata una panoramica delle Comunicazioni e dei Regolamenti europei sull'economia circolare classificati per fase del ciclo di vita.

⁷ <https://www.statista.com/statistics/1316475/circular-material-use-rate-in-european-union-by-country/>

Fase del Ciclo di Vita	Regolamenti	Direttive
Progettazione	Regolamento sull'Ecodesign per i Prodotti Sostenibili (ESPR) [Regolamento (UE) 2023/1781]	Direttiva sulla restrizione dell'uso di determinate sostanze pericolose (RoHS) [Direttiva 2011/65/UE]
	Regolamento sulla tassonomia verde (Regolamento (UE) 2020/852)	
Produzione	Net Zero Industry Act (NZIA) [Regolamento (UE) 2024/1711]	Direttiva sulle emissioni industriali (IED) [Direttiva 2010/75/UE]
	Critical Raw Materials Act (CRMA) [Regolamento (UE) 2024/1781] e Regolamento (UE) 2024/1252 che istituisce un quadro atto a garantire un approvvigionamento sicuro e sostenibile di materie prime critiche	
Consumo	Regolamento sugli imballaggi e i rifiuti di imballaggio (PPWR) [Regolamento (UE) 2025/1747]	Direttiva sulla protezione dei consumatori [Direttiva 2019/771/UE]
	Regolamento relativo alla Corporate Sustainability Reporting Directive (CSRD) [Regolamento 2024]	
Gestione dei Rifiuti	<i>Circular Economy Act in previsione nel 2026 stabilisce criteri sull'end-of-waste criteria [Clean Industrial Deal COM(2025) 85 final]</i>	Direttiva quadro sui rifiuti [Direttiva 2008/98/CE, modificata dalla Direttiva (UE) 2018/851]
		Direttiva sui rifiuti di apparecchiature elettriche ed elettroniche (WEEE) [Direttiva 2012/19/UE]
Riciclo e Riutilizzo	Regolamento (UE) 2025/40 sugli imballaggi e i rifiuti di imballaggio	Direttiva (UE) 2018/852 sugli imballaggi e il riciclo

Tabella 1. Legislazione vigente in materia di economia circolare suddivisa in base al ciclo di vita

La legislazione obbligatoria comprende i regolamenti e le direttive dell'UE che sono vincolanti per gli Stati membri e la cui mancata osservanza comporta sanzioni amministrative, economiche o addirittura penali. Nella tabella sono stati inseriti regolamenti e direttive recenti, distribuiti in maniera abbastanza omogenea su tutte le fasi del ciclo di vita. È inserita anche, in grigio, la proposta della nuova commissaria europea per l'ambiente e l'economia circolare competitiva, Jessika Roswall incaricata – dalla Presidente della Commissione europea Ursula Von Der Leyen, per il suo secondo mandato dal 2024 al 2029 – a guidare una legge sull'economia circolare per creare una domanda di mercato per le materie secondarie. La nuova normativa, attesa per il 2026, si concentrerà sull'istituzione di un mercato unico per i rifiuti, soprattutto in relazione alle materie prime critiche, un nuovo pacchetto per l'industria chimica e lo sviluppo di un mercato unico per i prodotti sostenibili.

1.4.Dal Patto verde europeo ad un piano industriale per l'era net-zero

Il Patto verde, meglio conosciuto come Green Deal europeo (COM(2019) 640 final), è stato il primo prodotto legislativo rilevante della Commissione von der Leyen e ha segnato la futura strategia politica. È stato adottato a dicembre 2019 per garantire la sostenibilità e la transizione verso un'economia neutrale rispetto al clima e comprende un'ampia gamma di settori: riduzione dell'inquinamento atmosferico e delle emissioni di gas serra, conservazione delle risorse idriche e del suolo, sviluppo dell'agricoltura

biologica, ripristino della biodiversità, costruzione di un nuovo sistema energetico, ecc. Con l'adozione del Green Deal, l'UE ha iniziato il suo percorso verso un'economia più sostenibile con l'obiettivo di diventare il primo continente neutrale dal punto di vista climatico entro il 2050 e ha anticipato il lancio e il contenuto del Piano d'Azione per l'economia circolare adottato l'anno successivo e di cui si è trattato nel sottocapitolo precedente.

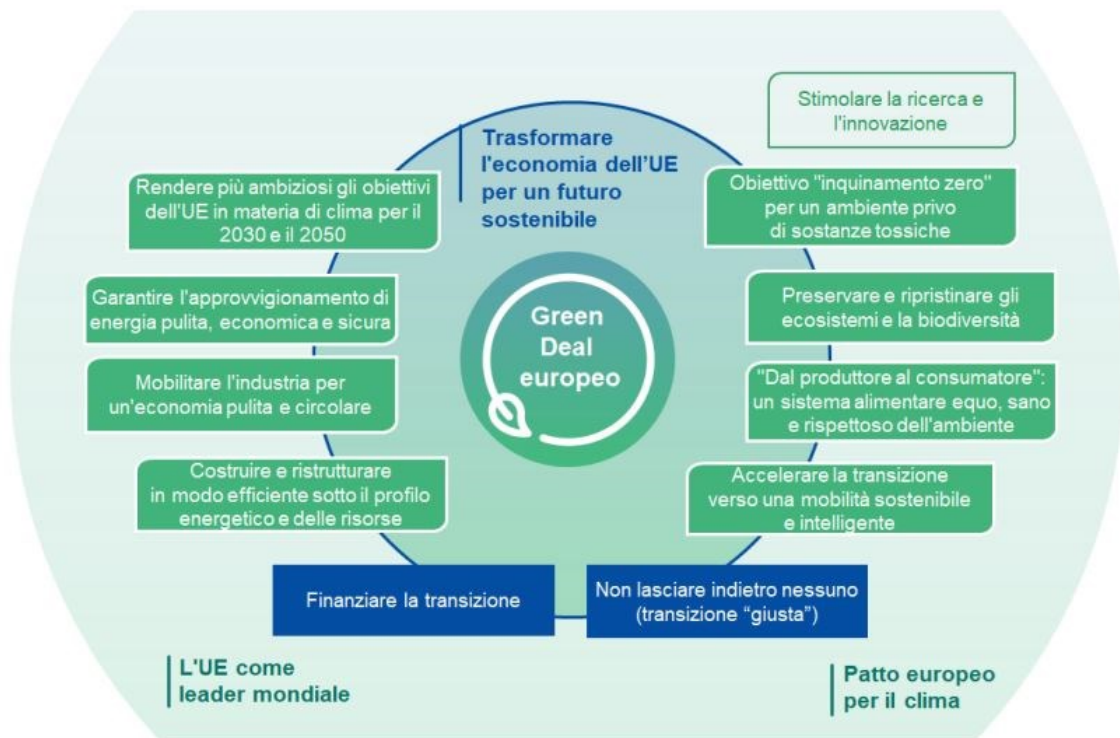


Figura 3. Il Green Deal europeo⁸

Nei primi mesi del 2023 il Green Deal ha subito un'evoluzione con la presentazione del *Green Deal Industrial Plan*, un piano pensato per consentire il rilancio dell'industria europea, che si è trovata a raggiungere obiettivi stringenti senza però gli strumenti necessari per raggiungerli. Complice il contesto geopolitico e l'entrata in vigore dell'IRA con conseguente minaccia di ricollocamenti degli investimenti europei all'estero, il piano vuole costruire una capacità produttiva adeguata alle ambizioni climatiche europee puntando su quattro pilastri:

- un contesto normativo prevedibile e semplificato,
- l'accelerazione dell'accesso ai finanziamenti,

⁸ Fonte: Commissione europea

- il miglioramento delle competenze e
- l'apertura del commercio per catene di approvvigionamento resilienti

Il quadro normativo è stato completato dalla legge sulle materie prime critiche (cfr. 1.8), per garantire un accesso sufficiente a materiali, come le terre rare, fondamentali per la produzione di tecnologie strategiche, dalla riforma della struttura del mercato dell'elettricità che consente ai consumatori di beneficiare dei costi più bassi delle energie rinnovabili e dalla revisione delle regole aiuti di Stato.

Il tema della circolarità in questo piano è affrontato sotto il punto di vista dell'istruzione. Per sviluppare le competenze necessarie per una transizione verde incentrata sulle persone, sono state istituite accademie industriali con programmi di aggiornamento e riqualificazione in settori strategici. Sul modello dell'Accademia dell'Alleanza europea per le batterie, è stata proposta l'istituzione di Accademie industriali Net-Zero per avviare programmi di aggiornamento e riqualificazione in settori strategici per la transizione verde, come le materie prime, l'idrogeno e le tecnologie solari, l'edilizia sostenibile, con particolare attenzione all'uso di materiali biobased, alla circolarità e alle tecnologie digitali.

1.5. Pronti per il 55%

Il pacchetto Pronti per il 55% o *Fit-for-55* è stato pubblicato nel luglio 2021. Il numero 55 indica la percentuale di riduzione delle emissioni entro al 2030 rispetto al 1990, che l'UE ambisce a raggiungere. A tal fine, l'UE ha rivisto la propria legislazione in materia di clima, energia e trasporti per adeguarla agli obiettivi del 2030 e del 2050 nel tentativo di rafforzare il suo ruolo di leadership nella lotta globale contro il cambiamento climatico.

Il Fit for 55 comprende le seguenti proposte legislative:

- una revisione del sistema di scambio di quote di emissioni dell'UE (EU ETS), compresa la sua estensione al trasporto marittimo;
- una revisione delle regole per le emissioni del trasporto aereo e l'istituzione di un sistema di scambio di emissioni separato per il trasporto stradale e gli edifici;
- una revisione del regolamento sulla condivisione degli impegni per quanto riguarda gli obiettivi di riduzione degli Stati membri nei settori che non rientrano nel sistema ETS dell'UE;

- una revisione del codice sull'inclusione delle emissioni e degli assorbimenti di gas a effetto serra derivanti dall'uso del suolo, dai cambiamenti di uso del suolo e dalla silvicoltura (LULUCF);
- una revisione della direttiva sulle energie rinnovabili (RED III);
- una revisione della direttiva sull'efficienza energetica (EED);
- una revisione della direttiva sul rendimento energetico degli edifici (EPBD);
- una revisione della direttiva sulla diffusione delle infrastrutture per i carburanti alternativi (AFIR);
- una modifica del regolamento che stabilisce gli standard di emissione di CO₂ per auto e furgoni;
- una revisione della direttiva sulla tassazione dell'energia;
- un meccanismo di adeguamento alle frontiere del carbonio;
- ReFuelEU Aviation per carburanti sostenibili per l'aviazione;
- FuelEU Maritime per uno spazio marittimo europeo verde;
- un Fondo sociale per il clima.

Il pacchetto segna una svolta per il settore energetico in quanto delinea molteplici interventi con obiettivi e azioni vincolanti da compiere nel breve termine ma non promuove nessuna azione specifica nell'ambito dell'economia circolare.

1.6. RepowerEU

Il RepowerEU è una proposta legislativa pubblicata a maggio 2022 dalla Commissione europea in risposta all'incremento dei prezzi dell'energia e alla crisi ucraina. La proposta ha portato alla modifica della direttiva sulla promozione delle energie rinnovabili per eliminare gradualmente le importazioni di combustibili fossili russi entro il 2027. Con il RepowerEU il processo autorizzativo dalle autorità competenti per i progetti di sviluppo di energia rinnovabile, riconosciuti come di interesse pubblico prevalente in specifiche aree designate dai singoli Stati, risulterà più rapido e semplificato, purché vengano applicate misure di mitigazione che limitino gli impatti ambientali, come l'uccisione di animali selvatici protetti. Oltre all'incremento di energia rinnovabile, il cui obiettivo al 2030 è passato dal 40% al 45% sul mix energetico di ogni singolo Paese, il piano promuove il potenziamento delle infrastrutture energetiche, l'approvvigionamento di gas, petrolio, idrogeno e GNL da Paesi diversi dalla Russia e l'aumento dell'efficienza energetica dal 9% al 13% entro il 2030.

L'energia solare beneficerà di nuovi requisiti che prevedono l'installazione di pannelli fotovoltaici sui tetti degli edifici:

- entro il 2026, per gli edifici pubblici e commerciali di nuova costruzione superiori a 250 metri quadrati
- entro il 2027, per gli edifici esistenti con gli stessi criteri del punto precedente
- entro il 2029, per tutti i nuovi edifici residenziali

L'auspicio della Commissione è quello di raddoppiare la percentuale di energia europea proveniente dal solare entro il 2030 e di aumentare la capacità di idrogeno fino a 20 milioni di tonnellate, di cui 10 milioni da produrre a livello nazionale e 10 da importare. A questo scopo, verranno creati tre corridoi di importazione dell'idrogeno attraverso il Mediterraneo, il Mare del Nord e l'Ucraina. Per quanto riguarda le importazioni di gas, verrà promosso un meccanismo volontario di acquisto congiunto, responsabile della negoziazione e della contrattazione per conto degli Stati membri aderenti. Per consentire alle infrastrutture energetiche europee di adeguarsi alla ricezione e distribuzione di energia, saranno inoltre investiti 10 miliardi di euro in infrastrutture per il gas e il GNL, circa 2 miliardi di euro in infrastrutture per il petrolio e 29 miliardi di euro per le reti elettriche.

Il piano non comprende esplicitamente misure volte alla promozione di un modello di economia circolare, tuttavia, la direzione e gli obiettivi prefissati volti ad uno sviluppo delle energie rinnovabili contribuiscono a creare un contesto normativo nel quale l'economia circolare si inserisce come fattore abilitante della transizione energetica.

1.7. Industria a zero emissioni

Il Regolamento (UE) 2024/1735 che istituisce un quadro di misure per rafforzare l'ecosistema europeo di produzione delle tecnologie a zero emissioni nette, o *Net-Zero Industry Act* (da qui l'acronimo NZIA) è applicabile a decorrere da giugno 2024, e pone le basi per la realizzazione di progetti con tecnologie net-zero in Europa e per attrarre investimenti che raggiungano una capacità produttiva strategica complessiva di almeno il 40% del fabbisogno dell'Unione entro il 2030. La legge è una chiara risposta all'IRA statunitense e definisce obiettivi non vincolanti per cinque tecnologie da realizzarsi entro il 2030:

- **Solare:** almeno 30 GW di capacità produttiva fotovoltaica operativa lungo l'intera catena del valore del fotovoltaico, in linea con gli obiettivi fissati dalla European Solar Photovoltaic Industry Alliance
- **Eolico:** 36 GW
- **Pompe di calore:** 31 GW
- **Batterie:** 550 GWh (quasi il 90% della domanda annuale di batterie dell'UE)
- **Elettrolizzatori:** 100 GW di idrogeno

Anche il biogas, il biometano, la CCS e le tecnologie di rete sono considerate tecnologie strategiche a zero emissioni. Queste ultime al momento fanno parte di un elenco che la Commissione aggiornerà regolarmente e che in futuro potrà comprendere la fusione, i piccoli reattori modulari, le tecnologie di cattura, utilizzo e stoccaggio del carbonio e le tecnologie di efficienza energetica relative ai sistemi energetici.

Il Regolamento di esecuzione del *Net Zero Industry Act*, entrato in vigore ad aprile 2025, introduce criteri innovativi per le aste dedicate alle tecnologie a zero emissioni nette, promuovendo la circolarità nel settore energetico. Tra le disposizioni più rilevanti, il regolamento consente agli Stati membri di includere criteri legati alla riciclabilità, alla facilità di riparazione e manutenzione, e all'uso di materiali riciclati, comprese le materie prime critiche, facendo riferimento a uno o più parametri di prodotto pertinenti stabiliti nell'allegato I del Regolamento (UE) 2024/1781 (cfr. 1.9). Questi criteri, che possono essere utilizzati sia come prerequisiti sia come criteri di aggiudicazione nelle aste, mirano a incentivare la progettazione di tecnologie energetiche più sostenibili lungo tutto il loro ciclo di vita.

La circolarità viene ulteriormente rafforzata attraverso l'obbligo di misurare l'impronta di carbonio delle tecnologie partecipanti, utilizzando metodologie armonizzate basate sull'analisi del ciclo di vita (LCA). Questo approccio garantisce che i progetti selezionati non solo rispettino i requisiti ambientali minimi, ma contribuiscano attivamente alla riduzione delle emissioni e al riutilizzo delle risorse. Inoltre, il regolamento sottolinea l'importanza dell'uso di materiali riciclati nei prodotti energetici e incoraggia la rigenerazione e il riutilizzo dei componenti tecnologici.

1.8. Materie prime critiche

Le materie prime critiche (*Critical Raw Materials*, CRM) sono elementi essenziali per molte tecnologie chiave necessarie alla transizione energetica e digitale, tra cui pannelli

fotovoltaici, turbine eoliche, batterie ed elettrolizzatori. La loro importanza deriva non solo dalla loro scarsità e difficoltà di approvvigionamento, ma anche dal ruolo strategico che rivestono nel raggiungimento degli obiettivi di sviluppo sostenibile (*Sustainable Development Goals*, SDG). Le CRM sono fondamentali per promuovere la decarbonizzazione, l'efficienza delle risorse e l'innovazione tecnologica.

Dal punto di vista socio-economico, le CRM sono cruciali per garantire la competitività industriale dell'Unione Europea. La dipendenza dell'UE da paesi terzi per l'approvvigionamento di queste risorse rappresenta una vulnerabilità strategica che può compromettere la resilienza economica e la sicurezza delle catene di approvvigionamento. Per esempio, il silicio metallico, essenziale per i pannelli fotovoltaici, è largamente importato dalla Cina, che domina il mercato globale. Questa dipendenza non solo espone l'UE a fluttuazioni dei prezzi e instabilità geopolitiche, ma limita anche la capacità di sviluppare un'industria fotovoltaica competitiva a livello globale. Dal punto di vista ambientale, le CRM sono al centro del dibattito sulla sostenibilità. L'estrazione e la lavorazione di queste risorse comportano significativi impatti ambientali, tra cui deforestazione, perdita di biodiversità ed emissioni di gas serra. Tuttavia, un approccio basato sull'economia circolare può mitigare questi effetti attraverso il riciclo e il riutilizzo dei materiali critici. Ad esempio, il recupero di silicio, argento e indio dai pannelli fotovoltaici a fine vita non solo riduce la domanda di materie prime vergini, ma contribuisce anche a ridurre i rifiuti elettronici.

La rilevanza delle CRM per gli SDG è evidente nella loro capacità di abilitare tecnologie pulite che supportano obiettivi come l'accesso universale all'energia pulita (SDG 7), l'industrializzazione sostenibile (SDG 9) e la lotta al cambiamento climatico (SDG 13). Tuttavia, il loro utilizzo deve essere bilanciato con pratiche che promuovano giustizia sociale ed equità economica. L'estrazione delle CRM in molte regioni del mondo è spesso associata a condizioni lavorative precarie e impatti negativi sulle comunità locali. Pertanto, una gestione responsabile delle CRM è essenziale per garantire che il loro utilizzo contribuisca realmente a uno sviluppo sostenibile.

In questo contesto, politiche come il Critical Raw Materials Act dell'UE rappresentano un passo importante verso una maggiore autonomia strategica e una gestione più sostenibile delle risorse. Questa iniziativa vuole diversificare le fonti di approvvigionamento, promuovere il riciclo interno e ridurre la dipendenza da paesi terzi.

Inoltre, l'integrazione dei principi dell'economia circolare nella gestione delle CRM può trasformare queste sfide in opportunità economiche e ambientali.

Il Regolamento (UE) 2024/1252 che istituisce un quadro atto a garantire un approvvigionamento sicuro e sostenibile di materie prime critiche o Critical Raw Materials Act o CRMA, in vigore da maggio 2024, supporterà l'UE nello sviluppo dell'industria coinvolta nell'estrazione e nella lavorazione di minerali critici per esigenze legate alla transizione energetica, alla difesa e alle lacune di approvvigionamento. Il CRMA identifica un elenco di materie prime strategiche, che rappresentano un sottoinsieme delle materie prime critiche, fondamentali per la produzione di tecnologie funzionali al raggiungimento degli obiettivi verdi e digitali europei e alle lacune di approvvigionamento. La lista include le seguenti materie prime strategiche per le quali ho individuato delle tecnologie energetiche di cui possono essere composte.

Materia prima	Tecnologia energetica
Bismuto	Utilizzato in alcune leghe per applicazioni elettroniche e nei sistemi di raffreddamento avanzati.
Boro (grado metallurgico)	Pannelli fotovoltaici (vetro ad alta resistenza termica), magneti permanenti per turbine eoliche.
Cobalto	Batterie per veicoli elettrici, sistemi di accumulo energetico stazionario.
Rame	Smart grid, cavi per turbine eoliche, fotovoltaico, colonnine di ricarica per la mobilità elettrica.
Gallio	Pannelli fotovoltaici ad alta efficienza (tecnologia CIGS), LED per illuminazione efficiente.
Germanio	Pannelli fotovoltaici ad alta efficienza, fibre ottiche per smart grid.
Litio (grado batteria)	Batterie per veicoli elettrici, sistemi di accumulo energetico stazionario.
Magnesio metallico	Leghe leggere per turbine eoliche e componenti strutturali nei veicoli elettrici.

Manganese (grado batteria)	Batterie al litio-manganese per veicoli elettrici e sistemi di accumulo energetico.
Grafite naturale (grado batteria)	Anodi delle batterie al litio per veicoli elettrici e sistemi di accumulo energetico.
Nichel (grado batteria)	Batterie al litio-nichel-cobalto-manganese (NCM) per veicoli elettrici e accumulo energetico.
Metalli del gruppo del platino (PGM)	Celle a combustibile per veicoli a idrogeno, elettrolizzatori per produzione di idrogeno verde.
Elementi delle terre rare per magneti (Nd, Pr, ecc.)	Magneti permanenti nelle turbine eoliche, motori dei veicoli elettrici.
Silicio metallico	Pannelli fotovoltaici, semiconduttori per elettronica di potenza nelle smart grid.
Titanio metallico	Componenti leggeri e resistenti in turbine eoliche e infrastrutture offshore.
Tungsteno	Elettrodi nelle tecnologie di saldatura avanzata utilizzate nella produzione di turbine eoliche.

Tabella 2. Materie prime strategiche.

La lista invece delle materie prime critiche, per le quali anche in questo caso è individuata la loro presenza in tecnologie energetiche, è la seguente:

Materia prima	Tecnologia energetica
Antimonio	Componenti elettronici nei sistemi di gestione dell'energia nelle smart grid.
Arsenico	Semiconduttori avanzati utilizzati nel fotovoltaico ad alta efficienza.
Bauxite (alluminio)	Strutture leggere per turbine eoliche, pannelli solari, veicoli elettrici.
Barite	Additivi nei fluidi perforanti utilizzati nell'estrazione geotermica.

Berillio	Componenti elettronici ad alta resistenza termica nei sistemi energetici avanzati.
Bismuto	Vedi sopra (<i>materie prime strategiche</i>).
Boro	Vedi sopra (<i>materie prime strategiche</i>).
Cobalto	Vedi sopra (<i>materie prime strategiche</i>).
Carbone da coke	Produzione di acciaio per infrastrutture energetiche come turbine eoliche.
Rame	Vedi sopra (<i>materie prime strategiche</i>).
Feldspato	Produzione di vetro per pannelli solari fotovoltaici.
Fluorite	Materiali fluorurati utilizzati nelle batterie al litio e nei refrigeranti efficienti energeticamente.
Gallio	Vedi sopra (<i>materie prime strategiche</i>).
Germanio	Vedi sopra (<i>materie prime strategiche</i>).
Afnio	Componenti nei reattori nucleari avanzati e semiconduttori energeticamente efficienti.
Elio	Raffreddamento nei sistemi criogenici utilizzati in alcune tecnologie energetiche avanzate.
Elementi delle terre rare pesanti (Dy, Tb)	Magneti permanenti nelle turbine eoliche offshore e motori dei veicoli elettrici ad alte prestazioni.
Elementi delle terre rare leggere (Nd, Pr)	Vedi sopra (<i>terre rare per magneti</i>).
Litio	Vedi sopra (<i>materie prime strategiche</i>).
Magnesio	Vedi sopra (<i>materie prime strategiche</i>).
Manganese	Vedi sopra (<i>materie prime strategiche</i>).
Grafite naturale	Vedi sopra (<i>materie prime strategiche</i>).
Nichel (grado batteria)	Vedi sopra (<i>materie prime strategiche</i>).

Niobio	Superconduttori utilizzati in applicazioni energetiche avanzate come i reattori nucleari.
Fosforite/Fosforo	Materiale essenziale nei fertilizzanti usati nella produzione di biomassa energetica sostenibile.
PGM (Platinoidi)	Vedi sopra (<i>metalli del gruppo del platino</i>).
Scandio	Leghe leggere per applicazioni aerospaziali ed energetiche avanzate come le turbine eoliche offshore.
Silicio metallico	Vedi sopra (<i>materie prime strategiche</i>).
Stronzio	Materiale usato in alcune celle fotovoltaiche specializzate.
Tantalo	Condensatori elettronici utilizzati nei sistemi di gestione dell'energia delle smart grid.
Titanio metallico	Vedi sopra (<i>materie prime strategiche</i>).
Tungsteno	Vedi sopra (<i>materie prime strategiche</i>).

Tabella 3. Materie prime critiche.

Sono stabiliti dei parametri di riferimento per le capacità nazionali lungo la catena di approvvigionamento delle materie prime con lo scopo ulteriore di diversificare la provenienza attuale dell'approvvigionamento europeo:

- Almeno il 10% del consumo annuale di CRM deve essere estratto in UE;
- Almeno il 40% del consumo annuale di CRM deve essere lavorato in UE;
- Almeno il 15% del consumo annuale di CRM deve essere riciclato in UE;
- Non più del 65% del consumo annuale dell'UE di ciascuna materia prima in qualsiasi fase di lavorazione deve provenire da un singolo Paese terzo.

Il CRMA riduce gli oneri amministrativi e semplifica le procedure di autorizzazione per i progetti che la Commissione ritiene strategici e che beneficeranno di un migliore accesso ai finanziamenti e di tempi di autorizzazione relativamente brevi. Concretamente si tratta di due anni per ottenere i permessi di estrazione e un anno per i permessi di lavorazione e riciclaggio. Particolare importanza è data alla costruzione di catene di approvvigionamento resilienti, dall'estrazione alla raffinazione, dalla lavorazione al

riciclaggio e si costituiranno riserve strategiche laddove vi siano rischi rilevanti nell'approvvigionamento delle materie. Sarà inoltre previsto un monitoraggio delle catene di approvvigionamento di materie prime critiche ed un coordinamento delle scorte tra Stati membri. Per quanto riguarda la sostenibilità e la circolarità, la proposta di legge prevede che gli Stati membri adottino misure nazionali per migliorare la raccolta dei rifiuti ricchi di materie prime critiche e garantirne il riciclo in materie prime critiche secondarie. È in mano ai singoli Stati e agli operatori privati lo studio del potenziale di recupero delle materie prime critiche dai rifiuti estrattivi delle attività minerarie. Più in particolare, i prodotti contenenti magneti permanenti dovranno soddisfare i requisiti di circolarità e fornire informazioni sulla riciclabilità e sul contenuto riciclato. In generale, la proposta di legge pone grande attenzione sui magneti permanenti e sulle terre rare tralasciando altri componenti critici che meriterebbero la stessa enfasi. Tuttavia, è fondamentale per lo sviluppo della catena del valore del fotovoltaico che sia stato inserito il silicio metallico tra le materie prime strategiche e anche tra quelle critiche, il cui elenco è soggetto a revisione con cadenza quadriennale. Difatti, il silicio è fondamentale per il fotovoltaico il cui attuale modello di produzione e utilizzo deve essere ripensato per massimizzare i benefici ambientali (Ellen McArthur Foundation, 2024).

Infine, l'articolo 25 è dedicato alle misure sulle circolarità che promuovono il riutilizzo di prodotti e componenti di scarto contenenti quantità rilevanti di CRM e l'incremento dell'utilizzo di CRM secondari nella produzione.

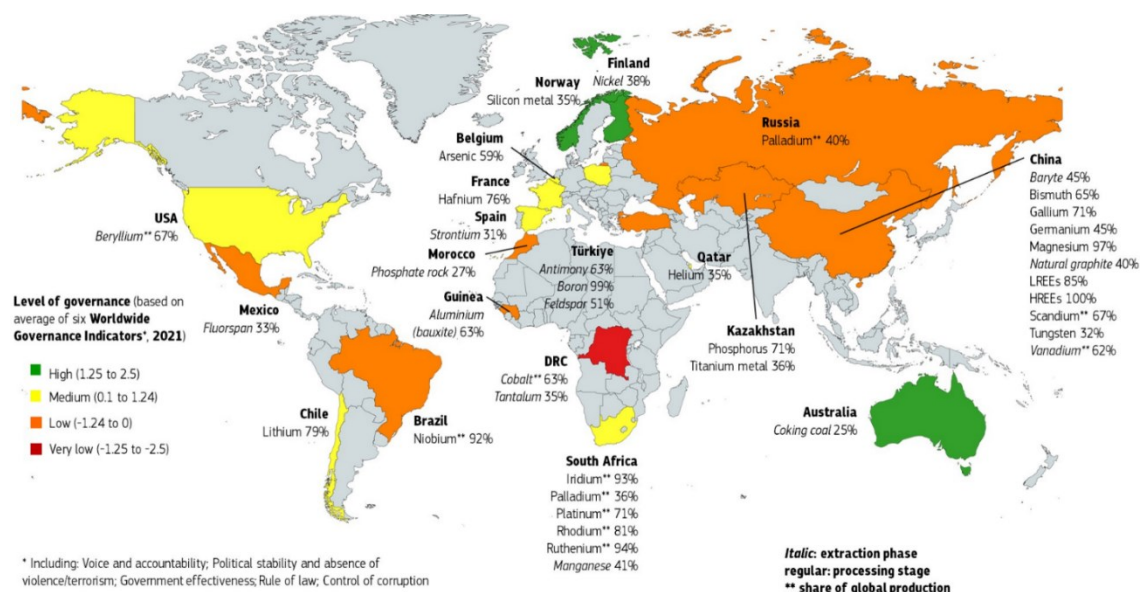


Figura 4⁹. Principali fornitori UE di CRM (2023) e loro livello di governance.

Il CRMA è stato preceduto dal Chips Act (COM(2022) 45 final) e dal Regolamento per le batterie (COM(2020) 798 final), nel tentativo di ridurre la dipendenza del blocco europeo dalla Cina che ad oggi tratta il 90% delle terre rare e il 60% del litio detenendo di fatto il controllo di queste risorse. Simultaneamente, l'UE intende incrementare la sua partecipazione ai Progetti importanti di interesse comune europeo (IPCEI) e creare un nuovo Fondo europeo per la sovranità. Tramite i progetti IPCEI, regolamentati dalla normativa Aiuti di Stato in materia di concorrenza, le aziende ricevono somme importanti di sostegno pubblico per finanziare innovazioni rivoluzionarie laddove si presentano rischi significativi che impedirebbero la realizzazione di questi progetti. Come era già avvenuto nel caso delle batterie per cui era stata costituita un'Alleanza (European Battery Alliance o EBA) anche per le materie prime è nata a livello europeo un'Alleanza (*European Raw Materials Alliance* o "ERMA"), aperta a chiunque voglia aderire per costruire la resilienza e l'autonomia strategica delle catene del valore delle terre rare e dei magneti e di altre materie prime in Europa incentivando un modello economico circolare.

La catena del valore del fotovoltaico è certamente una delle più critiche. Sebbene la strategia solare dell'UE (COM(2022) 221 final) miri ad una diffusione massiccia dell'energia solare, l'Europa continua a dipendere dalle importazioni dalla Cina di polisilicio estratto con un'impronta di carbonio molto più elevata rispetto al suo equivalente in Europa. L'industria europea si trova inoltre a competere in un mercato distorto in cui la Cina sovvenziona le sue aziende nel settore del fotovoltaico. Tra il 2009 e il 2012 il dumping cinese ha avuto un effetto devastante sui produttori solari europei. In questo lasso di tempo, circa 40 produttori in UE hanno dichiarato insolvenza, circa 6 produttori hanno interrotto la produzione, circa 4 produttori sono stati rilevati da investitori cinesi e circa 2 produttori in UE hanno abbandonato l'attività solare (ITC TradeMap; European Commission, 2013). La recisione del rapporto di dipendenza per le importazioni dalla Cina e la ricreazione dell'industria solare necessitano di una visione strategica. Tra le soluzioni per garantire un "*level playing field*" forte e sostenibile figurano l'utilizzo di schemi di certificazione delle prestazioni ambientali e sociali delle attività minerarie che potrebbero essere consolidate ai fini di rendere le aziende europee competitive a livello internazionale e di attrarre investimenti privati. Si auspica inoltre, considerato l'interesse dell'UE ad incrementare la sua partecipazione a futuri IPCEI,

⁹ Fonte: Commissione europea.

l'inclusione della filiera fotovoltaica in un IPCEI, dalle materie prime e lavorate fino ai prodotti finali per gli impianti solari, promuovendo lo sviluppo di soluzioni innovative e indirizzando le risorse finanziarie per lo sviluppo delle operazioni.

1.9. Direttiva sui Rifiuti di Apparecchiature Elettriche ed Elettroniche (RAEE)

Il CEAP 2020 ha consentito l'adozione di una serie di Regolamenti e Direttive fondamentali per l'implementazione diffusa di pratiche circolari, come ad esempio il Regolamento (UE) 2024/1781 che stabilisce il quadro per la definizione dei requisiti di progettazione ecocompatibile per prodotti sostenibili, direttamente applicabile a decorrere da luglio 2024 e fondamentale per il pilastro dell'estensione della vita utile. Per il fotovoltaico, saranno aggiornati i criteri di ecodesign per garantire durabilità e riparabilità (es. moduli modulari, disponibilità di pezzi di ricambio), la riciclabilità avanzata dei materiali critici (silicio, argento, indio) e il contenuto minimo di materiali riciclati nella produzione. È stato introdotto il passaporto digitale del prodotto per tracciare l'impronta ambientale e facilitare il recupero a fine vita e, per la mobilità elettrica, sono stati inseriti gli *EV charger* (infrastrutture di ricarica cfr. 2.6) tra i prodotti prioritari (adozione prevista entro il 2028) con requisiti che includono l'efficienza energetica (riduzione dei consumi in standby), l'interoperabilità e compatibilità con diverse tecnologie di accumulo e l'utilizzo di materiali riciclati nella produzione delle stazioni di ricarica. Inoltre, i sistemi di accumulo (es. batterie) rientrano negli "equipment elettronici" soggetti a requisiti orizzontali su riciclabilità e contenuto riciclato (previsti per il 2029) e obblighi di tracciabilità dei materiali critici (litio, cobalto, nichel) attraverso il passaporto digitale.

Sempre su questo pilastro, lo stesso mese, ma con obbligo di recepimento nei diritti nazionali degli Stati membri entro il 31 luglio 2026, è entrata in vigore la Direttiva 2024/1799 recante norme comuni che promuovono la riparazione dei beni, ad esclusione di quelli legati alla generazione, trasmissione, distribuzione e vendita di energia elettrica; sono dunque escluse le tecnologie trattate nel secondo capitolo, ad eccezione delle batterie per mezzi di trasporto leggeri.

In questo elaborato verrà trattata in particolare la Direttiva 2012/19/UE sui Rifiuti di Apparecchiature Elettriche ed Elettroniche (RAEE oppure WEEE in lingua inglese) fondamentale per diverse ragioni; sia perché i RAEE contengono quantità rilevanti di materie prime critiche e il loro riciclo costituisce un primo fondamentale tassello per il raggiungimento del target europeo e per diminuire la dipendenza strategica da Paesi terzi,

sia perché affronta il problema dell'aumento dei rifiuti elettronici, tra cui anche i pannelli fotovoltaici, tecnologia energetica oggetto del progetto PHOTORAMA e protagonista del terzo capitolo di questa tesi.

In generale, la Direttiva 2012/19/UE classifica i RAEE in diverse categorie, obbliga gli Stati membri a implementare misure che incentivano la progettazione ecocompatibile e a garantire che i RAEE non siano smaltiti come rifiuti urbani misti e che siano raccolti separatamente per il trattamento adeguato. Stabilisce inoltre obiettivi annuali minimi di raccolta: dal 2019, il tasso minimo è pari al 65% del peso medio delle AEE immesse sul mercato nei tre anni precedenti o all'85% del peso totale dei RAEE generati.

Un elemento chiave della direttiva è l'introduzione della responsabilità estesa del produttore (EPR), che obbliga i produttori a finanziare la raccolta, il trattamento e lo smaltimento ecocompatibile dei RAEE immessi sul mercato dopo il 13 agosto 2005. Inoltre, i produttori devono fornire informazioni ai consumatori su come restituire correttamente i RAEE e garantire che gli impianti di trattamento siano autorizzati.

Il dibattito su questa Direttiva si è riaperto recentemente a causa di una sentenza della Corte di Giustizia dell'Unione europea che si è espressa nella causa C-181/20, VYSOČINA WIND a.s. v. Česká republika – Ministerstvo životního prostředí, invalidando l'articolo 13, paragrafo 1, della direttiva relativa ai RAEE nella parte in cui esso impone ai produttori di finanziare i costi relativi alla gestione dei rifiuti originati da pannelli fotovoltaici immessi sul mercato tra il 13 agosto 2005 e il 13 agosto 2012, dunque retroattivamente rispetto all'entrata in vigore della Direttiva. Di conseguenza, il Consiglio dell'Unione europea ha confermato che i produttori di moduli solari saranno responsabili dello smaltimento e del riciclo dei moduli fotovoltaici nell'UE, formalizzando questa decisione attraverso un emendamento alla Direttiva RAEE secondo cui i costi relativi al riciclo e allo smaltimento dei moduli immessi sul mercato dopo il 13 agosto 2012 saranno a carico dei produttori. Il Consiglio ha inoltre introdotto una clausola di revisione che obbliga la Commissione europea a valutare la necessità di ulteriori modifiche alla Direttiva entro il 2026 e conferma che la responsabilità estesa del produttore si applica ai prodotti immessi sul mercato dal 15 agosto 2018. Gli emendamenti, presenti nella Direttiva di modifica (UE) 2024/884, sono entrati in vigore l'8 aprile 2024 e devono essere recepiti dagli Stati membri entro il 9 ottobre 2025.

1.10. Patto per l'industria pulita

Nel novero delle numerose politiche europee sull'economia circolare, cito infine il *Clean Industrial Deal* o Patto per l'industria pulita, pubblicato il 26 febbraio 2025, che mira a promuovere la competitività industriale e la transizione verso tecnologie pulite attraverso una serie di misure strategiche e introduce controlli sulle esportazioni dei rifiuti contenenti materie prime critiche per incentivare il loro riutilizzo e potenziare le capacità di riciclo all'interno dell'UE. I controlli che prevede saranno reciproci e applicati solo verso quei paesi che hanno imposto restrizioni simili sulle esportazioni di minerali grezzi. La strategia propone inoltre un obiettivo ambizioso, ovvero almeno il 25% del consumo annuale di materie prime critiche dell'UE dovrà provenire dal riciclo domestico entro il 2030. Per raggiungere questo traguardo, il *Circular Economy Act* o Regolamento sull'economia circolare proporrà misure che limitano l'esportazione di rifiuti contenenti materie prime critiche e incentivi per deviare i rifiuti dalle discariche verso il riutilizzo e il riciclo, anche attraverso una raccolta differenziata più efficace. L'idea di questa nuova normativa sarà di rendere l'UE leader nella circolarità entro il 2030, poiché nonostante gli sforzi messi in atto sinora, l'economia dell'UE è circolare solo per il 12%. Inoltre, è sotto esame l'introduzione di tasse sull'esportazione, i cui proventi potrebbero essere destinati a finanziare investimenti nelle capacità di riciclo. In questa fase di lavoro sulla delineazione della nuova normativa, diverse associazioni, tra cui Zero Waste Europe e FEAD, stanno interloquendo con la Commissaria Roswell responsabile del dossier, con lo scopo di influenzare il processo legislativo. In particolare, FEAD, l'Associazione europea per la gestione dei rifiuti, ha presentato, a fine aprile 2025, alla Commissione europea, dieci raccomandazioni politiche, esortandola ad andare oltre le materie prime critiche e a porre le basi per un'economia europea realmente circolare grazie ad un approccio che rafforzi l'autonomia strategica, sostenga gli ecosistemi industriali nazionali e crei posti di lavoro a livello locale. Le 10 raccomandazioni avrebbero lo scopo di affrontare le persistenti carenze del mercato, a rafforzare la competitività dei materiali riciclati, a garantire mercati equi e trasparenti e a promuovere un'attuazione e un'applicazione efficaci in tutta l'UE. Si tratterebbe di (1) aumentare la domanda di materiali riciclati attraverso obiettivi vincolanti di contenuto riciclato, un tasso di utilizzo del materiale circolare (CMUR) del 25% entro il 2030, incentivi economici (sgravi IVA, crediti d'imposta) e appalti pubblici verdi obbligatori; (2) creare un mercato competitivo per i materiali riciclati attraverso finanziamenti mirati, riforme fiscali e regole sugli aiuti di Stato; (3) dotare criteri di End-of-Waste a livello europeo per consentire un vero mercato unico delle materie prime secondarie; (4) garantire un commercio e una

concorrenza equi applicando clausole speculari alle importazioni, migliorando la tracciabilità ed evitando distorsioni commerciali; (5) semplificare le autorizzazioni e le spedizioni di rifiuti con processi armonizzati, digitalizzati e accelerati in tutta l'UE; (6) riformare i sistemi EPR per affrontare i fallimenti del mercato, promuovere la progettazione ecologica e sostenere la concorrenza leale; (7) sostenere il Waste-to-Energy (WtE) per i rifiuti non riciclabili e investire nella modernizzazione delle infrastrutture; (8) gestire le sostanze preoccupanti attraverso restrizioni a monte, decontaminazione e finanziamenti basati sul principio “chi inquina paga”; (9) rafforzare l'applicazione delle norme per garantire condizioni di parità e un'applicazione coerente delle regole in tutti gli Stati membri; (10) ridurre i rischi di incendio delle batterie al litio attraverso un fondo per gli incendi delle batterie, sistemi di deposito e restituzione e valutazioni del rischio a livello europeo (FEAD, 2025).

Un altro elemento chiave della strategia del Patto per l'industria pulita è la prima lista di progetti strategici nell'ambito del CRMA, pubblicata il 25 marzo 2025 e comprensiva di 47 progetti, di cui quattro italiani. Questi progetti mirano a diversificare le forniture lungo l'intera catena del valore e a facilitare l'accesso ai finanziamenti pubblici e privati. Le priorità includono l'estrazione, la lavorazione e il riciclo di materiali essenziali come litio, nichel, cobalto e grafite per batterie, nonché terre rare per magneti permanenti. La strategia prevede anche la creazione di un *EU Critical Raw Materials Centre*, che coordinerà l'acquisto congiunto di materie prime tramite la piattaforma *AggregateEU*, già utilizzata per il gas naturale. Il centro avrà anche il compito di monitorare le catene di approvvigionamento, gestire scorte strategiche e progettare strumenti finanziari per investire nelle forniture upstream sia nell'UE che in paesi terzi.

1.11. Economia circolare nella concorrenza

La politica sulla concorrenza è una delle politiche europee con maggiore impatto per le imprese e i consumatori. La DG Concorrenza (o DG COMP), che ne è responsabile, è considerata il braccio armato della Commissione in quanto in grado di sanzionare le imprese che adottano comportamenti anticoncorrenziali e abusano della propria posizione dominante. Vieta fusioni o acquisizioni e proibisce gli aiuti di Stato a favore di determinate imprese che distorcono la concorrenza. La DG COMP garantisce un corretto funzionamento del mercato interno con l'obiettivo di avere prezzi più bassi, migliore qualità, più scelta, più innovazione e imprese più competitive sui mercati mondiali. La politica sulla concorrenza ha subito un processo di revisione in concomitanza con la

direzione politica delle proposte legislative discusse nei precedenti paragrafi. Alcuni regolamenti sono stati già perfezionati, altri sono in fase di consultazione pubblica. Tra quelli già revisionati, alcuni hanno portato all'inserimento nel diritto della concorrenza di tematiche legate all'economia circolare. Prima fra tutte la disciplina aiuti di Stato, di notevole importanza in quanto guiderà il supporto agli investimenti per la decarbonizzazione nei prossimi anni. Anche la normativa che disciplina gli accordi di cooperazione orizzontale tra concorrenti è stata emendata ed è entrata in vigore nel 2023 con l'aggiunta di un nuovo capitolo che consente ad imprese concorrenti di stringere accordi, in casi particolari, su tematiche legate alla sostenibilità.

1.11.1. Aiuti di Stato

Nell'ambito della disciplina aiuti di Stato, il Piano d'azione 2020 cita espressamente la necessità di far sì che gli obiettivi connessi all'economia circolare siano rispecchiati nella nuova disciplina Clima, Energia, Ambiente, (*Climate, Energy and Environmental Aid Guidelines* o CEEAG), adottata dalla Commissione europea a dicembre 2021 ed entrata formalmente in vigore a partire dal 27 gennaio 2022 (Comunicazione 2022/C 80/01).

Le CEEAG disciplinano le condizioni alle quali le misure di sostegno per il clima, la protezione dell'ambiente e l'energia fornite dagli Stati membri a favore delle imprese, devono considerarsi compatibili con il mercato interno ai sensi dell'articolo 107, paragrafo 3, lettera c, del Trattato sul funzionamento dell'Unione europea (TFUE).

Oltre a prevedere una maggiore flessibilità delle regole di compatibilità, le nuove linee guida prevedono un ampliamento del campo di applicazione a nuovi settori, tra cui la mobilità pulita, l'efficienza energetica negli edifici e la circolarità e a tutte le tecnologie capaci di realizzare gli obiettivi prefissati dal Green Deal e di ridurre le emissioni da gas serra, tra cui tutti i tipi di stoccaggio. All'ampliamento del campo di applicazione delle linee guida sono affiancate misure di salvaguardia per garantire che gli aiuti siano effettivamente indirizzati laddove necessari e a quanto necessario per migliorare la tutela ambientale e non distorcano la concorrenza o l'integrità del mercato interno. Ad esempio, gli Stati membri sono tenuti a consultarsi prima di adottare un regime di sostegno a favore della riduzione delle emissioni di gas serra, della sicurezza dell'approvvigionamento e delle infrastrutture di ricarica. Lo scopo della revisione è anche quello di garantire una coerenza con la legislazione UE in materia di ambiente ed energia, facilitando la graduale eliminazione dei sussidi ai combustibili fossili, in particolare a quelli più inquinanti. La nuova normativa consente inoltre di erogare aiuti che coprono fino al 100% del deficit di

finanziamento e di introdurre nuovi strumenti di aiuto, come ad esempio i contratti per differenza sul prezzo del carbonio (*Carbon Contracts for Difference*), ovvero contratti a lungo termine stipulati, a seguito di specifiche aste, tra una controparte pubblica e quanti investono in grandi progetti commerciali per produrre beni e materiali climaticamente neutri o a bassissimo tenore di carbonio. Inoltre, è prevista la possibilità di eliminare l'obbligo di notifica individuale dei grandi progetti verdi nell'ambito dei regimi di aiuto approvati. Le misure che comportano nuovi investimenti nel gas naturale saranno coperte dalle linee guida solo nella misura in cui si dimostri che gli investimenti sono compatibili con gli obiettivi climatici dell'Unione europea per il 2030 e il 2050. Sono inoltre previsti gli aiuti per l'eliminazione graduale del carbone, ossia per la chiusura anticipata delle centrali e per i costi eccezionali per la mitigazione delle conseguenze sociali e regionali del processo di chiusura.

In particolare, all'economia circolare è dedicato un nuovo intero capitolo, il 4.4. "*Aiuti per l'uso efficiente delle risorse e per sostenere la transizione verso un'economia circolare*". Con la nuova disciplina sono esenti da notifica gli aiuti concessi dagli Stati alle imprese per tipologie di investimento volte a migliorare l'uso efficiente delle risorse attraverso:

- i) la riduzione netta delle risorse consumate per ottenere la stessa quantità di produzione;
- ii) la sostituzione delle materie prime primarie con materie prime secondarie (riutilizzate o riciclate) o recuperate; o
- iii) la sostituzione delle materie prime di origine fossile con materie prime di origine biologica.

Sono concessi inoltre gli aiuti per investimenti:

- i) per la riduzione, la prevenzione, la preparazione per il riutilizzo, il recupero di materiale, la decontaminazione e il riciclo dei rifiuti prodotti dal beneficiario;
- ii) per la preparazione per il riutilizzo, il recupero di materiale, la decontaminazione e il riciclo dei rifiuti prodotti da terzi e che sarebbero altrimenti smaltiti o trattati secondo una modalità di trattamento più bassa nell'ordine di priorità della gerarchia dei rifiuti o meno efficiente sotto il profilo delle risorse o che condurrebbe a un riciclo di minore qualità;
- iii) relativi alla raccolta differenziata e alla cernita dei rifiuti o di altri prodotti, materiali o sostanze, in vista della preparazione per il riutilizzo o il riciclo.

Possono essere concessi inoltre, a determinate condizioni, aiuti a copertura dei costi operativi per la raccolta differenziata e la cernita dei rifiuti in relazione a flussi o tipi di rifiuti specifici. Gli aiuti non dovranno incentivare la produzione di rifiuti o un maggiore uso di risorse e, secondo il principio di “chi inquina paga”, non devono esonerare le imprese che producono rifiuti dai costi o dagli obblighi relativi al trattamento di tali rifiuti, che dovrebbero essere a loro carico a norma del diritto dell’Unione o nazionale. Inoltre, la circolarità appare per la prima volta anche nell’ultimo emendamento al *General Block Exemption Regulation* o GBER, ossia il Regolamento di esenzione per categoria (Regolamento (UE) N. 651/2014) che esenta dall’obbligo di notifica preventiva a Bruxelles (Articoli 107(3) e 108(3) TFUE) alcuni casi di aiuti concessi agli operatori privati dagli Stati membri che soddisfano determinate condizioni. Nella definizione di tutela ambientale rientrano infatti i modelli di economia circolare per ridurre l’uso di materiali primari. Nello specifico viene dedicato un intero articolo, il 47, agli aiuti agli investimenti per l’efficienza delle risorse e per sostenere la transizione verso un’economia circolare. La più recente novità nella disciplina aiuti è infine il *Clean Industrial State Aid Framework (CISAF)*, che integra e amplia il quadro degli aiuti di Stato per sostenere gli obiettivi del *Clean Industrial Deal* (cfr. 1.10). Questo nuovo quadro normativo, attualmente in fase di consultazione pubblica e previsto per l’adozione nel giugno 2025, introduce importanti novità che potrebbero influenzare il contesto dell’economia circolare e della concorrenza. Il CISAF mira a sostenere gli investimenti in tecnologie pulite, decarbonizzazione industriale e capacità produttiva per le tecnologie verdi. Tra gli obiettivi chiave vi sono l’accelerazione della diffusione delle energie rinnovabili, l’agevolazione della decarbonizzazione industriale, garantire una capacità produttiva sufficiente per tecnologie pulite come pannelli solari e turbine eoliche e ridurre i rischi associati agli investimenti privati in progetti di energia pulita.

Sebbene il CISAF si concentri principalmente su energie rinnovabili e decarbonizzazione, esso include misure per promuovere la circolarità attraverso il sostegno alla produzione di tecnologie pulite. Ciò potrebbe includere aiuti per l’utilizzo di materiali riciclati nella produzione di pannelli fotovoltaici o turbine eoliche. Il CISAF sostituirà il *Temporary Crisis and Transition Framework (TCTF)*, introdotto durante la crisi energetica del 2022-2023. Sarà valido fino al 31 dicembre 2030, offrendo un orizzonte temporale più lungo per pianificare investimenti strategici. Il CISAF mira a garantire un livello di parità tra gli Stati membri e a evitare una corsa ai sussidi. Inoltre, consente agli Stati membri di

offrire livelli di aiuto superiori per contrastare il supporto fornito da paesi terzi, prevenendo così la delocalizzazione degli investimenti al di fuori dell'UE.

1.11.2. Antitrust

I regolamenti sugli accordi orizzontali (*Horizontal Block Exemptions Regulations* o HBERs) disciplinano gli accordi conclusi tra concorrenti effettivi o potenziali (Regulation (EU) 2023/1066, Regulation (EU) 2023/1067 e Linee direttrici sull'applicabilità dell'articolo 101 del trattato sul funzionamento dell'Unione europea agli accordi di cooperazione orizzontale (2023/C 259/01)). Tali accordi se da un lato apportano notevoli benefici economici in quanto possono costituire un mezzo per condividere i rischi, aumentare gli investimenti, condividere il *know-how*, migliorare la qualità e la varietà dei prodotti e lanciare più rapidamente le innovazioni, dall'altro sono particolarmente sensibili sotto il profilo concorrenziale in quanto possono produrre effetti negativi sui prezzi, la produzione, l'innovazione, o la varietà e la qualità dei prodotti. La revisione di questi regolamenti ha incluso delle disposizioni su come imprese concorrenti o potenziali concorrenti possano stipulare accordi con obiettivi sulla sostenibilità. Margrethe Vestager, Commissaria per la Concorrenza e anche Vice Presidente Esecutivo della Commissione, ha inoltre rilasciato ad una conferenza¹⁰ che, considerata la presenza di alcuni cartelli nel settore del riciclaggio, reputa che l'economia circolare sia finalmente un fenomeno che sta prendendo piede in Europa. Tuttavia, ha sollevato il problema dell'assenza di un'industria di riciclaggio delle batterie che rende dunque fisiologica la collaborazione tra imprese in tal senso. È importante che il legislatore, a maggior ragione se esso si occupa di politica sulla concorrenza, riconosca l'importanza della simbiosi industriale quando si parla di economia circolare.

Tra i principi fondamentali dell'economia circolare, la simbiosi industriale emerge come uno strumento chiave per massimizzare l'efficienza delle risorse e promuovere la collaborazione tra settori industriali tradizionalmente separati.

La simbiosi industriale si basa sulla condivisione di risorse, materiali e sottoprodotti tra diverse imprese, trasformando i rifiuti di una in materie prime per un'altra. Questo approccio non solo riduce la dipendenza dalle materie prime vergini ma crea vantaggi competitivi significativi. Ad esempio, consente di abbattere i costi legati alla gestione dei rifiuti e all'approvvigionamento di materie prime, generando nuove opportunità di mercato attraverso la valorizzazione dei sottoprodotti. Inoltre, la riduzione dei rifiuti

¹⁰Autonomous, digital and green Europe: a conversation with Margrethe Vestager, Bruegel, Brussels, June 29, 2022

destinati alle discariche e l'ottimizzazione del consumo energetico contribuiscono a mitigare l'impatto ambientale delle attività industriali.

Dal punto di vista economico, la simbiosi industriale offre alle imprese l'opportunità di aumentare la loro redditività e competitività. La creazione di reti simbiotiche tra aziende favorisce lo sviluppo di modelli di business innovativi, che combinano crescita economica e sostenibilità. A livello ambientale, il riutilizzo dei materiali e l'integrazione dei flussi energetici tra imprese riducono le emissioni di gas serra e limitano lo sfruttamento delle risorse naturali. Infine, dal punto di vista sociale, la simbiosi industriale può generare benefici per le comunità locali, creando nuovi posti di lavoro e rafforzando le economie regionali.

Un esempio emblematico è il distretto industriale di Kalundborg in Danimarca, considerato un modello pionieristico di simbiosi industriale. Qui, le aziende collaborano per condividere flussi di materiali ed energia, trasformando i sottoprodotti in risorse utili per altri processi produttivi. Questo approccio ha dimostrato come sia possibile combinare efficienza economica e tutela ambientale, diventando un riferimento per altre regioni europee.

L'integrazione della simbiosi industriale nelle politiche europee rappresenta una risposta concreta alle sfide della competizione globale. La creazione di reti simbiotiche tra imprese non solo aumenta la resilienza economica dell'UE ma contribuisce anche a ridurre la dipendenza da paesi terzi per l'approvvigionamento di materie prime critiche. Inoltre, favorisce una transizione verso modelli produttivi meno impattanti dal punto di vista ambientale.

In conclusione, l'economia circolare non può prescindere dalla simbiosi industriale come strumento operativo per realizzare i suoi obiettivi. La capacità delle imprese europee di adottare questo approccio sarà determinante per garantire una crescita sostenibile e competitiva nel lungo termine. Nel terzo capitolo in particolare verranno analizzate le implicazioni pratiche della simbiosi industriale nel settore energetico e fotovoltaico, evidenziando il potenziale trasformativo che questo modello può offrire nel progetto PHOTORAMA.

Nel quinquennio 2020-2025 sono nate tante iniziative legislative europee a favore dell'economia circolare, essenziali per affrontare le sfide ambientali, economiche e geopolitiche attuali. L'economia circolare non solo consente di ridurre la dipendenza dell'UE dalle materie prime critiche, ma promuove un modello industriale in cui il valore

delle risorse è massimizzato attraverso il riutilizzo, la rigenerazione e il riciclo. Tale visione è parte integrante della transizione energetica, poiché impone un approccio sistemico che coinvolge tutte le fasi della catena del valore, inclusa la produzione, l'uso e la gestione del fine vita dei prodotti. I cinque pilastri della circolarità rappresentano un quadro operativo fondamentale per orientare le imprese e le istituzioni verso pratiche sostenibili, preparando il terreno per i settori strategici, come quello energetico, ad assumere un ruolo chiave nella costruzione di un'Europa resiliente e competitiva. I capitoli successivi approfondiranno l'applicazione di questi principi nel settore energetico, evidenziando le opportunità per le utilities e le implicazioni nel fotovoltaico, settore in cui l'adozione di un modello circolare risulta particolarmente promettente.

Capitolo 2

Benefici per le utilities nel settore energetico

Per la scrittura di questo secondo capitolo, mi hanno guidato domande di ricerca direttamente collegata ai benefici pratici ed economici che l'economia circolare offrono alle utilities energetiche. In particolar modo, mi sono chiesta in che modo l'adozione di modelli di economia circolare può migliorare la sostenibilità e la competitività delle utilities nel settore energetico, quali sono i principali vantaggi economici e ambientali dell'economia circolare per le utilities che operano con tecnologie come il fotovoltaico, l'eolico, i sistemi di accumulo, le reti e le infrastrutture di ricarica per la mobilità elettrica, in che modo i cinque pilastri dell'economia circolare (input sostenibili, estensione della vita utile, utilizzo condiviso, prodotto come servizio e valorizzazione del fine vita) possono essere applicati a queste tecnologie, ed infine quali sono le *best practice* implementate dalle utilities europee o da altre imprese rilevanti per l'industria europea per integrare l'economia circolare nei loro modelli di business.

Per rispondere a queste domande, ho adottato un approccio metodologico qualitativo basato su analisi documentale, rapporti industriali e letteratura accademica sull'applicazione dell'economia circolare nel settore energetico. I dati provengono da organizzazioni internazionali e di settore, aziende, studi di ricerca e ricercatori.

L'analisi si concentra sull'identificazione dei benefici economici e ambientali derivanti dall'applicazione dei cinque pilastri dell'economia circolare alle utilities energetiche attraverso un'analisi tematica che individui modelli ricorrenti e *best practice*.

Gli obiettivi riguardano l'esplorazione di come l'economia circolare possa migliorare la sostenibilità ambientale e la competitività economica delle utilities nel settore energetico e l'analisi dei benefici economici derivanti dall'applicazione dei cinque pilastri dell'economia circolare alle cinque tecnologie energetiche e documentare esempi concreti di *best practice* adottate da utilities europee.

Capitolo	Titolo	Domande di ricerca	Disegno di ricerca	Obiettivo di ricerca
01	Le politiche europee sull'economia circolare	Quali sono gli ambiti di intervento del modello circolare per le imprese? Quali politiche promuovono lo sviluppo circolare nel settore energetico?	Approccio qualitativo basato su un'analisi documentale e tematica della normativa sull'economia circolare	Esaminare come le politiche europee sull'economia circolare influenzano la sostenibilità del settore energetico e fotovoltaico
02	Benefici per le utilities nel settore energetico	In che modo l'adozione dei cinque pilastri può migliorare la sostenibilità e la competitività delle utilities nel settore energetico?	Approccio qualitativo con analisi di rapporti industriali, letteratura accademica e modelli ricorrenti e best practice per eolico, fotovoltaico, reti, stoccaggio e infrastrutture di ricarica	Esplorare i benefici economici e ambientali derivanti dall'applicazione dei cinque pilastri dell'economia circolare alle utilities energetiche
03	Economia circolare nella tecnologia del fotovoltaico	In che modo il progetto PHOTORAMA può contribuire a rendere la filiera del fotovoltaico più circolare e sostenibile in Europa?	Approccio misto, con utilizzo di un'analisi documentale, dati forniti dai partner del progetto e un'indagine empirica sull'accettazione sociale	Valutare l'efficacia delle tecnologie sviluppate da PHOTORAMA per il disassemblaggio e il recupero dei materiali critici dai moduli fotovoltaici

Figura 5. Benefici per le utilities nel settore energetico: Metodologia di ricerca

2.1. Economia circolare e decarbonizzazione

L'implementazione di pratiche legate all'economia circolare è uno strumento cruciale per decarbonizzare l'industria energetica. L'adozione di un approccio circolare che tenga conto di tutto il ciclo di vita di un prodotto e dei cinque pilastri (cfr. 1.1) sui quali si basa l'economia circolare, ovvero input sostenibili, estensione della vita utile, utilizzo condiviso del bene, prodotto come servizio e valorizzazione del fine vita, riduce l'impatto ambientale e rappresenta una strategia di business per le utilities che operano nel settore energetico, impegnate in uno sforzo collettivo di decarbonizzazione dell'industria non solo per questioni ambientali ma anche in una logica economicamente competitiva (Bianchini et al., 2019 e Martin et al., 2017).

Per comprendere il legame tra economia circolare e decarbonizzazione è essenziale considerare il ruolo cruciale dell'industria energetica nell'emissione di gas serra. Secondo uno studio del World Resources Institute (WRI), l'industria energetica è responsabile di circa il 73%¹¹ delle emissioni globali di anidride carbonica (CO₂) nel 2020 (WRI, 2020). La figura 6 mostra per il 2022 il dettaglio delle percentuali di emissioni di gas serra in base alla tecnologica e la percentuale di fornitura totale di energia per prodotto.

¹¹ Al momento (maggio 2025) l'autrice non è riuscita a reperire fonti bibliografiche più recenti che forniscano un dato più aggiornato. Lo stesso è tuttavia confermato anche da ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale) e da Global Carbon Project, una organizzazione che dal 2011 ha lo scopo di quantificare le emissioni globali di gas serra e le loro cause.

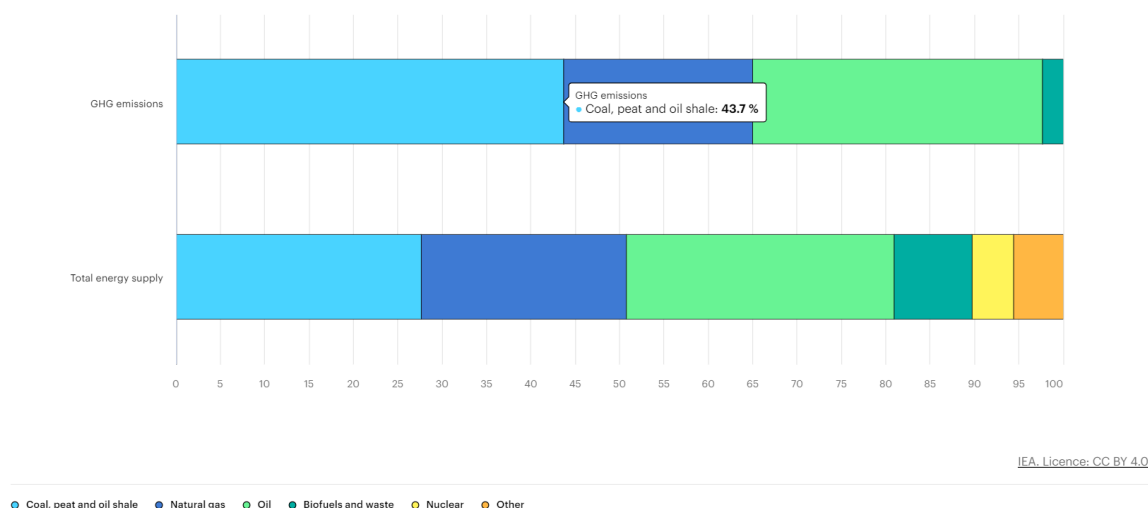


Figura 6¹². Quota, in percentuale, di emissioni di gas serra e fornitura totale di energia per prodotto (carbone, torba e scisti bituminosi; gas naturale; biocombustibili e rifiuti; nucleare; altro tra cui altre fonti rinnovabili, ad esempio idroelettrica, geotermica, solare ed eolica) nel mondo, nell'anno 2022.

Una quota significativa delle emissioni a livello globale è associata anche alle attività di estrazione di materie prime, produzione di materiali e manifattura¹³. Di conseguenza, ripensare il ciclo delle materie prime e dei prodotti lungo tutta la catena di approvvigionamento rappresenta una leva per la riduzione delle emissioni. L'economia circolare, che mira a disaccoppiare le attività industriali dal consumo di risorse, considera le energie rinnovabili - come solare, eolico, geotermico e idroelettrico - essenziali per soddisfare l'intero fabbisogno energetico, puntando quindi ad elettrificare i consumi per alimentarli con energia sostenibile riducendo l'impiego globale di fonti fossili ad alta intensità di carbonio. Alla luce degli importanti cambiamenti che la transizione energetica comporterà, è necessario che tutte le nuove tecnologie siano progettate, realizzate e gestite in una prospettiva di economia circolare, anche per quanto riguarda il ciclo delle materie prime in modo da garantire la piena sostenibilità e competitività della transizione.

L'impatto dell'economia circolare sulla riduzione di emissioni di gas serra varia a seconda del settore in cui l'approccio circolare viene applicato¹⁴ e la produzione di

¹² Fonte: IEA

¹³ UNEP stima che le emissioni generate dalla produzione di materiali siano più che raddoppiate negli ultimi 20 anni, passando da 5 miliardi di tonnellate di CO₂eq nel 1995 a oltre 11 miliardi di tonnellate nel 2015, raggiungendo una quota pari a un quarto di tutte le attuali emissioni di gas a effetto serra (UNEP, 2021).

¹⁴ Secondo la European Environment Agency (EEA), il settore dei rifiuti contribuisce a circa il 3% delle emissioni totali di gas serra (GHG). Un utilizzo più efficiente dei rifiuti come risorsa potrebbe quindi ridurre significativamente le emissioni anche in altri settori. L'EEA evidenzia un approccio positivo verso l'economia circolare, la quale, a seconda del settore in cui viene applicata, ha il potenziale di ridurre le emissioni di GHG. Il settore edilizio risulta essere quello con il maggiore impatto: una gestione ottimale dei materiali e l'estensione della loro vita utile potrebbero ridurre fino al 61% le emissioni di gas serra associate al ciclo di vita degli edifici.

tecnologie a bassa emissione di carbonio, come i pannelli solari e le turbine eoliche, richiede una notevole quantità di materiali e risorse naturali che limita la disponibilità di materie prime e aumenta l'ecosistema di approvvigionamento (D. Mulvaney et al., 2021). Inoltre, non è chiaro se l'economia circolare possa spostare le emissioni verso altre fasi del ciclo di vita del prodotto o verso altre industrie, piuttosto che ridurle globalmente.

Tuttavia, la maggior parte della letteratura (cfr. Ellen Mc Arthur Foundation, Hailemariam, A. et al., 2023; M. Geissdoerfer et al., 2017 e The Circularity Gap Report, 2024.) è concorde sulla positività degli impatti dell'economia circolare sulla decarbonizzazione. Gli studi più conservativi dimostrano che l'implementazione di modelli circolari può portare ad una riduzione delle emissioni di CO₂ comprese tra il 2% e il 4% entro il 2030 (Zhang, L. et al., 2019). Altri evidenziano che l'efficienza energetica, la produzione decentralizzata e l'utilizzo di fonti rinnovabili possono ridurre le emissioni di CO₂ dell'industria energetica del 50% entro il 2030 rispetto ai livelli del 2010 (Ecofys, 2020). Secondo la Fondazione Ellen MacArthur, l'adozione di modelli circolari potrebbe ridurre le emissioni globali di CO₂ di circa il 44% entro il 2050 (Ellen MacArthur Foundation, 2019).

Oltre a contribuire a decarbonizzare l'industria, un ulteriore vantaggio dell'economia circolare per le utilities energetiche è la possibilità di generare nuove opportunità di business e nuovi flussi di reddito (Utilitalia, 2021). Attraverso l'estensione del ciclo di vita dei prodotti e l'implementazione di strategie di riparazione e manutenzione, le aziende possono sviluppare servizi innovativi, aumentando la loro competitività sul mercato. Infine, l'adozione dell'economia circolare potrebbe generare un valore aggiunto per le aziende energetiche pari a 1,8 trilioni di dollari entro il 2030 (McKinsey & Company, 2015).

A partire da queste considerazioni generali sull'importanza dell'economia circolare per la decarbonizzazione, è necessario ora approfondire il ruolo delle tecnologie di produzione energetica in questo contesto. L'adozione di pratiche circolari non solo influenza il ciclo di vita dei prodotti, ma incide in modo significativo anche sull'intera catena di approvvigionamento delle risorse e dei materiali necessari per produrre energia. In particolare, tecnologie come i pannelli fotovoltaici e le turbine eoliche, nonostante siano fondamentali per la transizione verso un sistema energetico sostenibile, richiedono un uso intensivo di materie prime, spesso difficili da reperire, nonostante i grandi investimenti impiegati per il loro sviluppo. Infatti, il report del 2024 "*Advancing Clean Technology Manufacturing*" dell'International Energy Agency (IEA) evidenzia come gli

investimenti globali nella produzione di tecnologie per l'energia pulita con un focus su fotovoltaico, turbine eoliche, batterie, elettrolizzatori e pompe di calore abbiano raggiunto i 200 miliardi di dollari nel 2023, con un aumento del 70% rispetto al 2022, e rappresentino il 4% della crescita del PIL globale. Il report sottolinea che la capacità produttiva globale per i moduli fotovoltaici è già in linea con le esigenze previste per il 2030 secondo lo scenario Net Zero Emissions (NZE) dell'IEA, mentre quella per le batterie ha raggiunto il 90% del fabbisogno stimato. Tuttavia, la produzione di altre tecnologie come elettrolizzatori e pompe di calore richiede ulteriori investimenti per soddisfare la domanda futura. Di conseguenza, la progettazione delle tecnologie pulite e la produzione devono essere ripensate in un'ottica circolare per garantire un impatto positivo sia in termini di riduzione delle emissioni sia di efficienza delle risorse, senza compromettere la sostenibilità complessiva della transizione energetica. Nella sezione successiva, verranno esaminati i principali esempi di tecnologie energetiche a basse emissioni e le sfide legate all'adozione di modelli circolari in questo ambito.

2.2. Generatori eolici

Nel contesto della transizione verso un sistema energetico più sostenibile e decarbonizzato, l'implementazione dell'economia circolare nei generatori eolici riveste un ruolo fondamentale. Questa sezione esplorerà come la circolarità può essere applicata nell'industria eolica, focalizzandosi sui cinque pilastri dell'economia circolare (cfr. 1.1): input sostenibili, estensione della vita utile attraverso la progettazione modulare, utilizzo condiviso del bene, prodotto come servizio e valorizzazione del fine vita. Saranno presentati esempi concreti di società energetiche all'avanguardia sull'implementazione dell'economia circolare nei generatori eolici, evidenziando le best practice e le opportunità di miglioramento.

2.2.1. Input sostenibili e materiali riciclati

Un primo passo verso l'economia circolare nei generatori eolici è la promozione dell'utilizzo di input sostenibili e materiali riciclati nella fase di produzione. Gli input sostenibili riducono la dipendenza da materie prime vergini e il conseguente impatto ambientale legato all'estrazione e alla lavorazione.

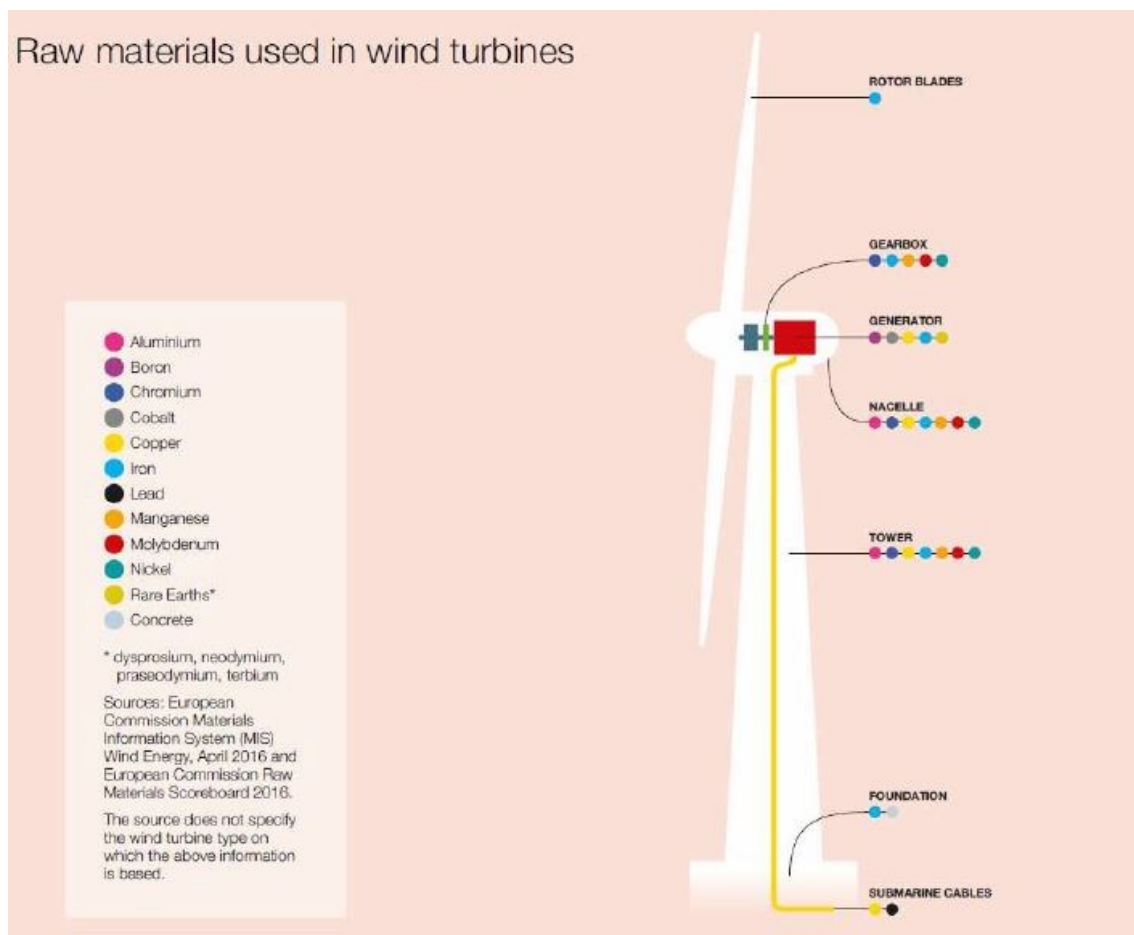


Figura 7. Materie prime utilizzate nelle turbine eoliche (Carrara S. et al., 2020)

Materiale	Percentuale di riciclo (%)
Alluminio	100
Rame	97
GFK (composto di fibre di vetro)	100
Ghisa	98
Acciaio	100
Cemento	80

Tabella 4. Percentuale di riciclaggio dei materiali utilizzati nella produzione di un impianto eolico (Pehlken et al., 2013)

I generatori eolici sono composti da circa 25.000 componenti, ognuna delle quali richiede l'utilizzo di specifici materiali e materie prime (Carrara et al., 2020). Secondo la World Steel Association, circa l'85% delle turbine eoliche in tutto il mondo sono costruite principalmente in acciaio. Tuttavia, vengono utilizzate anche torri in cemento, basi in

cemento con sezioni superiori in acciaio e torri a traliccio (IRENA, 2012). Oltre alla torre, realizzata principalmente in lamiera d'acciaio, anche il riduttore, il generatore e il trasformatore della turbina sono costituiti principalmente da acciaio strutturale e acciai inossidabili. L'alluminio viene utilizzato per la produzione di componenti resistenti ma leggeri. Il rame è utilizzato prevalentemente negli avvolgimenti delle bobine dello statore e del rotore del generatore, nei conduttori dei cavi di alimentazione ad alta tensione, nelle bobine dei trasformatori e nella messa a terra. Il piombo viene utilizzato per la guaina dei cavi nella trasmissione di energia elettrica offshore. Le terre rare e il boro sono invece essenziali per i progetti di turbine che utilizzano magneti permanenti.

Di seguito sono elencati i materiali e le materie prime principali utilizzati nella produzione di turbine eoliche con una breve descrizione del loro utilizzo, del loro impatto ambientale e del loro riciclo a livello globale:

1. **Acciaio:** L'acciaio è un componente essenziale nelle strutture delle turbine eoliche, poiché offre la resistenza e la robustezza necessarie per sopportare le forze del vento. L'impatto ambientale dell'acciaio è significativo, ma può variare a seconda delle fonti di materie prime, delle tecnologie utilizzate per la produzione e delle pratiche di gestione dei rifiuti. L'acciaio è un materiale riciclabile e può essere recuperato e riutilizzato per nuove strutture eoliche. Il processo di produzione dell'acciaio richiede la riduzione del minerale di ferro utilizzando coke e carbone come fonti di energia in altoforni o forni elettrici ad arco. Durante questo processo, vengono emessi gas serra, in particolare CO₂, e altre sostanze inquinanti, come ossidi di azoto e di zolfo. La produzione di una tonnellata di acciaio genera circa 2 tonnellate di CO₂ (Di Stefano, 2021). Il recupero e il riciclo dell'acciaio possono contribuire a ridurre l'impatto ambientale complessivo, poiché il riciclo dell'acciaio richiede meno energia rispetto alla produzione da materie prime vergini. Il settore siderurgico sta sviluppando tecnologie più efficienti dal punto di vista energetico e a basse emissioni di carbonio, nonché pratiche di gestione dei rifiuti e delle emissioni più sostenibili.
2. **Cemento:** Il cemento è utilizzato per la realizzazione delle fondamenta delle turbine. Le fondamenta in cemento sono necessarie per ancorare le turbine al terreno e fornire stabilità strutturale, specialmente per le turbine di grandi dimensioni. La produzione di una tonnellata di cemento comporta l'emissione in atmosfera di una tonnellata di CO₂ (Di Stefano, 2021). Inoltre, nel contesto dell'economia circolare, è fondamentale considerare anche il ciclo di vita del cemento e le opportunità di ridurre il suo impatto

ambientale attraverso diverse strategie, come l'adozione di tecnologie di produzione a basse emissioni di carbonio, il riciclo del cemento nelle fasi di demolizione o riconversione e l'utilizzo di materiali alternativi meno impattanti per le fondamenta delle turbine, come ad esempio il calcestruzzo rinforzato con fibra di vetro. In sintesi, il cemento è un materiale essenziale per la produzione di generatori eolici, ma le considerazioni ambientali legate alla sua produzione e utilizzo richiedono l'adozione di strategie e tecnologie sostenibili per massimizzare i benefici dell'economia circolare nel settore dell'energia eolica.

3. **Ghisa:** La ghisa è un materiale utilizzato per alcune componenti interne come i cuscinetti e i supporti. La ghisa è resistente e durevole ed è spesso utilizzata per componenti critici che richiedono una maggiore resistenza e stabilità. Ad esempio, i cuscinetti a sfera e i supporti delle turbine eoliche possono essere realizzati in ghisa per sopportare il peso e le forze rotazionali generate dalle pale durante il funzionamento. Anche la ghisa ha un impatto ambientale associato alla sua produzione, principalmente legato alle emissioni di CO₂ generate durante il processo di fusione. Nel contesto dell'industria eolica, le aziende stanno lavorando per sviluppare soluzioni più sostenibili per l'uso della ghisa, tra cui l'utilizzo di ghisa riciclata proveniente da fonti interne o esterne all'industria eolica. Inoltre, la ricerca e l'innovazione stanno puntando a materiali alternativi più leggeri e a basso impatto ambientale, tra cui compositi avanzati, leghe di alluminio, acciaio avanzato a basso tenore di carbonio, materiali biocompositi, materiali ceramici avanzati.
4. **Leghe di alluminio:** L'alluminio viene spesso utilizzato per parti leggere come il guscio del generatore e il sistema di trasmissione. La produzione di una tonnellata di alluminio primario genera da circa 10 a oltre 20 tonnellate di CO₂, a seconda delle fonti di energia utilizzate e dell'efficienza del processo. Questo materiale può essere riciclato e riutilizzato per nuove applicazioni ed è uno dei materiali con il tasso di riciclo più elevato al mondo. A livello globale, il tasso di riciclo dell'alluminio è stimato essere superiore all'80%¹⁵ (il cemento e l'acciaio oscillano tra il 70% e l'80%). Questa elevata percentuale è dovuta alla facilità con cui l'alluminio può essere riciclato e riutilizzato senza compromettere le sue proprietà. Il riciclo dell'alluminio consente un notevole risparmio di energia rispetto alla produzione di alluminio primario da bauxite.

¹⁵ L'Italia, secondo i dati relativi all'anno 2022 del Consorzio imballaggi alluminio, ha riciclato il 73,6% del totale dell'immesso sul mercato.

5. **Fibra di vetro:** La fibra di vetro è impiegata principalmente per realizzare le pale delle turbine eoliche. È leggera e resistente e consente alle pale di catturare efficacemente l'energia del vento. La fibra di vetro può essere riciclata e utilizzata in altri prodotti in vetroresina o materiali compositi.
6. **Resina epossidica:** La resina epossidica viene utilizzata come legante per rinforzare la fibra di vetro nella produzione delle pale delle turbine. Sebbene il materiale sia leggero, resistente e altamente durevole, è difficile da riciclare in modo efficiente dal punto di vista dei costi e senza lasciare un'impronta di carbonio maggiore rispetto all'utilizzo di materie prime vergini.
7. **Rame e altri metalli:** Il rame è utilizzato per le componenti elettriche dei generatori eolici, come il sistema di generazione eolico e i cablaggi. I metalli possono essere recuperati e riciclati per il riutilizzo in altre applicazioni.
8. **Materiali compositi avanzati:** Alcune turbine eoliche utilizzano materiali compositi avanzati per migliorare le prestazioni e ridurre il peso complessivo. Questi materiali possono essere più difficili da riciclare, ma lo sviluppo di nuove tecnologie può consentire il loro recupero e il riutilizzo in futuro.

Per quanto riguarda la possibilità di utilizzo da fonti rinnovabili, riuso o riciclo, molti dei materiali sopra elencati possono essere considerati compatibili con l'economia circolare. L'energia eolica stessa è una fonte rinnovabile e l'uso di generatori eolici contribuisce a promuovere l'adozione di fonti energetiche sostenibili. Alcuni componenti delle turbine eoliche possono essere ricondizionati e riutilizzati dopo la fine della vita utile del generatore eolico. Ad esempio, parti come il meccanismo di trasmissione e alcuni componenti elettrici possono essere recuperati e utilizzati in altre turbine o attrezzature industriali. Molti dei materiali utilizzati nella produzione di generatori eolici possono essere riciclati. Il riciclo della fibra di vetro, delle resine e dell'acciaio è particolarmente comune e offre opportunità per ridurre l'impatto ambientale della produzione di nuove turbine eoliche.

Inoltre, si può utilizzare il legno per la realizzazione delle torri per generatori eolici affinché siano più leggere e facilmente trasportabili. L'impiego del legno potrebbe portare ad una riduzione di CO₂ per KWh prodotto fino al 90% laddove applicabile. La base delle torri e le prime sezioni possono inoltre essere sostituite da un piedistallo in cemento che sarà realizzato direttamente in sito, riducendo significativamente l'uso di acciaio, come abbiamo visto più inquinante rispetto al cemento. Le emissioni di CO₂ legate alle fasi di

estrazione materiali e di produzione della torre (circa il 23% delle emissioni totali) possono essere ridotte fino al 30% rispetto ad una soluzione tradizionale in acciaio.

2.2.2. Estensione della vita utile attraverso la progettazione modulare

Un altro aspetto chiave per migliorare l'economia circolare nei generatori eolici è la progettazione modulare, che consente l'estensione della vita utile delle turbine eoliche. La progettazione modulare delle turbine eoliche è una strategia che mira a semplificare la produzione, l'installazione, la manutenzione e il riciclo delle turbine, consentendo una maggiore flessibilità e facilità di aggiornamento e sostituzione delle componenti favorendo al contempo il riuso, il riciclo e l'estensione della vita utile dei generatori eolici (Veers et al., 2022 e Firoozi, 2024).

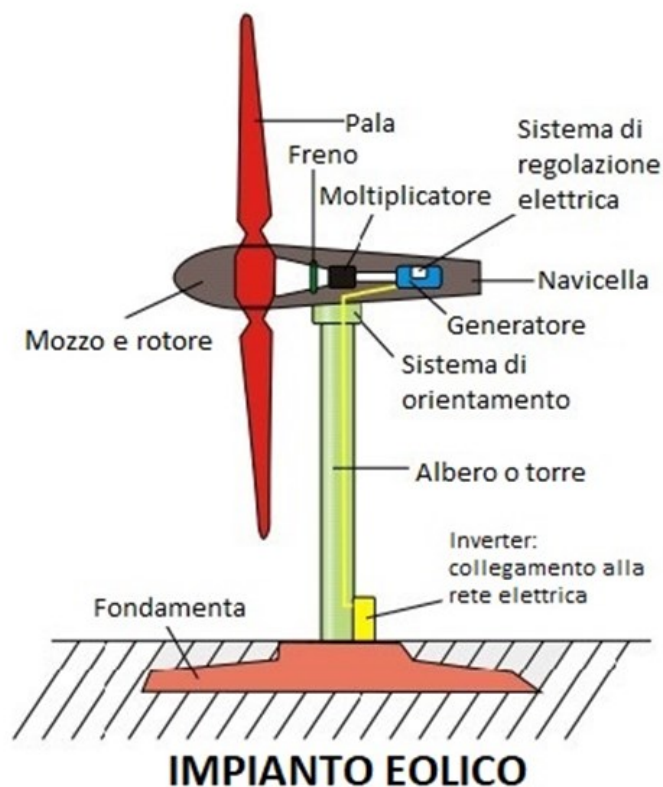


Figura 8. Componenti di un impianto eolico¹⁶.

Le componenti delle turbine eoliche che possono essere più facilmente progettate in modo modulare sono prime fra tutte le pale delle turbine, disegnate in segmenti o sezioni per poter facilitare il trasporto e il montaggio delle pale, rendendo più efficiente la logistica di installazione. Inoltre, la sostituzione di una singola pala danneggiata o usurata può

¹⁶ Fonte: www.impiantibianchi.it

essere più semplice, riducendo i tempi di fermo della turbina e la necessità di sostituire l'intero sistema. Il generatore eolico, che trasforma l'energia cinetica del vento in energia elettrica, può essere progettato in modo modulare per facilitare la manutenzione e la sostituzione delle parti interne, come gli ingranaggi e le parti meccaniche. Le torri delle turbine eoliche possono essere realizzate in sezioni, consentendo una maggiore flessibilità nella scelta dell'altezza della turbina in base alle specifiche del sito. Inoltre, l'adozione di materiali leggeri e sostenibili per la costruzione delle torri può semplificare il loro smontaggio e riciclo alla fine della vita utile della turbina. Infine, il sistema di controllo della turbina eolica può essere progettato modularmente per facilitare gli aggiornamenti software e l'adozione di nuove tecnologie di monitoraggio e gestione dell'energia.

Diverse aziende nel settore eolico, tra cui Vestas, Siemens Gamesa ed Enercon, quest'ultima nota soprattutto per aver realizzato a inizi anni '90 il primo aerogeneratore caratterizzato dall'introduzione del sistema “*gearless*”, ossia senza sistema di cambio marce tra il rotore delle pale e il rotore del generatore elettrico, adottano un approccio modulare nella progettazione delle turbine eoliche, consentendo una maggiore affidabilità e una minore necessità di manutenzione. L'estensione della vita utile delle turbine eoliche è un aspetto cruciale per migliorare l'efficienza e l'efficacia del settore. Secondo un rapporto della Global Wind Energy Council (GWEC) pubblicato nel 2022, la durata media dei contratti di manutenzione delle turbine eoliche onshore è stata di circa 15-20 anni. Tuttavia, molte turbine eoliche possono continuare a funzionare ben oltre questo periodo iniziale con la giusta manutenzione e aggiornamenti tecnologici, raggiungendo fino a 25-30 anni o più di vita utile. Infine, prevedere ed evitare i guasti dei componenti della turbina gioca un ruolo importante nella riduzione dei costi e nell'aumento del valore e dunque nell'economia circolare. Le soluzioni *Software as a Service* (SaaS) basate sui dati possono aiutare gli operatori di turbine a incrementare la produzione di energia e il valore. Ad esempio, il modulo di manutenzione predittiva di Kavaken aiuta gli operatori a determinare le cause principali dei guasti e a pianificare i ricambi e la manutenzione dei parchi eolici. I servizi principali comprendono il rilevamento dei guasti, la diagnostica e la prognostica, l'analisi della curva di potenza e la previsione della produzione. Il modulo di manutenzione predittiva impiega un insieme di algoritmi di rilevamento delle anomalie su misura per determinare lo stato di salute di ciascun componente della turbina e prognosticare la vita utile residua prima che si verifichi un guasto. Gli algoritmi incorporati passano al setaccio grandi volumi di vibrazioni, SCADA e altri dati accessibili e valutano centinaia di caratteristiche per produrre un indicatore di condizione intelligente

che attiva i flag al raggiungimento di determinate soglie. Rilevando i guasti mesi prima che si verifichino, si evitano effetti negativi sui componenti adiacenti, consentendo riparazione meno gravose anche in termini finanziari.

2.2.3. Utilizzo condiviso del bene e prodotto come servizio

Come affronteremo più nel dettaglio al 2.3.3., le turbine eoliche possono far parte di comunità energetiche, nelle quali queste diventano un bene condiviso dalla comunità e dunque dai suoi utilizzatori. Possono inoltre avvalersi del modello “*Product as a Service*” o PaaS attraverso di un “*Performance Contracting*” ossia un contratto di performance in virtù del quale il cliente paga solo per l’energia elettrica effettivamente prodotta dalla turbina eolica e il fornitore si assume la responsabilità per l’installazione, la manutenzione e l’efficienza del generatore, incentivando la massimizzazione della produzione di energia e l’ottimizzazione delle performance. Il modello PaaS potrebbe inoltre consentire agli utenti di accedere agli ultimi aggiornamenti tecnologici e di sostituzione delle componenti o a servizi di gestione dell’integrazione del generatore eolico con la rete elettrica, garantendo la massima efficienza e stabilità dell’intero sistema energetico.

2.2.4. Valorizzazione del fine vita

La gestione responsabile del fine vita delle turbine comporta la necessità di adottare pratiche di smantellamento sicure e sostenibili per consentire il riciclo e il recupero dei materiali utilizzati. Le principali aziende europee del settore stanno riprogettando i generatori eolici per garantire la commercializzazione di turbine e pale completamente riciclabili nel breve termine.

L’implementazione dell’economia circolare nei generatori eolici offre una vasta gamma di opportunità per promuovere la sostenibilità e la decarbonizzazione nel settore energetico. Sfruttando i cinque pilastri dell’economia circolare, le aziende energetiche possono massimizzare l’efficienza delle turbine eoliche, riducendo l’impatto ambientale complessivo.

2.2.5. Best practice

In questa sezione, come nelle altre sezioni *Best practice* relative alle altre tecnologie energetiche (cfr. 2.3.5, 2.4.5, 2.5.5 e 2.6.5) ho provato ad individuare almeno tre realtà industriali, di dimensione piccola, media o grande, di origine italiana, europea o

internazionale che abbiano messo in pratica un'attività circolare relativa ad uno dei cinque pilastri. Le realtà industriali non appartengono necessariamente al settore energetico. La scelta di inserire un'impresa piuttosto che un'altra è dettata dall'originalità, virtuosità e replicabilità dell'attività e soprattutto dalla reperibilità della notizia, poiché le fonti dei dati e delle informazioni riportate sono report industriali provenienti dai loro siti web. In particolare, in questo caso ho scelto due aziende leader nel settore eolico europeo e una realtà italiana nel settore dell'edilizia che lavora un materiale fondamentale per le fondamenta delle turbine eoliche, il cemento.

Società	Pilastro economia circolare	Attività circolare
Italcementi	Input sostenibili	Brevetto prodotto i.active Biodynamic costituito da malta cementizia composta all'80% di aggregati da riciclo provenienti dagli sfridi di lavorazione del marmo di Carrara e che può contenere TX Active ¹⁷ .
Siemens Gamesa	Estensione della vita utile attraverso la progettazione modulare Valorizzazione fine vita	Servizi di riparazione e ricondizionamento delle turbine eoliche e riprogettazione dei loro componenti per migliorarne la qualità, efficacia e resilienza con tassi di guasto significativamente ridotti. ¹⁸ Lancio della "RecyclableBlade", la prima pala eolica <i>offshore</i> al mondo che può essere riciclata alla fine del suo ciclo di vita. ¹⁹
Vestas (con il supporto di Stena Recycling e del produttore globale di epossidici Olin per la valorizzazione del fine vita)	Estensione della vita utile attraverso la progettazione modulare Valorizzazione fine vita	Lancio della piattaforma EnVentus™ che crea nuove varianti di turbine eoliche progettate tenendo conto dell'applicabilità globale. La modularità del design consente di soddisfare le esigenze di personalizzazione, combinando moduli riutilizzabili in base alle condizioni del mercato e del progetto. ²⁰ Scalabilità di un nuovo processo chimico di disassemblaggio delle pale eoliche costituite da resina epossidica, sostanza altamente resiliente e difficilmente scomponibile in componenti riutilizzabili. Al 2022, almeno l'85% del peso della turbina può essere completamente riciclato o riutilizzato. La percentuale rimanente, che rappresenta l'obiettivo sfidante per Vestas, è costituita principalmente dai rotori delle turbine

¹⁷ TX Active è il principio fotocatalitico brevettato da Italcementi. Grazie alla luce il catalizzatore accelera i naturali processi di ossidazione che favoriscono una più rapida decomposizione degli inquinanti presenti nell'ambiente (micropolveri, ossidi di azoto), evitandone l'accumulo.

¹⁸ <https://www.siemensgamesa.com/-/media/siemensgamesa/downloads/en/products-and-services/services/spares-and-repairs/repair-and-reconditioning-services-brochure-en.pdf>

¹⁹ <https://www.siemensgamesa.com/en-int/newsroom/2021/09/launch-world-first-recyclable-wind-turbine-blade>

²⁰ <https://www.vestas.com/en/products/enventus-platform>

		costituiti sia da resina epossidica che da fibre di vetro. ²¹
--	--	--

Tabella 5. Best practice per i generatori eolici

2.3. Moduli fotovoltaici

Lo sviluppo dei moduli fotovoltaici è in rapido aumento e ogni prodotto fisico prima o poi raggiungerà la fine della sua vita utile. La vita utile di un modulo è compresa tra i 20 e i 35 anni; pertanto, un'abbondante quantità di moduli raggiungerà la fine della propria vita utile entro il 2050. Si stima che almeno 8 milioni di tonnellate di moduli raggiungano la fine del loro ciclo di vita ogni anno, per un totale di circa 78 milioni di tonnellate entro il 2050 (Weckend et al., 2016). Analogamente alla pervasività della plastica nel nostro ecosistema e ai suoi effetti associati, se il fine vita dei moduli non viene gestito in modo responsabile, comporterà non solo un inquinamento massiccio dell'ecosistema terrestre ma anche l'estrazione perpetua delle risorse limitate della Terra diminuendo il beneficio ambientale netto della raccolta dell'energia solare. Al contrario, il recupero dei moduli potrebbe ridurre l'estrazione di risorse e i rifiuti e generare un ritorno economico e un valore sufficienti a finanziare la produzione di altri 2 miliardi di moduli entro il 2050 (Heath, 2020). Pertanto, il fine vita dei moduli deve essere gestito adeguatamente e occorre incoraggiare il settore solare a partecipare all'economia circolare.

2.3.1. Input sostenibili

Per esaminare la sostenibilità di un sistema fotovoltaico solare, analizziamo anzitutto, come per i generatori eolici, i suoi componenti strutturali critici.

I pannelli solari fotovoltaici sono uno dei flussi di rifiuti futuri in più rapida crescita nella categoria dei grandi rifiuti elettronici nonché uno dei flussi di rifiuti più importanti, poiché contenente elementi come selenio, tellurio, gallio, molibdeno e indio (Kastanaki et al., 2022). I pannelli solari fotovoltaici sono attualmente basati su diverse sotto-tecnologie, le più comuni delle quali sono:

- a) silicio cristallino (c-Si) basato su wafer, sia monocristallino che multicristallino;
- b) tellururo di cadmio (CdTe);
- c) diseleniuro di rame indio gallio (CIGS);

²¹ <https://www.vestas.com/en/sustainability/blade-circularity>

d) silicio amorfo (a-Si)

Queste ultime tre tecnologie sono note collettivamente come tecnologie a film sottile, a causa dello spessore limitato della cella fotovoltaica, che è dell'ordine di pochi micrometri, rispetto ai 150-200 μm dei wafer a base di silicio. La differenza è dovuta al fatto che i materiali utilizzati nelle tecnologie a film sottile assorbono la luce da 10 fino a 100 volte più efficientemente rispetto al c-Si (Carrara et al., 2020). Tuttavia, il mercato fotovoltaico globale è stato dominato dai pannelli in c-Si fin dal suo decollo all'inizio del secolo, complice la loro efficienza pari al 15-21% rispetto al 12-15% dei moduli a film sottile (Jean et al., 2015). Infatti, la tecnologia a base di silicio rappresenta il 95% della produzione fotovoltaica globale nel 2020 (Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, 2022).

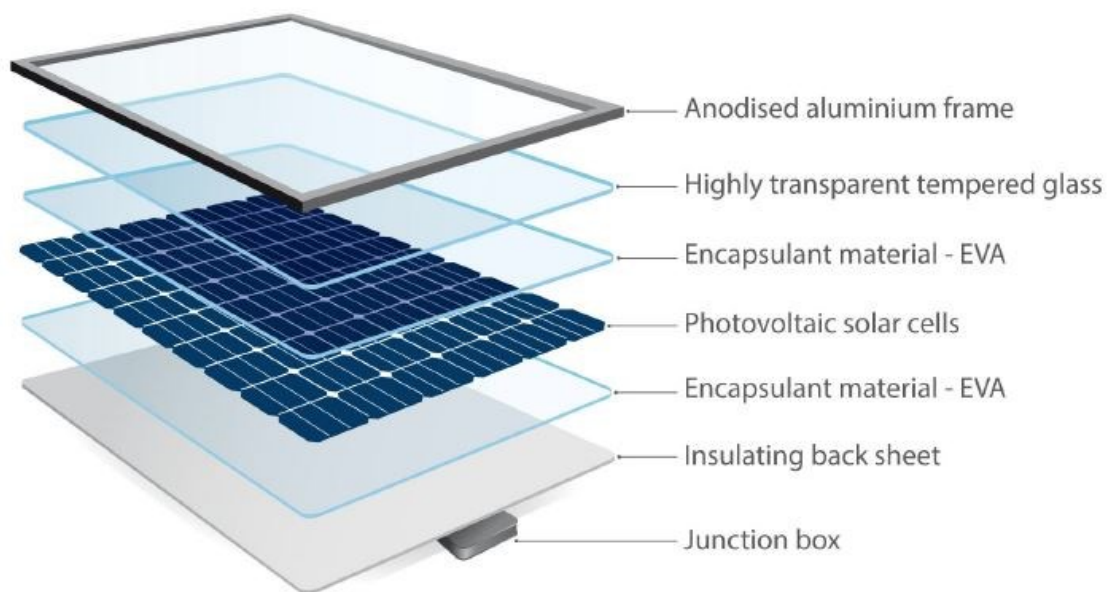


Figura 9²². Struttura di un modulo fotovoltaico a base di silicio

Calcestruzzo, acciaio, plastica, vetro, alluminio e rame sono i materiali generalmente utilizzati nei componenti strutturali ed elettrici degli impianti fotovoltaici e sono comuni a tutte le tecnologie. I materiali specifici utilizzati nelle celle solari sono invece silicio, argento, cadmio, tellurio, rame, indio, gallio, selenio e germanio. L'intensità di materiale

²² Fonte: Sakhria, B., Hamaidi, B., Djemana, M. *et al.* Harnessing neural networks for precise damage localization in photovoltaic solar via impedance-based structural health monitoring. *Electr Eng* (2024).

del silicio nei pannelli c-Si è stata caratterizzata da una massiccia riduzione negli ultimi decenni, soprattutto in corrispondenza dell'espansione del solare fotovoltaico avvenuta circa un decennio fa. In particolare, ha raggiunto i 4 g/W (cioè t/MW), rispetto ai 16 g/W del 2004. Questa tendenza è destinata a continuare in futuro, poiché si prevede che il consumo di silicio scenderà tra i 2,1 e i 3 g/W nel 2028 (JRC, 2018). In generale, è difficile determinare con precisione la composizione dei pannelli solari poiché la tecnologia è in evoluzione e la maggior parte dei processi di produzione sono segreti commerciali. All'interno del pannello, altri elementi come argento, rame, piombo e stagno sono incorporati per varie ragioni funzionali. Compreso il silicio, questi materiali sono scarsi e preziosi, pertanto, dovrebbero essere idealmente recuperati e riciclati in nuove applicazioni. Tuttavia, il design di un pannello contemporaneo prevede molti materiali compattati e interconnessi, rendendo difficile la loro separazione (Tan, 2022).

Materiale	Quantità	Unità	(wt/wt %)
Vetro, contenente antimonio (0,01-1%/ kg di vetro)	700	kg	70%
Telaio in alluminio	180	kg	18%
Connettore in rame	10	kg	1%
Strato di incapsulamento adesivo a base di polimeri (EVA)	51	kg	5,1%
Strato posteriore (a base di fluoruro di polivinile)	15	kg	1,5%
Cella solare in silicio metallico	36,5	kg	3,56%
Argento	0,53	kg	0,053 %
Alluminio, conduttore interno	5,3	kg	0,53%
Rame, conduttore interno	1,14	kg	1,14%
Metalli vari (stagno, piombo)	0,53	kg	0,053 %
Totale	1000	kg	100%

Tabella 6²³. Composizione materiale di un modulo fotovoltaico

Ad ogni modo, per aumentare la circolarità degli input sostenibili, è possibile sostituire materiali più inquinanti con alternative meno impattanti. Ad esempio, l'uso di celle solari a film sottile anziché celle a silicio cristallino può richiedere meno materiali semiconduttori, riducendo il consumo di silicio e di altri metalli preziosi. L'adozione di processi di produzione a basso impatto ambientale e il ricorso a energie rinnovabili per alimentare le fabbriche di moduli fotovoltaici possono anche ridurre l'impatto ambientale complessivo del ciclo produttivo. Infine, investire nella ricerca e nell'innovazione per sviluppare nuovi materiali e tecnologie che riducano ulteriormente l'impatto ambientale dei pannelli fotovoltaici risulta di particolare importanza in un settore in così rapida crescita.

2.3.2. Estensione della vita utile attraverso la progettazione modulare

La progettazione modulare può essere applicata anche nei moduli fotovoltaici, permettendo la sostituzione agevole di parti danneggiate o obsolete senza dover smantellare l'intero pannello solare. Inoltre, l'implementazione di soluzioni intelligenti per il monitoraggio delle prestazioni dei moduli e la manutenzione preventiva può contribuire ad aumentare la loro durata e prestazioni (Solar Power Europe, 2021).

Un pannello fotovoltaico progettato in modo modulare può avere componenti sostituibili. I pannelli possono essere suddivisi in moduli o componenti separati, come celle fotovoltaiche, inverter o connessioni elettriche che si possono facilmente rimuovere e sostituire senza che subentri un nuovo pannello. I pannelli possono essere inoltre progettati con connettori standardizzati che consentono di collegarli tra loro in modo semplice ed efficiente. Questo favorisce la scalabilità del sistema, permettendo di aggiungere o rimuovere pannelli a seconda delle esigenze. In aggiunta, i pannelli possono essere progettati in modo che i componenti chiave come l'inverter possano essere aggiornati o migliorati nel tempo (Schnatmann et al., 2022). Alcuni produttori stanno sviluppando pannelli fotovoltaici intelligenti con componenti integrati come *microinverter*, sensori di monitoraggio elettronico e tecnologia di comunicazione che consentono una facile sostituzione e aggiornamento per migliorare le prestazioni complessive del sistema. Infine, i pannelli a strati sottili utilizzano meno materiali rispetto

²³ Fonte: J. Tan, S. Jia, S. Ramakrishna, 2022.

ai pannelli tradizionali e possono essere più flessibili nella loro integrazione e sostituzione (Panagoda et al., 2023).

2.3.3. Utilizzo condiviso del bene e prodotto come servizio

In un modello basato sull'utilizzo condiviso, i pannelli fotovoltaici, proprio come i generatori eolici, potrebbero essere di proprietà di una comunità energetica rinnovabile o di un ente che offre servizi energetici. Le comunità energetiche rinnovabili danno un forte impulso alla generazione distribuita e favoriscono lo sviluppo di energia a chilometro zero e di reti intelligenti. Come spiega bene il Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica (MASE), si tratta di associazioni che producono e condividono energia rinnovabile, per generare e gestire in autonomia energia verde a costi vantaggiosi, riducendo nettamente le emissioni di CO₂ e lo spreco energetico. Ne può far parte chiunque, dai semplici cittadini, alle attività commerciali, le pubbliche amministrazioni fino alle piccole e medie imprese. All'interno di una comunità energetica, i pannelli vengono installati in luoghi strategici, come su tetti di edifici, terreni o spazi pubblici e condivisi all'interno della comunità. I membri della comunità possono quindi usufruire dell'energia prodotta dai pannelli senza dover essere necessariamente proprietari dell'intero impianto. In questo modello, si delinea una nuova figura, quella del *prosumer*, ovvero il consumatore che è parte attiva del sistema elettrico ed è quindi al contempo produttore di energia. Ogni prosumer può contribuire con la propria produzione di energia solare e beneficiare di una quota dell'energia totale generata dai pannelli condivisi (Kotilainen, 2019). Il prosumer non deve necessariamente far parte di una comunità energetica, può trattarsi anche del singolo privato che installa sul tetto della propria abitazione dei pannelli fotovoltaici e decide, qualora l'energia che produce ecceda quella di cui necessita per l'auto-consumo, di immettere nella rete questa differenza consentendo ad altri utenti di poterne beneficiare. Questo sistema favorisce la generazione distribuita di energia, riducendo la dipendenza dalle fonti energetiche tradizionali e creando un ambiente più sostenibile.

Per quanto riguarda invece il modello PaaS, i pannelli fotovoltaici possono essere acquisiti tramite noleggio o leasing o con abbonamenti mensili o annuali che permettono ai membri della comunità di utilizzare l'energia prodotta dai pannelli condivisi. Inoltre, attraverso l'uso della tecnologia blockchain, l'energia prodotta dai pannelli potrebbe essere tokenizzata e scambiata tra i membri della comunità come un bene digitale. I membri della comunità potrebbero quindi scambiare l'energia che producono con altri

membri o con la rete elettrica, creando un'economia di scambio basata sull'energia solare. L'approccio dell'utilizzo condiviso dei pannelli fotovoltaici promuove l'efficienza, l'ottimizzazione delle risorse e la riduzione dell'impatto ambientale. Inoltre, favorisce l'adozione di energie rinnovabili e l'indipendenza energetica delle comunità locali.

2.3.4. Valorizzazione del fine vita

La gestione responsabile del fine vita dei moduli fotovoltaici è fondamentale per chiudere il ciclo di vita in modo sostenibile. Il riciclo dei materiali dei pannelli solari è una pratica importante che consente di recuperare preziose risorse e ridurre l'impatto ambientale. Il trattamento del fine vita dei pannelli fotovoltaici comprende metodi fisici, chimici e una combinazione di entrambi. Tra i metodi fisici, il metodo di recupero meccanico inizia con lo smontaggio manuale dei pannelli fotovoltaici e la rimozione della scatola di giunzione e del telaio in alluminio. Dopo lo smontaggio, il resto del pannello viene frantumato e classificato in base alle sue proprietà fisiche. A seguito della frantumazione, le particelle di etilene-vinilacetato (EVA) vengono separate usando un separatore vibrante a basse temperature. La separazione fisica si conclude solitamente con la setacciatura delle particelle di EVA. Per ottenere riciclati di alta purezza, possono essere utilizzate altre tecniche di separazione, come flottazione, separazione elettrostatica e separazione a correnti parassite. La separazione fisica ha meno impatti negativi sull'ambiente, ma produce riciclati di bassa purezza che richiedono ulteriori selezioni. La separazione elettrostatica ha il potenziale di separare i materiali in base alle loro proprietà elettriche, ma al momento non è ancora altamente efficiente. La separazione a correnti parassite utilizza un separatore a vortice elettrico, ma richiede particelle ottimizzate per il processo.

Il metodo di vagliatura meccanica seleziona e ordina i riciclati in base a dimensioni, forma, spessore e altre differenze, raggiungendo un tasso di recupero del silicio superiore all'85%. È preferito poiché è pratico, richiede meno energia e non utilizza reagenti chimici. Infine, il metodo di frantumazione a impulsi ad alta tensione offre maggiore selettività rispetto ai tradizionali metodi di frantumazione meccanica ma richiede tensioni e frequenze di impulso elevate (>100 kV), rendendo le applicazioni limitate a causa delle difficoltà nell'ottenere tali condizioni.

La pirolisi è un altro metodo fisico per il recupero dei pannelli fotovoltaici fuori uso. Questo processo termico avviene a temperature superiori a 400°C , rimuovendo sostanze organiche come il film EVA e il backplane. Questa procedura lascia il telaio in alluminio, il vetro temperato e le celle fotovoltaiche intatte e non coinvolge la frantumazione.

Successivamente, l'idrometallurgia estrae gli elettrodi metallici e le impurità dalle celle per ottenere silicio di alta purezza. Durante la pirolisi, il film EVA viene decomposto attraverso processi di deacetilazione e frattura a catena lunga, generando acido acetico e idrocarburi. La combinazione di pirolisi, azoto e decomposizione sottovuoto può recuperare specifici idrocarburi con conversione organica completa. Sebbene la pirolisi separi in modo efficace vetri, celle fotovoltaiche e backplane, richiede apparecchiature specializzate e ad alta intensità energetica. Tuttavia, può comportare impatti ambientali negativi e sfide legate ai sottoprodotti inquinanti e alla possibilità di danneggiare le celle di silicio. Inoltre, il trattamento termico ad alte temperature può generare rifiuti organici inquinanti.

I metodi chimici per il trattamento dei pannelli fotovoltaici fuori uso sono meno complessi dei metodi fisici e richiedono meno energia. Uno di questi è la dissoluzione con solvente inorganico che comporta l'immersione dei pannelli in soluzioni acide o alcaline. L'immersione scioglie il film EVA, lasciando le celle fotovoltaiche intatte. Gli acidi nitrico e fluoridrico sono spesso utilizzati come solventi. Esistono due approcci principali per rimuovere le impurità metalliche dalla superficie delle celle: il primo utilizza unicamente acidi, rimuovendo l'alluminio e il nitrato di silicio con acido fosforico e poi utilizzando una miscela di acido nitrico e fluoridrico per rimuovere l'argento e altre impurità. Il secondo approccio combina acidi e alcali, rimuovendo prima il nitrato di silicio e l'argento con una miscela di acido nitrico e fluoridrico, e poi rimuovendo l'alluminio con idrossido di sodio. Tuttavia, quest'ultimo metodo può causare scanalature sulla superficie dei wafer di silicio, compromettendo le prestazioni future. Alcuni studi suggeriscono che riscaldare l'acido nitrico a temperature più elevate può accelerare il processo di rimozione del film EVA. Indipendentemente dall'approccio, i wafer di silicio ottenuti sono di buona qualità e possono essere utilizzati per creare nuovi pannelli fotovoltaici. Tuttavia, il metodo di dissoluzione con solventi inorganici potrebbe non estrarre completamente tutti i metalli preziosi per il riciclaggio. Inoltre, l'uso di acido fluoridrico e altri solventi tossici può avere impatti ambientali negativi e i sottoprodotti tossici richiedono ulteriori trattamenti.

In alternativa, il metodo di dissoluzione con solventi organici coinvolge l'immersione del film EVA in solventi organici diversi, causando l'espansione e la dissoluzione del film. Questo processo separa i componenti del pannello, consentendo di estrarre il foglio di celle fotovoltaiche. L'espansione e la dissoluzione avvengono in parti reticolate e non

reticolate del film EVA. L'espansione crea spazio tra il vetro e il silicio, mentre la dissoluzione scioglie l'EVA in liquido. La fluidità dell'EVA nei solventi organici aumenta con la temperatura, e ciò può superare le proprietà adesive dell'EVA, facilitando la separazione delle celle fotovoltaiche. Diversi studi hanno dimostrato che dopo due giorni di immersione in solventi organici, le celle fotovoltaiche possono essere separate dal resto del pannello. Per accelerare il processo, è stato sviluppato un metodo con ultrasuoni che permette di dissolvere completamente l'EVA in 30 minuti. La possibilità di successo di questo metodo dipende dalla capacità di rimuovere completamente l'EVA senza danneggiare gli altri componenti. Anche se è efficace nel trattare solo l'EVA, la sua efficacia può variare in base alla coesione degli strati del pannello. Tuttavia, i solventi organici sono spesso tossici, volatili, costosi e difficili da smaltire, limitando la fattibilità su larga scala per il riciclaggio dei pannelli fotovoltaici fuori uso.

Infine, il metodo fisico-chimico combina vantaggi e svantaggi dei metodi fisici e chimici per il trattamento dei pannelli fotovoltaici fuori uso. I metodi di recupero meccanico vengono utilizzati per frantumare il pannello e i frammenti vengono poi immersi in un reagente acido per separare componenti come l'argento e il vetro. L'uso di metodi chimici e fisici insieme è sempre più utilizzato e il suo approccio è stato ottimizzato da vari ricercatori. Esempi includono l'utilizzo combinato di pirolisi e dissoluzione chimica per recuperare i wafer di silicio da pannelli fuori uso. Alcuni studi si sono concentrati sul trovare metodi di trattamento ottimali in base alle dimensioni dei frammenti, suggerendo che diversi metodi possono essere utilizzati in base alle dimensioni delle particelle. Il metodo fisico-chimico ha dimostrato un alto tasso di utilizzo e recupero dei rifiuti, ottimizzando l'efficienza dei processi. Tuttavia, ci sono sfide da superare, come l'ossidazione del silicio durante la frantumazione meccanica, la complessità e il consumo energetico. In questo contesto, è fondamentale trovare soluzioni pratiche ed efficienti dal punto di vista energetico. L'industria sembra incline ad utilizzare un approccio misto fisico-chimico per il trattamento dei pannelli fotovoltaici fuori uso, ma sono necessari ulteriori sforzi per ottimizzare ulteriormente il processo e affrontare le sfide rimanenti (Tan, 2022).

Diverse aziende leader nel settore dell'energia rinnovabile, si dedicano a programmi di riciclo per i moduli fotovoltaici, sfruttando il potenziale delle tecnologie di recupero e smaltimento ecocompatibili.

2.3.5. Best practice

Per trattare il fotovoltaico ho deciso di riportare i casi della più importante società energetica in Portogallo (EDP) e in Spagna (Iberdrola) nonché la prima fabbrica europea di pannelli fotovoltaici (3SUN).

Società	Pilastro economia circolare	Attività circolare
EDP con il supporto di Corticeira Amorim e di Isigenere	Input sostenibili	Sviluppo di un materiale innovativo, basato su un nuovo composito di sughero, testato per la prima volta per la centrale solare galleggiante di Alqueva, inaugurata nel 2022, e che consente di ridurre del 30% l'impronta di CO2 dei pannelli galleggianti. ²⁴
Iberdrola	Utilizzo condiviso del bene e prodotto come servizio	Iniziativa "solar grazing" in Portogallo che prevede il pascolo sostenibile di circa 300 pecore nei parchi fotovoltaici a beneficio degli allevatori, del bestiame e degli stessi parchi riducendo il rischio di incendi. L'approccio integrato combina la produzione di energia rinnovabile con le esigenze della comunità e promuove la rigenerazione del suolo, la biodiversità e la creazione di posti di lavoro a livello locale. ²⁵
3SUN	Input sostenibili Estensione della vita utile attraverso la progettazione modulare Valorizzazione del fine vita	TANGO (iTaliAN pv Giga factOry) a Catania è uno dei più grandi impianti di produzione fotovoltaica in Europa, nonché la prima fabbrica europea di moduli fotovoltaici bifacciali ad alte prestazioni. La produzione di 3Sun includerà celle fotovoltaiche a eterogiunzione bifacciale (B-HJT) che possono rispondere alla luce su entrambe le superfici anteriori e posteriori, catturando così più irradiazione solare. Attraverso un ambizioso programma di ricerca e sviluppo, i pannelli fotovoltaici saranno ulteriormente sviluppati per incorporare anche una struttura chiamata "Tandem", che utilizza due celle impilate che consentono di catturare più luce rispetto alle strutture a cella singola, producendo una maggiore efficienza complessiva. La combinazione di pannelli fotovoltaici bifacciali e struttura a celle "Tandem" consentiranno ai moduli fotovoltaici di superare il 30% di efficienza, garantendo una maggiore produzione media di energia. I 3 GW di pannelli che saranno prodotti ogni anno dalla Gigafactory possono generare fino a circa 5,5 TWh di elettricità rinnovabile all'anno, che dal punto di vista della sostenibilità hanno il potenziale per evitare l'equivalente di quasi 25 milioni di tonnellate di CO2 nei loro primi dieci anni di attività. Allo stesso modo, la produzione

²⁴ <https://www.edp.com/en/floating-solar-panels>

²⁵ <https://www.iberdrola.com/press-room/news/detail/iberdrola-launches-a-solar-grazing-in-portugal-with-some-300-sheep>

		generata dai pannelli della Gigafactory ha il potenziale per evitare l'acquisto di quasi 1,2 miliardi di metri cubi di gas all'anno, sostituiti da energia rinnovabile prodotta internamente. Verranno introdotti materiali riciclati nel processo produttivo, come la sostituzione del vetro dei pannelli con plastica riciclata. Inoltre, la fabbrica è fortemente impegnata nella ricerca e sviluppo in collaborazione con centri di ricerca internazionali, aziende leader del settore e start-up, con l'obiettivo di sviluppare nuovi processi di riciclo per la gestione dei moduli fotovoltaici a fine vita attraverso il recupero e il riutilizzo dei materiali, in un'ottica completamente circolare. Ad esempio, l'uso di procedure altamente automatizzate e di sofisticati algoritmi di intelligenza artificiale migliorerà notevolmente il controllo dei processi di produzione, portando a una significativa riduzione degli scarti.
--	--	---

Tabella 7. Best practice nel fotovoltaico

2.4. Sistemi di accumulo e di ricarica

La rapida espansione dell'energia elettrica da fonti rinnovabili richiede un sistema energetico più flessibile per consentire ad ampie quote di risorse rinnovabili di essere gestite in modo affidabile ed economico. Grazie alla sua capacità unica di assorbire, immagazzinare e poi restituire l'elettricità, i sistemi di accumulo sono una soluzione importante per affrontare una serie di problematiche tecniche ed economiche legate all'integrazione delle fonti rinnovabili. I sistemi di accumulo forniscono un'ampia gamma di servizi a supporto dell'integrazione del solare e dell'eolico risolvendo la loro variabilità e incertezza e agevolando il loro inserimento nel sistema elettrico. In un contesto di mercato, se autorizzati a partecipare al mercato all'ingrosso, i sistemi di accumulo possono consumare o immettere elettricità in risposta ai segnali di prezzo, in particolare aumentando la domanda quando i prezzi sono molto bassi o addirittura negativi. Se i prezzi negativi possono considerarsi un segno di inflessibilità del sistema, l'intervento dei sistemi di accumulo previene tali fenomeni consumando elettricità a fronte di una remunerazione. Quando abbinato al solare fotovoltaico, l'accumulo può evitare la cannibalizzazione dei profitti nelle ore centrali della giornata, aumentando la redditività del fotovoltaico e creando di conseguenza l'opportunità di installare più energia solare. Dal momento che la produzione di energia solare è molto probabile che superi la domanda di elettricità nelle ore centrali della giornata, i sistemi di accumulo

possono assorbire parte di questa elettricità e reimmetterla in una fase successiva, riducendo di fatto la decurtazione dovuta alla sovragerazione.

Secondo IRENA, la quota di energie rinnovabili nella produzione di energia elettrica a livello mondiale crescerà dall'attuale 25% all'86% nel 2050. La crescita è particolarmente forte per il solare fotovoltaico e l'eolico con un aumento dal 4,5% della produzione di energia elettrica nel 2015 a circa il 60% nel 2050. Dunque, nei sistemi elettrici attuali e a maggior ragione in quelli futuri che prevedono l'utilizzo di grandi percentuali di fonti di generazione elettrica intermittenti, come l'eolica e la solare, sarà richiesta una crescente scalabilità dell'accumulo di energia per adeguare l'offerta ai profili di domanda elettrica orari, giornalieri e stagionali. Di conseguenza, i sistemi di accumulo e di ricarica energetica rappresentano componenti chiave nella trasformazione del settore energetico verso modelli più sostenibili e decarbonizzati. Le proiezioni di sviluppo per lo stoccaggio o "*storage*" sono promettenti, IRENA stima infatti che a un potenziale raddoppiamento della diffusione delle rinnovabili, nell'arco temporale 2017-2030, dovrà corrispondere un triplicamento dello stock di energia elettrica disponibile nei sistemi di storage: dai 4,67 TWh del 2017 ad un range compreso tra gli 11,89 e i 15,72 TWh del 2030.

Lo stoccaggio comprende diverse tecnologie tra cui (a) le batterie, (b) l'accumulo termico che prevede la cattura e il rilascio di calore o freddo in un solido, liquido per creare energia su richiesta o compensare il fabbisogno energetico, (c) lo stoccaggio meccanico che sfrutta l'energia cinetica o gravitazionale per immagazzinare elettricità, i (d) sistemi idroelettrici di pompaggio in cui l'accumulo di energia si basa sull'utilizzo di grandi serbatoi d'acqua e rientra tra le forme più comuni di stoccaggio su scala industriale a livello globale e infine (e) l'idrogeno. L'accumulo di energia con l'idrogeno è in una fase ancora emergente e comporterebbe la conversione dell'idrogeno dall'elettricità tramite l'elettrolisi per essere successivamente immagazzinata in serbatoi. Ai fini di questo elaborato, tra le varie categorie di stoccaggio verrà data maggiore attenzione alle batterie, una tecnologia di accumulo elettrochimico composta da una o più celle e che a loro volta possono essere distinte in batterie chimiche avanzate, batterie a flusso e condensatori. I sistemi di stoccaggio dell'elettricità a batteria offrono un enorme potenziale di diffusione, di prestazione, durata e di riduzione dei costi. Secondo IRENA, i costi delle batterie agli ioni di litio potrebbero scendere al di sotto dei 200 dollari per chilowattora entro il 2030. Entro la stessa data i costi totali installati potrebbero diminuire tra il 50% e il 60%, con una percentuale ancora più promettente per i costi delle celle delle batterie, grazie

all'ottimizzazione degli impianti di produzione, a combinazioni migliori e a un uso ridotto dei materiali.

Infine, le batterie possono essere sia autonome che accoppiate a FER:

- a) i sistemi di accumulo e di ricarica autonomi o “*standalone*” sono dispositivi di stoccaggio energetico indipendenti non direttamente integrati con altre fonti rinnovabili. Questi sistemi immagazzinano l'energia proveniente da qualsiasi fonte disponibile, comprese le reti elettriche tradizionali, per poi rilasciarla quando necessario;
- b) i sistemi di accumulo “RES + BESS” (*Renewable Energy Systems + Battery Energy Storage Systems*) sono integrati a impianti di produzione di energia da fonti rinnovabili (RES). In questo approccio, ad esempio, i pannelli solari o le turbine eoliche vengono collegati a sistemi di stoccaggio delle batterie consentendo di catturare l'energia in eccesso prodotta dalle fonti rinnovabili quando è abbondante e rilasciarla quando la produzione è inferiore alla domanda.

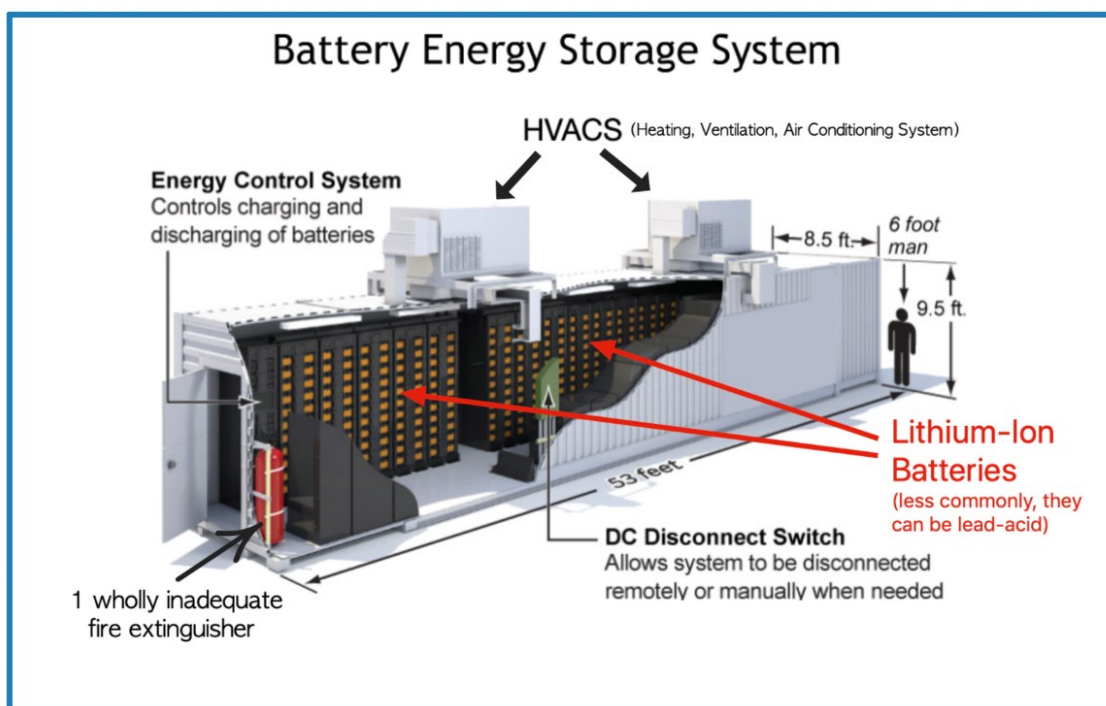


Figura 10²⁶. Sistema di accumulo di energia a batteria

2.4.1. Input sostenibili

²⁶ Fonte: www.solarbatterymanufacturer.com

La maggior parte dei sistemi di storage attualmente operativi nel mondo utilizza batterie al litio. Tali batterie utilizzano ioni di litio per il trasporto di carica elettrochimica tra i due elettrodi (anodo e catodo) durante il processo di carica e scarica. Oltre allo storage, queste batterie sono utilizzate in una vasta gamma di applicazioni, dalle auto elettriche ai dispositivi elettronici portatili. Il settore sta attraversando una vera e propria rivoluzione tecnologica poiché anno dopo anno si introducono nuovi materiali e soluzioni tecnologiche d'avanguardia, garantendo così maggiore efficienza, costi più bassi e un approccio *design-to-recycle*, mirato ad ottenere un prodotto sempre più sostenibile. L'universo delle batterie al litio si basa su un gruppo variegato di tecnologie, in cui il filo conduttore per accumulare energia è l'utilizzo degli ioni di litio, particelle con una carica positiva libera che possono facilmente entrare in reazione con altri elementi. Il funzionamento di carica e scarica delle batterie al litio, la cui struttura è composta da un elettrodo positivo (catodo in litio) ed un elettrodo negativo (costituito da un anodo in carbonio), si realizza tramite reazioni chimiche che consentono di accumulare e restituire l'energia. Le batterie al litio presentano caratteristiche tecnologiche molto interessanti per le applicazioni energetiche, tra cui la modularità, l'elevata densità energetica e l'alta efficienza di carica e scarica, che può superare il 90% a livello di singolo modulo. La tecnologia basata su Nichel, Manganese e Cobalto (NMC), con proporzioni variabili a seconda della formulazione, ha conosciuto negli ultimi anni una vera e propria rivoluzione dal punto di vista dell'aumento della produzione e della discesa dei prezzi, scesi secondo i dati di Bloomberg di circa l'85% dal 2010 al 2018. La difficoltà anche per questioni sociopolitiche nel reperimento di alcuni materiali, in primis il cobalto, sta spingendo i ricercatori a testare soluzioni alternative e innovative, in cui la percentuale di cobalto è sempre minore o in cui il litio può lavorare in abbinamento con altri elementi di più facile reperibilità come il silicio o, addirittura, l'ossigeno. L'utilizzo di silicio per gli anodi può aumentare la capacità energetica delle batterie, ma presenta sfide di espansione e contrazione durante il ciclo di carica/scarica.

Tra i materiali oggetto di ricerca per migliorare la sostenibilità delle batterie a ioni di litio è incluso il ferrofosfato di litio (LiFePO_4), ossia un materiale di catodo alternativo che utilizza il ferro al posto del cobalto. È meno energetico e presenta una maggiore stabilità termica, ma ha una densità energetica leggermente inferiore. Tuttavia, è considerato meno problematico dal punto di vista ambientale rispetto ai catodi a base di cobalto. Infine, alcune ricerche si stanno concentrando sullo sviluppo di batterie a ioni di litio a base di

materiali organici, che possono offrire una maggiore sostenibilità in termini di processi di produzione e smaltimento.

È importante notare che la scelta dei materiali per le batterie a ioni di litio coinvolge un equilibrio complesso tra prestazioni, costo, disponibilità e sostenibilità ambientale. Le tecnologie stanno evolvendo rapidamente e nuovi sviluppi potrebbero portare a soluzioni più ecologicamente sostenibili nel tempo.

Le batterie a flusso sono una delle soluzioni più indicate a cui si sta lavorando per il futuro degli impianti di storage connessi alle rinnovabili. Le batterie a flusso sono un tipo di batterie che immagazzinano energia in soluzioni elettrochimiche contenute in serbatoi esterni. Durante il funzionamento, queste soluzioni vengono pompate attraverso una cella elettrochimica dove avviene lo scambio di elettroni. Le batterie a flusso sono spesso considerate adatte per l'accumulo su larga scala e per applicazioni che richiedono cicli di carica e scarica frequenti. I sistemi di storage con batterie a flusso sono costruiti a partire da materie prime meno critiche dal punto di vista della disponibilità e con impatto ambientale limitato rispetto al litio, a vantaggio della sostenibilità. Dal punto di vista della sicurezza, le batterie a flusso godono di un sistema di funzionamento con meno criticità da gestire sempre rispetto agli ioni di litio, che necessitano invece di diversi sistemi di controllo per evitare danni da sovraccarico o surriscaldamento. Grazie alla loro particolare tecnologia, nelle batterie a flusso l'energia accumulata e la potenza erogata non sono intrinsecamente vincolate, una caratteristica che le rende particolarmente adatte per i sistemi di storage connessi alle rinnovabili, soprattutto negli utilizzi con lunghe durate di scarica. Le batterie a flusso possono offrire alcuni vantaggi in termini di sostenibilità ed economia circolare rispetto alle batterie al litio. Poiché utilizzano soluzioni elettrochimiche in serbatoi esterni, possono essere più facili da riciclare e riutilizzare rispetto alle batterie al litio, che possono contenere materiali più complessi. Queste batterie possono essere svuotate e riempite con nuove soluzioni elettrochimiche, riducendo la necessità di smaltire materiali critici come il litio, il cobalto o il nichel. Utilizzano materiali elettrochimici come vanadio, cromo o zinco per formare le soluzioni attive che possono comunque comportare problematiche legate all'estrazione e alla produzione, sebbene in alcuni casi possano essere meno critici rispetto ai materiali utilizzati nelle batterie al litio. In generale, le batterie a flusso sono considerate una tecnologia promettente per l'accumulo su larga scala e potrebbero presentare vantaggi in termini di sostenibilità ed economia circolare rispetto alle batterie al litio. Sono da

considerare una tecnologia in fase di crescita ma ulteriori sviluppi sono necessari per ridurre il costo ed aumentarne l'efficienza complessiva rispetto agli standard garantiti dai sistemi al litio.

Infine, dal punto di vista della sostenibilità degli input, oltre a materiali alternativi e innovativi per le batterie al litio e quelle a flusso, la ricerca e le sperimentazioni in corso individuano altre tecnologie più sostenibili, per le quali è richiesto un utilizzo ridotto di materie prime critiche dai punti di vista dell'approvvigionamento, della compatibilità ambientale e della sicurezza. Fra queste figurano soluzioni di accumulo dell'energia in forma meccanica, quali ad esempio gli stoccaggi in aria compressa (*Compressed Air Energy Storage* o CAES) di ultima generazione e gli stoccaggi in aria liquida (*Liquid Air Energy Storage* o LAES). Entrambe sono piuttosto simili poiché i CAES usano l'aria compressa, i LAES l'aria compressa e raffreddata fino alla liquefazione per accumulare energia. In ambo i casi, al fine di garantire efficienze complessive adeguate, è indispensabile accumulare il calore e il freddo che vengono sviluppati durante le fasi di compressione ed espansione dell'aria. La diffusione di impianti CAES, già dimostrati anche su taglia industriale, è stata finora limitata dalla necessità di avere a disposizione serbatoi naturali come cavità sotterranee, la cui diffusione e impiegabilità sono in natura scarse. Il LAES si propone di superare questo limite e presentarsi competitivo alla sfida con le altre tecnologie per conservare e riutilizzare al meglio l'energia rinnovabile. Altri sistemi di accumulo di energia rinnovabile sotto forma meccanica sono rappresentati dai volani (*flywheels*) e dai sistemi di accumulo gravitazionali. Nei volani l'energia è accumulata in forma cinetica rotazionale e sono particolarmente adatti a casi d'uso in cui è richiesta un'alta velocità di scarica e presentano dei costi che li rendono difficilmente competitivi con altre alternative. Nei sistemi di accumulo gravitazionali grandi masse vengono movimentate in altezza accumulando energia potenziale per poi renderla disponibile anche per lunghe durate di scarica in maniera continuativa ed efficace, grazie all'utilizzo di sofisticati sistemi di controllo.

Un'altra importante famiglia di sistemi di accumulo di energia non basati su batteria sono i sistemi di accumulo di energia termica (*Thermal Energy Storage* o TES). Affinché tali sistemi possano funzionare in maniera analoga ad una batteria, nella fase di carica vi è una conversione dell'energia elettrica rinnovabile in calore, che viene accumulato per poi essere convertito nuovamente in elettricità durante la fase di scarica, tramite un ciclo termodinamico. I sistemi TES presentano molte varianti, legate soprattutto alla fase di

carica e al sistema di accumulo. Nell’accezione più semplice, la carica avviene tramite resistenze, mentre nei sistemi più innovativi si sfrutta il principio della pompa di calore al fine di aumentare l’efficienza complessiva. Per quanto riguarda il mezzo di stoccaggio, si va dai Sali fusi a sistemi solidi basati su rocce come il basalto e cementi ad alta capacità termica, fino a letti fluidi sabbiosi o a sistemi con cambio di fase. Tutti i materiali utilizzati (rocce, tubature e involucri) sono da considerarsi ambientalmente sostenibili in quanto non sono presenti composti chimici, materiali critici o infiammabili.

Infine, queste tipologie di accumulo in fase di sviluppo presentano diversi vantaggi potenziali, tali da garantire loro nel prossimo futuro un ruolo da facilitatori nella diffusione dell’energia rinnovabile. Sono anzitutto tecnologie già consolidate, nelle quali è assente la degradazione significativa della capacità di accumulo nell’arco della vita dell’impianto. Non da ultimo, come già menzionato, sono più sostenibili dal punto di vista dei materiali utilizzati ai fini della loro produzione.

I sistemi analizzati, i cui costi diminuiscono notevolmente aumentando la taglia degli impianti e il rapporto energia/potenza, sono particolarmente promettenti negli scenari in cui vi è la maggiore necessità di accumulo di grande taglia e lunga durata. Una prospettiva che ben si interfaccia con le necessità di aumentare produzione e utilizzo di energia rinnovabile da qui al 2030, come previsto dagli accordi internazionali e dalle politiche energetiche dei vari Paesi.

2.4.2. Estensione della vita utile attraverso la progettazione modulare

La progettazione modulare delle batterie per l’accumulo di energia su larga scala rappresenta un approccio chiave per estendere la vita utile delle batterie e promuovere l’economia circolare nell’ambito dell’energia. Questo concetto si basa sulla creazione di batterie costituite da moduli interconnessi e autonomi, che possono essere facilmente sostituiti, riparati o aggiornati durante il ciclo di vita del sistema. Un corretto design modulare considera diversi aspetti che contribuiscono alla sostenibilità del processo di produzione, utilizzo e smaltimento delle batterie. Innanzitutto, la progettazione modulare mira a minimizzare l’impiego di materiali critici e a ottimizzare l’uso di risorse. I moduli possono essere realizzati utilizzando materiali sostenibili e a basso impatto ambientale, preferibilmente provenienti da fonti riciclate o rinnovabili. Inoltre, il design tiene conto dell’estrazione responsabile e dell’approvvigionamento etico di materie prime, riducendo la dipendenza da risorse limitate e garantendo un approccio più circolare. La facilità di smontaggio e sostituzione dei moduli è un altro elemento chiave. Una batteria modulare

è progettata in modo che i singoli moduli possano essere rimossi e sostituiti separatamente, senza compromettere l'intero sistema. Questo approccio consente di estendere la vita utile complessiva della batteria, poiché i moduli usurati o danneggiati possono essere sostituiti senza dover sostituire l'intera unità. Inoltre, i moduli rimossi possono essere soggetti a processi di riparazione, rigenerazione o riciclo specifici, massimizzando il recupero di materiali preziosi e riducendo il flusso di rifiuti. La standardizzazione e l'interoperabilità sono altrettanto cruciali. Una progettazione modulare ben pianificata considera l'adozione di standard comuni per i moduli, facilitando la sostituzione e l'aggiornamento da parte di diversi produttori. Questo promuove una concorrenza basata sulla qualità e sull'efficienza, spingendo verso l'innovazione continua e il miglioramento delle tecnologie, mentre facilita il recupero e il riutilizzo di moduli in un contesto di economia circolare.

2.4.3. Utilizzo condiviso del bene e prodotto come servizio

I sistemi di accumulo possono essere condivisi e sfruttati in maniera efficiente da più attori, come imprese, comunità energetiche e servizi pubblici, al fine di ottimizzare l'utilizzo delle risorse energetiche e promuovere la flessibilità della rete elettrica. Anche in questo caso le comunità energetiche giocano un ruolo essenziale in ottica circolare poiché aggregano batterie di accumulo di energia da diverse fonti e le mettono a disposizione per servizi di bilanciamento della rete. La realizzazione di un corretto utilizzo di un prodotto come servizio per i sistemi di accumulo di energia richiede una gestione intelligente e automatizzata delle batterie. Le tecnologie avanzate di monitoraggio, controllo e previsione consentono di ottimizzare il flusso di energia in entrata e uscita dalle batterie, in modo da massimizzare il beneficio economico per gli utenti condivisi. Le piattaforme digitali e i sistemi di gestione dell'energia consentono agli operatori di gestire in modo efficiente le batterie, adattando dinamicamente il loro funzionamento alle esigenze della rete e agli schemi di consumo energetico.

Inoltre, l'aspetto economico e finanziario svolge un ruolo chiave nell'implementazione dell'utilizzo condiviso delle batterie per l'accumulo di energia. Modelli di business innovativi, come l'offerta di contratti di servizio o di capacità, permettono di creare incentivi per la partecipazione degli utenti e di generare flussi di ricavi condivisi. Questo approccio non solo promuove la sostenibilità economica dei sistemi di accumulo, ma favorisce anche la diffusione su larga scala di tecnologie energetiche avanzate.

2.4.4. Valorizzazione del fine vita

MECHANICAL	PYROMETALLURGICAL	HYDROMETALLURGICAL	THERMAL PRE-TREATMENT + HYDROMETALLURGICAL
Dismantling to cell or pack level	High-temperature processing aimed at recovery or refinement of metals at elevated temperature	Treatment of aqueous solutions to separate components	Low-temperature thermal treatment aimed at removing organic compounds and graphite (carbon oxidation)
Crushing (hammer mill)		Black mass is treated by leaching, cementation, purification, solvent extraction or precipitation methods to extract valuable components	Allows phase transformation into water soluble lithium carbonate
Classifying	Works under a separation principle producing two phases		
Scrap fractions generated	Slag phase where Li, Mn, Al are lost		
Black mass with valuable metals (Co, Ni, Mn, Li, etc. are recovered)	Recovers Co, Ni, Cu, Fe in a metal phase (alloy)		
	Electric arc furnace and shaft furnace are used		Has low energy requirements

Figura 11²⁷. Percorsi di riciclo dei sistemi di accumulo di energia elettrica con batterie agli ioni di litio

Secondo McKinsey, la domanda di batterie agli ioni di litio crescerà di circa il 33% annuo per raggiungere circa 4.700 GWh entro il 2030 e la catena del valore delle batterie agli ioni di litio offrirà opportunità di guadagno per oltre 400 miliardi di dollari entro il 2030 (Global Battery Alliance, 2023). Lo studio prevede la creazione da parte dei produttori di batterie di nuove opportunità nel riciclaggio man mano che il mercato matura e di una catena di approvvigionamento domestica a circuito chiuso che includa la raccolta, il riciclaggio, il riutilizzo o la riparazione delle batterie agli ioni di litio usate. L'industria del riciclaggio da sola potrebbe creare profitti pari a 6 miliardi di dollari entro il 2040.

Secondo i dati del Global Battery Alliance, entro il 2030, 11 milioni di tonnellate di batterie agli ioni di litio arriveranno a fine vita. Una strategia chiave per la valorizzazione del fine vita delle batterie è il riciclaggio di materiali preziosi, come il litio, il cobalto, il nichel e l'alluminio che possono essere estratti e rigenerati per essere utilizzati nella produzione di nuove celle o in altre applicazioni industriali. Processi avanzati di riciclaggio, come la pirometallurgia e l'idrometallurgia, consentono di recuperare in modo efficiente e selettivo i componenti delle batterie, riducendo la dipendenza dalle materie prime vergini e contribuendo alla riduzione del consumo energetico e delle emissioni di gas serra associati alla loro estrazione.

Oltre al riciclaggio, un'altra opzione importante è la riutilizzazione delle batterie per scopi secondari. Le batterie che raggiungono la fine della loro vita operativa per l'accumulo di

²⁷ Fonte: <https://www.platformelectromobility.eu/>

energia possono ancora conservare una capacità residua utile per altre applicazioni, come lo stoccaggio di energia in sistemi domestici o industriali di minori dimensioni. Questa pratica contribuisce a prolungare ulteriormente il ciclo di vita delle batterie e a sfruttarne appieno il valore residuo. La gestione responsabile del fine vita delle batterie richiede anche il monitoraggio e la tracciabilità dei materiali e delle prestazioni dei moduli nel tempo. L'implementazione di sistemi di identificazione elettronica o codici a barre può consentire di tenere traccia dell'origine e delle caratteristiche delle batterie durante il loro ciclo di vita, semplificando il processo di smantellamento, riciclaggio e riutilizzo. Questi dati possono guidare decisioni informate sulla manutenzione, l'ottimizzazione delle operazioni e la sostituzione dei moduli in base alle reali esigenze, riducendo gli sprechi e massimizzando l'utilizzo delle risorse. È importante infine avere una visione ampia e far interagire i vari settori in uno sforzo condiviso di riciclo. Ad esempio, il settore automotive può erogare batterie di veicoli a quello energetico assicurandogli una seconda vita in qualità di sistema di accumulo. L'elemento innovativo è rappresentato dall'integrazione di batterie provenienti da più case automobilistiche riducendo il rischio di fornitura e aumentando la modularità del sistema.

In conclusione, attraverso il riciclaggio, la riutilizzazione e la tracciabilità dei materiali, è possibile massimizzare l'efficienza nell'uso delle risorse e ridurre l'impatto ambientale delle tecnologie di accumulo. Questo approccio non solo contribuisce alla sostenibilità ambientale, ma offre anche opportunità per la creazione di nuovi mercati e modelli di business basati sulla gestione responsabile delle batterie in fase di fine vita.

2.4.5. Best practice

Per i sistemi di accumulo ho deciso di inserire la società più popolare nello scenario internazionale, che ha subito una rapida crescita negli ultimi anni (Tesla), una realtà del Regno Unito e un consorzio belga e francese impegnato nel settore delle batterie per le auto elettriche.

Società	Pilastro economia circolare	Attività circolare
Tesla	Input sostenibili Estensione della vita utile attraverso la progettazione modulare Valorizzazione del fine vita	La Gigafactory in Nevada è l'edificio più grande al mondo interamente alimentato da energia solare con il più alto volume di produzione di batterie (Powerwall e Powerpack) Sistema a ciclo chiuso in cui (i) l'elettronica (fili, metalli, moduli) viene rimossa, testata e riutilizzata (ii) i moduli di litio vengono congelati con l'azoto liquido che li rende inerti e sicuri (iii) i moduli vengono tritati e frantumati e divisi in lanugine, cobalto, rame e liquame (iv) il rame-

		cobalto viene venduto ai centri di recupero che lo scompongono ulteriormente in cobalto, nichel, rame e alluminio ottenendo un impasto liquido riutilizzato per rivestire gli apparecchi (v) il glicole propilenico viene riciclato localmente una volta estratto dai tubi di raffreddamento Sistema di scambio delle batterie in cui i clienti usufruiscono di crediti per la restituzione dei moduli batteria usati Centri assistenza che recuperano e riciclano al 100% i materiali delle batterie agli ioni di litio. I materiali vengono raffinati e inseriti in una cella sino al fine vita, successivamente sono riciclati per recuperare materiali preziosi da riutilizzare più e più volte preferendo un approccio di estensione della vita piuttosto che di riciclo.²⁸
Acleron	Estensione della vita utile attraverso la progettazione modulare	Batterie agli ioni di litio progettate per facilitare la facile sostituzione dei componenti ed analisi avanzata in grado di rilevare quali componenti necessitano di manutenzione consentendo una vita fino a 25 anni con un'adeguata manutenzione, più del doppio della durata delle tradizionali batterie agli ioni di litio.
Solvay e Veolia	Valorizzazione del fine vita	Consorzio di economia circolare per i metalli critici utilizzati nelle batterie agli ioni di litio per le auto elettriche. Veolia gestisce già un impianto di riciclaggio per le batterie basato su un processo idrometallurgico interno per l'estrazione selettiva dei metalli. Solvay apporta competenze per ottimizzare l'estrazione e la purificazione di metalli critici come cobalto, nichel e litio e mira a consentire il riutilizzo dei metalli come materie prime per produrre nuove batterie.

Tabella 8. Best practice nei sistemi di accumulo

2.5. Reti e infrastrutture

Le reti o infrastrutture energetiche sono sistemi complessi di trasmissione, distribuzione e fornitura di energia elettrica e gas naturale che connettono centrali di generazione, sottostazioni, reti di distribuzione e consumatori finali. Il loro scopo principale è garantire la fornitura affidabile, sicura ed efficiente di energia ai consumatori in tutto il territorio. L'utilizzo delle reti è cruciale per soddisfare il fabbisogno energetico delle comunità, delle industrie e delle imprese, supportando una vasta gamma di applicazioni che vanno dalla luce elettrica nelle case al funzionamento di macchinari industriali. Inoltre, le reti energetiche fungono da ponte tra le fonti di energia primaria, come centrali eoliche, solari,

²⁸ <https://www.tesla.com/support/sustainability-recycling>

idroelettriche e termiche, e i punti di consumo, consentendo la trasmissione dell'energia elettrica attraverso lunghe distanze. L'evoluzione delle tecnologie e la crescente integrazione delle energie rinnovabili hanno reso necessaria l'adozione di soluzioni più avanzate, quali le *smart grid* o reti intelligenti.

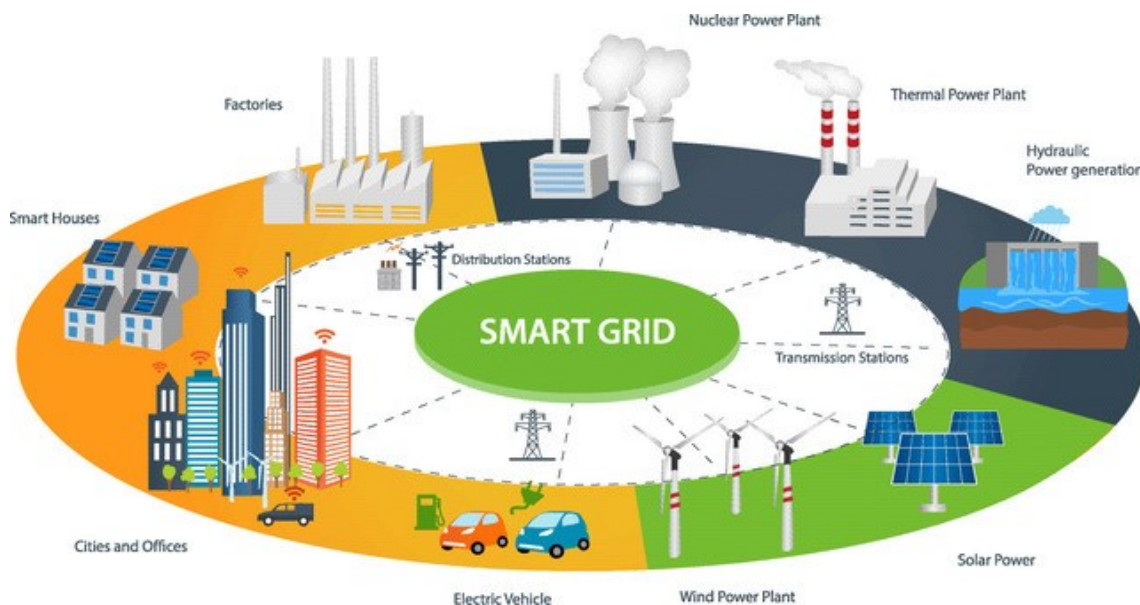


Figura 12²⁹. Reti intelligenti o smart grid

Le smart grid sono una versione modernizzata e digitalizzata delle tradizionali reti energetiche. Integrando tecnologie dell'informazione e delle comunicazioni, sensori, automazione e intelligenza artificiale, le smart grid sono in grado di monitorare in tempo reale la produzione, la distribuzione e il consumo di energia. Ciò consente di ottimizzare dinamicamente il flusso energetico, gestire la domanda e l'offerta in modo più efficiente, ridurre gli sprechi e rispondere in modo rapido e flessibile alle variazioni del carico energetico. Le reti intelligenti sono funzionali alla decarbonizzazione per diversi motivi. Innanzitutto, permettono una maggiore integrazione delle fonti di energia rinnovabile, grazie alla loro capacità di adattarsi ai flussi variabili di produzione. Inoltre, consentono una gestione più accurata ed efficiente dell'energia, contribuendo a ridurre la necessità di utilizzare risorse non rinnovabili. Le smart grid favoriscono l'adozione di veicoli elettrici, l'accumulo di energia e la gestione attiva della domanda, rendendo possibile l'utilizzo ottimale delle risorse energetiche disponibili. Infine, promuovono la decentralizzazione

²⁹ Fonte: <https://apar.com/>

dell'energia e l'adozione di comunità energetiche, creando un ambiente favorevole alla produzione distribuita e alla partecipazione attiva dei consumatori.

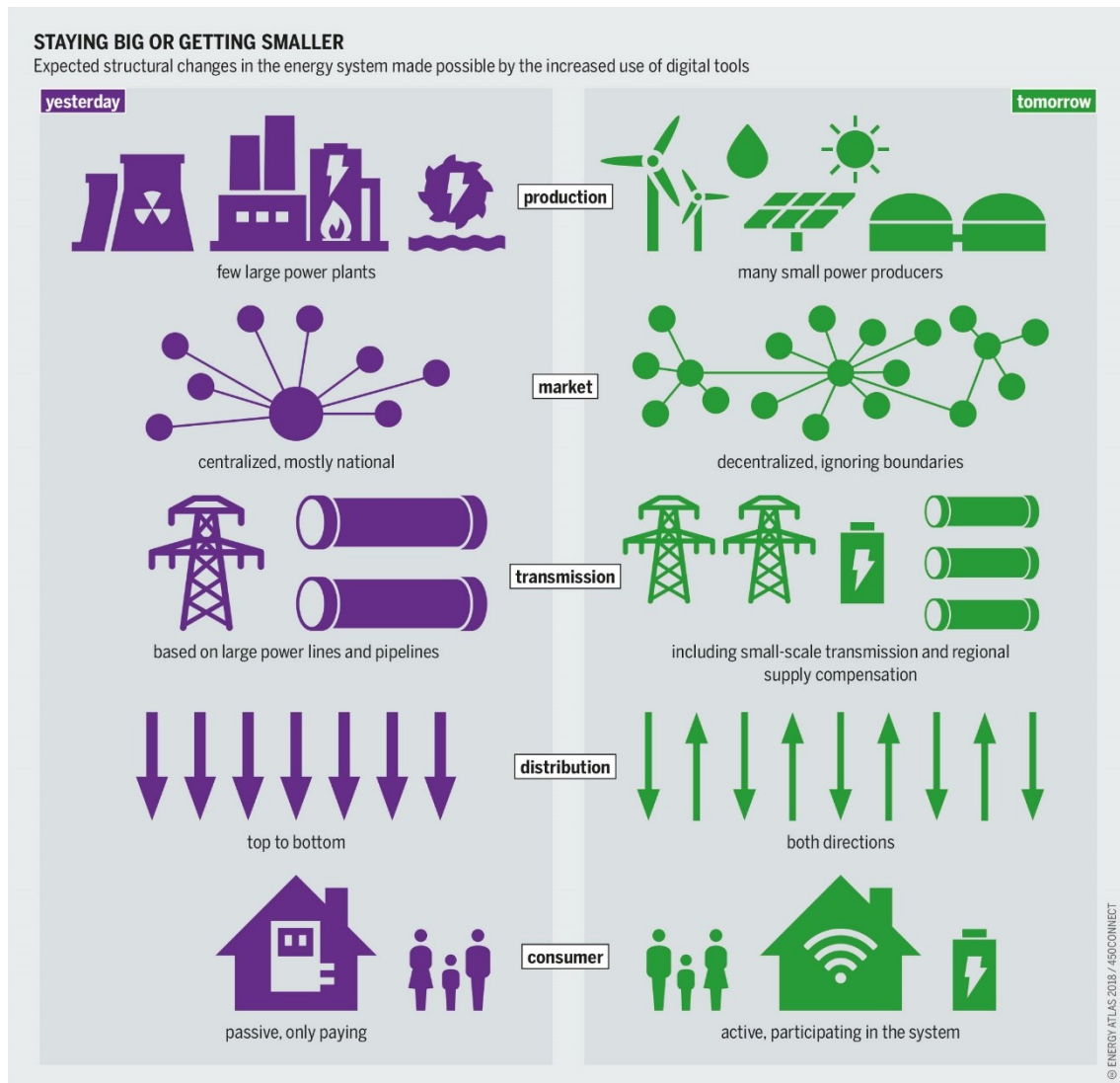


Figura 13³⁰. Bidirezionalità delle reti intelligenti

2.5.1. Input sostenibili

Le smart grid, o reti intelligenti, sono costituite da una combinazione di tecnologie dell'informazione, dell'automazione e delle comunicazioni integrate nelle infrastrutture energetiche esistenti. Queste tecnologie consentono una gestione più sofisticata e dinamica della produzione, della trasmissione e della distribuzione dell'energia elettrica.

³⁰ P.F. Borowski, 2023. Digital Transformation and Prosumers Activities in the Energy Sector. In: Kahraman, C., Haktanır, E. (eds) Intelligent Systems in Digital Transformation. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 549. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-16598-6_6

Alcuni componenti e materiali comunemente utilizzati nella produzione delle smart grid includono:

- 1. Sensori e dispositivi di misurazione:** Questi dispositivi rilevano in tempo reale dati sul flusso di energia, la tensione, la corrente e altri parametri fondamentali nelle reti energetiche. Sono spesso realizzati utilizzando materiali come il silicio per la produzione dei sensori e i metalli per i circuiti elettronici.
- 2. Sistemi di comunicazione:** Le reti intelligenti richiedono una comunicazione bidirezionale tra diversi punti della rete per trasmettere dati e comandi. I materiali utilizzati per le infrastrutture di comunicazione includono cavi in fibra ottica, cavi di rame e dispositivi di comunicazione wireless.
- 3. Apparecchiature di controllo e automazione:** Queste apparecchiature consentono il monitoraggio e il controllo automatizzato delle reti energetiche. Sono costituite da componenti elettronici e dispositivi di controllo, spesso realizzati con materiali come il rame, l'alluminio e vari componenti elettronici.
- 4. Sistemi di archiviazione dell'energia:** Le smart grid possono includere sistemi di accumulo di energia, come batterie, per immagazzinare l'energia in eccesso e rilasciarla quando necessario. Le batterie a ioni di litio sono attualmente le più comuni, ma, come descritto nel capitolo precedente, diverse ricerche sono in corso per garantire accumuli più sostenibili e circolari.
- 5. Software e piattaforme di gestione:** Le smart grid richiedono software avanzati per analizzare i dati in tempo reale, ottimizzare il flusso di energia e prendere decisioni intelligenti sulla gestione delle reti. Questi software possono essere basati su algoritmi di intelligenza artificiale e sono eseguiti su piattaforme informatiche con componenti elettronici e di elaborazione.

Per rendere le smart grid più sostenibili, si potrebbe considerare l'adozione di materiali eco-compatibili e riciclabili nella produzione di dispositivi e componenti. Ad esempio, l'uso di materiali compositi a base di fibre naturali o riciclate potrebbe ridurre l'impatto ambientale della produzione delle apparecchiature. Inoltre, lo sviluppo di nuove tecnologie di accumulo dell'energia, come analizzato nel paragrafo 2.4., che utilizzano materiali meno critici e più abbondanti potrebbe contribuire alla sostenibilità delle reti intelligenti.

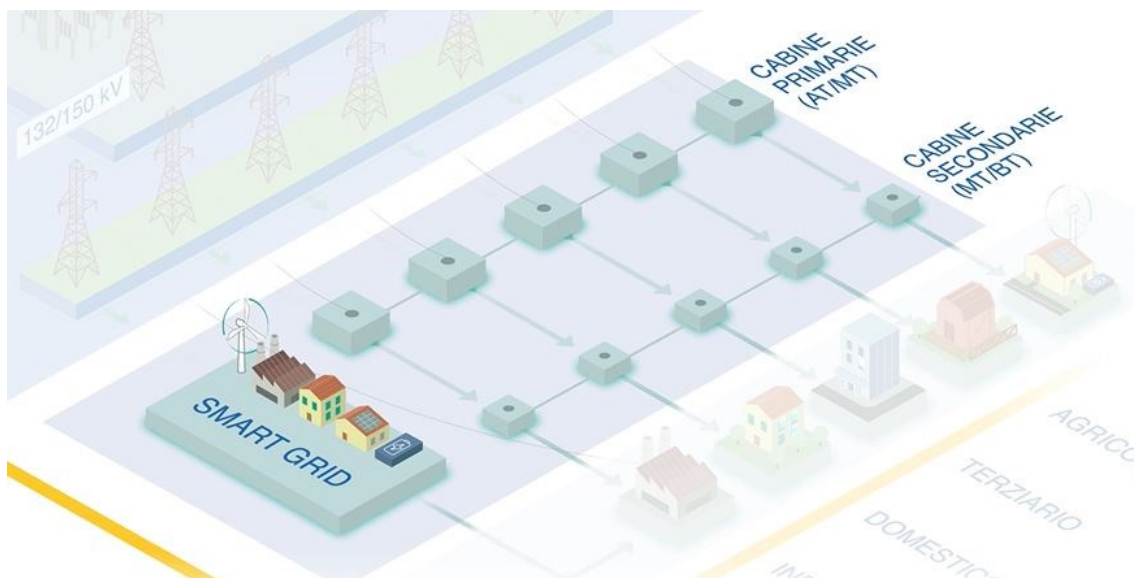


Figura 14³¹. Sistema elettrico nazionale in Italia: Distribuzione di energia elettrica

2.5.2. Estensione della vita utile attraverso la progettazione modulare

Come per le precedenti tecnologie, la progettazione modulare delle smart grid può contribuire significativamente all'estensione della loro vita utile attraverso la progettazione di componenti intercambiabili e moduli fisici autonomi che siano facilmente sostituibili e aggiornabili in caso di guasto o obsolescenza, senza influire sul funzionamento globale del sistema e senza dover sostituire l'intera infrastruttura. In questo contesto è fondamentale la standardizzazione, ovvero l'adozione di standard e interfacce comuni per i componenti delle smart grid che facilita l'integrazione di nuovi moduli o tecnologie senza la necessità di modifiche complesse all'infrastruttura. Gli aggiornamenti dei software inoltre consentono di implementare sistemi di controllo e gestione basati su software che possano essere aggiornati per adattarsi a nuove esigenze o tecnologie emergenti. Anche la scalabilità e l'adattabilità ai cambiamenti sono concetti da tenere a mente nella progettazione delle smart grid poiché consentono la prima di ampliarle facilmente o ridurle in base alle esigenze energetiche e la seconda di gestire variazione nel carico energetico dovuta dall'aggiunta di nuove fonti rinnovabili. Ai fini di rilevare eventuali problematiche in modo tempestivo e prevedere le esigenze di manutenzione, la manutenzione predittiva consente di intervenire preventivamente prima che si verifichino guasti gravi.

³¹ Fonte: Terna - Rete Elettrica Nazionale S.p.A.

Un recente studio (Helmi et al., 2023) introduce una progettazione scalabile e modulare passo dopo passo delle smart grid di distribuzione proponendo una procedura *plug-and-play* che consente di fornire l'intercambiabilità desiderata per le linee e zone all'interno di una rete di distribuzione elettrica. La riconfigurazione della rete di distribuzione richiede la possibilità di collegare e disconnettere gli interruttori ovunque sia necessario all'interno della rete. Pertanto, ogni ramo della rete è dotato di un interruttore intelligente che può essere controllato a distanza tramite una piattaforma IoT centralizzata. Il framework proposto, utilizzando recenti tecniche meta-euristiche, impiega la riconfigurazione della rete per l'ottimizzazione del funzionamento della smart grid. Vengono presi in considerazione la maggior parte degli aspetti pratici, come il costo e i parametri della linea. Oltre all'analisi del caso base, sono state considerate sia l'interruzione di linea che l'ingresso di linea in diverse posizioni della rete. I risultati della simulazione rivelano l'estesa applicabilità intelligente del framework, nonché una funzionalità più efficiente in termini di minimizzazione di perdite di potenza e miglioramento della tensione minima rispetto agli approcci tradizionali per migliorare le prestazioni delle smart grid attraverso la riconfigurazione della rete (Helmi et al., 2023).

2.5.3. Utilizzo condiviso del bene e prodotto come servizio

La condivisione di un'infrastruttura di distribuzione energetica, come una smart grid o una cabina secondaria, può essere utilizzata in maniera condivisa attraverso strategie e modelli di condivisione delle risorse energetiche. Nel paragrafo 2.3.3. si è analizzata la figura del prosumer e di come l'energia possa essere prodotta attivamente dal consumatore e successivamente reimmessa nella rete. Nei contesti in cui le smart grid supportano la produzione di energia da fonti rinnovabili da parte dei prosumer, l'energia in eccesso può essere condivisa con la rete e distribuita ad altri utenti o carichi nelle vicinanze. Questo scambio può avvenire attraverso una tariffazione dinamica che incentiva la vendita di energia elettrica prodotta in eccesso. Le smart grid possono facilitare la condivisione di stazioni di ricarica alle quali gli utenti possono accedere per caricare i veicoli elettrici e contribuire allo sviluppo di una rete di mobilità elettrica condivisa. Le smart grid possono inoltre gestire sistemi di stoccaggio energetico condiviso, consentendo agli utenti di immagazzinare l'energia in eccesso durante i periodi di produzione eccessiva e prelevarla quando ne hanno bisogno. Questo può bilanciare il carico sulla rete e migliorare l'utilizzo delle risorse energetiche. Inoltre, le smart grid possono essere *microgrid comunitarie*, ossia reti locali che funzionano sia in modo

autonomo sia connesso alla rete principale. Le comunità possono creare microgrid che includono fonti rinnovabili locali, sistemi di stoccaggio e smart grid, consentendo loro di condividere e distribuire l'energia all'interno della comunità. Infine, le smart grid possono consentire una gestione flessibile della domanda energetica, adattando il consumo in base alle esigenze della rete. Gli utenti possono partecipare attivamente a programmi di gestione della domanda, consentendo alla rete di bilanciare l'offerta e la domanda energetica in tempo reale.

Condividendo le infrastrutture energetiche si ottimizza l'utilizzo delle risorse, si riducono gli sprechi, si migliora l'efficienza e promuove un sistema energetico più resiliente. La condivisione può avvenire attraverso tecnologie digitali, come l'IoT e la comunicazione bidirezionale tra i dispositivi, consentendo una gestione intelligente e dinamica delle risorse energetiche condivise.

Per quanto riguarda invece l'adozione del modello PaaS, l'infrastruttura stessa diventa un servizio erogato agli utenti anziché essere posseduta o gestita direttamente da loro. Gli utenti usufruiscono dell'infrastruttura energetica senza doversi preoccupare della sua gestione, manutenzione o aggiornamento che viene invece curata da terzi in qualità appunto di servizio che garantisce il funzionamento affidabile nel tempo della rete. Inoltre, l'infrastruttura può essere scalabile e adattabile alle esigenze in evoluzione degli utenti trasformandosi di fatto in un servizio e consentendo agli utenti di beneficiare di soluzioni su misura senza dover investire in nuove attrezzature. Le tecnologie avanzate integrate nelle reti, come l'intelligenza artificiale, l'analisi dei dati e l'automazione, per ottimizzare l'uso dell'energia e migliorare l'efficienza operativa, costituiscono di fatto un servizio.

In sintesi, il modello PaaS trasforma l'infrastruttura di distribuzione energetica in un servizio completo e personalizzato, consentendo agli utenti di usufruire di soluzioni energetiche avanzate senza dover possedere o gestire direttamente l'infrastruttura stessa.

2.5.4. Valorizzazione del fine vita

Molti componenti elettronici di cui sono composte le reti e le infrastrutture energetiche, cavi e apparecchiature possono essere recuperati per essere riutilizzati in altre applicazioni o come parti di ricambio. I componenti o le parti dell'infrastruttura che sono ancora in buone condizioni possono essere riutilizzati in altri contesti. Ad esempio, le cabine primarie e secondarie possono essere smontate e le parti ancora funzionanti

possono essere integrate in nuovi impianti. I materiali che non possono essere riutilizzati direttamente possono essere sottoposti a processi di riciclo. Ad esempio, i metalli, il rame e l'alluminio presenti nelle reti di distribuzione elettrica possono essere estratti e riciclati per produrre nuovi materiali, riducendo la necessità di materie prime vergini. Le smart grid coinvolgono una vasta gamma di componenti, tra cui reti elettriche intelligenti, sensori, dispositivi di monitoraggio e sistemi di gestione. Ad esempio, sensori e dispositivi di comunicazione possono essere recuperati e riutilizzati, mentre componenti elettronici possono essere richiedere processi di riciclo più complessi. I tassi di recupero, riutilizzo e riciclo ad ogni modo variano a seconda dell'infrastruttura specifica e dei materiali impiegati. Un esempio concreto può essere l'installazione di sostegni delle linee elettriche realizzati con materiale recuperato dai pali dismessi con l'obiettivo di sviluppare una nuova gestione del fine vita dei sostegni in cemento armato utilizzati nelle reti di media e bassa tensione. Una sperimentazione condotta da Enel ha dimostrato la possibilità di trattare il materiale dei pali dismessi e riutilizzarlo come aggregato riciclato fino al 100% nella produzione dei nuovi sostegni.

2.5.5. Best practice

Sia per la difficoltà di reperire informazioni circa altri operatori di rete, sia per le caratteristiche delle infrastrutture energetiche, intese come reti di trasmissione e di distribuzione di energia elettrica, che costituiscono attività in monopolio naturale e legale, è riportata una sola società tra le best practice, ovvero Enel, impegnata in ingenti investimenti nelle reti per garantire un sistema nazionale resiliente.

Società	Pilastro economia circolare	Attività circolare
Enel	Input sostenibili	Realizzazione delle “Enel Box”, ovvero delle cabine secondarie con un design rivoluzionario a partire da meno componenti e materiali più sostenibili, che hanno ridotto l'impronta di carbonio delle infrastrutture e facilitato l'integrazione armoniosa delle sottostazioni ai contesti urbani, rurali, moderni e storici. La progettazione è basata sui principi della sostenibilità e su un approccio “ <i>circular by design</i> ” in modo che gli elementi architettonici possano essere adattati a vari contesti di utilizzo. Il progetto nasce dall'approccio <i>Grid Futurability</i> che ha consentito, grazie anche alla collaborazione con diversi stakeholder, di ripensare i componenti chiave delle reti per realizzare reti più sostenibili, resilienti e interattive accelerando al contempo la transizione energetica. Oltre al nuovo design, le sottostazioni massimizzano la capacità di ospitare tecnologie avanzate di digitalizzazione, tra cui dispositivi con capacità computazionale decentralizzata e

		trasformatori più sostenibili, in grado di gestire in maniera ottimale la generazione distribuita e flussi elettrici sempre più bidirezionali. Le cabine secondarie sono infrastrutture elettriche essenziali per la trasformazione in media-bassa tensione (MT/BT) e per il controllo e la protezione della rete. Fanno parte del mercato della distribuzione elettrica, un mercato regolato in cui operano poche società in regime di concessione, gestendo le reti locali dell'energia elettrica a bassa tensione e realizzandone la manutenzione. Il Gruppo Enel ne ha 245.000 in Italia e 148.000 che necessitano però di un potenziamento ed un ammodernamento affinché possano aumentare la quantità di energia da fonti rinnovabili ed elettrificare i consumi energetici. Questo obiettivo è facilitato dai piani nazionali attualmente vigenti, in Italia ad esempio dal Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR), che verrà affrontato più nel dettaglio nel capitolo 3, che ha consentito ad Enel di aggiudicarsi 3,5 miliardi di euro per la trasformazione delle reti intelligenti. Inoltre, le cabine possono essere isolate da materiali più sostenibili come ad esempio l'estere naturale, un olio vegetale totalmente biodegradabile e con ridotto livello di emissioni di CO₂. L'impiego dell'estere naturale come isolante, al posto del tradizionale olio minerale, permette infatti di ridurre l'impronta carbonica, dalla produzione fino allo smaltimento.
--	--	--

Tabella 9. Best practice nelle infrastrutture energetiche

2.6. Mobilità elettrica

La mobilità elettrica sta rapidamente trasformando il panorama dei trasporti moderni, offrendo un'alternativa ecologica e sostenibile ai veicoli a combustione interna. Questo nuovo paradigma si basa su un ecosistema diversificato e in continua evoluzione, comprendente veicoli elettrici, batterie ad alta capacità, colonnine di ricarica e tecnologie innovative come il Vehicle-to-Grid (V2G). I veicoli elettrici costituiscono il cuore di questa rivoluzione, rappresentando una classe di veicoli alimentati esclusivamente da energia elettrica immagazzinata nelle batterie. Questi veicoli offrono prestazioni agili e silenziose, eliminando le emissioni nocive e riducendo l'inquinamento atmosferico. Le batterie, anch'esse al centro dell'ecosistema, sono il motore dell'autonomia dei veicoli elettrici, immagazzinando e rilasciando l'energia necessaria per la guida. La continua ricerca sta conducendo a sviluppi tecnologici che aumentano l'autonomia delle batterie,

migliorandone al contempo l'efficienza, la durata e la sostenibilità. Un altro pilastro fondamentale dell'ecosistema della mobilità elettrica è costituito dalle colonnine di ricarica. Queste infrastrutture pubbliche e private forniscono una rete essenziale per la ricarica dei veicoli elettrici, consentendo ai conducenti di rifornirsi di energia elettrica durante le loro attività quotidiane. La distribuzione capillare delle colonnine di ricarica è fondamentale per rendere praticabile e conveniente l'adozione dei veicoli elettrici da parte dei consumatori. Inoltre, il concetto di V2G sta guadagnando terreno come parte integrante dell'ecosistema della mobilità elettrica. Il V2G consente ai veicoli elettrici di agire come risorse bidirezionali, consentendo loro di immagazzinare energia dalla rete e restituirla ad essa quando necessario. Questa tecnologia offre opportunità di stabilizzazione della rete e di ottimizzazione dei costi energetici, consentendo ai veicoli elettrici di diventare parte attiva del sistema energetico.

2.6.1. Input sostenibili

Trattandosi il veicolo di un mezzo tipicamente appartenente al settore dei trasporti e non prettamente a quello energetico, ed essendo la sua alimentazione costituita da una batteria elettrica, di cui si sono analizzati i cinque pilastri dell'economia circolare al 2.4, e al contempo trattandosi il V2G di una formula che consente di cedere l'energia immagazzinata nelle batterie di un veicolo elettrico alla rete e dunque una sorta di ponte tra le batterie e la rete, di cui si è discusso al 2.5, in questo e nei futuri paragrafi analizzeremo i cinque pilastri dell'economia circolare limitatamente alla parte mancante di questo ecosistema della mobilità elettrica: le infrastrutture o colonnine di ricarica.

Le infrastrutture di ricarica si rendono necessarie in questo ecosistema poiché forniscono corrente continua (DC) per ricaricare le auto elettriche, a differenza della corrente alternata (AC) che alimenta la rete elettrica domestica.

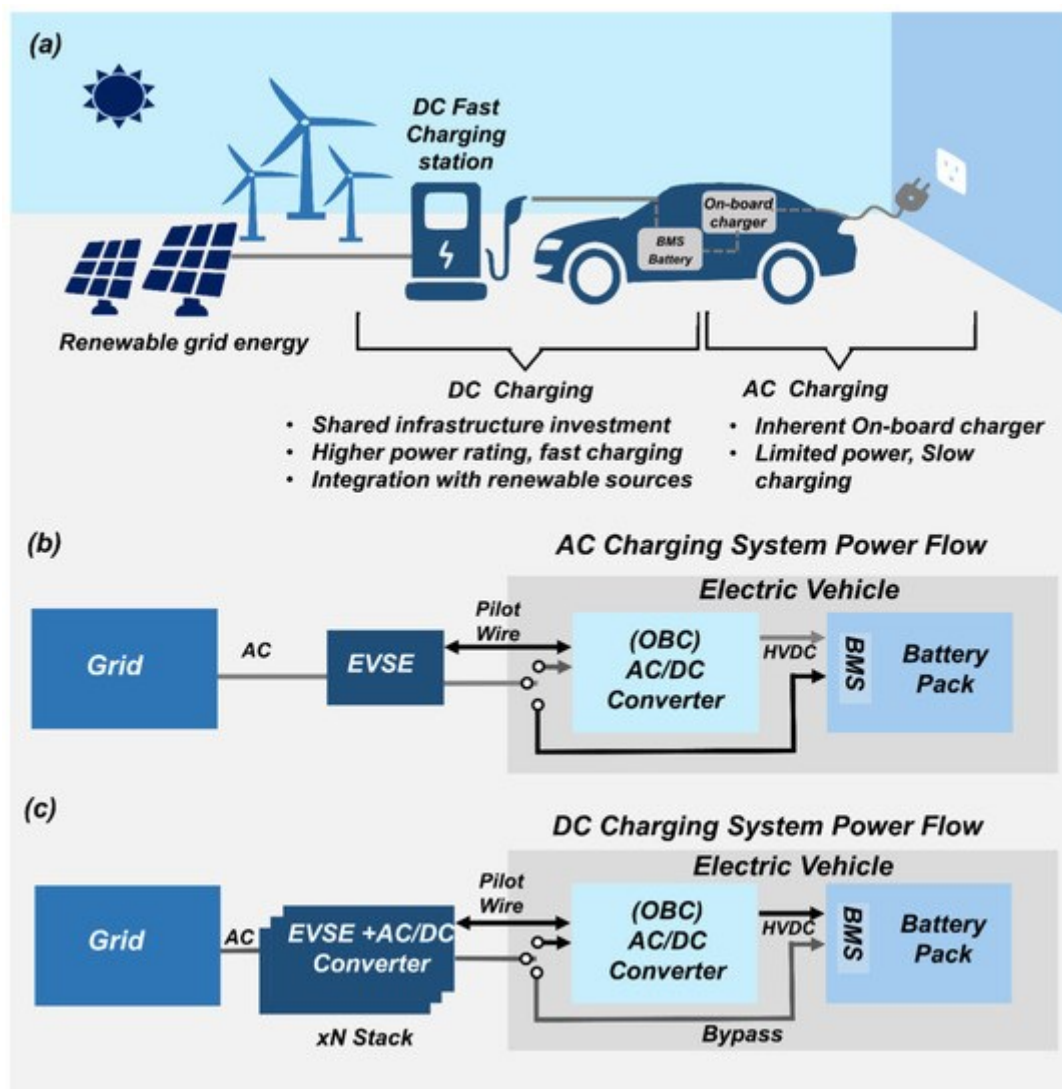


Figura 15³². Ecosistema della mobilità elettrica. Schema concettuale del sistema di ricarica V2G: (a) differenze tra ricarica AC, DC e caricatore di bordo (b) Stazioni di ricarica AC di livello 1 e 2 e (c) Stazione di ricarica DC di livello 3 (ricarica rapida).

Le colonnine di ricarica possono essere costruite utilizzando materiali sostenibili come acciaio inossidabile riciclato, alluminio, legno certificato FSC e plastica riciclata per le componenti strutturali. In generale, è possibile far riferimento ad alcune certificazioni ambientali per assicurarsi che i materiali e i processi di produzione rispettino determinati standard, come ad esempio ISO 14001³³. Anche l'energia utilizzata per la ricarica è da

³² Fonte: S. S. Ravi eM. Aziz, 2022.

³³ La ISO 14001 è una norma internazionale a adesione volontaria, applicabile a qualsiasi tipologia di organizzazione pubblica o privata, che specifica i requisiti di un sistema di gestione ambientale. Tale certificazione ISO 14001 non attesta una particolare prestazione ambientale, né tanto meno dimostra un particolarmente basso impatto ambientale, ma piuttosto sta a dimostrare che l'organizzazione certificata ha un sistema di gestione adeguato a tenere sotto controllo gli impatti

considerarsi un input delle colonnine e per ridurre l'impatto ambientale, è necessaria un'alimentazione da energia da fonti rinnovabili. Ugualmente, l'imballaggio delle colonnine gioca la sua parte, durante il trasporto e l'installazione preferire imballaggi minimali e biodegradabili piuttosto che materiali monouso contribuisce alla circolarità. Infine, input più sostenibili si ottengono anche attraverso la collaborazione con fornitori e partner che condividono gli stessi valori di circolarità, per promuovere l'adozione di materiali e pratiche a basso impatto ambientale.

2.6.2. Estensione della vita utile attraverso la progettazione modulare

Un'infrastruttura di ricarica per veicoli elettrici può essere progettata in modo modulare suddividendo l'intera struttura in componenti o moduli separati, che possono essere assemblati, smontati, sostituiti o ampliati in modo indipendente. Questo approccio consente una maggiore flessibilità, facilità di manutenzione e riduzione degli sprechi.

2.6.3. Utilizzo condiviso del bene e prodotto come servizio

I veicoli elettrici sono, fra le tecnologie analizzate in questo capitolo, l'esempio più lampante di come un bene possa essere condiviso da più utenti. I veicoli elettrici possono essere facilmente condivisi attraverso il concetto di *car-sharing*, che rappresenta un modo innovativo e sostenibile di utilizzare i mezzi di trasporto. Il car-sharing consente a più utenti di condividere ed utilizzare lo stesso veicolo elettrico per brevi periodi contribuendo ad ottimizzare l'utilizzo delle risorse e a ridurre il numero complessivo di veicoli in circolazione e promuovendo una maggiore efficienza ed economicità. Nel corso degli ultimi anni, il fenomeno del car-sharing è cresciuto rapidamente in tutto il mondo, grazie anche all'aumento della consapevolezza ambientale e alla crescente disponibilità di veicoli elettrici. Le società di car-sharing offrono flotte di veicoli elettrici che possono essere prenotati e utilizzati dagli utenti in base alle loro esigenze di mobilità, pagando solo per il tempo effettivo di utilizzo o per i chilometri effettuati.

Parimenti, le colonnine di ricarica pubbliche e semi-private, come quelle installate nei parcheggi dei condomini, nelle strutture ricettive, nei supermercati, nei luoghi di lavoro etc., possono essere facilmente condivise e utilizzate in maniera condivisa attraverso un

ambientali delle proprie attività, e ne ricerca sistematicamente il miglioramento in modo coerente, efficace e soprattutto sostenibile. La ISO 14001 non è quindi una certificazione di prodotto, come lo sono invece i marchi ecologici, bensì una certificazione di processo.

sistema di prenotazione e gestione dell'accesso. Questo sistema permette agli utenti di prenotare uno slot di ricarica in anticipo e di utilizzare la colonnina durante il periodo predefinito. La gestione può avvenire tramite app o piattaforme online, semplificando il processo di prenotazione, pagamento e utilizzo.

Sia i veicoli elettrici sia le colonnine sono facilmente offerti come un PaaS poiché possono non essere vendute direttamente all'utente finale ma offerte attraverso il servizio di trasporto autonomo per quanto riguarda il veicolo o di accesso alla ricarica per le infrastrutture di ricarica. Per accedere a queste ultime, l'utente paga una tariffa periodica o basata sull'utilizzo effettivo senza dover far fronte a spese relative a installazione, manutenzione e aggiornamento che sono invece in capo all'azienda proprietaria dell'infrastruttura. L'approccio PaaS consente anche una maggiore flessibilità e scalabilità poiché le colonnine possono essere facilmente aggiunte o rimosse in base alle esigenze dell'utente o dell'area geografica, ottimizzando l'uso delle risorse. Non da ultimo, il modello PaaS può incentivare l'adozione di veicoli elettrici, poiché offre una soluzione comoda e accessibile per la ricarica, eliminando la preoccupazione per l'acquisto e la gestione delle colonnine.

2.6.4. Valorizzazione del fine vita

Al termine della loro vita, le colonnine di ricarica vengono valutate per il riutilizzo in nuove posizioni o contesti, a seconda delle esigenze e dell'evoluzione delle infrastrutture di ricarica. Possono essere spostate da un luogo all'altro o aggiornate con nuove tecnologie per prolungarne la vita utile e dal loro smontaggio si recuperano e riciclano i loro componenti che consistono in una varietà di materiali, tra cui metalli, plastica e componenti elettronici. I componenti funzionanti o ancora utilizzabili delle colonnine possono essere estratti e riutilizzati in altre applicazioni o riparati per prolungarne la vita utile. Ad esempio, i circuiti elettronici, i connettori e altri componenti potrebbero essere recuperati e utilizzati in altre apparecchiature. La ricerca continua e lo sviluppo di nuove tecnologie possono portare a soluzioni avanzate per il riciclo dei materiali delle colonnine di ricarica e per il riutilizzo dei componenti. Le aziende e le organizzazioni coinvolte nella gestione delle infrastrutture di ricarica possono stabilire programmi e protocolli specifici per la gestione responsabile del fine vita che includano criteri per la valutazione del riutilizzo, del riciclo e del riuso dei componenti.

2.6.5. Best practice

Trattandosi di un business innovativo, sono reperibili diversi report sia di attività emergenti che di attività consolidate a cui ho deciso di dare spazio.

Società	Pilastro economia circolare	Attività circolare
ABB	Input sostenibili	Lancio del marchio EcoSolutions™, che fornisce piena trasparenza sul valore di circolarità e sull'impatto ambientale delle infrastrutture di ricarica per veicoli elettrici in base ad un chiaro insieme di indicatori chiave di performance (KPI) corrispondenti a ogni fase del ciclo di vita del prodotto. ³⁴
EVBox	Estensione della vita utile attraverso la progettazione modulare	Stazioni di ricarica modulari adattabili alle esigenze specifiche di ciascun sito. Le colonnine beneficiano di un design durevole e resistente alle intemperie, consentono di combinare diversi moduli di ricarica e ricevono assistenza remota e aggiornamenti del firmware. I vari componenti, come i caricabatterie, i cavi e i moduli di connessione, possono essere facilmente sostituiti o aggiornati senza dover smantellare l'intera struttura. La modularità consente di adattare l'infrastruttura a futuri sviluppi tecnologici e alle esigenze mutevoli dei clienti.
ShareNow, Enjoy, Leasys	Utilizzo condiviso del bene e prodotto come servizio	Piattaforme che offrono il servizio di car-sharing mettendo a disposizione una flotta di veicoli prenotabili tramite app sul territorio nazionale. Per soluzioni più durature nel tempo, Leasys offre un servizio di car leasing che consente agli utenti di affittare i veicoli per diversi mesi garantendo una totale assistenza e manutenzione.
Enel X, Edison, A2A	Utilizzo condiviso del bene e prodotto come servizio	Utilities che offrono piattaforme di condivisione di infrastrutture di ricarica per veicoli elettrici
Drake & Farrell	Valorizzazione del fine vita	Servizi su misura per sbloccare le opportunità commerciali della catena di fornitura circolare delle colonnine che includono l'organizzazione dei resi e lo screening funzionale, il collaudo, la riparazione e la rimessa a nuovo, l'analisi delle cause profonde, il re-kitting e l'approvvigionamento di parti di ricambio.
Stellantis	Input sostenibili Estensione della vita utile attraverso la progettazione modulare Valorizzazione del fine vita	Piano per raggiungere 2 miliardi di euro di ricavi entro il 2030 e azzerare le emissioni di carbonio dell'azienda entro il 2038 basato sulla strategia 4R - rimontare, riparare, riutilizzare e riciclare. Gli obiettivi sono l'estensione della vita dei veicoli e delle parti, la garanzia che durino il più a lungo possibile e il ritorno dei materiali e dei veicoli a fine vita nel ciclo di produzione di nuovi veicoli e prodotti. Un esempio è Citroën "oli" [all-ě], un veicolo familiare che utilizza materiali leggeri e riciclati, processi di produzione sostenibili, accessibilità economica, durata per

³⁴ <https://global.abb/group/en/sustainability/we-preserve-resources>

		una vita utile prolungata e riciclabilità responsabile a fine vita. Rigenerare - I pezzi usati, usurati o difettosi vengono smontati, puliti e rigenerati secondo le specifiche OEM. Sono disponibili quasi 12.000 pezzi che coprono 40 linee di prodotti, comprese le batterie per veicoli elettrici. Riparare - I pezzi usurati vengono riparati e reinstallati nei veicoli. In 21 sedi in tutto il mondo, i centri di e-repair lavorano sulle batterie dei veicoli elettrici. Riutilizzare - Circa 4,5 milioni di ricambi multimarca in inventario, ancora in buone condizioni, vengono recuperati da veicoli fuori uso e venduti in 155 Paesi attraverso la piattaforma di e-commerce B-Parts. Riciclare - Gli scarti di produzione e i veicoli fuori uso vengono reimmessi nel processo produttivo. In sei mesi sono stati raccolti 1 milione di pezzi riciclati. Inaugurazione nel 2023 del principale Hub per l'economia circolare presso il complesso di Mirafiori in Italia. L'Hub ospita attività di ricondizionamento, smontaggio e rigenerazione di veicoli. Acquisizione del 2016 di Aramis, leader europeo nella compravendita online multimarca di auto usate, che dispone di sette centri di ricondizionamento interni, posizionati in Europa occidentale e centrale. Oltre agli hub dell'economia circolare, i "circuiti locali" mantengono prodotti e materiali all'interno dei Paesi, accelerando le consegne ai clienti. In Brasile, i componenti chiave, ovvero i motorini di avviamento e gli alternatori dei veicoli a marchio Stellantis, vengono rigenerati, distribuiti e venduti in 1.000 concessionari locali. Lancio della nuova etichetta SUSTAINera per parti e accessori, che indica un risparmio fino all'80% di materiali e al 50% di energia rispetto alle parti nuove equivalenti. I valori sono determinati conducendo un'analisi del ciclo di vita del corrispondente best-seller di ogni famiglia di prodotti, secondo una metodologia approvata da Sphera, una società indipendente.³⁵
--	--	---

Tabella 10. Best practice nella mobilità elettrica

³⁵ https://www.stellantis.com/en/investors/events/circular-economy-event-2022?adobe_mc_ref=

In conclusione, le utilities possono intervenire con un approccio circolare in numerosi segmenti della filiera energetica tenendo conto dei cinque pilastri dell'economia circolare. Tutti questi segmenti per quanto riguarda gli input da rinnovabili, riuso e riciclo possono avvalersi di un approvvigionamento di tecnologie che presentano una composizione di materie prime nell'ottica di realizzare una transizione pienamente sostenibile. In questo contesto, vanno presi in considerazione diversi fattori, tra cui le componenti ambientali quali le emissioni di CO₂, il consumo d'acqua, l'utilizzo del suolo, la produzione di rifiuti e le ricadute sulla biodiversità. Rilevano anche le componenti sociali quali condizioni di lavoro, salubrità dell'ambiente di lavoro, salute e sicurezza dei lavoratori e delle comunità, sviluppo economico delle comunità locali e rispetto delle culture indigene e tribali. Infine, le materie prime basilari sono legate anche ad una necessaria valutazione geopolitica. Tenere conto di tutti questi aspetti per far sì che si riduca al minimo la dipendenza dalle materie prime richiede dunque un gruppo di lavoro interno che per tutte le tecnologie analizzate, eolico, fotovoltaico, accumuli, reti e mobilità elettrica, analizzi le filiere di materie prime approvvigionate, individui impatti ambientali e sociali lungo tutta la catena del valore e adotti soluzioni volte a garantirne la sostenibilità e l'implementazione di strategie di riduzione del rischio geopolitico, di commodity, ambientale e sociale rispetto alle nuove tecnologie e ai modelli di business. L'approvvigionamento circolare è abilitato e facilitato da metriche e KPI che valutano gli impatti ambientali del ciclo di vita legati ai flussi di materia ed energia delle categorie merceologiche strategiche acquistate. Un ulteriore spunto è quello di inserire requisiti di gara e fattori premianti per incentivare i fornitori ad offrire prodotti sempre più circolari. Per quanto riguarda invece il riciclo, è utile implementare l'automatizzazione dei processi di smontaggio di pale eoliche, pannelli solari, batterie, reti e colonnine e identificare un trattamento idoneo al recupero di materiali preziosi per raggiungere tassi di riciclo totale sempre più vicini al 100%.

Questo capitolo ha esplorato le diverse strategie e tecnologie per integrare i principi dell'economia circolare nel settore energetico, con un focus specifico sull'estensione del ciclo di vita e sulla gestione sostenibile dei componenti nei settori eolico, fotovoltaico, dei sistemi di accumulo, delle reti e della mobilità elettrica. Queste soluzioni hanno dimostrato di poter generare un impatto positivo sulla decarbonizzazione e la competitività delle utilities. Tuttavia, le sfide legate alla gestione del fine vita dei moduli fotovoltaici richiedono un approccio ancora più articolato.

Il capitolo successivo introdurrà il progetto PHOTORAMA, un'iniziativa europea mirata alla creazione di una filiera circolare per il riciclo dei moduli fotovoltaici. PHOTORAMA rappresenta un progetto chiave per il recupero di materiali critici, come il silicio, l'indio e l'argento, attraverso soluzioni avanzate di disassemblaggio. Questo approccio ambizioso si pone l'obiettivo di ridurre la dipendenza europea da risorse esterne e promuovere una gestione sostenibile dei rifiuti fotovoltaici, rispondendo concretamente alle esigenze di sostenibilità e innovazione del settore.

Capitolo 3

Economia circolare nella tecnologia del fotovoltaico

Secondo Solar Power Europe, nel 2023, l'industria solare globale ha vissuto un anno straordinario, caratterizzato da una crescita che ha superato ampiamente le aspettative e reso obsolete le previsioni precedenti. Il mercato ha registrato un'espansione dell'87% rispetto all'anno precedente, raggiungendo una capacità installata di 447 GW.

Questo incremento è stato trainato principalmente dalla Cina, che ha contribuito per il 57% delle installazioni globali. Leader mondiale nella produzione e nel consumo di prodotti solari, la Cina ha stabilito un nuovo record aggiungendo 253 GW di capacità fotovoltaica nel 2023, con un impressionante tasso di crescita del 167% su base annua. Al contrario, il resto del mondo ha installato complessivamente 194 GW di nuova capacità solare fotovoltaica, pari a un aumento del 35% rispetto ai 144 GW installati nel 2022.

Tra i dieci principali mercati del settore solare, otto hanno registrato una crescita significativa nel 2023, mentre solo l'India e il Giappone hanno subito una contrazione del mercato. Gli Stati Uniti, dopo un anno difficile per il settore solare nel 2022, hanno recuperato terreno con un tasso di crescita del 48%, connettendo alla rete 32,4 GW di nuova capacità fotovoltaica. In Europa, la Germania ha stabilito un nuovo record nazionale con l'installazione di 15 GW nel 2023, superando il precedente primato europeo detenuto dall'Italia, che aveva installato 9,3 GW nel 2011 durante la prima fase di espansione del mercato solare europeo.

Nel complesso, i primi dieci mercati hanno rappresentato l'80% del mercato globale del solare fotovoltaico nel 2023, consolidando il ruolo centrale di questi Paesi nello sviluppo dell'energia solare a livello mondiale.

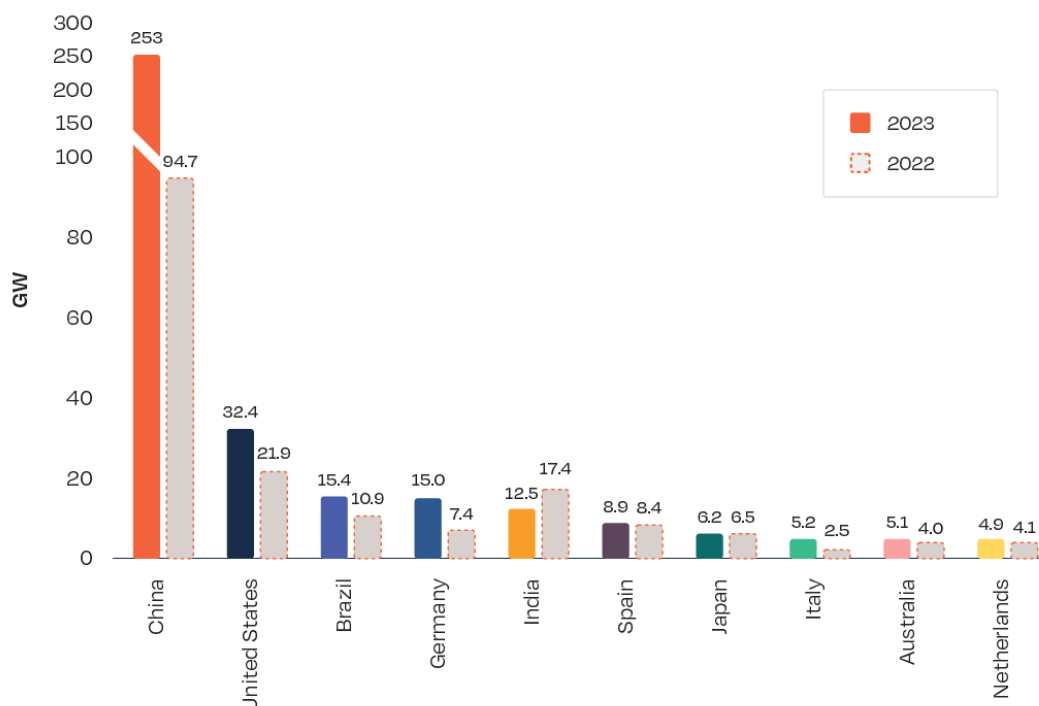


Figura 16. I dieci principali mercati del fotovoltaico 2022 - 2023³⁶

Guardando al futuro nel breve termine, si prevede che il mercato continuerà a espandersi, raggiungendo 876 GW nel 2028. L'impegno globale di triplicare la capacità rinnovabile a 11 TW entro il 2030, sancito alla COP28, offre ulteriori prospettive di crescita per il solare. Sebbene non sia stata fornita una suddivisione dettagliata tra le diverse tecnologie energetiche, il solare fotovoltaico è destinato a svolgere un ruolo predominante. Negli ultimi anni, infatti, il solare ha registrato la maggiore crescita in termini di capacità installata rispetto a qualsiasi altra tecnologia di generazione di energia (Solar Power Europe, 2024).

Secondo le stime dell'International Renewable Energy Agency (IRENA), il solare fotovoltaico contribuirà con 5,5 TW, pari a circa la metà dell'obiettivo complessivo di 11 TW entro il 2030. Questo rappresenta un incremento straordinario rispetto agli 1,6 TW registrati alla fine del 2023, evidenziando l'importanza strategica del solare nel raggiungimento degli obiettivi climatici globali.

³⁶ Fonte: Solar Power Europe "Global Market Outlook For Solar Power 2024-2028", 2024.

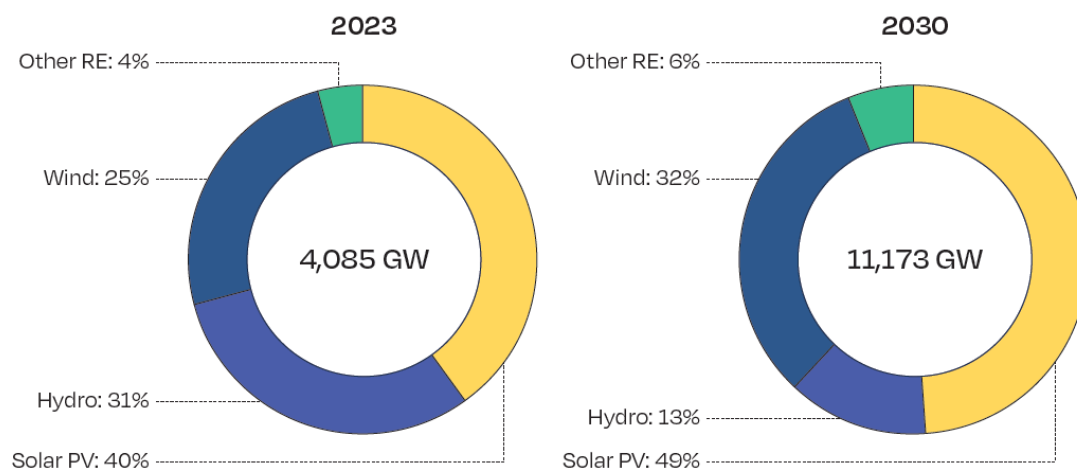


Figura 17. Capacità di produzione di energia elettrica rinnovabile installata a livello mondiale nello scenario 1,5 C°, 2023 e 2030³⁷

Inoltre, secondo una dichiarazione di Eurelectric basata sui dati dell'associazione³⁸, datata aprile 2025 e la più recente al momento della redazione di questa tesi, a marzo 2025, per il terzo mese consecutivo, l'energia solare ha raggiunto un nuovo record storico nella produzione di energia elettrica, rappresentando oltre il 10% del mix elettrico europeo. Un tale previsto incremento rappresenta una sfida ambiziosa per l'industria circolare.

Con l'espansione della produzione solare a livelli di terawatt, le catene di approvvigionamento coinvolte nella realizzazione dei pannelli fotovoltaici stanno generando una crescente domanda di minerali e metalli critici (cfr. 1.8). Questa crescita sta riconfigurando le geografie industriali e i paesaggi energetici globali, ma può anche riprodurre disuguaglianze esistenti o causare impatti negativi evitabili. La governance dell'industria solare è frammentata e dispersa tra politiche e regolamenti che toccano vari aspetti delle catene di produzione e dei processi di gestione a fine vita. A differenza di settori consolidati come quelli dell'alluminio o del petrolio, l'industria solare manca di un'autorità centrale che stabilisca regole comuni. Questo rende complesso implementare principi di sostenibilità e giustizia ambientale lungo tutto il ciclo di vita dei pannelli fotovoltaici.

Nella catena del valore del fotovoltaico, la produzione di polisilicio – componente chiave dei pannelli solari – è particolarmente critica. Questo processo è associato a emissioni elevate di carbonio, spesso derivanti dall'utilizzo di centrali a carbone nei parchi

³⁷ Fonte: Solar Power Europe, 2024.

³⁸ <https://electricity-data.eurelectric.org/>

industriali. Inoltre, lo sviluppo su larga scala di impianti solari ha causato la perdita di terreni agricoli fertili e habitat ecologicamente significativi. Problemi legati ai diritti umani si aggiungono a queste criticità: nella regione dello Xinjiang, in Cina, sono emerse accuse di lavoro forzato nella produzione di polisilicio, coinvolgendo alcune delle principali aziende globali del settore. La Cina domina incontrastata il settore del fotovoltaico: secondo i dati dell'Agenzia Internazionale dell'Energia (IEA), detiene l'80% della produzione globale di silicio policristallino, contro l'8% dell'Unione Europea. Inoltre, il 97% dei wafer utilizzati a livello mondiale proviene dalla Cina, mentre l'UE si ferma allo 0,5%. Pechino controlla anche l'85% della produzione di celle fotovoltaiche, rispetto allo 0,6% europeo, e il 64% dei moduli solari, contro il 2,8% dell'UE (IEA, 2022).

Oltre alla necessità di rendere più competitiva l'industria europea, un'altra sfida riguarda gli impatti ambientali e sociali della transizione solare che richiederebbero soluzioni innovative. Tra queste vi sono l'integrazione agrivoltaica – che combina coltivazioni agricole con pannelli solari – e l'utilizzo di terreni già disturbati (come discariche o ex siti minerari) per ridurre i conflitti sull'uso del suolo. Inoltre, standard volontari come il “Sustainability Leadership Standard” del Green Electronics Council promuovono pratiche più sostenibili nella produzione solare (Mulvaney, 2024).

Tuttavia, la sfida sulla quale si concentrerà questo capitolo riguarda la gestione del fine vita dei pannelli solari. Sebbene in Europa oltre il 90% dei moduli venga riciclato grazie alla Direttiva RAEE (cfr. 1.9), negli Stati Uniti meno del 5% subisce lo stesso destino per mancanza di normative adeguate. Politiche come la responsabilità estesa del produttore (EPR) potrebbero favorire un'economia circolare per i materiali fotovoltaici, incentivando il recupero delle materie prime critiche e riducendo gli impatti ambientali. Sebbene i sistemi fotovoltaici forniscano una generazione di energia a emissioni zero per tutta la loro durata di vita di 25-30 anni, per l'intero ciclo di vita non è garantita la completa sostenibilità, soprattutto nella fase del fine vita. Negli ultimi decenni, i rifiuti di apparecchiature elettriche ed elettroniche (RAEE) sono aumentati drasticamente in Europa, in particolare per le tecnologie più recenti come i dispositivi fotovoltaici, con una previsione di 60-80 milioni di tonnellate di materiali da smaltire entro il 2050 (Solar Power Europe, 2024). Questi moduli sono progettati come complessi *sandwich*, che rendono estremamente impegnativo il recupero delle materie prime incapsulate negli strati come l'indio (In), l'argento (Ag), il silicio e il gallio (Si e Ga); queste ultime sono

oltretutto considerate materie prime critiche strategiche (cfr. 1.8). L'evoluzione tecnologica ha già compiuto grandi passi in avanti dal punto di vista della produzione dei pannelli fotovoltaici; tuttavia, la fase legata alla fine del ciclo di vita risulta ad oggi ancora poco efficiente. Le soluzioni attuali, infatti, prevedono soprattutto tecniche di triturazione dei moduli fotovoltaici, dove le celle finiscono però in una catena di recupero dal basso valore economico, nota come *down-cycling*. Inoltre, l'Europa dipende in larga misura dalle importazioni di metalli, quali materie prime e metalli preziosi di cui il Partenariato Europeo per l'Innovazione (PEI) intende ridurre la dipendenza dalle importazioni dell'economia europea. Il riciclaggio è il modo più pertinente, nonché necessario, per procurare materie prime dall'enorme miniera di rifiuti fotovoltaici come RAEE.

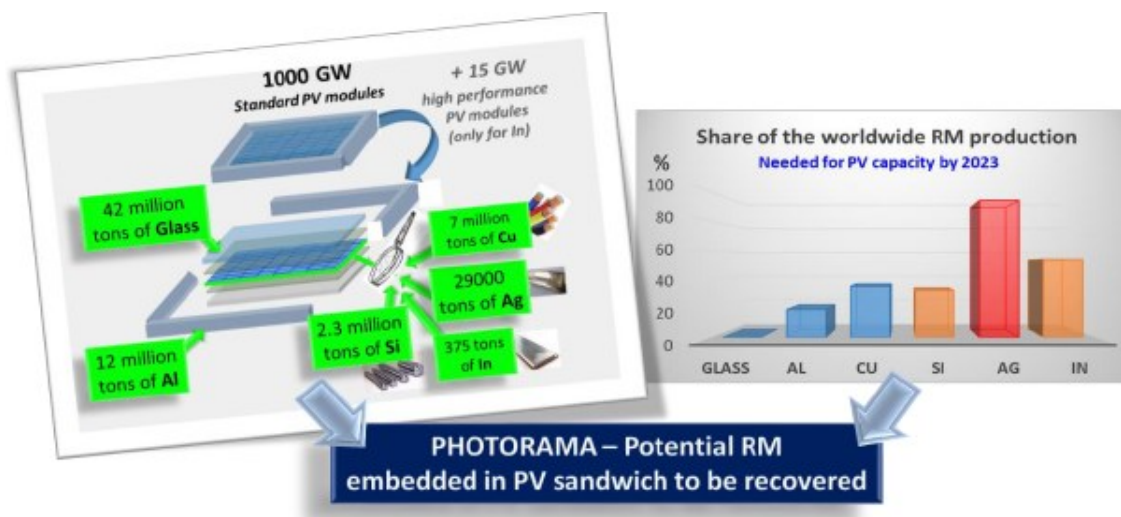


Figura 18³⁹. Quantità di materiali necessari per produrre 1.000 GW di pannelli fotovoltaici standard (Al, Cu, vetro, Si, Ag) e 15 GW di moduli ad alte prestazioni (solo In) (a sinistra) e rapporto comparativo con la produzione mondiale (a destra).

All'interno di 1.000 GW di un sistema fotovoltaico standard e 15 GW di moduli ad alte prestazioni, sono presenti i materiali rappresentati nella figura 20, in particolare il grafico a sinistra illustra le relative quote di ciascuna materia prima rispetto alle loro attuali produzioni mondiali. Risorse convenzionali come alluminio (Al) e rame (Cu), necessari per 1.000 GW, rappresentano rispettivamente il 19% e il 35% dell'attuale produzione mondiale di Al e Cu. Il silicio, CRM strategico, equivale al 32% dell'attuale produzione mondiale di Si. I dati più allarmanti riguardano l'indio e le quantità di argento richiesti per tali capacità, che equivalgono rispettivamente al 54% e al 94% delle loro attuali

³⁹ European Commission, European Health and Digital Executive Agency, 2021.

produzioni mondiali. Considerando le proiezioni della figura 20, questa cifra potrebbe essere moltiplicata per 8,5 entro il 2050.

3.1. PHOTORAMA

I rifiuti fotovoltaici costituiscono un incredibile ed inutilizzato valore il cui potenziale verrà ottimizzato dal progetto di economia circolare PHOTORAMA. La domanda principale di ricerca che ha guidato la realizzazione di questo terzo e ultimo capitolo è stata *“In che modo il progetto PHOTORAMA può contribuire a rendere la filiera del fotovoltaico più circolare e sostenibile in Europa?”* Da questo quesito provengono una serie di domande secondarie volte a comprendere se le tecnologie innovative di disassemblaggio e recupero dei materiali critici sviluppate dal progetto possono essere implementate per migliorare il riciclo dei moduli fotovoltaici; quali sono i principali ostacoli economici, normativi e sociali all’adozione di un modello circolare nel settore fotovoltaico e come può l’accettazione sociale influenzare l’implementazione delle pratiche circolari nel riciclo dei moduli fotovoltaici.

Per rispondere a queste domande ho adoperato un approccio metodologico misto, combinando analisi documentale di rapporti prodotti dal gruppo di lavoro di PHOTORAMA, di cui Enel Green Power è partner insieme ad altri attori industriali impegnati lungo la filiera del fotovoltaico, dati economici, sperimentali e un’indagine empirica sull’accettazione sociale delle pratiche circolari nel settore fotovoltaico condotta su stakeholder rilevanti come aziende, consumatori, enti pubblici e associazioni. I dati raccolti sono poi stati analizzati e valutati quantitativamente. L’obiettivo della ricerca è stato quello di esplorare come il progetto PHOTORAMA possa contribuire a creare una filiera circolare per i moduli fotovoltaici, riducendo la dipendenza europea da materie prime critiche e promuovendo la sostenibilità ambientale e di valutare l’efficacia delle tecnologie sviluppate da PHOTORAMA per il disassemblaggio e il recupero dei materiali critici dai moduli fotovoltaici.

Capitolo	Titolo	Domande di ricerca	Disegno di ricerca	Obiettivo di ricerca
01	Le politiche europee sull'economia circolare	Quali sono gli ambiti di intervento del modello circolare per le imprese? Quali politiche promuovono lo sviluppo circolare nel settore energetico?	Approccio qualitativo basato su un'analisi documentale e tematica della normativa sull'economia circolare	Esaminare come le politiche europee sull'economia circolare influenzano la sostenibilità del settore energetico e fotovoltaico
02	Benefici per le utilities nel settore energetico	In che modo l'adozione dei cinque pilastri può migliorare la sostenibilità e la competitività delle utilities nel settore energetico?	Approccio qualitativo con analisi di rapporti industriali, letteratura accademica e modelli ricorrenti e best practice per eolico, fotovoltaico, reti, stoccaggio e infrastrutture di ricarica	Esplorare i benefici economici e ambientali derivanti dall'applicazione dei cinque pilastri dell'economia circolare alle utilities energetiche
03	Economia circolare nella tecnologia del fotovoltaico	In che modo il progetto PHOTORAMA può contribuire a rendere la filiera del fotovoltaico più circolare e sostenibile in Europa?	Approccio misto, con utilizzo di un'analisi documentale, dati forniti dai partner del progetto e un'indagine empirica sull'accettazione sociale	Valutare l'efficacia delle tecnologie sviluppate da PHOTORAMA per il disassemblaggio e il recupero dei materiali critici dai moduli fotovoltaici

Tabella 11. Economia circolare nella tecnologia del fotovoltaico: Metodologia di ricerca

In questo capitolo viene adottato il metodo del case study, concentrandosi sul progetto PHOTORAMA, un'iniziativa pionieristica di economia circolare realizzata per 3SUN, la prima fabbrica di pannelli fotovoltaici in Europa, in cooperazione con Enel e un consorzio di partner europei nell'ambito di un programma dell'Unione Europea. La scelta di analizzare PHOTORAMA nasce dal suo carattere unico ed esemplare: rappresenta infatti un avanzamento strategico nella circolarità applicata al settore energetico, con particolare riferimento al fotovoltaico, grazie all'innovazione nei processi di smontaggio automatizzato dei pannelli e al recupero di materiali ad alta purezza.

Il metodo del case study è particolarmente indicato per ricerche che mirano a rispondere a domande di tipo “come” e “perché” in contesti reali, soprattutto quando il fenomeno oggetto di studio è complesso e fortemente influenzato dal contesto (Yin, 2018; Grandori, 1996; Lucidi et al., 2008). Nel caso di PHOTORAMA, questa metodologia permette un'analisi approfondita e longitudinale delle pratiche organizzative, delle innovazioni tecnologiche e delle interazioni tra stakeholder, aspetti difficilmente indagabili tramite approcci quantitativi o comparativi. La letteratura riconosce ampiamente il valore del case study per ricerche esplorative e descrittive, in particolare quando le informazioni disponibili sono limitate o quando si analizzano fenomeni nuovi o unici.

La scelta di focalizzarsi su un singolo caso, invece che su un confronto tra più casi, è giustificata sia dalla disponibilità e dalla ricchezza dei dati forniti dal progetto PHOTORAMA, sia dalle indicazioni metodologiche consolidate (Yin, 2018). I case study singoli sono particolarmente preziosi quando il caso selezionato è unico o critico, consentendo una comprensione profonda del contesto e lo sviluppo di nuove prospettive teoriche. In questa ricerca, PHOTORAMA rappresenta un contesto raro e ricco di

informazioni, risultando quindi ideale per un'analisi approfondita tramite case study singolo.

Tra gli aspetti positivi del metodo figurano sicuramente l'analisi approfondita e la ricchezza contestuale. Il case study consente di esplorare in modo dettagliato le dinamiche del progetto PHOTORAMA, cogliendo l'interazione tra fattori tecnici, organizzativi e di policy in un contesto reale. L'analisi dettagliata del caso permette di contribuire anche allo sviluppo e all'affinamento delle teorie sull'implementazione dell'economia circolare nel settore energetico. Il metodo consente di integrare diverse fonti informative, tra cui documentazione aziendale, dati longitudinali e survey mirate con rappresentanti aziendali e stakeholder consentendo dunque flessibilità (Yin, 2018; Corbetta, 2015).

La robustezza e la validità dei risultati sono rafforzate dalla triangolazione, ovvero dalla combinazione di dati qualitativi e quantitativi provenienti da fonti diverse, che permette di compensare i limiti di ciascuna fonte (Yin, 2018).

Nonostante i numerosi punti di forza, il metodo del case study presenta anche alcune limitazioni, ampiamente discusse in letteratura, tra cui la generalizzabilità limitata poiché i risultati ottenuti da un singolo caso possono non essere immediatamente generalizzabili ad altri contesti, poiché sono strettamente legati alle specificità di PHOTORAMA. Tuttavia, alcuni autori (Flyvbjerg, 2011) sottolineano come la conoscenza approfondita di un caso possa comunque offrire contributi significativi alla comprensione scientifica.

Il coinvolgimento diretto del ricercatore nella raccolta e nell'interpretazione dei dati può aumentare il rischio di soggettività. Per mitigare questo rischio, lo studio fa ricorso alla triangolazione e alla riflessività, utilizzando fonti e prospettive diverse per aumentare la credibilità dei risultati. Inoltre, la realizzazione di un case study approfondito richiede un notevole investimento di tempo e risorse, soprattutto nella raccolta e nell'analisi di dati longitudinali e nella conduzione di interviste o survey. Basti pensare che PHOTORAMA è stato avviato nel 2021 e si sta concludendo solo nel 2025. L'unicità del contesto di PHOTORAMA può infine rendere difficile la replica esatta dello studio, limitando la validità esterna dei risultati (Yin, 2018).

La decisione di concentrarsi su un solo caso, anziché su un confronto tra più casi, deriva principalmente dalla disponibilità e dalla qualità dei dati relativi a PHOTORAMA, nonché dal carattere unico del progetto come prima esperienza di questo tipo nel settore fotovoltaico europeo. Dal punto di vista metodologico, la letteratura riconosce

l'adeguatezza del case study singolo quando l'obiettivo è comprendere a fondo fenomeni complessi e contestualizzati (Yin, 2018). Questo approccio consente di cogliere sfumature e generare contributi teorici che potrebbero essere trascurati in studi più ampi ma meno dettagliati. Pur offrendo un quadro dettagliato sull'implementazione dell'economia circolare nel settore fotovoltaico, il case study singolo lascia spazio a futuri approfondimenti. Studi comparativi su più casi o analisi cross-settoriali potrebbero infatti aiutare a valutare la trasferibilità dei risultati e a validare ulteriormente le implicazioni teoriche emerse dall'analisi di PHOTORAMA.

In sintesi, il metodo del case study applicato al progetto PHOTORAMA, realizzato in collaborazione con Enel e altri stakeholder europei, rappresenta uno strumento efficace per esplorare le sfide e le opportunità dell'economia circolare nel settore energetico, pur riconoscendo i limiti metodologici e indicando possibili sviluppi futuri della ricerca.

3.1.1. Panoramica del progetto

Il progetto europeo per la filiera fotovoltaica dal nome completo “*PHOtovoltaic waste management – advanced Technologies for recOvery & recycling of secondary RAW MAterials from end-of-life modules*)” oppure abbreviato “PHOTORAMA” ha come obiettivo generale quello di creare una catena del valore circolare redditizia e sostenibile che porti a un'industria fotovoltaica a zero emissioni. Il progetto si inserisce nel contesto delle politiche europee di transizione energetica e di sostenibilità, in particolare attraverso il Green Deal Europeo. Nonostante il fotovoltaico sia una delle tecnologie centrali nella transizione che prevede la neutralità climatica entro il 2050, poiché rappresenta una soluzione a basso costo per la generazione di energia pulita, la gestione del fine vita (EoL) dei moduli fotovoltaici è un problema urgente che PHOTORAMA vorrebbe risolvere sviluppando soluzioni innovative per il recupero e il riciclaggio dei materiali contenuti nei moduli. Il progetto intende dimostrare la prospettiva industriale di soluzioni di riciclaggio per recuperare e riciclare quasi tutti i materiali e i componenti dei pannelli fotovoltaici a fine vita recuperando dai pannelli una percentuale di materie prime molto elevata (98-99,99%) che inoltre abbiano un grado di purezza senza precedenti e di industrializzare il processo di disassemblaggio dei pannelli a fine vita.

Il consorzio è costituito da tredici aziende e istituti di ricerca europei, che includono COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE ET AUX ENERGIES

ALTERNATIVES (CEA), Francia; ENEL GREEN POWER SPA (EGP), Italia; MONDRAGON ASSEMBLY SOCIEDAD COOPERATIVA (MASS), Spagna; PV CYCLE FRANCE (PVCYC), Francia; HP TECHNOLOGY GMBH (RHP), Austria; LUXCHEMTECH GMBH (LUX), Germania; MALTHA GLASRECYCLAGE BELGIE (MALTHA), Belgio; SINTEF AS (SINTEF), Norvegia; AGENZIA NAZIONALE PER LE NUOVE TECNOLOGIE, L'ENERGIA E LO SVILUPPO ECONOMICO SOSTENIBILE (ENEA), Italia; DFD - DENSE FLUID DEGREASING (DFD), Francia; IDENER RESEARCH & DEVELOPMENT AGRUPACION DE INTERES ECONOMICO IDEN (R&D), Spagna; BIFA UMWELTINSTITUT GMBH (BIFA), Germania; ZENTRUM FUR SOZIALE INNOVATION GMBH (ZSI), Austria.

La struttura di PHOTORAMA include:

- (1) lo sviluppo di processi e tecnologie innovative da TRL4-5 a TRL7⁴⁰ per stabilire un solido schema di riciclaggio che aumenti significativamente l'efficienza delle risorse con soluzioni decisive per la riduzione dei costi. L'implementazione del disassemblaggio automatizzato e dell'apertura a sandwich come separazione degli strati (MONDRAGON, DFD, CEA) che consente un elevato recupero (> 95%) di materie prime: Ag, Si (SINTEF, CEA, IDENER) e In, Ga (LUXCHEMTECH) dai pannelli fotovoltaici EoL (silicio cristallino, film sottili);
- (2) l'approccio di piena circolarità enfatizzato dalla raccolta (PV CYCLE) a nuovi prodotti commerciabili da Si, In, Ga, Ag (RHP), vetro (MALTHA) principalmente per la produzione di FV (EGP);
- (3) la dimostrazione della redditività e dell'attrattiva delle sue soluzioni tecnologiche (BIFA, ENEA) come una delle prospettive più competitive per il riciclaggio del fotovoltaico.

Il progetto nasce da un'iniziativa finanziata dal programma europeo Horizon 2020 (cfr. 1.3.4) che ha messo a disposizione 8,4 milioni di euro per sviluppare soluzioni

⁴⁰ Il *Technology Readiness Level* (TRL, o in italiano Livello di Maturità Tecnologica) è una metodologia per la valutazione del grado di maturità di una tecnologia, sviluppata originariamente dalla NASA nel 1974 e successivamente modificata. Viene attualmente utilizzata da vari enti americani ed europei, tra cui anche la Commissione europea. È basata su una scala di valori da 1 a 9, dove 1 è il più basso (definizione dei principi base) e 9 il più alto (sistema già utilizzato in ambiente operativo). In particolare, il TRL 7 corrisponde alla dimostrazione di un prototipo di sistema in ambiente operativo.

tecnologiche innovative volte a massimizzare il recupero di materie prime dai pannelli fotovoltaici a fine vita.

L'obiettivo ultimo è la creazione e qualificazione di una linea pilota innovativa, competitiva e di successo per lanciare mercati sostenibili per le materie prime secondarie in Europa. Nel contesto della realizzazione di una filiera industriale europea, il riciclaggio di dispositivi fotovoltaici come i RAEE contribuisce allo sviluppo di modelli circolari di materie prime secondarie reimmesse nella produzione di nuovi pannelli fotovoltaici in un'ottica di economia circolare tenendo conto e andando oltre la legislazione ambientale UE applicabile. I settori dalla raccolta alla produzione di materie prime secondarie saranno collegati in una visione globale e sistemica che affronta la loro reintroduzione nelle industrie delle materie prime secondarie come nuovi materiali o nuovi prodotti riunendo filiere intersettoriali. Gli impatti previsti con l'operatività di PHOTORAMA sono articolati attorno a cinque dimensioni:

1. Aumentare in modo quantificabile l'efficienza e l'efficacia (intervallo, resa, qualità e selettività delle materie prime recuperate) dello sfruttamento delle materie prime secondarie complesse;
2. Liberare un volume significativo di diverse materie prime secondarie attualmente non sfruttate o sotto-sfruttate all'interno dell'UE, migliorandone la circolarità nell'economia;
3. Migliorare la salute, la sicurezza e le prestazioni ambientali dell'intero ciclo di vita;
4. Migliorare la redditività economica e il potenziale di mercato, espandere le attività commerciali dell'UE, creare valore aggiunto e nuovi posti di lavoro;
5. Sostenere l'UE in prima linea nell'elaborazione e nel riciclaggio delle materie prime promuovendo soluzioni socialmente innovative.

Funzionali al modellamento di queste dimensioni saranno lo sviluppo di tecnologie all'avanguardia per implementare un solido e affidabile schema di riciclaggio del fotovoltaico, dimostrazioni di soluzioni di riciclaggio innovative con una linea pilota TRL 7, nonché l'inserimento dei materiali rari secondari nelle catene del valore intersettoriali. Inoltre, PHOTORAMA vuole guidare l'adozione sul mercato delle sue tecnologie come soluzioni sostenibili e rafforzare le azioni di gestione sostenibile dei rifiuti nell'ambito del Partenariato Europeo per l'Innovazione (PEI).

La tecnologia proposta utilizza processi di delaminazione innovativi e chimico-fisici per separare efficacemente le celle solari dalla lastra di vetro e dagli strati polimerici. Nello specifico, per i pannelli solari a base di silicio cristallino vengono impiegate:

- (i) delaminazione meccanica, tramite un processo di taglio che utilizza un filo diamantato di spessore molto sottile;
- (ii) delaminazione fluida, ove viene applicata CO₂ allo stato supercritico e
- (iii) delaminazione ottica, per i pannelli a film sottile.

Questa nuova tecnologia consente di recuperare non solo i materiali di alto valore (come l'alluminio e il vetro) ma anche metalli quali Ag e In e critici e strategici come Si e Ga in percentuali superiori al 98% grazie ad una linea pilota di gestione completa che include tutti i passaggi successivi interrelati necessari tra cui lo smontaggio automatico, la separazione intelligente ed il recupero innovativo. Tali materie prime potranno essere così riutilizzate per realizzare nuovi pannelli fotovoltaici oppure nuovi prodotti di altre industrie. Questo approccio rappresenta un netto miglioramento rispetto alle tecniche attuali di “down-cycling” che portano alla perdita irreversibile di materie prime di valore.

Per chiudere il cerchio, tutte le frazioni dei componenti PV EoL saranno recuperate direttamente come combustibile energetico, riutilizzate o riciclate come materia prima per costruire nuovi pannelli o altri nuovi prodotti. La strategia principale è quella di elaborare uno schema di riciclaggio globale considerando attentamente le dimensioni economiche, ambientali e sociali.

Dei tredici istituti di ricerca e aziende, due sono italiani, ovvero ENEA e EGP. ENEA si occupa dello studio dell'eco-design dei moduli fotovoltaici per rendere tutti i componenti facilmente riciclabili. EGP invece valuta e determina la migliore tecnologia di riciclo per i moduli e valida l'utilizzo di componenti prodotti con le materie prime recuperate, nella manifattura di moduli fotovoltaici, aumentando la circolarità dei pannelli della fabbrica 3SUN a Catania.

Entrambe sono beneficiarie principali di due degli otto piani di lavoro individuati da PHOTORAMA. Gli otto piani di lavoro (abbreviati in “WP” dall'inglese *working plackage*) sono: WP1 Linea pilota PHOTORAMA – Raccolta rifiuti, disassemblaggio pannelli; WP2 Delaminazione – Consentire un alto valore aggiunto dalla separazione degli strati dei moduli; WP3 Recupero dei metalli: Consentire un alto valore aggiunto dall'estrazione dei metalli; WP4 Rendere circolare l'industria fotovoltaica: riutilizzo di

materiali riciclati come nuovi prodotti; WP5 Valutazioni tecnico-economiche, ambientali e sociali; WP6 Sensibilizzazione sociale, diffusione e clustering; WP7 Business plan e suo utilizzo e infine WP8 Gestione del progetto e verranno descritti più in dettaglio al 3.1.3. EGP è la principale beneficiaria del WP4 e prenderà a carico la valutazione della fattibilità tecnica ed economica di un modulo fotovoltaico ecodesignato e innovativo e della relativa relazione confidenziale, mentre ENEA è beneficiaria del WP6. Tuttavia, i fini di rispondere alla domanda di ricerca, i prossimi paragrafi si concentreranno sul WP5.

L'attuazione dello schema di riciclaggio di PHOTORAMA consentirebbe di liberare più di 100.000 tonnellate di materie prime entro il 2030 e, nel 2024, PHOTORAMA ha vinto il premio European Sustainable Energy Award⁴¹ nella categoria Innovazione, riconosciuto per i suoi sforzi pionieristici nel migliorare il riciclo dei pannelli fotovoltaici e la creazione di un modello circolare che unisce il settore manifatturiero a quello del riciclo, poiché i risultati iniziali indicano che il riciclo di 1.200 tonnellate di pannelli fotovoltaici potrebbe portare a un risparmio di oltre 3.800 tonnellate di CO₂ equivalente, ovvero una quantità di gas serra pari a quella emessa da quasi mille automobili guidate per un anno.

3.1.2. Concept

Il concetto alla base di PHOTORAMA è quello di una filiera completamente circolare per i moduli fotovoltaici, che consenta di trasformare i rifiuti in nuove risorse attraverso il recupero di materiali preziosi (Si, In, Ga e Ag). Il progetto prevede lo sviluppo di tecnologie di disassemblaggio automatico, delaminazione e recupero dei metalli, che consentano di separare in modo efficiente i vari componenti dei moduli fotovoltaici. Questo approccio permetterà di evitare la perdita permanente di materiali, che attualmente finiscono in discarica o vengono distrutti nei processi di triturazione, gestendo in modo più responsabile il loro fine vita.

⁴¹ https://sustainable-energy-week.ec.europa.eu/news/project-pioneering-circular-solutions-solar-panel-recycling-wins-2024-european-sustainable-energy-2024-06-11_en

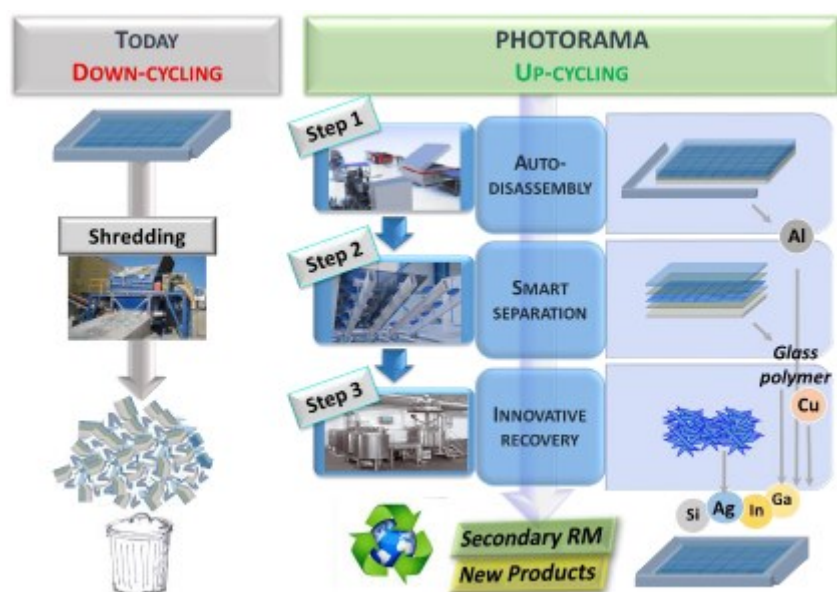


Figura 19⁴². Approccio innovativo proposto da PHOTORAMA in contrasto con la situazione attuale

Un modulo fotovoltaico, assimilabile ad un sandwich, è generalmente circondato da una cornice di alluminio, composta da diversi strati. Gli strati comprendono una lastra frontale in vetro, uno strato di celle solari ed una lastra posteriore in polimero o vetro, sigillata da un polimero incapsulante. La situazione attuale del riciclo dei moduli fotovoltaici EoL è illustrata nella parte sinistra della Figura 19, che rappresenta le pratiche di riciclaggio in corso, basate su processi di frantumazione e triturazione. Le frazioni miste vengono perlopiù smaltite in discarica o infine reindirizzate ad applicazioni di valore molto basso (i.e. down-cycling) che comportano una perdita radicale e irreversibile di materie prime, tra le quali anche materie prime critiche e strategiche contenute nei rifiuti fotovoltaici.

L'approccio innovativo di *up-cycling* promosso da PHOTORAMA e illustrato nella parte destra della Fig. 19 evidenzia il cambio di paradigma rispetto al down-cycling ed i vantaggi in termini di recupero dei materiali. In primo luogo, il lavoro manuale sarà sostituito dall'automazione per rendere l'intero progetto più redditizio e sicuro rispetto alle pratiche attuali. In secondo luogo, la separazione innovativa degli strati consentirà di accedere alle materie prime secondarie incapsulate negli strati dei componenti. In terzo luogo, le nuove tecnologie di estrazione porteranno ad un recupero efficiente dei metalli dalle celle solari. L'intero schema porterà all'*up-cycling* con recupero ad alto valore di

⁴² European Commission, European Health and Digital Executive Agency, 2021.

materie prime, tra cui alluminio dal telaio, vetro dalle lastre superiori e Cu, Si, Ag, In, Ga dalle celle solari.

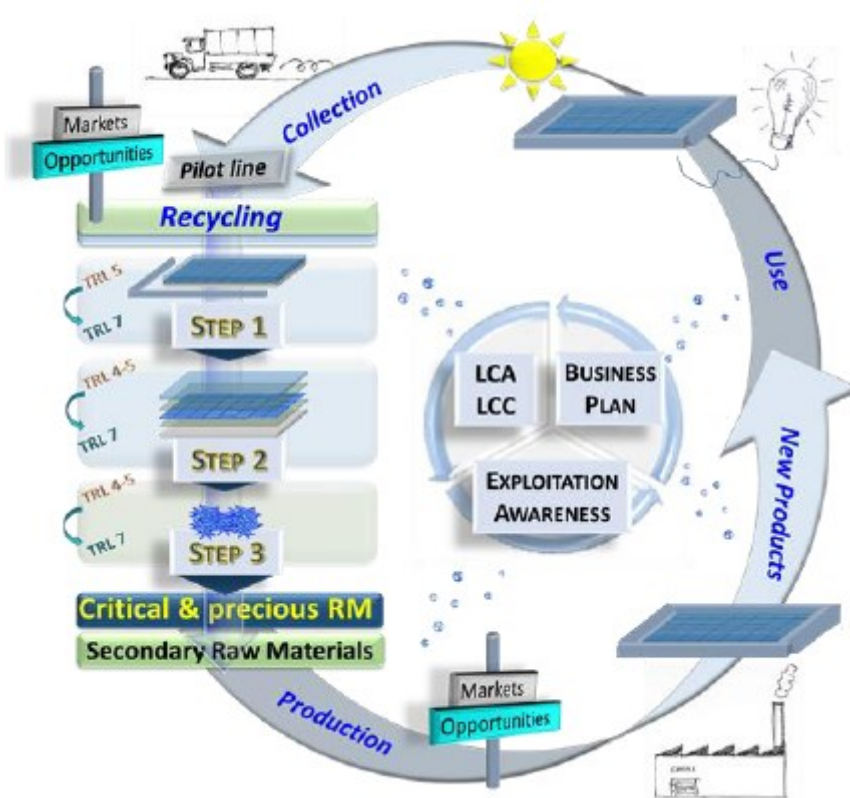


Figura 20⁴³. Concept di PHOTORAMA

Il cuore del concept di PHOTORAMA è la creazione di un ecosistema di innovazione circolare che coinvolga tutti gli attori della catena del valore del fotovoltaico, dalla raccolta dei moduli EoL fino al loro riciclo e alla reintroduzione dei materiali recuperati in nuovi cicli produttivi. Il progetto adotta un approccio sistemico che integra più settori. I moduli fotovoltaici a fine vita, anziché essere smaltiti come rifiuti, vengono recuperati e le materie prime secondarie estratte vengono reintrodotte nei processi produttivi di nuovi moduli o in altri settori industriali in un contesto di simbiosi industriale (cfr. 1.11.2). La Figura 20 illustra questo modello circolare come un flusso continuo di materiali che collega la raccolta, la separazione ed il recupero dei componenti fino alla loro riutilizzazione. I principali materiali target includono vetro, Ag, Si, In, Ga, nonché polimeri utilizzati nei *backsheet* dei moduli. La strategia è suddivisa in tre passaggi fondamentali:

⁴³ European Commission, European Health and Digital Executive Agency (2021).

1. Disassemblaggio automatico dei componenti esterni (telai di alluminio, scatole di giunzione, connessioni elettriche);
2. Separazione intelligente degli strati del modulo (vetro, celle solari, foglio posteriore);
3. Recupero innovativo dei metalli dalle celle solari, con particolare attenzione alla purezza dei materiali recuperati.

PHOTORAMA si concentra sul miglioramento dell'efficienza di recupero dei materiali attraverso processi a basso consumo energetico e con impatto ambientale ridotto. Ad esempio, il processo di taglio con filo di diamante viene utilizzato per separare gli strati di vetro dalle celle solari senza contaminarli, consentendo di recuperare vetro e metalli con un grado di purezza superiore al 95%. In parallelo, viene sviluppata una tecnologia di separazione a fluidi supercritici, che utilizza CO₂ sotto pressione per delaminare i moduli senza l'uso di prodotti chimici nocivi. Questo processo innovativo permetterà una separazione rapida ed efficiente dei materiali, riducendo significativamente il consumo energetico e limitando al massimo la produzione di rifiuti. L'energia richiesta per il processo sarà molto inferiore rispetto ai metodi termici o chimici tradizionali, rendendo il processo sostenibile dal punto di vista ambientale.

L'approccio di PHOTORAMA non è solo tecnologico, ma anche orientato alla creazione di un nuovo modello di business circolare per il settore fotovoltaico. Il mercato emergente dei rifiuti PV rappresenta una grande opportunità economica per l'Europa, specialmente se si considera che molti dei materiali utilizzati nei moduli (come In e Ga) sono classificati dall'Unione europea come materie prime critiche e strategiche per l'economia europea e che la loro domanda è in costante aumento.

La linea pilota di PHOTORAMA potrà trattare 1200 tonnellate di moduli PV all'anno, con l'intento di dimostrare che il riciclo dei moduli fotovoltaici può diventare un business economicamente sostenibile, con costi operativi (OPEX) stimati tra 130-150 €/tonnellata e investimenti iniziali (CAPEX) di circa 1.5-2 milioni di euro.

Dal punto di vista ambientale, PHOTORAMA punta a ridurre l'impatto dell'industria fotovoltaica attraverso l'uso di processi di riciclo a basse emissioni di carbonio, minimizzando l'uso di prodotti chimici e recuperando fino al 98% dei materiali contenuti nei moduli. Inoltre, la produzione di materie prime secondarie attraverso il riciclo ridurrà

la necessità di estrazione di materie prime vergini, contribuendo così a diminuire il *carbon footprint* complessivo dell'industria.

Sul piano sociale, il progetto si propone di coinvolgere tutti gli stakeholder della filiera, inclusi i produttori, i consumatori, le aziende di riciclo e i cittadini. Questo coinvolgimento sarà facilitato da workshop di co-creazione, sondaggi e campagne di sensibilizzazione, con l'obiettivo di aumentare la consapevolezza dell'importanza del riciclo dei moduli fotovoltaici e favorire l'accettazione sociale delle tecnologie sviluppate.

3.1.3 Metodologia

La metodologia del progetto si articola in tre fasi principali che coinvolgono lo sviluppo delle tecnologie, l'ottimizzazione e la dimostrazione su scala industriale. Durante la fase di sviluppo, verranno creati prototipi delle tecnologie di riciclaggio per i moduli fotovoltaici a base di silicio cristallino (c-Si) e per quelli a film sottile (CI(G)S). Una linea pilota sarà installata in Germania, presso il sito di LUX, per trattare questi due flussi di rifiuti e dimostrare la fattibilità delle tecnologie su scala industriale.

Le tecnologie sviluppate includeranno il disassemblaggio automatizzato dei moduli, la separazione degli strati (vetro, celle solari, foglio di supporto) ed il recupero dei metalli. L'uso di processi a basso consumo energetico, come il taglio meccanico e il trattamento con CO₂ supercritica, garantirà un impatto ambientale minimo. Inoltre, saranno esplorate diverse soluzioni per il riutilizzo dei materiali recuperati. Il vetro potrà essere riutilizzato per la produzione di nuovi moduli fotovoltaici, mentre l'argento e il silicio potranno essere reintegrati in processi produttivi come le paste conduttive e i substrati per celle solari.

La metodologia di PHOTORAMA è strutturata in maniera tale da affrontare in modo sistemico tutte le fasi necessarie per sviluppare tecnologie avanzate di riciclo dei moduli fotovoltaici (PV) a fine vita (EoL). Il progetto adotta un approccio integrato, che combina lo sviluppo tecnologico, la dimostrazione su scala industriale e l'analisi degli impatti economici, ambientali e sociali. Questa metodologia ha l'obiettivo di portare le tecnologie di riciclo da livelli di sviluppo TRL4-5 fino alla dimostrazione in ambiente industriale (TRL7), garantendo una transizione fluida dal laboratorio alla produzione su scala.

Il flusso metodologico di PHOTORAMA si sviluppa in tre fasi principali:

1. Sviluppo delle tecnologie (Fase 1): durante questa fase, le tecnologie chiave di disassemblaggio, delaminazione e recupero dei materiali saranno sviluppate e testate su scala ridotta per garantire la loro efficienza e adattabilità. Parallelamente, verranno eseguite le prime valutazioni tecniche, economiche, ambientali e sociali per assicurare che le soluzioni proposte siano sostenibili dal punto di vista sia economico che ambientale.
2. Ottimizzazione e scalabilità (Fase 2): in questa fase intermedia, le tecnologie saranno ottimizzate e scalate per consentire un aumento della capacità produttiva e della velocità di trattamento dei moduli fotovoltaici. Questa fase prevede test più estesi e la raccolta di dati in modo da perfezionare il business plan e garantire la commerciabilità delle soluzioni sviluppate.
3. Dimostrazione industriale (Fase 3): l'ultima fase prevede la dimostrazione delle tecnologie in un ambiente industriale, con l'implementazione di una linea pilota su larga scala presso il sito industriale di LUX in Germania. Durante questa fase, le tecnologie sviluppate verranno utilizzate per trattare moduli fotovoltaici a fine vita (sia a base di silicio cristallino che CI(G)S) e sarà effettuata una valutazione completa dell'impatto economico, ambientale e sociale delle soluzioni proposte.

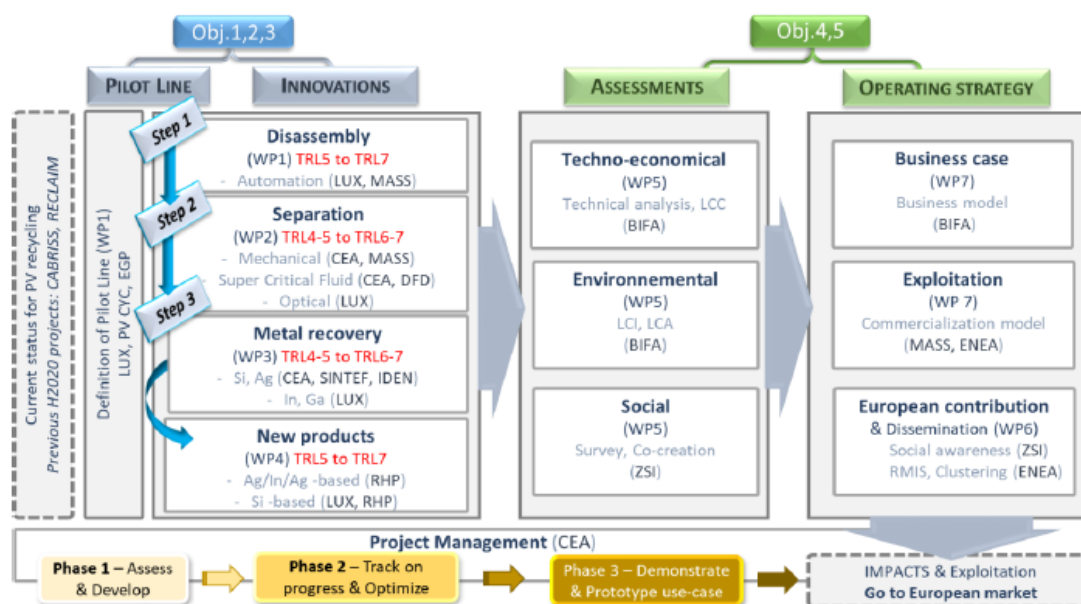


Figura 21⁴⁴. Metodologia

⁴⁴ European Commission, European Health and Digital Executive Agency, 2021.

Il flusso di lavoro del progetto, rappresentato nella Figura 21 è suddiviso in cinque principali pacchetti di lavoro (dall'inglese *work packages*), ciascuno dei quali copre uno specifico aspetto del ciclo di vita dei moduli fotovoltaici a fine vita:

- WP1: Raccolta e disassemblaggio – Questo pacchetto di lavoro si occupa della raccolta dei moduli EoL e del loro disassemblaggio. PVCYC, uno dei partner principali del progetto, fornirà una vasta gamma di moduli fotovoltaici da trattare, garantendo un accesso continuo ai rifiuti fotovoltaici durante tutta la durata del progetto. Saranno sviluppate tecnologie di disassemblaggio automatico che permetteranno di separare componenti esterni come i telai di alluminio e le scatole di giunzione, riducendo il costo e migliorando la sicurezza del processo rispetto alle pratiche manuali attuali.
- WP2: Separazione degli strati – La delaminazione dei moduli è una delle sfide tecnologiche più complesse, poiché i moduli fotovoltaici sono composti da diversi strati strettamente legati (vetro, celle solari, polimeri). PHOTORAMA svilupperà due tecnologie di separazione, un approccio meccanico basato sul taglio con filo di diamante e un approccio fluido basato sull'uso di fluidi supercritici. Entrambe le tecnologie saranno ottimizzate per garantire la separazione completa dei materiali con un elevato grado di purezza, consentendo il loro riutilizzo nei processi produttivi.
- WP3: Recupero dei metalli – Il recupero di metalli quali l'argento (Ag), il silicio (Si), l'indio (In) e il gallio (Ga), sarà realizzato attraverso processi di estrazione innovativi. In particolare, verranno utilizzate tecniche di iono-metallurgia ed elettrodeposizione per garantire l'estrazione selettiva e l'alta purezza dei metalli recuperati. L'obiettivo è ottenere tassi di recupero superiori al 95%, con una purezza dei metalli che raggiunga il 99-99.999%.
- WP4: Riuso e riciclo – Questa fase si concentra sulla reintroduzione dei materiali recuperati nei processi produttivi. Il vetro sarà riutilizzato per la produzione di nuovi moduli fotovoltaici o riciclato per l'industria del vetro piano, mentre i metalli recuperati, come l'argento e il silicio, saranno utilizzati per creare nuovi prodotti, come paste conduttive e substrati per celle solari. L'approccio circolare di PHOTORAMA garantisce che tutti i materiali recuperati abbiano una seconda vita, contribuendo a ridurre la domanda di materie prime vergini e l'impatto ambientale dell'industria.

- WP5 e WP6: Valutazione degli impatti e strategia operativa – Gli impatti economici, ambientali e sociali delle tecnologie sviluppate saranno valutati utilizzando metodologie come LCA (*Life Cycle Assessment*) e LCC (*Life Cycle Costing*). Proprio queste valutazioni, appartenenti al WP5 saranno analizzate di seguito. Queste valutazioni saranno aggiornate costantemente durante tutto il progetto per supportare le decisioni tecnologiche e garantire che le soluzioni proposte siano sostenibili sotto tutti gli aspetti. Parallelamente, saranno sviluppati un piano di business e una strategia di sfruttamento delle tecnologie, con l'obiettivo di portare le soluzioni PHOTORAMA sul mercato europeo.

Le tecnologie sviluppate da PHOTORAMA si basano su un approccio multidisciplinare che combina automazione, tecniche di separazione avanzate e processi di recupero dei metalli a basso impatto ambientale. Le tecnologie principali sono:

- Il disassemblaggio automatico, tecnologia che consente di rimuovere i componenti esterni dei moduli PV (telai in alluminio e scatole di giunzione) in modo efficiente e sicuro, riducendo la necessità di manodopera e migliorando la sicurezza operativa.
- La separazione degli strati con filo di diamante, tecnologia sviluppata da CEA, utilizza un filo di diamante per separare il vetro dalle celle solari senza contaminare i materiali. Questo approccio garantisce un recupero di alta qualità, riducendo al minimo le perdite di materiali preziosi.
- La delaminazione con fluidi supercritici, tecnologia basata sull'uso di CO₂ permette di separare gli strati dei moduli senza l'uso di sostanze chimiche nocive, riducendo il consumo energetico e minimizzando l'impatto ambientale.
- Il recupero dei metalli, tecniche avanzate di iono-metallurgia ed elettrodeposizione che saranno utilizzate per recuperare metalli come argento, silicio e indio dalle celle solari, garantendo un elevato grado di purezza.

L'obiettivo di PHOTORAMA è dimostrare la fattibilità economica e ambientale di un modello di riciclo circolare per i moduli fotovoltaici, riducendo i costi operativi e migliorando l'efficienza del recupero dei materiali. L'implementazione della linea pilota in Germania permetterà di trattare 1200 tonnellate di rifiuti PV all'anno, recuperando materiali preziosi e critici che potranno essere reimmessi nel ciclo produttivo.

3.1.4 Business Model

Il modello di business di PHOTORAMA si basa sulla creazione di nuovi mercati per le materie prime secondarie provenienti dal riciclo dei moduli fotovoltaici. La domanda di materiali come In e Ga, essenziali per l'industria fotovoltaica, è in costante crescita, e l'Europa dipende in gran parte dalle importazioni per soddisfare questa richiesta. PHOTORAMA mira a ridurre questa dipendenza sviluppando una filiera industriale per il riciclo dei moduli, che possa garantire l'approvvigionamento sostenibile di materie prime critiche a livello europeo. Tenendo conto delle stime attuali dei rifiuti fotovoltaici in Europa che indicano una quantità totale di 10 milioni di tonnellate entro il 2050, il riciclo e il recupero di materie prime secondarie dai moduli fotovoltaici EoL, come vetro, polimeri e metalli, sta quindi diventando fondamentale per i seguenti motivi:

- 1) Ricavi potenziali. Il recupero dei moduli fotovoltaici EoL può offrire ricavi significativi se reimmessi nell'industria fotovoltaica o come applicazioni *high-tech* in altri settori industriali.
- 2) Promozione di un settore fotovoltaico sostenibile. Il trasferimento dei moduli fotovoltaici EoL dal regime dei rifiuti allo status di materie prime secondarie contribuirà alla circolarità economica del settore che genererà nuovi mercati per i produttori globali che integrano le fasi di riciclaggio nella catena del valore del fotovoltaico. Dalla produzione dei moduli alla loro installazione, alla raccolta di energia, allo smantellamento/riciclaggio degli impianti fotovoltaici e al ritorno alla produzione dei moduli.
- 3) Sviluppo di un mercato secondario del riciclaggio. La promozione del riciclaggio secondario contribuirà alla circolarità economica e a ridurre la dipendenza del mercato UE per il riciclaggio.

Il modello di business preliminare si basa sui dati attualmente disponibili e sulle aspettative del progetto. Anzitutto viene descritta la capacità della Linea Pilota e i relativi flussi di materiali che sono stati utilizzati per sviluppare l'analisi costi/benefici. In termini economici, la linea pilota avrà una capacità di trattamento di circa 1200 tonnellate di rifiuti fotovoltaici all'anno e genererà nuovi flussi di entrate dalla vendita di materiali di alta qualità. La strategia è quella di puntare alla massima capacità di produzione per facilitare lo *scale-up* dopo il progetto e assicurare un aumento della capacità in linea con la produzione industriale pari a 3.600 tonnellate/anno.

Il progetto prevede di abbattere i costi di smontaggio e separazione dei moduli grazie all'automazione dei processi, riducendo di almeno tre volte i costi attuali. PHOTORAMA si colloca quindi come un progetto pionieristico non solo per le soluzioni tecnologiche sviluppate, ma anche per il suo potenziale di creare nuovi modelli di business nell'economia circolare.

Il modello di business si fonda sull'integrazione dei principi dell'economia circolare nella gestione dei moduli fotovoltaici EoL, puntando a trasformare i rifiuti in risorse attraverso il riciclo di materie prime critiche e preziose. L'obiettivo è creare un ciclo industriale sostenibile e competitivo che generi nuove opportunità di mercato, riducendo la dipendenza dell'Europa dalle importazioni di materie prime e valorizzando al massimo i materiali secondari recuperati. Lo smaltimento in discarica e la triturazione non consentono di recuperare materiali di alta qualità costituendo in tal senso una grande perdita economica, soprattutto considerando il rapido aumento previsto dei rifiuti fotovoltaici. Si stima che entro il 2050 la quantità cumulativa di rifiuti fotovoltaici in Europa raggiungerà i 10 milioni di tonnellate ed in questo contesto è necessario lo sviluppo di una filiera di riciclo tecnologicamente avanzata e commercialmente sostenibile. Il mercato emergente del riciclo dei moduli fotovoltaici offre opportunità significative per l'Europa, sia dal punto di vista economico che ambientale. La creazione di un'infrastruttura per il riciclo dei moduli, infatti, può ridurre la dipendenza dalle importazioni di materie prime critiche fondamentali per la produzione di nuovi moduli fotovoltaici e altre applicazioni industriali.

La linea pilota sarà installata in Germania, presso il sito industriale di LUX, e sarà utilizzata per dimostrare l'efficacia delle tecnologie sviluppate su scala industriale. La linea tratterà sia moduli a base di silicio cristallino (c-Si), che rappresentano circa il 95% del mercato PV, sia moduli a film sottile (CI(G)S). Uno degli elementi chiave del modello di business è la riduzione dei costi operativi (OPEX) grazie all'automazione dei processi. Attualmente, il disassemblaggio manuale dei moduli PV è un processo costoso e pericoloso; PHOTORAMA punta a ridurre questi costi di almeno tre volte, passando da un costo attuale di 0.1-0.3 €/kg ad una spesa significativamente inferiore grazie all'introduzione di tecnologie di disassemblaggio automatico.

L'automazione non solo ridurrà i costi ma migliorerà anche la sicurezza operativa eliminando la necessità di manodopera manuale per le fasi più rischiose del processo di riciclo. Il modello di business di PHOTORAMA si basa su diversi flussi di entrate

derivanti dalla vendita di materie prime secondarie di alta qualità recuperate dai moduli PV:

- Vetro. Uno dei materiali principali recuperati dai moduli fotovoltaici è il vetro che può essere riutilizzato per la produzione di nuovi moduli o riciclato nell'industria del vetro piano. La linea pilota sarà in grado di recuperare più di 750 tonnellate di vetro all'anno, contribuendo a ridurre la domanda di vetro vergine.
- Argento (Ag). L'argento recuperato dalle celle solari sarà utilizzato per la produzione di paste conduttive, inchiostri e adesivi elettricamente conduttivi. Questo mercato presenta elevate opportunità di crescita dato che l'argento è un componente essenziale nei processi di produzione fotovoltaica.
- Silicio (Si). Il silicio recuperato sarà riutilizzato per la produzione di nuovi substrati per celle solari o come additivo in leghe metalliche. Il riciclo del silicio offre un grande vantaggio competitivo, poiché rappresenta circa il 32% della produzione mondiale di silicio.
- Indio (In) e Gallio (Ga). Questi metalli saranno riciclati per essere riutilizzati nei processi di deposizione per moduli a film sottile o in altri settori ad alta tecnologia, come l'elettronica. L'indio, in particolare, è un materiale chiave per la produzione di rivestimenti conduttivi e semiconduttori.

Il business plan di PHOTORAMA prevede una spesa di capitale iniziale (CAPEX) compresa tra 1.5 e 2 milioni di euro, necessaria per l'installazione della linea pilota. Il costo operativo (OPEX) stimato per il trattamento dei moduli fotovoltaici sarà di 130-150 €/tonnellata. Questi costi saranno sostenibili grazie ai flussi di entrate generati dalla vendita delle materie prime secondarie, che offriranno nuovi margini di profitto.

Una volta dimostrata la fattibilità delle tecnologie e la sostenibilità economica della linea pilota, il modello di business prevede la scalabilità del processo a livello europeo, con l'obiettivo di creare nuove linee di riciclo in diversi Paesi, a partire dalle regioni con il maggior volume di rifiuti fotovoltaici, come Francia e Germania.

Uno degli aspetti centrali del modello di business di PHOTORAMA è la sostenibilità ambientale. L'uso di processi a basso consumo energetico e il riciclo dei materiali ridurranno significativamente l'impatto ambientale del ciclo di vita dei moduli fotovoltaici. Questo aspetto sarà cruciale per attirare l'interesse di stakeholder e

investitori orientati verso la sostenibilità e per garantire che i prodotti ottenuti dal riciclo rispettino gli standard ambientali europei.

Dal punto di vista competitivo, PHOTORAMA si posiziona come una delle prime iniziative europee in grado di gestire in modo completo e sistemico il fine vita dei moduli fotovoltaici. Il progetto offrirà soluzioni tecnologiche innovative che miglioreranno significativamente i tassi di recupero e la qualità dei materiali rispetto alle attuali pratiche di riciclo. Questo vantaggio competitivo permetterà a PHOTORAMA di inserirsi in un mercato emergente con una proposta di valore unica, basata su efficienza, sostenibilità e riduzione dei costi.

PHOTORAMA ha il potenziale per diventare un modello di riferimento nel settore del riciclo dei moduli fotovoltaici in Europa. Dopo il completamento del progetto, i partner industriali coinvolti, come LUX e MASS, intendono scalare la linea pilota per trasformarla in una linea di riciclo commerciale a pieno regime. Questo permetterà di gestire volumi ancora maggiori di rifiuti fotovoltaici e di aumentare la produzione di materie prime secondarie, contribuendo a garantire un approvvigionamento sostenibile di risorse critiche per l'economia europea.

3.2. Valutazione del ciclo di vita (LCA)

PHOTORAMA prevede la realizzazione di un inventario del ciclo di vita (*Life Cycle Inventory* o LCI) e di una valutazione del ciclo di vita (*Life Cycle Assessment* o LCA) sulla base di dati industriali pubblici e di dati confidenziali forniti dai partner del progetto. I risultati sono stati monitorati e convalidati per tutta la durata del progetto, dal 2020 al 2025, utilizzando le più recenti metodologie standardizzate. I dati sono integrati con dati economici per i costi del ciclo di vita (*Life Cycle Costing* o LCC) e l'analisi dell'eco-efficienza. Per una comprensione più approfondita del processo di analisi della valutazione del ciclo di vita (LCA), si invita il lettore interessato a consultare l'appendice, dove sono riportati i dati intermedi dell'LCA che hanno supportato la determinazione dei risultati finali. In questo capitolo sono presentati esclusivamente i risultati conclusivi, al fine di garantire una trattazione sintetica e chiara della valutazione complessiva. L'appendice offre tuttavia l'opportunità di esaminare nel dettaglio le fasi intermedie e il percorso analitico che ha condotto all'LCA finale.

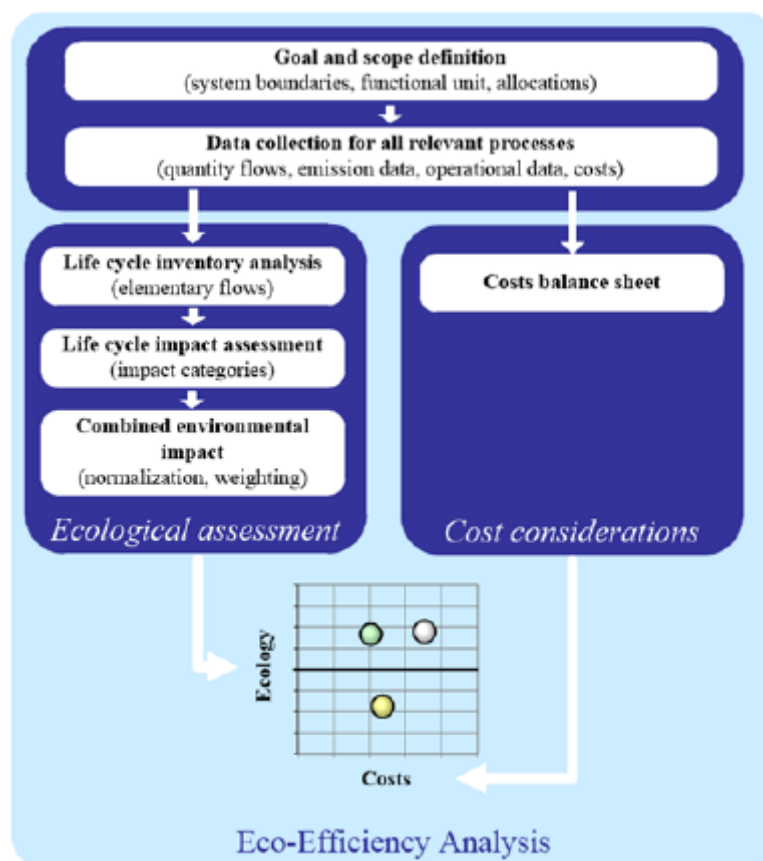


Figura 22. Fasi per considerare l'impatto ambientale ed economico congiunto nel contesto dell'analisi di ecoefficienza

L'analisi dell'eco-efficienza illustrata nella Figura 22 è l'ottimizzazione degli aspetti economici ed ecologici combinati (LCA/LCC) che verrà utilizzata per identificare i percorsi di sviluppo e i prodotti più promettenti. Verrà inoltre applicata per sviluppare processi di riciclaggio con la massima resa e qualità possibile da un punto di vista economico per i singoli materiali utilizzati nella fase di produzione. L'analisi di eco-efficienza inizia con la definizione dei confini del sistema e dei processi alla quale segue la raccolta dei dati ambientali ed economici, sino a costruire l'LCI ed eseguire l'LCA sulle categorie di impatto concordate nella fase di definizione.

In questo contesto, un concetto importante è quello di impronta ambientale del prodotto, una misura fondata sulla valutazione delle prestazioni ambientali di un prodotto, analizzate lungo tutto il ciclo di vita, dall'approvvigionamento delle materie prime al fine vita, calcolate al fine di ridurre gli impatti ambientali di tale bene o servizio. La Commissione Europea ha pubblicato la raccomandazione 2021/2279/UE che definisce un metodo unico europeo per la valutazione e comunicazione dell'impronta ambientale dei prodotti denominato *Product Environmental Footprint* o PEF. Sono inoltre state

elaborate delle regole di categoria relative all'impronta ambientale dei prodotti (*Product Environmental Footprint Category Rules* o PEFCR) ovvero delle regole, basate sul ciclo di vita, specifiche per tipologia di prodotto, tra cui anche i moduli fotovoltaici, che completano il metodo PEF identificando ulteriori requisiti per una data categoria di prodotto (Polverini et al., 2023). Per i moduli fotovoltaici si tiene dunque conto sia del PEF che delle PEFCR. Gli indicatori chiave di prestazione ambientale nell'ambito del LCA possono essere calcolati dopo la normalizzazione e la ponderazione, sulla base dei fattori attuali (Sala, 2018)⁴⁵. Questi saranno utilizzati, insieme all'analisi dei costi, per costruire il portafoglio di eco-efficienza, che è illustrato nella Figura 22. Per completare l'analisi tecno-economica, ambientale e di eco-efficienza, sarà sviluppata anche un'analisi sociale con un'ampia indagine e workshop di co-creazione. Il concept di PHOTORAMA sarà dimostrato dalla Linea Pilota che convaliderà le tecnologie di riciclo e dimostrerà il riutilizzo delle materie prime secondarie in nuovi moduli fotovoltaici (o altri prodotti di alto valore). In questo modo, il modello completo di riciclo/reintegrazione delle materie prime secondarie dimostrerà il potenziale di attuazione della circolarità dell'economia nel settore fotovoltaico con catene del valore interdisciplinari. Poiché i ricavi varieranno tra le possibili applicazioni a seconda della purezza del materiale recuperato, verrà eseguito uno studio di fattibilità tecno-economica. Tale analisi valuterà e massimizzerà gli impatti del progetto PHOTORAMA selezionando gli approcci più vantaggiosi.

3.2.1. Impostazione del modello, unità funzionale, scenari, limiti, confini

Nell'ambito del progetto PHOTORAMA e più in particolare del WP5 Valutazioni tecnico-economiche, ambientali e sociali, sono stati raccolti dati per la modellazione e l'implementazione di benchmark relativi ai processi di riciclo dei moduli fotovoltaici a fine vita. L'obiettivo principale è stabilire un riferimento per confrontare i progressi tecnologici e ambientali ottenuti attraverso nuovi processi sviluppati nel progetto. La metodologia utilizzata si basa sulle norme internazionali (DIN EN ISO 14040 e 14044) e, come anticipato nel 3.2, sul PEF e sulle PEFCR.

L'LCA è definita come un metodo sistemico per l'analisi degli impatti ambientali associati a prodotti, processi o servizi, considerando l'intero ciclo di vita—dall'estrazione

⁴⁵ Current Environmental Footprint Reference Package 3.0:

https://eplca.jrc.ec.europa.eu/permalink/Normalisation_Weighting_Factors_EF_3.0.xlsx

delle materie prime allo smaltimento finale. Questo approccio consente una valutazione integrata e trasversale dei flussi di materiali ed energia, nonché delle emissioni negli ambienti terrestri, acquatici e atmosferici. Il progetto PHOTORAMA applica questa metodologia per analizzare il riciclo dei moduli fotovoltaici, con particolare attenzione ai flussi di materiali critici e alle emissioni. L’LCA adottato nel progetto PHOTORAMA si conforma alle norme DIN EN ISO 14040 e DIN EN ISO 14044, garantendo rigore metodologico nella raccolta e interpretazione dei dati. In aggiunta, le linee guida del Product Environmental Footprint (PEF) e delle Product Environmental Footprint Category Rules (PEFCR) per il fotovoltaico sono state integrate per allineare lo studio agli standard europei più recenti.

Il concetto di unità funzionale costituisce l’elemento centrale di uno studio di valutazione del ciclo di vita (LCA), come definito nella norma ISO 14041. Secondo questa norma, l’unità funzionale è descritta come “utilizzo quantificato di un sistema di prodotto, impiegato come riferimento comparativo in uno studio di ecobilancio”. Questo parametro standardizzato è essenziale per confrontare scenari diversi e stabilire criteri uniformi per i dati di input e output analizzati.

In questo studio, l’unità funzionale è definita come il trattamento di 1.000 tonnellate annue di moduli fotovoltaici (PV) a fine vita (EoL), riflettendo la capacità pianificata dell’impianto di riciclaggio. Il progetto considera tre tipologie di moduli:

- Moduli fotovoltaici in silicio cristallino (c-Si)⁴⁶
- Moduli in c-Si con lastra di vetro e superficie posteriore in alluminio (Al-BSF)
- Pannelli a film sottile (CIS/CIGS).

La differenza di dimensioni e peso tra i moduli fotovoltaici influisce direttamente sul numero di unità processabili annualmente a parità di capacità impiantistica (1.000 t/anno). I pannelli c-Si (Al-BSF), più pesanti, raggiungono 54.000 unità/anno, mentre i più leggeri CI(G)S arrivano a 57.000. Lo studio ha inoltre analizzato la composizione materiale dei moduli, con i dettagli per i c-Si (Al-BSF) disponibili nella seguente tabella.

⁴⁶ I moduli c-Si rappresentano una delle tecnologie più diffuse per la conversione dell’energia solare in elettricità. Tra le varianti dei moduli c-Si si trova la tecnologia Al-BSF (Aluminum Back Surface Field), nella quale viene applicato uno strato di alluminio sulla superficie posteriore delle celle. Tale strato crea un campo elettrico superficiale che riduce la ricombinazione degli elettroni e migliora la raccolta della corrente, incrementando così l’efficienza del modulo rispetto a una cella c-Si standard. I moduli c-Si sono stati inizialmente presi in considerazione nell’analisi intermedia LCA, presente in appendice. Sono stati successivamente sostituiti dai c-Si Al-BSF nell’LCA finale, per la loro maggiore efficienza.

Componente	Valore (kg/modulo)
Scatola di giunzione elettrica	0,17
Cavi	0,12
Telaio in alluminio pulito	0,45
Alluminio non pulito (silicone e/o vernice)	2
Vetro	13,2
Superficie posteriore + EVA	1,74
Argento	0,02
Alluminio	0,05
Rame	0,17
Silicone	0,83
Somma	18,74

Tabella 13. Composizione dei pannelli in c-Si con lastra di vetro e superficie posteriore in alluminio (Al-BSF) considerati in questo progetto

Componente	Valore (kg/modulo)
Scatola di giunzione elettrica	0,17
Cavi	0,12
Vetro	14,22
Telaio in acciaio	2,51
Polimero	0,64
Rame	0,002
Gallio	0,002
Indio	0,004
Selenio	0,01
Somma	17,68

Tabella 14. Composizione dei pannelli a film sottile CI(G)S che contengono gallio, indio e selenio al posto del silicio.

Questa analisi mette a confronto le tecnologie di riciclo all'avanguardia esistenti con i progressi innovativi sviluppati nel progetto PHOTORAMA. Per ogni tipologia di modulo fotovoltaico analizzato (c-Si Al-BSF e CI(G)S), sono stati definiti due scenari:

- **Scenario Benchmark:** riproduce i metodi di riciclo tradizionali, considerati lo stato dell'arte precedente al progetto.
- **Scenario PHOTORAMA:** incorpora le soluzioni ottimizzate, come nuove tecniche di separazione dei materiali o processi chimici più efficienti.

La denominazione degli scenari riflette questa dualità:

- Per i moduli **c-Si Al-BSF**, si confrontano il riciclo convenzionale (Benchmark) con l'approccio innovativo (PHOTORAMA).
- Per i moduli **CI(G)S**, il parallelo è analogo: Benchmark (tecnologie standard) vs. PHOTORAMA (metodi avanzati).

Per consentire un confronto significativo tra gli scenari analizzati, è fondamentale stabilire con precisione l'unità funzionale e delimitare i confini del sistema sotto esame. Secondo la norma ISO 14041, i confini del sistema rappresentano l'insieme dei moduli e dei processi inclusi nell'analisi. Idealmente, il sistema dovrebbe essere modellato in modo che tutti gli input (risorse, energia) e gli output (emissioni, rifiuti) corrispondano a flussi elementari misurabili ai suoi margini.

Tuttavia, quando i dati disponibili o le risorse tecniche non permettono un'analisi completa, è necessario operare scelte strategiche su quali moduli includere (es. fasi di trasporto, pre-trattamento, smaltimento finale); quali emissioni considerare (es. gas serra, metalli pesanti) e il livello di dettaglio richiesto per ciascuna componente.

Queste decisioni, seppur pragmatiche, devono garantire coerenza metodologica e trasparenza, evitando di escludere elementi critici per la valutazione ambientale.

All'interno dei confini del sistema vengono considerate le seguenti fasi:

- La produzione, la lavorazione e lo smaltimento dei materiali, compreso il trattamento dei residui e dei materiali riciclabili.
- Tutti i flussi di materiali ed energia rilevanti per i processi, a partire dall'estrazione e dal trattamento delle materie prime, fino alla fornitura di materiali di consumo, ausiliari e materie prime per la produzione (feedstock), e, per quanto possibile, lo smaltimento dei residui.
- Nelle condizioni ideali, i confini del sistema comprendono l'intero ciclo; dall'estrazione delle materie prime dai giacimenti naturali, passando per la loro disponibilità al trattamento tecnico successivo, fino al rilascio dei flussi elementari nei comparti ambientali di acqua, aria e suolo.

Nel definire il livello di dettaglio del modello, è fondamentale garantire che sia possibile effettuare un'analisi comparativa efficace tra gli scenari dei processi esaminati.

Secondo la norma DIN 1997, gli input di materiali ed energia (lato input) e le emissioni e i prodotti (lato output) devono essere considerati come flussi elementari ai confini del sistema, laddove ciò sia possibile nella modellizzazione. È importante che le catene di approvvigionamento dei materiali e dei combustibili vengano modellate a partire dall'estrazione delle risorse naturali fino alla loro disponibilità per il processo specifico. In assenza di dati specifici, è necessario ricorrere a procedure simili e formulare assunzioni basate su questi confronti.

La produzione di materie prime, materiali di esercizio e materiali di partenza nei processi a monte (cioè quelli che precedono il modulo analizzato) può essere esclusa dall'analisi se rispetta i criteri di dettaglio stabiliti in questo studio. In questi casi, nel bilancio ambientale viene riportato semplicemente il flusso di materiale, senza entrare nel dettaglio dei singoli flussi elementari.

Il limite per trascurare la modellizzazione dei processi a monte di un materiale in ingresso è fissato all'1% del peso del flusso di riferimento (di solito l'output richiesto). Tuttavia, la somma totale di tutti i materiali trascurati per un processo non deve superare il 3% del flusso di riferimento. Fanno eccezione i materiali con massa molto bassa, ma il cui processo a monte può avere un impatto significativo sull'LCA, ad esempio per aspetti legati alla tossicità o al consumo energetico.

Gli stessi criteri si applicano ai rifiuti e ai processi successivi al modulo analizzato. Lo smaltimento viene modellato quando i criteri di esclusione non sono sufficienti o quando le informazioni disponibili nei database non chiariscono se questi processi siano già stati considerati.

Quando si ricicla, oltre al prodotto principale, si ottengono altri vantaggi come la produzione di elettricità, calore o il recupero di materiali utili. Questi benefici fanno sì che non sia più necessario produrre energia o materie prime in modo tradizionale, riducendo così l'impatto ambientale. Gli impatti ambientali che sono stati evitati grazie a questi processi vengono considerati come "crediti" positivi nel bilancio ambientale del prodotto. Per fare un'analisi completa, bisognerà considerare questi impatti evitati e assegnare i crediti al sistema del prodotto. In pratica, gli effetti positivi del riciclo vengono sottratti dagli impatti totali del processo. Quando si calcola il beneficio aggiuntivo, si usa

un “processo di equivalenza” che mostra come si sarebbe ottenuto lo stesso beneficio in modo tradizionale. Tuttavia, spesso i materiali recuperati non sono perfettamente uguali a quelli originali. Per questo, si usa un “fattore di sostituzione” che tiene conto delle differenze tra i materiali primari e quelli riciclati. Questo metodo permette di collegare direttamente i risultati dell’analisi ambientale solo agli input e output del sistema studiato.

È importante considerare questi processi di equivalenza e i relativi crediti, per esempio quando si inceneriscono i rifiuti. In generale, i benefici extra sono trattati come risultati del sistema di prodotto. Se non c’è un’equivalenza perfetta tra materiali primari e secondari, si usa comunque il fattore di sostituzione per valutare correttamente i vantaggi ambientali.

Per classificare i risultati dell’analisi del ciclo di vita (LCA) e valutare la validità dei dati, oppure garantire la comparabilità con altre LCA, è necessario definire un riferimento geografico e temporale. L’ambito geografico dipende dal contesto economico e dalla definizione del prodotto (ad esempio: sito di produzione, catene di fornitura, ecc.). Il periodo temporale di riferimento è ampio e corrisponde all’anno o al periodo dei dati raccolti. Nel caso di prodotti durevoli, la durata di vita o di utilizzo stimata è molto importante. Si riconosce che modellare queste fasi può essere difficile a causa dell’incertezza legata a scenari futuri di smaltimento o riutilizzo. In questo studio, i dati utilizzati coprono generalmente l’Europa occidentale e, per alcuni aspetti, il contesto globale, con l’inclusione di produttori cinesi per diversi materiali e processi. Le fonti dei dati sono principalmente due: database commerciali aggiornati (ecoinvent 3.8) e conoscenze interne del team del progetto.

3.2.2. Analisi dell’inventario del ciclo di vita (LCI)

L’analisi dell’inventario del ciclo di vita, comunemente indicata con l’acronimo LCI (Life Cycle Inventory), rappresenta una fase cardine nella valutazione ambientale di un prodotto. Tale attività consiste nella raccolta, organizzazione e quantificazione dei dati relativi ai flussi di materiali e di energia che entrano e escono dal sistema produttivo, considerando tutte le fasi significative del ciclo di vita. Il risultato di questa analisi fornisce una base solida e dettagliata per la successiva valutazione degli impatti ambientali (LCIA), nonché per ulteriori approfondimenti di natura tecnica ed economica.

La modellazione del sistema produttivo costituisce il punto di partenza per la raccolta dei dati e il calcolo dei bilanci relativi a ciascun processo. È pertanto indispensabile

identificare con precisione i processi rilevanti, prendere in considerazione sia le fasi a monte sia quelle a valle della filiera, e utilizzare strumenti affidabili come il databaseecoinvent versione 3.9.1 per lo svolgimento dei calcoli.

Il processo di costruzione del modello si articola in diverse fasi: si procede con la descrizione dettagliata di ciascuna componente del sistema, si definiscono in modo rigoroso i processi coinvolti nello scenario analizzato, si documentano le fonti dei dati utilizzati – indicando l’anno di riferimento, la provenienza e il grado di rappresentatività – e si registrano le ipotesi e gli accordi adottati. Infine, si elaborano i dati dell’inventario per ciascun processo, assicurando la massima trasparenza e la tracciabilità delle informazioni.

Le fonti dei dati possono comprendere partner di progetto, database specializzati, pubblicazioni scientifiche e studi di letteratura specifici sul tema della valutazione del ciclo di vita. Tutti questi elementi vengono puntualmente descritti nel capitolo 3.2.4 per ciascuno scenario analizzato, al fine di garantire la replicabilità e la correttezza metodologica dell’intera analisi.

3.2.3. Valutazione degli impatti del ciclo di vita (LCIA)

La valutazione degli impatti del ciclo di vita (LCIA) consiste nel riepilogare i risultati dell’inventario del ciclo di vita (LCI) per valutarne gli effetti ambientali. I dati raccolti vengono organizzati in categorie di impatto specifiche (es. acidificazione, cambiamento climatico), calcolando i valori complessivi per ciascuna categoria.

Ogni categoria di impatto è collegata a un meccanismo più o meno complesso che contribuisce a determinati problemi ambientali. L’analisi parte dall’identificazione delle sostanze rilasciate dal sistema studiato o delle azioni che modificano l’ambiente. Ad esempio, il rilascio di protoni può essere utilizzato come indicatore per quantificare l’impatto legato all’acidificazione del suolo o delle acque.

La Figura 23 illustra il rilascio di protoni come indicatore della categoria di impatto “acidificazione”.

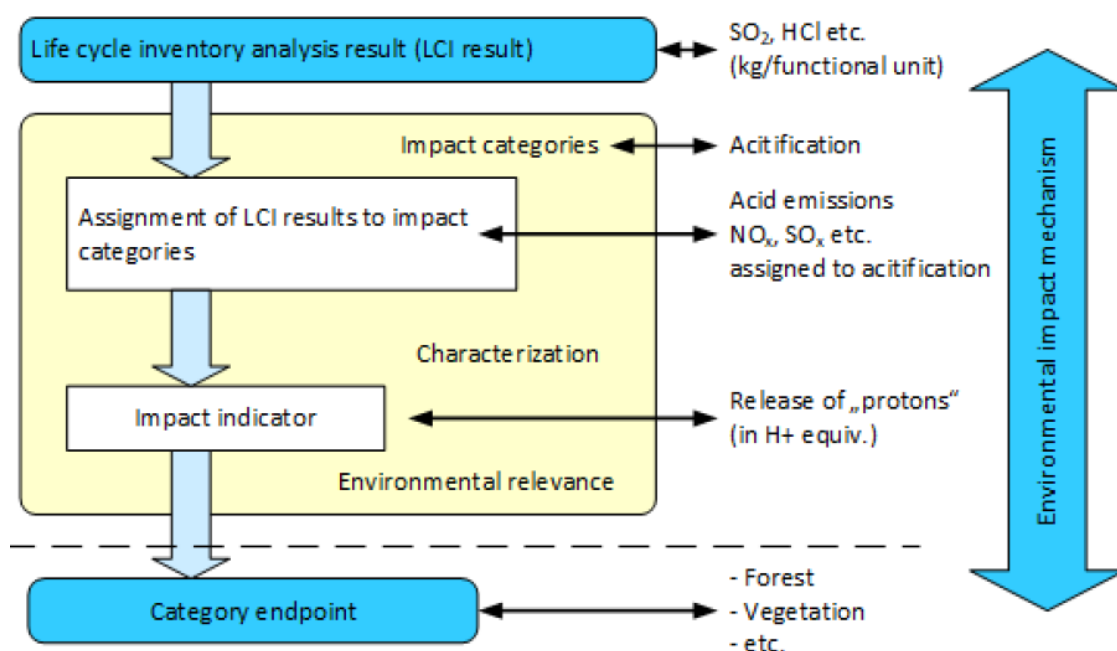


Figura 23. Conversione dei risultati dell'inventario del ciclo di vita in indicatori di impatto che rappresentano i punti finali dell'impatto, utilizzando l'esempio dell'acidificazione

La classificazione degli impatti ambientali all'interno di una valutazione del ciclo di vita si fonda sull'identificazione di uno o più indicatori appropriati per ciascuna categoria di impatto. Tali indicatori rappresentano il legame tra il sistema oggetto di analisi, caratterizzato dai dati dell'inventario del ciclo di vita (LCI), e il cosiddetto punto di mezzo (midpoint) della categoria di impatto, ovvero la fase intermedia del meccanismo attraverso cui si manifesta l'effetto ambientale. L'indicatore di impatto viene scelto in modo tale da rappresentare nel modo più accurato possibile la categoria di riferimento e può essere individuato sia tra i risultati dell'inventario sia tra i punti chiave del meccanismo di impatto ambientale. Inoltre, le emissioni dirette registrate nel LCI possono essere impiegate direttamente come indicatori di impatto, qualora risultino sufficientemente rappresentative. La selezione delle categorie di impatto da considerare in una specifica analisi del ciclo di vita è guidata sia dallo stato attuale delle conoscenze scientifiche in ambito ambientale sia dagli obiettivi cognitivi del progetto. In questo studio, le categorie ritenute rilevanti sono quelle riconosciute dal Joint Research Centre della Commissione Europea – Institute for Environment and Sustainability, che rappresentano lo standard di riferimento nel contesto della valutazione dell'impronta ambientale. Tuttavia, le tre categorie relative alla tossicità – tossicità umana cancerogena, tossicità umana non cancerogena ed ecotossicità per le acque dolci – non sono state incluse nell'analisi poiché, allo stato attuale delle conoscenze, i relativi indicatori non

sono considerati sufficientemente robusti per essere inseriti in comunicazioni ufficiali o in risultati ponderati nell'ambito dell'impronta ambientale (EF). L'intenzione è comunque quella di integrarle in futuro, una volta che la loro solidità metodologica sarà stata ulteriormente rafforzata.

La valutazione degli impatti si basa principalmente sui risultati ottenuti dai singoli indicatori, calcolati a partire dai dati dell'inventario del ciclo di vita. Nel caso in cui più parametri del LCI contribuiscano a un unico indicatore di impatto, diventa necessario stabilire un'unità di misura comune per consentire la conversione e la somma dei risultati. A tal fine, vengono utilizzati diversi modelli di caratterizzazione, che possono variare per complessità e che definiscono la relazione tra l'indicatore di impatto e i parametri del ciclo di vita presi in esame. Tali modelli permettono di ottenere un fattore di caratterizzazione unitario, come ad esempio la mole di equivalenti di protoni (H^+) per chilogrammo di gas acidificante emesso. In questo modo, i risultati del LCI vengono convertiti nell'unità di misura scelta e aggregati per ottenere il valore complessivo dell'indicatore di impatto, come illustrato nella Figura 23.

La Tabella 15 presenta le categorie di impatto selezionate per questo studio, il metodo LCIA raccomandato, l'indicatore e l'unità utilizzati per quantificare l'impatto ambientale. Questi indicatori permettono di valutare gli effetti ambientali associati ai processi analizzati.

Categoria di impatto	Metodo LCIA raccomandato	Indicatore	Unità	Classificazione ^d
Cambiamento climatico	Modello di base di 100 anni dell'IPCC	Forzatura radiativa come Potenziale di Riscaldamento Globale (GWP100)	kg CO ₂ eq.	I
Deplezione dell'ozono	ODP in stato stazionario	Potenziale di Deplezione dell'Ozono (ODP)	kg CF-11 eq.	I
Particolato	Metodo PM raccomandato dall'UNEP	Effetti sulla salute umana associati all'esposizione a PM2.5	Incidenza della malattia	I
Radiazioni ionizzanti, salute umana	Modello degli effetti sulla salute umana sviluppato da Dreicer ^c 1995	Efficienza dell'esposizione umana relativa a U235	kBq U ²³⁵ eq.	II
Formazione di ozono fotochimico, salute umana	LOTOS-EUROS	Incremento della concentrazione di ozono troposferico	kg NMVOC eq.	II
Acidificazione	<u>Accumulated Exceedance</u>	<u>Accumulated Exceedance</u>	mole H ⁺ eq.	II
Eutrofizzazione terrestre	<u>Accumulated Exceedance</u>	<u>Accumulated Exceedance</u>	mole N eq.	II
Eutrofizzazione d'acqua dolce	Modello EUTREND implementato in ReCiPe	Frazione di nutrienti che raggiungono compartimenti d'acqua dolce	kg P eq.	II
Eutrofizzazione marina	Modello EUTREND implementato in ReCiPe	Frazione di nutrienti che raggiungono compartimenti marini	kg N eq.	II
Uso del suolo	Indice della qualità del suolo basato sul modello LANCA	Indice della qualità del suolo ^a (produzione biotica, resistenza all'erosione, filtrazione meccanica e ricarica delle acque sotterranee)	P ^{tb}	III
Uso dell'acqua	AWARE (Available Water REmaining)	Potenziale di privazione dell'acqua (consumo ponderato per privazione)	kg world eq. deprived	III
Uso delle risorse, minerali e metalli	CML	Deplezione delle risorse abiotiche – combustibili fossili (riserve finali ADP)	kg Sb eq.	III
Uso delle risorse, vettori energetici	CML	Deplezione delle risorse abiotiche - combustibili fossili (ADP-fossili) ^c	MJ	III

Tabella 15. Metodi raccomandati per lo schema EF (impronta ambientale), compresi indicatore, unità e livello di raccomandazione (Estratto della categoria di impatto applicata utilizzata in questo studio)

Note:

- **a)** L'indice della qualità del suolo è il risultato dell'aggregazione, effettuata dal JRC, dei 4 indicatori forniti dal modello LANCA per la valutazione degli impatti dovuti all'uso del suolo
- **b)** Pt = Punti; Indice aggregato senza dimensione che include:
 - kg produzione biotica/(m²*a) – si riferisce a occupazione e trasformazione.
 - kg suolo/(m²*a).
 - m³ acqua/(m²*a).
- **c)** Nell'elenco dei flussi ILCD, l'Uranio è incluso tra i vettori energetici ed è misurato in MJ.
- **d)** Livello di raccomandazione secondo i livelli ILCD:
 - Livello I: Raccomandato e soddisfacente.
 - Livello II: Raccomandato ma necessita miglioramenti.
 - Livello III: Raccomandato ma da applicare con cautela.

Le categorie di impatto possono essere descritte brevemente come segue:

- **Cambiamento climatico:** Le emissioni di gas serra alterano la temperatura e il clima, con effetti negativi anche sulla salute umana.
- **Deplezione dell'ozono:** Le emissioni danneggiano lo strato di ozono, aumentando la radiazione ultravioletta, che può causare tumori della pelle e danni alle piante.
- **Particolato:** Le emissioni di particelle fini provocano malattie respiratorie e il cosiddetto “smog invernale”.
- **Radiazioni ionizzanti (salute umana):** L'esposizione a radiazioni aumenta il rischio di tumori.
- **Formazione di ozono fotochimico (salute umana):** Le emissioni contribuiscono allo “smog estivo” e a malattie respiratorie.
- **Acidificazione:** Le emissioni causano piogge acide, peggiorando la qualità dell'aria, dell'acqua e del suolo.
- **Eutrofizzazione terrestre:** Un'eccessiva presenza di nutrienti nell'ambiente (ad esempio, dovuta all'uso intensivo di fertilizzanti) altera l'equilibrio naturale.

- **Eutrofizzazione delle acque dolci:** Un eccesso di nutrienti nelle acque dolci (ad esempio, da fertilizzanti o acque reflue) provoca fioriture algali che possono uccidere i pesci.
- **Eutrofizzazione marina:** Un'eccessiva quantità di nutrienti nelle acque marine causa fioriture algali, alterando l'ecosistema marino.
- **Uso del suolo:** L'utilizzo del suolo minaccia la fertilità del terreno e la sopravvivenza di alcune specie animali e vegetali.
- **Uso dell'acqua:** L'uso delle risorse idriche dolci ne riduce la disponibilità per usi futuri.
- **Uso delle risorse (metalli e minerali):** L'impiego di minerali e metalli in un prodotto ne limita la disponibilità per usi futuri.
- **Uso delle risorse (vettori energetici):** L'utilizzo di combustibili fossili riduce le riserve disponibili per il futuro.

3.2.4. LCI per ciascuno scenario

I partner del progetto hanno raccolto dati per l'LCI relativi a ciascuna fase delle catene di processo, considerando sia gli input (energia, materie prime, materiali operativi) sia gli output (prodotti, rifiuti, emissioni). Per garantire la costruzione di un modello indipendente dalla composizione specifica dei moduli, sono state integrate anche informazioni sull'efficienza delle singole fasi di processo. Il presente rapporto non descrive nel dettaglio i dati forniti dai partner, sui quali si fonda la valutazione del ciclo di vita. Tuttavia, viene presentata una panoramica della struttura del modello e vengono illustrati i sistemi di equivalenza adottati per quantificare i benefici ambientali. La struttura del modello, sviluppata con il software GaBi, riflette la rappresentazione tecnica delle fasi di processo e si articola su livelli gerarchici corrispondenti a componenti impiantistiche o a step operativi. Questa organizzazione consente di analizzare in profondità le strutture mappate durante la valutazione degli impatti (LCIA), effettuare valutazioni settoriali e identificare i fattori influenti in casi specifici. La seguente figura mostra schematicamente l'architettura del modello e la suddivisione in livelli. Inoltre, il modello è stato progettato per adattarsi a diverse configurazioni di tipologie modulari, grazie all'impiego di parametri globali accessibili da tutte le fasi di processo. Questa

flessibilità permette di personalizzare la catena produttiva in base alle esigenze specifiche, mantenendo al contempo coerenza metodologica e tracciabilità dei dati.

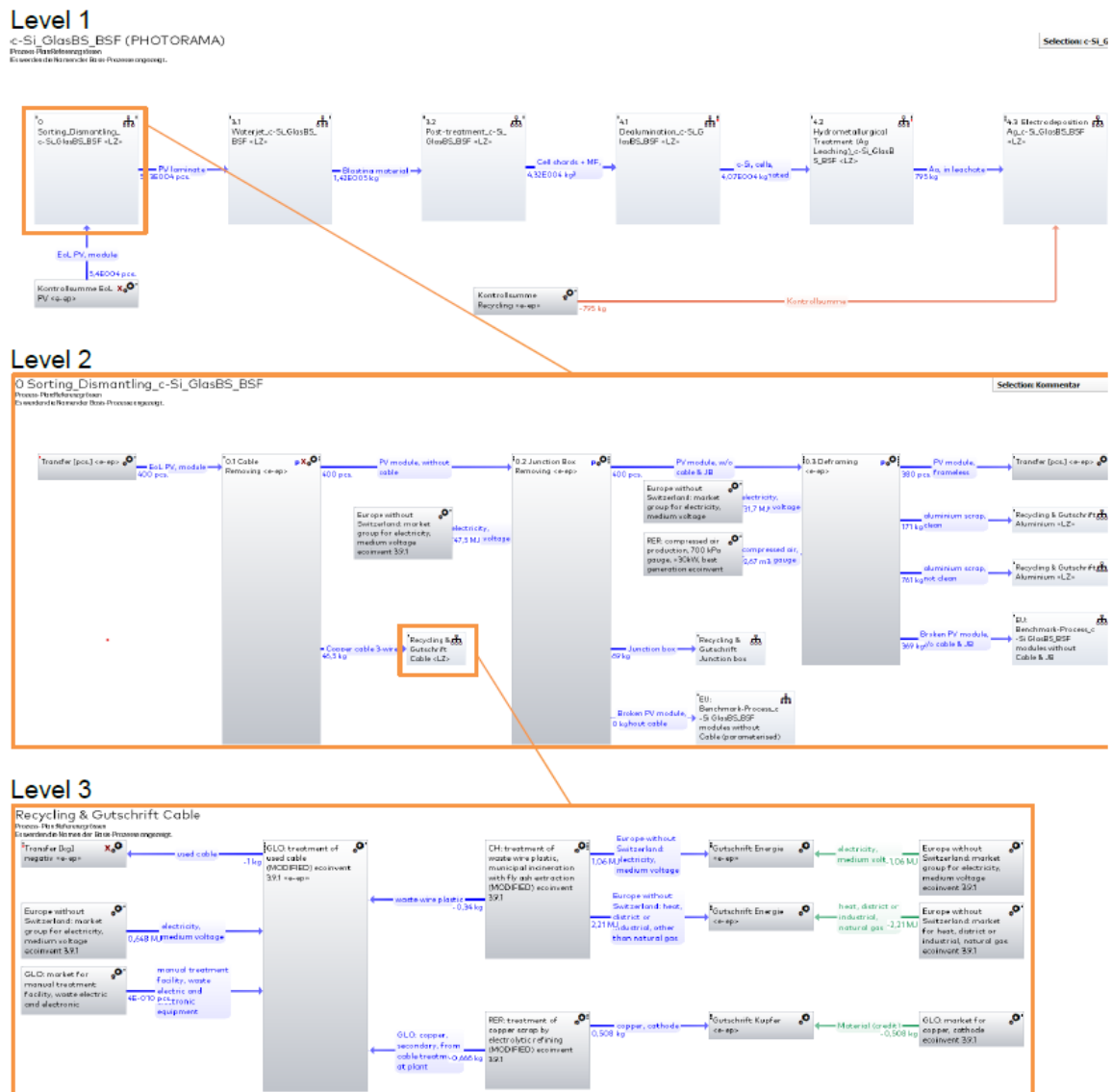


Figura 24. Struttura del modello LCA – Vista di livello (utilizzando l'esempio dei moduli c-Si Al-BSF)

Nella Tabella 16 sono riassunti i benefici del modello di bilancio e dei materiali, prodotti ed energie sostituite dalle materie prime primarie. I crediti derivano esclusivamente dal riciclo di alluminio, rame, acciaio e vetro. Sono indicati anche i fattori di sostituzione utilizzati per il calcolo dei crediti; questi fattori valgono per i materiali, prodotti o energie secondari, dopo il riciclo o lo smaltimento dei componenti fotovoltaici.

Anche se il silicio recuperato dal progetto PHOTORAMA non può essere usato per produrre moduli fotovoltaici, può essere impiegato per produrre target da sputtering. Un

target da sputtering è un materiale solido, spesso un metallo o una lega, che viene utilizzato nel processo di sputtering per depositare un sottile strato di materiale sulla superficie di un substrato. Durante lo sputtering, il target viene bombardato da ioni ad alta energia, che ne staccano atomi che poi si depositano sul substrato, formando un film sottile. Nel caso del silicio recuperato da PHOTORAMA, si utilizza normalmente silicio policristallino di qualità simile al silicio solare. Il sistema riceve quindi un credito corrispondente al silicio primario di grado solare.

Per i moduli CI(G)S, i crediti per la soluzione ricca di gallio e indio ottenuta dopo la lisciviazione del semiconduttore sono ridotti al 70%, perché non si ottengono metalli puri ma solo una soluzione contenente metalli. Serviranno quindi ulteriori passaggi di riciclo per recuperare effettivamente i metalli.

Il vetro recuperato può seguire due vie di riciclo:

1. **Vetro rottamato** utilizzato nella produzione primaria, che riduce il consumo di materie prime ed energia, sostituendo il vetro primario.
2. **Lastre di vetro puro** riutilizzabili direttamente, che sostituiscono il vetro piano. La scelta tra queste due opzioni è già stata descritta negli scenari.

Descrizione del beneficio/credito	Materiale, prodotto o energia secondaria	Materiale, prodotto o energia sostituiti	Fattore di sostituzione
Energia elettrica che sostituisce quella prodotta da combustibili fossili	Potenza elettrica	Elettricità prodotta dal mix energetico europeo	1
Rottami di vetro dopo la delaminazione a getto d'acqua che sostituiscono le materie prime e riducono la domanda energetica nella produzione di vetro piano	Vetro piano	Vetro piano primario	1
Rottami di vetro che sostituiscono le materie prime per la produzione del vetro	Materiali riciclati per la produzione del vetro	Materie prime per la produzione del vetro	1
La lastra di vetro dopo la lisciviazione che	Vetro piano	Vetro piano primario	1

sostituisce il vetro piano			
Calore che sostituisce l'energia prodotta da combustibili fossili	Energia termica	Calore di processo e teleriscaldamento provenienti dal mix di riscaldamento europeo	1
In soluzione ricca di metalli; il gallio secondario sostituisce la produzione di gallio primario	Gallio secondario	Gallio primario	0,7
In soluzione ricca di metalli; l'indio secondario sostituisce la produzione di indio primario	Indio secondario	Indio primario	0,7
La soluzione di polialluminio che sostituisce la produzione di polialluminio primario	Polialluminio secondario	Cloruro di alluminio primario	1
Alluminio secondario che sostituisce la produzione di alluminio primario	Alluminio secondario	Alluminio primario	0,96
Rame secondario che sostituisce la produzione di rame primario	Rame secondario	Rame primario	1
Indio secondario che sostituisce la produzione di indio primario	Indio secondario	Indio primario	1
Plastica secondaria che sostituisce la produzione di plastica primaria	Plastica secondaria	Plastica primaria	1
Silicio secondario che sostituisce la produzione di silicio primario	Silicone secondario	Silicio primario di grado solare	1
Argento secondario che sostituisce la produzione di argento primario	Argento secondario	Argento primario	1
Acciaio secondario che sostituisce la produzione di acciaio primario	Acciaio secondario	Acciaio primario a bassa lega, ottenuto mediante	1

		forno elettrico ad arco	
--	--	-------------------------	--

Tabella 16. Vantaggi associati al modello di bilancio

3.2.5. LCIA per ciascuno scenario

La LCIA per ciascuno scenario restituisce tre tipi di risultati: i risultati lordi, che rappresentano la somma degli impatti ambientali e sono visualizzati come barre verso l'alto; i crediti ambientali, che includono i benefici ottenuti attraverso la sostituzione di materiali e il recupero di energia; e infine il risultato netto, che emerge dal bilanciamento tra impatti e benefici ambientali e riflette il bilancio complessivo del sistema o delle singole fasi di processo.

I risultati relativi a ogni scenario vengono presentati per settore, come illustrato nella Figura 25, e l'intero processo viene suddiviso in quattro sezioni principali: il fabbisogno energetico, il processo vero e proprio, lo smaltimento e il riciclo dei materiali. Il risultato lordo incorpora tutti gli impatti ambientali derivanti dalle sezioni energia, processo e smaltimento, mentre l'ultima barra visualizza il risultato netto dell'intera catena di processo.

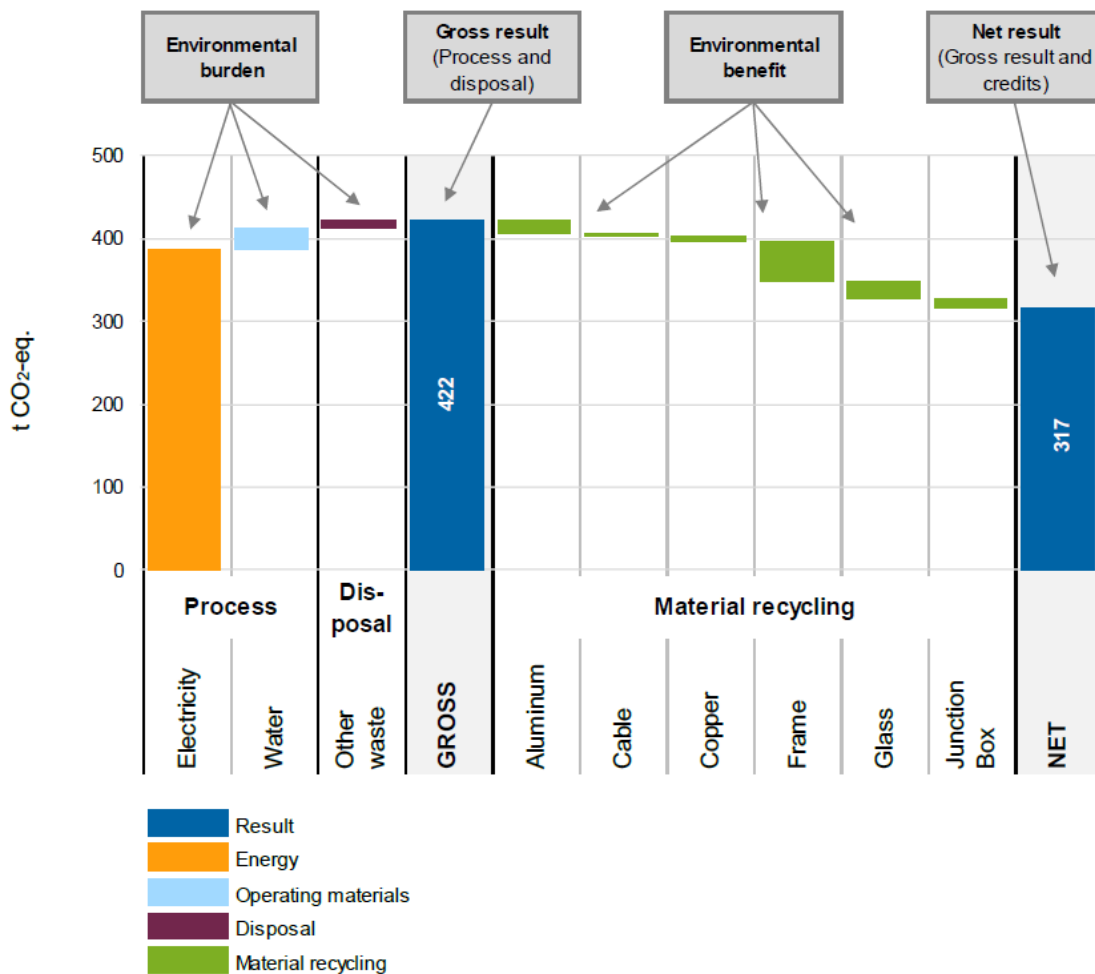


Figura 25. Spiegazione della presentazione per la valutazione settoriale di una categoria di impatto (con dati fittizi)

Per ciascuno scenario viene presentato nel dettaglio l'impatto sulla categoria "cambiamento climatico". Le altre categorie di impatto sono invece riassunte in una tabella, che mostra il contributo di ogni sezione (energia, processo, smaltimento, riciclo dei materiali) al risultato complessivo per ciascuna categoria.

3.2.5.1. LCIA per moduli c-Si Al-BSF

In questa fase sono descritti i risultati relativi al riciclo dei moduli c-Si Al-BSF. Viene dapprima presentato l'impatto sulla categoria "cambiamento climatico" per il processo benchmark e quello PHOTORAMA; a seguire una panoramica di tutte le categorie di impatto.

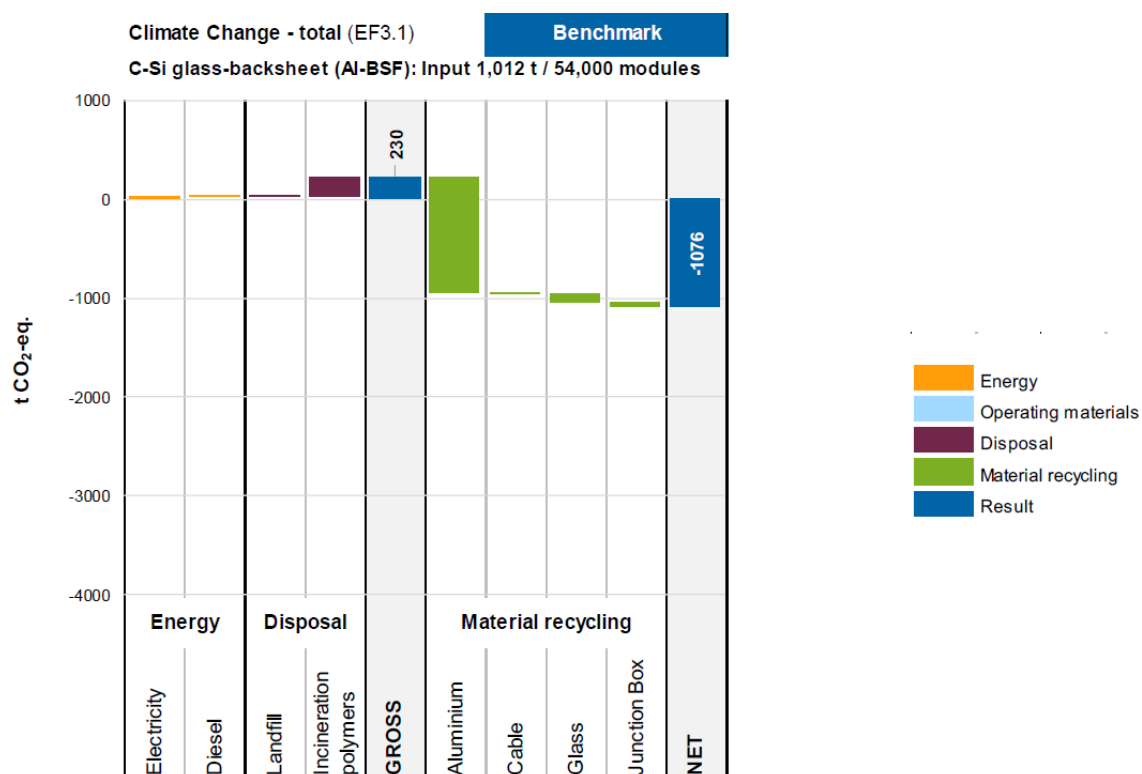


Figura 26. Cambiamento climatico per il riciclo *benchmark* di 1.000 t = 54.000 moduli c-Si (Al-BSF) come vista settoriale - Valutazione secondo EF3.1

La Figura 26 illustra gli impatti ambientali del riciclo *benchmark* di circa 1.000 t di moduli c-Si Al-BSF (pari a circa 54.000 moduli), con riferimento alla categoria cambiamento climatico. Gli impatti negativi (230 t CO₂-eq.) sono dovuti principalmente al trattamento termico delle plastiche. I crediti sono invece quasi interamente legati al riciclo dell'alluminio, che genera un risparmio di 1.172 t CO₂-eq. Il bilancio netto finale è di **-1.076 t CO₂-eq.**

La Figura 27 illustra i risultati relativi al cambiamento climatico per il riciclo di 54.000 moduli c-Si (Al-BSF) mediante il processo PHOTORAMA, presentati in un diagramma suddiviso in quattro sezioni: energia, processo, smaltimento e riciclo dei materiali. Gli impatti ambientali principali derivano dal consumo di elettricità, dall'uso di prodotti chimici e dall'incenerimento dell'EVA, con un risultato lordo totale di 396 t CO₂-eq. I crediti, invece, sono generati principalmente dal recupero di silicio, alluminio, argento e vetro. Il bilancio finale, dopo la compensazione tra impatti e crediti, mostra un risultato netto di **-3.529 t CO₂-eq**, evidenziando un beneficio ambientale significativo.

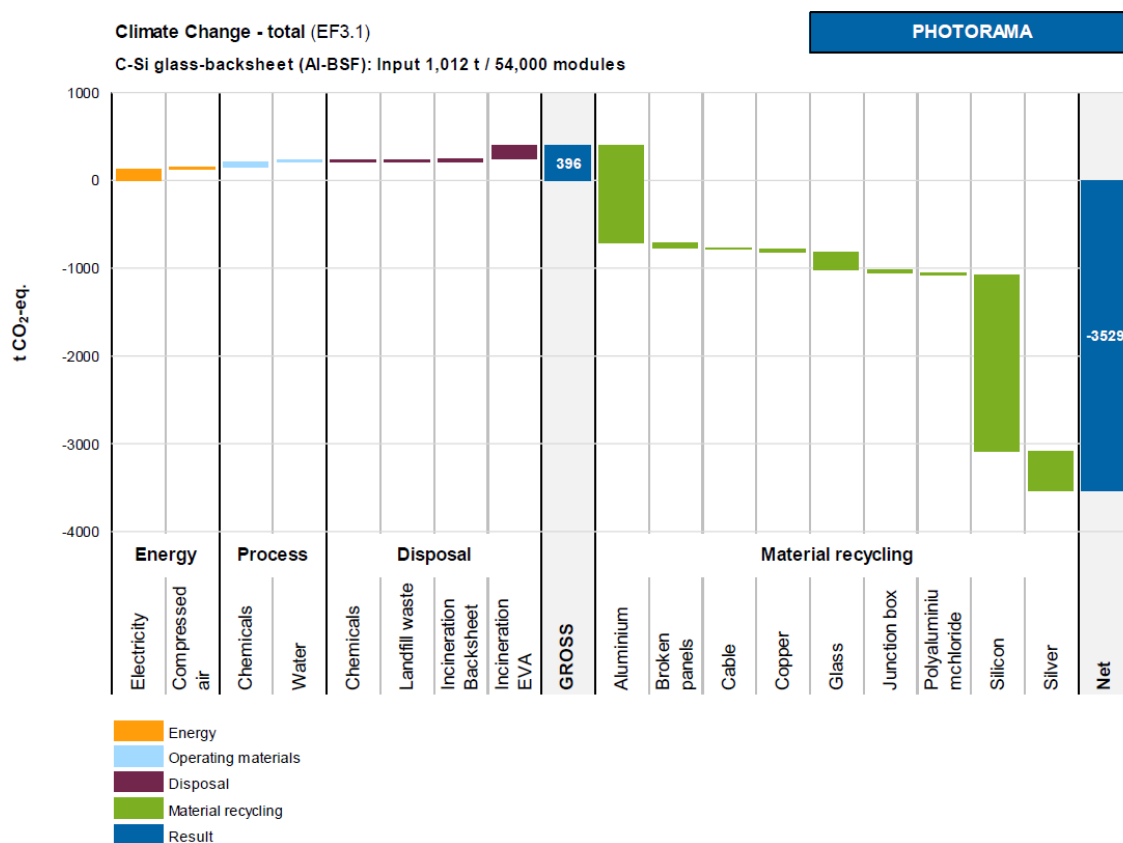


Figura 27. Cambiamento climatico per il riciclo PHOTORAMA di 1.000 t (~54.000 moduli) c-Si (Al-BSF) – Vista settoriale – Valutazione secondo EF3.1

Dopo l’analisi dettagliata della categoria “cambiamento climatico”, la Figura 28 fornisce una panoramica di tutte le categorie di impatto analizzate (secondo la metodologia descritta) per il riciclo dei moduli c-Si Al-BSF.

Le emissioni evitate grazie al recupero di materie prime tramite riciclo superano sistematicamente le emissioni, più elevate, legate al consumo energetico dei processi PHOTORAMA. Di conseguenza, il processo PHOTORAMA mostra benefici ambientali in tutte le categorie di impatto.

Rispetto al benchmark, i crediti del processo PHOTORAMA sono maggiori in ogni categoria, il che si traduce in un valore delta negativo in tutti i casi (ovvero, un vantaggio netto per PHOTORAMA).

Impact category		Benchmark c-Si Al-BSF					PHOTORAMA c-Si Al-BSF					Delta
		Total	Energy	Process	Disposal	Recycling	Total	Energy	Process	Disposal	Recycling	Total
		net	gross				net	gross				net
Climate Change - total	[t CO ₂ eq.]	-1,076	32	0	198	-1,307	-3,529	139	70	187	-3,925	-2,453
	key processes	100%					328%					228%
Particulate matter	[Disease incidences]	-0.095	0.001	0.000	0.000	-0.095	-0.215	0.002	0.005	-0.001	-0.221	-0.119
	key processes	100%					225%					125%
Water use	[1000 m ³ world eq.]	-1,387	23	0	-26	-1,384	-3,767	104	34	-25	-3,880	-2,380
	key processes	100%					272%					172%
Resource use, fossils	[TJ]	-19.5	0.9	0.0	-1.7	-18.7	-55.0	3.5	0.9	-1.6	-57.9	-35.5
	key processes	100%					282%					182%
Land Use	[1000 Ft]	-2,498	114	0	-114	-2,499	-14,966	504	144	-139	-15,475	-12,468
	key processes	100%					599%					499%
Resource use, mineral and metals	[kg Sb eq.]	-9.3	0.1	0.0	-0.1	-9.3	-805.0	0.4	0.2	-0.1	-805.5	-795.7
	key processes	100%					8634%					8534%
Ozone depletion	[kg CFC-11 eq.]	-0.032	0.001	0.000	-0.003	-0.030	-0.085	0.002	0.006	-0.002	-0.091	-0.053
	key processes	100%					267%					167%
Acidification	[kMole of H ⁺ eq.]	-10.3	0.2	0.0	-0.2	-10.3	-27.4	0.7	0.4	-0.2	-28.4	-17.1
	key processes	100%					266%					166%
Ionising radiation, human health	[1000 kBq U235 eq.]	-158	19	0	-27	-151	-333	89	3	-25	-400	-175
	key processes	100%					211%					111%
Photochemical ozone formation, human health	[kg NMVOC eq.]	-5,037	94	0	-91	-5,040	-16,478	353	243	-92	-16,982	-11,441
	key processes	100%					327%					227%
Eutrophication, terrestrial	[kMole of N eq.]	-14.8	0.3	0.0	-0.1	-15.0	-55.1	1.1	0.8	-0.1	-56.8	-40.3
	key processes	100%					372%					272%
Eutrophication, marine	[kg N eq.]	-1,352	29	0	0	-1,380	-4,935	124	77	-2	-5,135	-3,583
	key processes	100%					365%					265%
Eutrophication, freshwater	[kg P eq.]	-627	28	0	-37	-617	-2769	127	24	-35	-2885	-2143
	key processes	100%					442%					342%

Figura 28. Risultati ambientali per il riciclo benchmark e il riciclo PHOTORAMA di 1.000 t = 54.000 moduli c-Si (Al-BSF) per ciascuna categoria di impatto – Valutazione secondo EF3.1 (Delta = Totale netto PHOTORAMA – Totale netto benchmark)

3.2.5.2. LCIA per moduli CI(G)S

Un altro modulo considerato nel progetto è il modulo CI(G)S. Gli impatti ambientali nella categoria “cambiamento climatico” vengono spiegati dettagliatamente per il processo benchmark e per il processo PHOTORAMA, seguito da una sintesi di tutti gli impatti ambientali.

Il riciclo benchmark di circa 1.000 t di moduli CI(G)S (pari a circa 57.000 moduli), approssimato tramite il riciclo dei moduli CdTe, mostra un risultato netto di **-42 t CO₂-eq.** nella categoria di impatto cambiamento climatico, ovvero un credito ambientale.

Questo beneficio è dovuto soprattutto ai crediti derivanti dal riciclo del vetro e dell'acciaio lungo l'intero processo benchmark. Le principali fonti di impatto nel risultato lordo di 259 t CO₂-eq. sono dovute al consumo di elettricità, l'utilizzo di prodotti chimici e lo smaltimento della scatola di giunzione e dei polimeri.

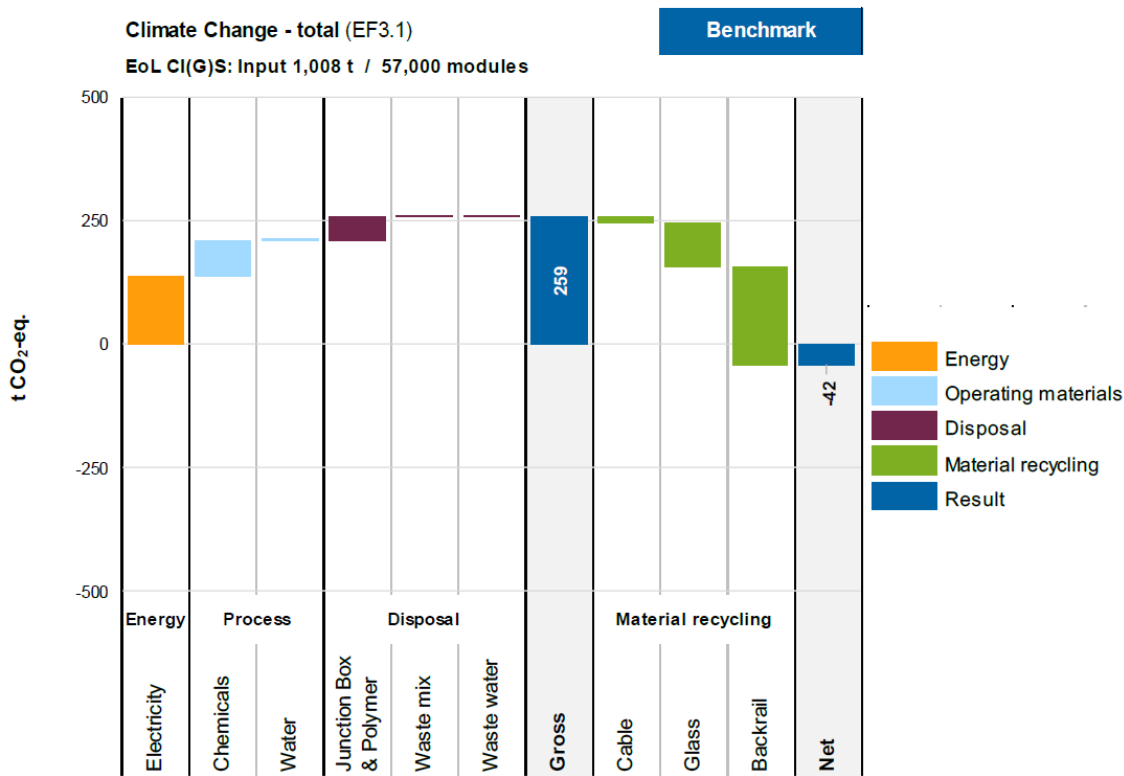


Figura 29. Cambiamento climatico per il riciclo *benchmark* di 1.000 t = 57.000 moduli CI(G)S come visione settoriale - Valutazione secondo EF3.1

Il risultato netto nella categoria di impatto “cambiamento climatico” per il riciclo PHOTORAMA di 57.000 moduli CI(G)S (-407 t CO₂-eq.) è inferiore a quello del corrispondente riciclo benchmark. Tuttavia, anche il risultato lordo del processo PHOTORAMA (410 t CO₂-eq.) è più elevato rispetto al benchmark, il che suggerisce che i crediti per i materiali recuperati siano anch’essi maggiori.

Dal confronto tra benchmark e processo PHOTORAMA emerge che il credito maggiore per il vetro è la principale ragione di questa differenza. Il risultato lordo del processo PHOTORAMA è influenzato principalmente dal fabbisogno di elettricità, seguito dall’incenerimento dei componenti plastici (Figura 30).

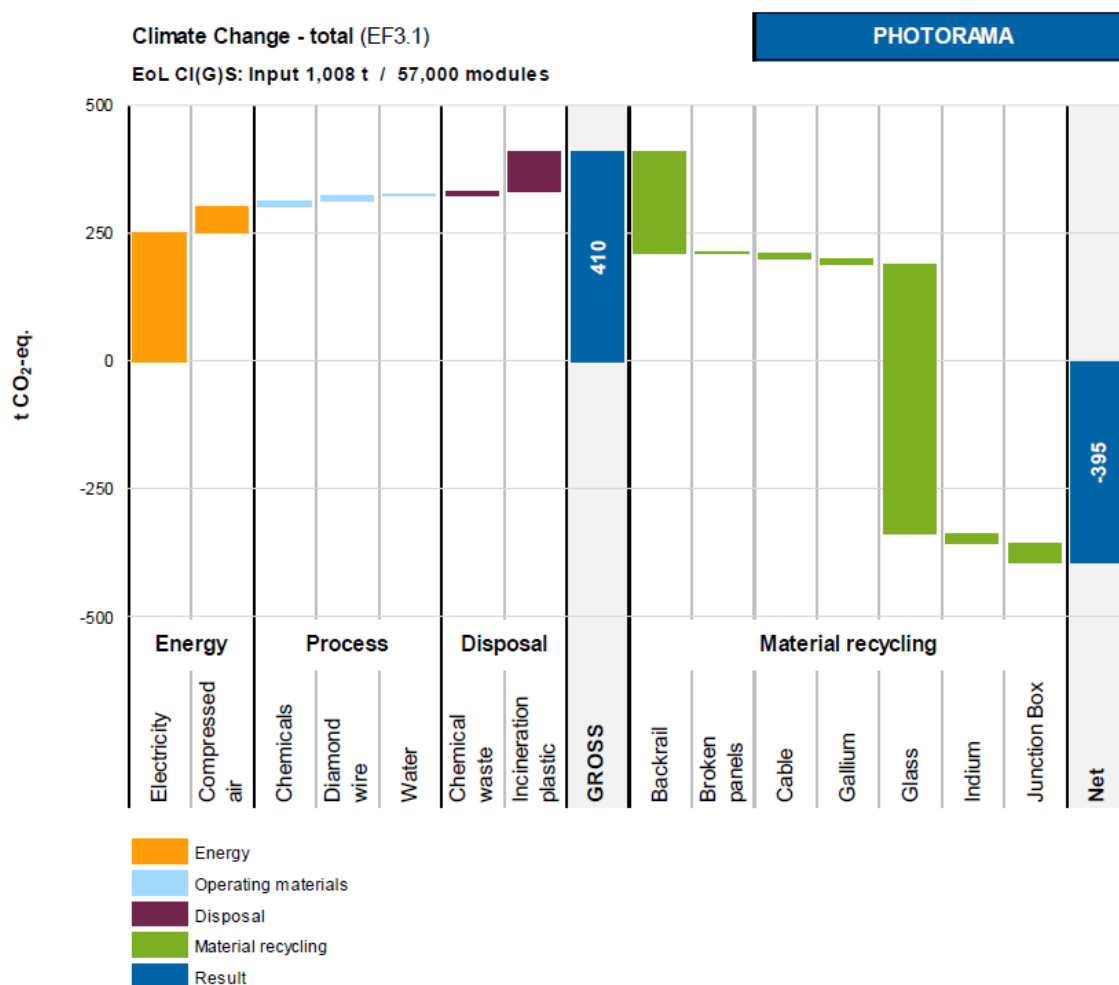


Figura 30. Cambiamento climatico per il riciclo di PHOTORAMA di 1.000 t = 57.000 moduli CI(G)S – Visualizzazione settoriale – Valutazione secondo EF3.1

Per quanto riguarda tutte le categorie di impatto, mostrate nella Figura 31 sia per il processo benchmark che per il processo PHOTORAMA, i benefici ambientali del processo PHOTORAMA sono superiori agli oneri ambientali per tutte le categorie di impatto tranne che per la categoria “radiazioni ionizzanti, salute umana”. Rispetto al processo di riferimento, il processo PHOTORAMA mostra risultati peggiori in due categorie: radiazioni ionizzanti (salute umana) ed eutrofizzazione (acque dolci). Queste possono essere identificate dai loro valori delta positivi.

Impact category		Benchmark CI(G)S					PHOTORAMA CI(G)S					Delta
		Total	Energy	Process	Disposal	Recycling	Total	Energy	Process	Disposal	Recycling	Total
		net	gross				net	gross				net
Climate Change - total	[t CO2 eq.]	-42	138	71	50	-300	-407	302	23	85	-817	-366
	key processes	100%					979%					879%
Particulate matter	[Disease incidences]	-0.022	0.002	0.003	0.000	-0.027	-0.067	0.005	0.002	0.000	-0.074	-0.045
	key processes	100%					300%					200%
Water use	[1000 m³ world eq.]	119	103	204	-26	-161	-22	226	39	-10	-277	-141
	key processes	100%					-18%					-118%
Resource use, fossils	[TJ]	0.4	3.5	1.3	-0.4	-3.9	-3.2	7.6	0.3	-0.8	-10.3	-3.6
	key processes	100%					-769%					-869%
Land Use	[1000 Pt]	-1,877	492	192	-5	-2,556	-2,440	1,130	79	-58	-3,591	-563
	key processes	100%					130%					30%
Resource use, mineral and metals	[kg Sb eq.]	-22.9	0.3	0.6	0.0	-23.8	-39.0	1.4	0.6	0.0	-41.0	-16.2
	key processes	100%					171%					71%
Ozone depletion	[kg CFC-11 eq.]	0.006	0.002	0.009	-0.001	-0.005	-0.016	0.005	0.000	-0.001	-0.021	-0.022
	key processes	100%					-255%					-355%
Acidification	[kMole of H+ eq.]	-2.4	0.7	0.4	0.0	-3.4	-6.4	1.6	0.3	-0.1	-8.2	-4.0
	key processes	100%					271%					171%
Ionising radiation, human health	[1000 kBq U235 eq.]	94	88	11	-7	2	163	192	3	-11	-21	69
	key processes	100%					173%					73%
Photochemical ozone formation, human health	[kg NMVOC eq.]	-1,202	348	230	-17	-1,763	-3,749	776	94	-47	-4,571	-2,546
	key processes	100%					312%					212%
Eutrophication, terrestrial	[kMole of N eq.]	-4.2	1.1	0.5	0.0	-5.8	-12.4	2.4	0.2	0.0	-15.0	-8.2
	key processes	100%					296%					196%
Eutrophication, marine	[kg N eq.]	-222	123	58	8	-411	-978	272	23	0	-1,273	-756
	key processes	100%					441%					341%
Eutrophication, freshwater	[kg P eq.]	-121	125	24	-9	-261	-68	276	12	-13	-344	53
	key processes	100%					56%					-44%

Figura 31. Risultati ambientali per il riciclo benchmark e il riciclo PHOTORAMA di 1.000 t = 57.000 moduli CI(G)S per ciascuna categoria di impatto – Valutazione secondo EF3.1 (Delta = Totale netto PHOTORAMA – Totale netto di riferimento)

3.2.5.3. Interpretazione del ciclo di vita

Per i moduli c-Si Al-BSF, il confronto tra il processo di riferimento e quello PHOTORAMA mostra che, nella categoria di impatto “cambiamento climatico”, le spese sono maggiori per il processo PHOTORAMA rispetto al benchmark. Tuttavia, i materiali ottenuti grazie a questi investimenti aggiuntivi generano crediti ambientali così significativi che il risultato complessivo del processo PHOTORAMA è più favorevole. Nel benchmark, il risultato lordo è dominato dall’incenerimento dei polimeri (86% della quota), mentre nel processo PHOTORAMA, l’incenerimento di EVA e dello strato

posteriore (insieme 47% della quota) e il fabbisogno di elettricità (33% della quota) rivestono anch'essi un ruolo importante. I crediti per alluminio, cavo e scatola di giunzione sono simili nei due processi. La differenza nei crediti per il vetro è dovuta alle diverse qualità del vetro recuperato nei processi di riciclo.

La valutazione delle altre categorie di impatto segue lo stesso schema della categoria “cambiamento climatico”. I risultati netti del benchmark sono negativi, così come quelli del processo PHOTORAMA, ma questi ultimi sono inferiori. Ciò significa che il processo PHOTORAMA presenta un vantaggio ecologico rispetto al benchmark in tutte le categorie di impatto.

Il processo di riciclo benchmark per i moduli CI(G)S nella categoria di impatto “cambiamento climatico” presenta un risultato lordo inferiore rispetto al corrispondente processo PHOTORAMA. Nel benchmark, la fornitura di energia rappresenta circa il 53% del risultato lordo, mentre la fornitura di prodotti chimici circa il 27%. Nel processo PHOTORAMA, l'energia contribuisce maggiormente al risultato lordo (74%), mentre i prodotti chimici hanno un ruolo relativamente minore (3%). Al contrario, l'incenerimento dei polimeri è più importante nel processo PHOTORAMA (18% del risultato lordo). Grazie ai maggiori crediti derivanti dal vetro recuperato, il risultato netto del processo PHOTORAMA è inferiore rispetto al benchmark. Gli elevati crediti per il vetro sono dovuti a due fattori: la qualità superiore del vetro proveniente da una lastra nei moduli CI(G)S rispetto a quella del benchmark, e la possibilità di recuperare una lastra intera nel modulo CI(G)S. Oltre al benchmark, il processo PHOTORAMA ottiene crediti anche dal recupero di gallio, indio e scatola di giunzione, ma questi sono bassi rispetto a quelli del vetro e del telaio.

Analizzando tutte le categorie di impatto, è evidente che il benchmark presenta carichi ambientali in quattro delle tredici categorie. Al contrario, il processo PHOTORAMA presenta carichi ambientali solo nella categoria “radiazioni ionizzanti (salute umana)”. Confrontando i due processi, il processo PHOTORAMA risulta peggiore in due categorie per quanto riguarda la performance ecologica: “radiazioni ionizzanti (salute umana)” ed “eutrofizzazione (acque dolci)”. Nelle altre categorie, tuttavia, il processo PHOTORAMA determina un miglioramento ecologico.

Tutti i tipi di moduli analizzati hanno una caratteristica in comune: il risultato lordo del processo PHOTORAMA è superiore a quello del rispettivo benchmark. Tuttavia, grazie agli elevati crediti, i risultati netti sono migliori rispetto al benchmark. Il carico

ambientale del processo è determinato principalmente dalla fornitura di energia e dall'incenerimento dei componenti organici. La produzione di ausiliari di processo non gioca un ruolo rilevante. I crediti sono principalmente determinati dal recupero di telaio, vetro, silicio e/o argento. Tuttavia, il modulo analizzato, la sua composizione e il processo sottostante sono fattori importanti per i crediti ottenuti. Ulteriori ottimizzazioni e sviluppi futuri, come il riciclo degli organici o il passaggio a energie rinnovabili, sono possibili e potrebbero migliorare il risultato ecologico del processo PHOTORAMA.

3.3 Analisi di ecoefficienza

L'analisi di ecoefficienza descrive la procedura per la creazione dell'indice ecologico complessivo sulla base dei risultati LCA individuali determinati nei paragrafi precedenti. Si tratta di un processo articolato in tre fasi:

1. **Standardizzazione:** Conversione dei risultati individuali nell'unità di riferimento comune degli "equivalenti di popolazione".
2. **Ponderazione:** Attribuzione di pesi alle singole categorie di impatto.
3. **Aggregazione:** Combinazione dei risultati ponderati per ottenere l'indice ecologico.

Nella metodologia LCA, la standardizzazione è una componente opzionale della valutazione degli impatti. Il punto di partenza per l'aggregazione degli indicatori di impatto/inventari del ciclo di vita è rappresentato dai valori degli equivalenti di popolazione (PE), calcolati a partire dai rispettivi indicatori di impatto/inventari e dalle corrispondenti emissioni totali in Europa (UE-27). Valori positivi di equivalenti di popolazione indicano un impatto ambientale, mentre valori negativi rappresentano benefici ecologici.

Gli equivalenti di popolazione calcolati nel contesto della standardizzazione consentono di confrontare i risultati dei diversi indicatori di impatto in termini di ordine di grandezza. Più alto è il numero di equivalenti di popolazione, più significativa è la categoria di impatto per la valutazione ambientale del procedimento o dello scenario considerato, in termini di contributo all'impatto ambientale. L'equivalente di popolazione come parametro per determinare la rilevanza di un risultato di indicatore di impatto si ottiene con la seguente formula:

$$\text{Equivalente di popolazione (PE)} = \frac{\text{Risultato indicatore di impatto}}{\text{Valore di riferimento}} \times \text{Popolazione dell'Europa}$$

I valori di riferimento utilizzati per standardizzare i risultati di questo progetto sono riportati nella Tabella 17.

Categoria di impatto	Unità di misura	Fattore di normalizzazione
Cambiamento climatico	kg CO ₂ eq./persona	$7,55 \times 10^3$
Deplezione dell'ozono	kg CFC-11 eq./persona	$5,23 \times 10^{-2}$
Particolato	casi di malattia/persona	$5,95 \times 10^{-4}$
Radiazioni ionizzanti, salute umana	kBq U235 eq./persona	$4,22 \times 10^3$
Formazione di ozono fotochimico, salute umana	kg NMVOC eq./persona	$4,09 \times 10^1$
Acidificazione	mol H ⁺ eq./persona	$5,56 \times 10^1$
Eutrofizzazione terrestre	mol N eq./persona	$1,77 \times 10^2$
Eutrofizzazione acqua dolce	kg P eq./persona	$1,61 \times 10^0$
Eutrofizzazione marina	kg N eq./persona	$1,95 \times 10^1$
Uso del suolo	pt/persona	$8,19 \times 10^5$
Uso dell'acqua	m ³ acqua eq. di acqua privata/persona	$1,15 \times 10^4$
Uso di risorse, minerali e metalli	kg Sb eq./persona	$6,36 \times 10^{-2}$
Uso di risorse, fossili	MJ/persona	$6,50 \times 10^4$

Tabella 17. Cambiamento climatico per il riciclo di riferimento di 1.000 t = 57.000 moduli CI(G)S come visione settoriale - Valutazione secondo EF3.1

Nella metodologia di valutazione del ciclo di vita, anche la ponderazione è una delle componenti opzionali della valutazione degli impatti. Per ottenere un singolo indicatore ecologico (il cosiddetto “single score”), viene effettuata una ponderazione tra categorie. I valori degli indicatori standardizzati delle categorie di impatto vengono quindi ponderati tra loro utilizzando una chiave di ponderazione.

La chiave di ponderazione consente alle singole categorie di impatto di avere un'influenza maggiore o minore sul risultato complessivo dell'analisi ecologica. È inoltre possibile combinare categorie ambientali che comprendono più categorie di

impatto, come l'eutrofizzazione. La chiave di ponderazione utilizzata in questo progetto è riportata nella Tabella 18.

Categoria di impatto	Indicatore di impatto	Fattore di ponderazione
Cambiamento climatico	CO ₂ eq.	22,19
Deplezione dell'ozono	CFC-11 eq.	6,75
Particolato	Casi di malattia	9,54
Radiazioni ionizzanti, salute umana	U235 eq.	5,37
Formazione di ozono fotochimico, salute umana	NM VOC eq.	5,1
Acidificazione	H ⁺ eq.	6,64
Eutrofizzazione terrestre	N eq.	3,91
Eutrofizzazione acqua dolce	P eq.	2,95
Eutrofizzazione marina	N eq.	3,12
Uso del suolo	Pt	8,42
Uso dell'acqua	Acqua eq. di deprivazione dell'acqua	9,03
Uso di risorse, minerali e metalli	Sb eq.	8,08
Uso di risorse, fossili	MJ	8,92

Tabella 18. La ponderazione raccomandata per le categorie di impatto standardizzate in EF3.1

Per ottenere un singolo valore di indice ecologico, i valori degli indicatori ponderati vengono sommati. In questo modo si stabilisce una relazione tra le diverse categorie di impatto. Il risultato è un valore singolo (“single score”) adimensionale.

3.3.1 Indice ecologico

I risultati presentati nei paragrafi precedenti sono riassunti di seguito applicando la metodologia sopra descritta espressa in punti ecologia.

Le Figure 32 e 33 mostrano che tutti i risultati sono fortemente determinati dalla categoria di impatto “Uso di risorse, minerali e metalli”. Le categorie “Cambiamento climatico” e “Particolato” hanno un ruolo molto meno rilevante.

A seconda della composizione dei moduli fotovoltaici a fine vita analizzati negli scenari, il recupero dell'argento (contatti delle celle) gioca un ruolo decisivo per la categoria di impatto "Uso di risorse, minerali e metalli", rappresentando più dell'80% e fino al 95% del risultato. Per i moduli CI(G)S, la quota di indio (film sottile) contribuisce per circa il 40% del risultato. La quota rimanente deriva principalmente dal riciclo del rame (cavi e busbar/ribbon, ovvero il tipo di nastro di collegamento utilizzato per interconnettere le celle solari all'interno di un modulo).

I risultati per la categoria di impatto "Cambiamento climatico" sono determinati dai metalli silicio e alluminio.

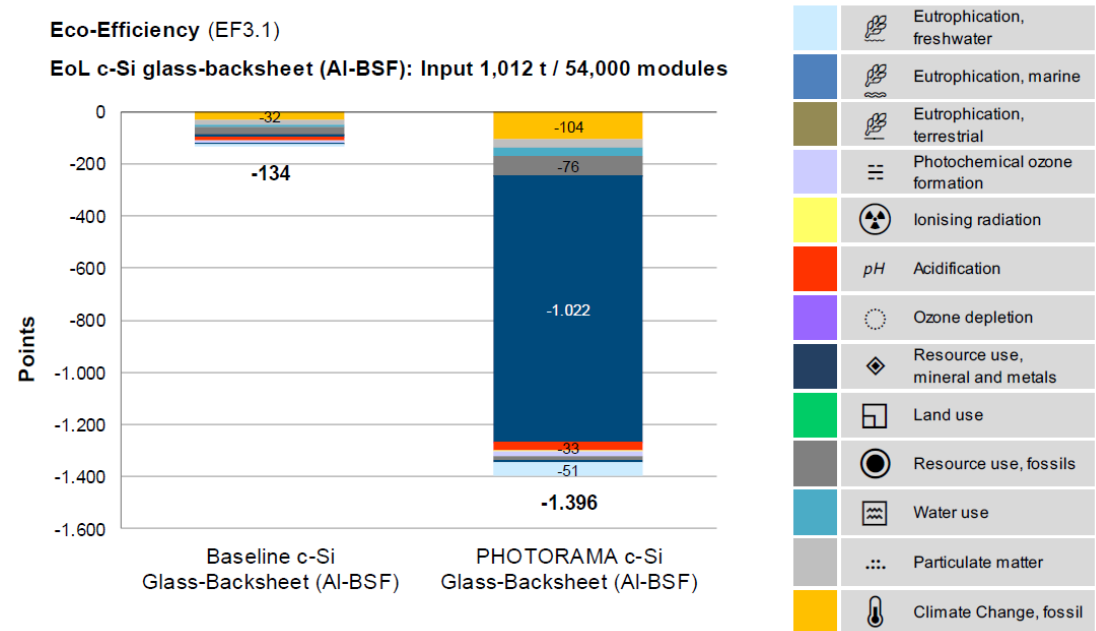


Figura 32. Indice ecologico per il riciclo di 54.000 moduli c-Si (Al-BSF) – Visualizzazione settoriale – Valutazione secondo EF3.1

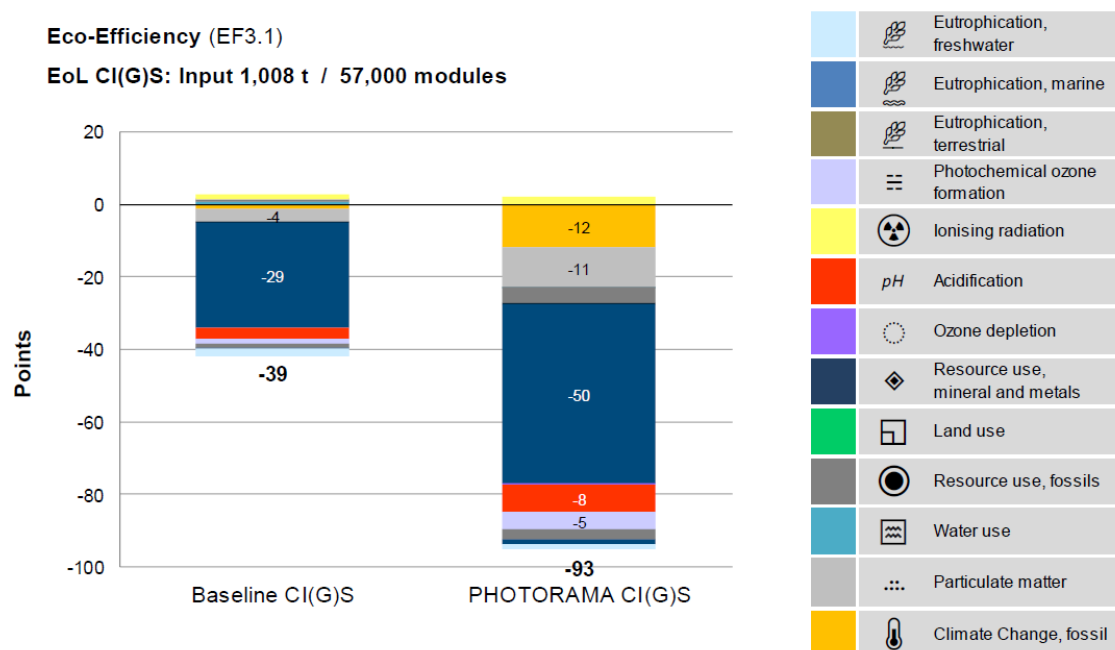


Figura 33. Indice ecologico per il riciclo di 57.000 moduli CI(G)S – Visualizzazione settoriale – Valutazione secondo EF3.1

3.3.2 Costo del ciclo di vita (LCC)

Il Life Cycle Costing (LCC) è un metodo per determinare i costi totali di un prodotto, sistema o progetto lungo tutto il suo ciclo di vita, dove le analisi sono tipicamente suddivise nelle fasi di acquisizione, funzionamento, manutenzione e smaltimento. L'obiettivo è rendere trasparenti i costi per supportare decisioni di investimento informate. Questa attività viene svolta in parallelo con la raccolta dei dati ambientali per la valutazione del ciclo di vita (LCA) e definisce obiettivi e ambiti coerenti con il progetto. Inoltre, vi è una stretta interrelazione tematica con una fase successiva del progetto, che non verrà approfondita in questo elaborato, relativa allo sviluppo del business plan, poiché le informazioni provenienti dal LCC contribuiscono in modo significativo alla valutazione finanziaria dei risultati del progetto come parte del business plan PHOTORAMA per la linea pilota, ovvero il calcolo della redditività.

La valutazione della redditività è una componente centrale del piano industriale, quantifica la sostenibilità economica di un progetto attraverso indicatori come fabbisogno di capitale, fatturato, utile, ammortamento e ritorno sull'investimento (ROI). L'obiettivo è dimostrare a potenziali investitori la sostenibilità economica del progetto.

La tabella seguente illustra le caratteristiche comuni e le correlazioni tra i due metodi.

Aspetto	Life Cycle Costing (LCC)	Calcolo della redditività
Periodo di osservazione	Ciclo di vita del prodotto/progetto	Periodo di pianificazione del piano industriale
Obiettivo principale	Orientato ai costi totali	Orientato a profitto e redditività
Base dati	Costi di investimento, operativi, manutenzione e smaltimento	Investimenti, costi, ricavi, liquidità
Obiettivo	Ottimizzazione dei costi nel corso della vita utile	Dimostrazione della sostenibilità economica
Metodo	Analisi completa dei costi nel tempo	Combinazione di analisi di costi, ricavi e redditività

Tabella 19. Caratteristiche comuni e correlazioni tra LCC e valutazione della redditività

Il Life Cycle Costing (analisi del costo del ciclo di vita) e l'analisi della redditività utilizzano quindi dati e metodi simili, ma con un focus diverso. Per la tecnologia di riciclo PHOTORAMA, il LCC è stato utilizzato come un sotto-aspetto dell'analisi della redditività (investimento in attrezzature, macchinari, ecc.). In un business plan con una prospettiva ancora più a lungo termine (ad esempio progetti infrastrutturali o energetici), il LCC viene spesso integrato per analizzare gli effetti a lungo termine sulla redditività. Tuttavia, questo approccio sarebbe troppo ampio per la tecnologia di riciclo PHOTORAMA e quindi non è stato preso in considerazione.

Nonostante non sia stata eseguita un'analisi LCC (Life Cycle Costing) completa, sono stati comunque applicati gli elementi essenziali della metodologia, che hanno costituito la base fondamentale per una valutazione economica. Durante la fase di raccolta dati, l'approccio orientato al LCC ha permesso di identificare e considerare sistematicamente tutti gli aspetti rilevanti di costi e benefici. La raccolta dei dati per l'LCC è stata condotta in linea con il modello di previsione VDMA per i costi del ciclo di vita di macchine e impianti (Tabella 20).

Base	Elemento di costo	Raccolta dati
Costruzione	Acquisto	Basata sulle specifiche e i requisiti della linea pilota e del design dell'unità PHOTORAMA
	Costi infrastrutturali	
	Altri costi associati	
Operazione	Manutenzione e ispezione	Coperta considerando scenari con ridotta portata
	Riparazione	
	Manutenzione non programmata	
	Costi dei materiali	

	Costi energetici	Valutata tramite dati LCI, portata annuale pianificata e analisi dei costi
	Materiali di consumo e forniture	
	Costi di smaltimento	
	Costi del personale	Specificati nel calcolo della redditività
	Costi degli utensili	
	Costi di set-up	
	Costi di stoccaggio	
	Altri costi operativi	
Smaltimento	Valore residuo	Determinato utilizzando il tasso di ammortamento specificato nel calcolo del business case
	Costi di smaltimento	Si presume che sia irrilevante per l'analisi attuale.
	Altri costi di smaltimento	

Tabella 20. Elementi di costo secondo lo standard VDMA e raccolta dati.

Per progetti caratterizzati da elevati investimenti in capitale e costi operativi (macchinari, edifici, sistemi tecnici), l'integrazione dell'approccio Life Cycle Costing (LCC) nella valutazione economica complessiva si è rivelata particolarmente utile. Tale integrazione ha consentito di costruire una base solida e dettagliata per dimostrare la sostenibilità economica del progetto.

Per realizzare un'analisi di eco-efficienza significativa e robusta, è fondamentale definire un indicatore di costo appropriato che permetta un confronto coerente tra i processi benchmark e la nuova tecnologia PHOTORAMA. I valori di costo per PHOTORAMA possono essere ricavati dalla valutazione di fattibilità economica. Tuttavia, è necessario stabilire anche un indicatore di costo per i tradizionali impianti di riciclo meccanico (benchmark).

Sulla base dell'analisi di mercato e dei prezzi condotta internamente al progetto PHOTORAMA, vengono valutati di seguito i materiali rilevanti che possono essere recuperati in ciascuno degli scenari definiti (cfr. 3.2.1). Secondo una stima di esperti, questa valutazione può essere effettuata anche per lo stato attuale del riciclo utilizzando il processo di triturazione per i moduli fotovoltaici a fine vita (benchmark). La Tabella 21 mostra la valutazione di base per la determinazione dell'indice dei costi: da un lato, PHOTORAMA fornisce vetro di qualità superiore dopo il passaggio di riciclo meccanico rispetto alla tecnologia benchmark; dall'altro, i metalli contenuti nei residui

del getto d'acqua diventano accessibili per il successivo processo di riciclo chimico. Queste frazioni metalliche sono invece perse o di qualità inferiore nel processo benchmark.

Materiale	Potenziale di Valorizzazione	
	Benchmark	PHOTORAMA
Riciclo meccanico		
Scatola di giunzione / cavi	Sì	Sì
Telai in alluminio / acciaio	Sì	Sì
Vetro	Sì, bassa qualità	Sì, alta qualità
Polimero	No	No
Riciclo chimico		
Rame	No	Sì
Silicone	No	Sì
Argento	No	Sì
Indio	No	Sì
Gallio	No	Sì

Tabella 21. Valutazione di base nella determinazione dell'indice dei costi

A causa degli accordi di riservatezza con i partner del progetto, non possono essere divulgati i valori assoluti dell'indice dei costi. Le differenze nell'analisi di eco-efficienza sono quindi presentate come deviazioni percentuali; con una valorizzazione esemplificativa di 30 EUR per modulo utilizzando la tecnologia PHOTORAMA, rispetto a 10 EUR per modulo nel processo benchmark, ciò determina una differenza nell'indice dei costi di: $(30-10)/10=-200\%$.

3.3.3 Risultato dell'ecoefficienza

L'analisi di eco-efficienza confronta i risultati della valutazione dell'impatto del ciclo di vita (indice di ecologia) con i risultati specifici della valutazione dei costi (indice dei costi). Per visualizzare i risultati vengono utilizzati i portafogli di eco-efficienza.

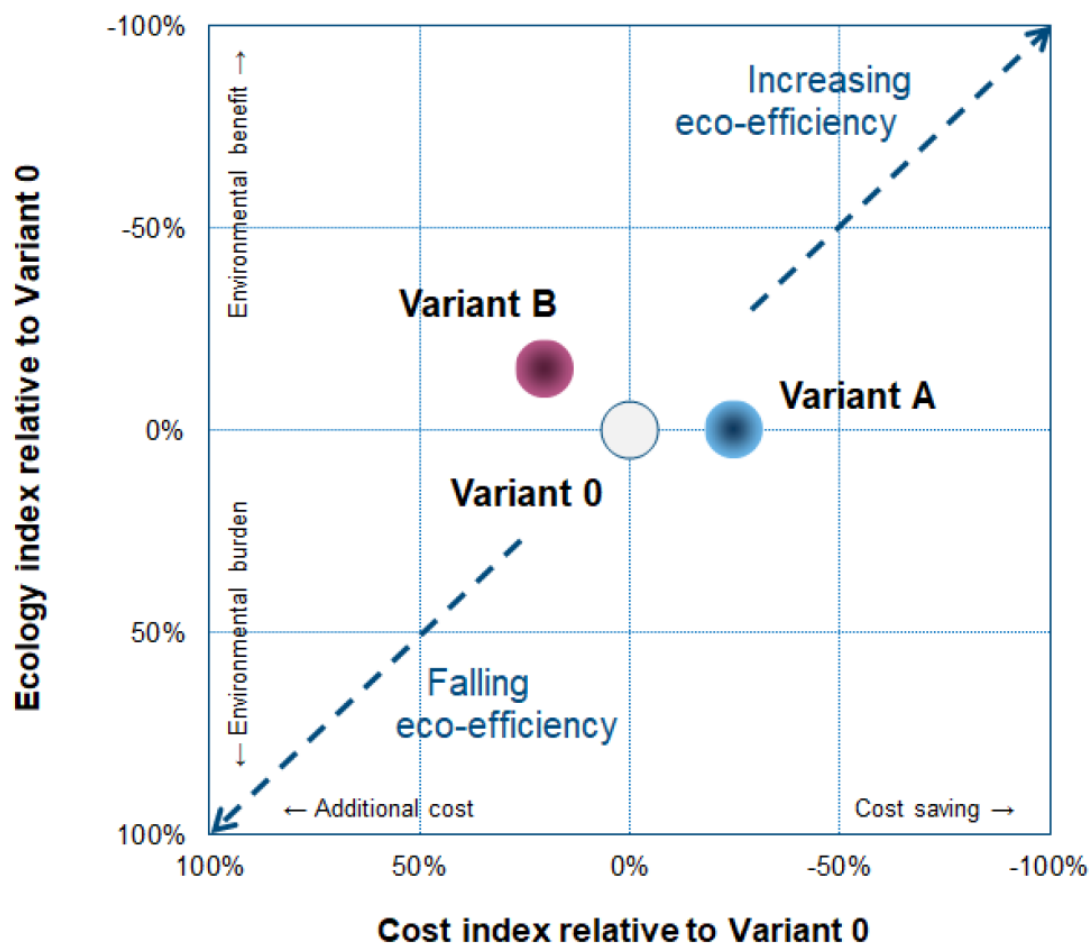


Figura 34. Spiegazione del portafoglio di ecoefficienza.

Come illustrato nella Figura 34, la configurazione di un portafoglio di eco-efficienza è progettata per facilitare l'identificazione dei processi caratterizzati da **bassa eco-efficienza** (che presentano alti indici dei costi e indici ecologici positivi, ovvero impatti ambientali negativi) nell'area in basso a sinistra del diagramma. Contemporaneamente, i processi che dimostrano un'**elevata eco-efficienza** (bassi indici dei costi e indici ecologici negativi, ovvero benefici ambientali) si trovano nell'area in alto a destra del diagramma.

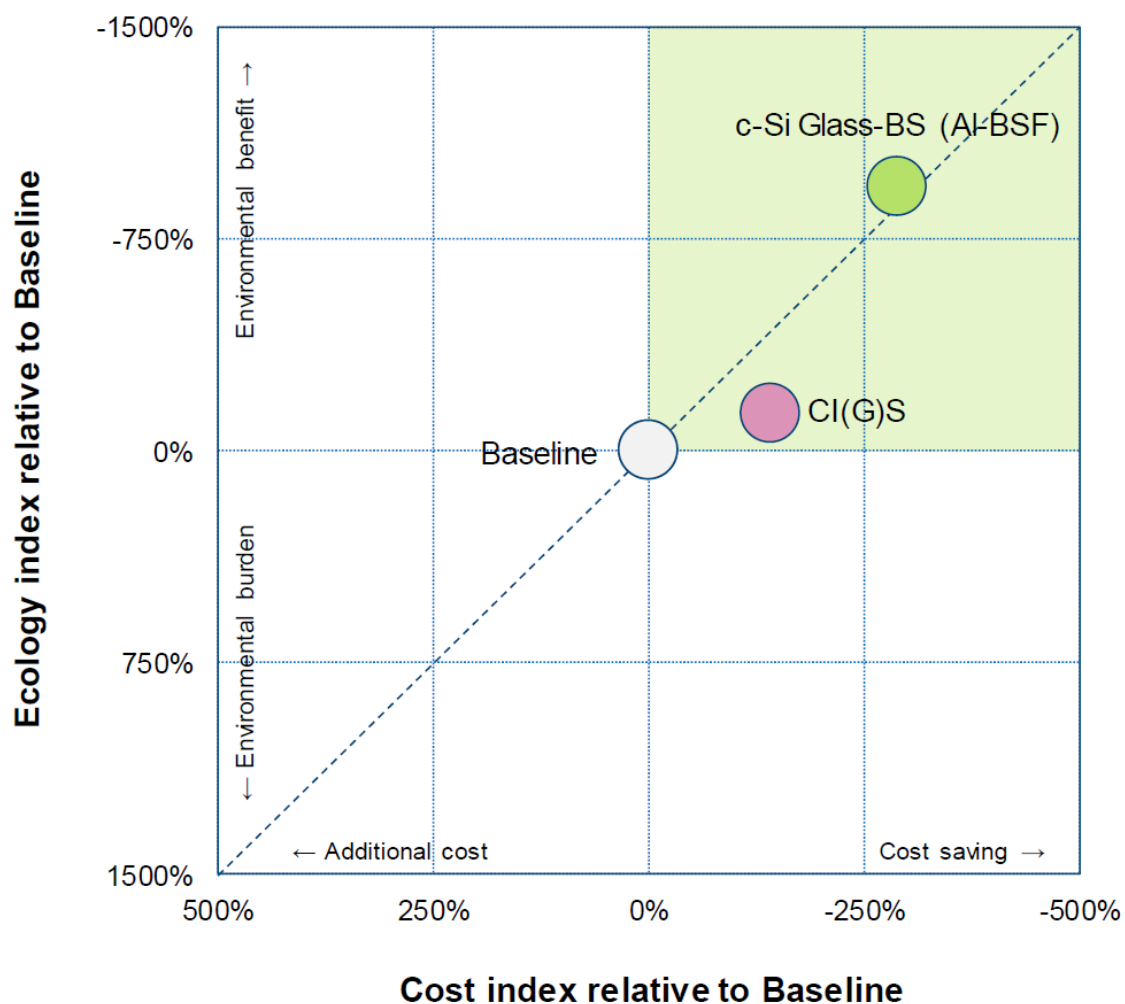


Figura 35. Risultati di eco-efficienza per la tecnologia PHOTORAMA rispetto al benchmark

Per una corretta interpretazione dei risultati mostrati, va notato che i rispettivi punti di eco-efficienza possono essere confrontati solo con il benchmark corrispondente nel punto zero.

Il risultato per lo scenario c-Si Glass-BS (Al-BSF) mostra quindi un miglioramento dell'indice di eco-efficienza del -940% rispetto al benchmark per un tipo di modulo fotovoltaico della stessa tecnologia, mentre l'indice dei costi migliora del -290%. Per lo scenario CI(G)S, sia l'indice di eco-efficienza sia l'indice dei costi migliorano del -140% rispetto al benchmark.

I rispettivi punti di eco-efficienza si trovano tutti nell'area in alto a destra del grafico (Figura 35). Ciò significa che, per PHOTORAMA, tutti i tipi di modulo esaminati mostrano un miglioramento rispetto ai rispettivi benchmark, sia per l'indice di ecologia basato sull'analisi LCA sia per l'indice dei costi derivato dal calcolo di valorizzazione dei materiali riciclati.

In conclusione, la valutazione del ciclo di vita dimostra che la tecnologia PHOTORAMA offre vantaggi ecologici rispetto ai corrispondenti processi benchmark di riferimento per tutti i tipi di modulo. Questo è dimostrato in dettaglio per quanto riguarda il cambiamento climatico. Il recupero di materiali secondari di alta qualità come vetro, silicio e argento compensa i maggiori requisiti energetici e materiali. Per i moduli c-Si Al-BSF, si osservano miglioramenti in tutte le categorie di impatto, e per i moduli CI(G)S in quasi tutte le categorie. L'indice di ecologia deriva da categorie di impatto aggregate e ponderate, con l'uso delle risorse (minerali e metalli) come fattore dominante. L'indicatore dei costi è determinato in base al potenziale di valorizzazione rispetto al benchmark. Un confronto tra l'indice di ecologia e l'indicatore dei costi, come parte dell'analisi di eco-efficienza, indica che tutti i processi PHOTORAMA sono più eco-efficienti dei rispettivi benchmark, dimostrando vantaggi sia ecologici che economici.

3.4 Analisi del sondaggio per l'accettazione sociale

In aggiunta alle valutazioni tecniche ed economiche precedentemente discusse (LCA, LCC ed analisi di ecoefficienza, cfr. 3.2 e 3.3), si ritiene opportuno ampliare la prospettiva introducendo una dimensione socioculturale. L'analisi delle interviste, condotta con lo scopo di indagare l'accettazione sociale delle pratiche di sviluppo, consente di integrare il punto di vista degli stakeholder e di comprendere le dinamiche che influenzano la percezione e l'adozione delle innovazioni proposte. In questa sezione si presenteranno spesso riferimenti alla normativa europea vigente in materia di energia ed economia circolare (cfr. capitolo 1) poiché considerate un driver delle pratiche di riciclo. Le strategie di accettazione e costruzione della fiducia sono state realizzate attraverso un approccio integrato che include innovazione sociale—con analisi qualitative e quantitative tramite sondaggio e workshop di co-creazione—e strumenti di comunicazione come sito web e social media. La tabella seguente sintetizza le attività, i relativi obiettivi, KPI e destinatari. Questo paragrafo si concentra esclusivamente sul sondaggio.

Misura	Tempi	Scopo	KPI	Destinatari
Sondaggio	M1-M6	Raccolta informazioni sul recupero RM e riciclo PV, generazione di input per il	≥ 1.000 contatti invitati a	Utenti, stakeholder

		progetto, sensibilizzazione e accettazione	rispo ndere	
Workshop di co- creazione	M6- M12	Generazione di input per il progetto, sensibilizzazione e accettazione	≥ 2 works hop ≥ 40 partec ipanti	Stakeholder chiave, moltiplicato ri
Sito web	M3- M36	Campagna di sensibilizzazione , comunicazione, disseminazione	≥ 12 aggior name nti/an no $\geq$ 1.000 visite/ anno	Pubblico generale
Blog	M3- M36	Campagna di sensibilizzazione , accettazione sociale, fiducia, disseminazione	≥ 6 aggior name nti/an no	Professionis ti, stakeholder
Social media (Facebook , Twitter, LinkedIn)	M3- M36	Campagna di sensibilizzazione , accettazione sociale, fiducia, comunicazione e disseminazione	≥ 12 aggior name nti/an no	Professionis ti, stakeholder, pubblico generale
E-flyer	M12	Campagna di sensibilizzazione , accettazione sociale, fiducia, disseminazione	≥ 1 e- flyer	Stakeholder, moltiplicato ri
Conferenz e, fiere, esposizion i	M3- M36	Campagna di sensibilizzazione , accettazione sociale, fiducia, disseminazione	> 20 eventi	Utenti, stakeholder, professionis ti
Moltiplicat ori / Brief	M3- M36	Campagna di sensibilizzazione , accettazione sociale, fiducia, disseminazione	≥ 6 brief disse minati	Stakeholder, pubblico generale
Workshop macro- regionali	M18- M30	Generazione di fiducia e accettazione sociale, disseminazione	≥ 3 works hop ≥ 90 partec ipanti	Stakeholder chiave, moltiplicato ri, pubblico generale

Tabella 22. Quantificazione delle misure di accettazione sociale e di costruzione della fiducia, campagna di sensibilizzazione.

Il questionario, sviluppato tramite la piattaforma “limesurvey” e supervisionato dal coordinatore del progetto di PHOTORAMA, è stato testato dal consorzio ed era composto principalmente da domande chiuse, con almeno una domanda aperta per raccogliere suggerimenti specifici. Destinato a utenti e stakeholder dei settori energia ed elettronica—tra cui aziende di servizi, imprese di riciclaggio, istituzioni pubbliche, agenzie e cooperative energetiche, ricercatori, Commissione Europea e iniziative UE come PV Tech Platform e KIC InnoEnergy—il sondaggio mirava a valutare le conoscenze sul riciclo dei pannelli fotovoltaici, le preoccupazioni ambientali e a raccogliere raccomandazioni per il progetto. L’obiettivo era anche sensibilizzare i partecipanti sui risultati attesi del progetto.

Lanciato il 3 dicembre 2021, il sondaggio ha superato i 1.000 contatti grazie alla collaborazione del consorzio e di organizzazioni come Rescoop e Fedarene, che lo hanno diffuso attraverso newsletter e social media. Sono state raccolte oltre 250 risposte complete, con una scadenza inizialmente fissata al 14 gennaio 2022 ma prorogata fino al 15 febbraio 2022 per aumentare la partecipazione. La distribuzione geografica ha visto una prevalenza di stakeholder francesi e italiani, compensata da contatti mirati per garantire una copertura più equilibrata.

Pur essendo anonimo, il questionario offriva la possibilità di lasciare nome e indirizzo e-mail per ricevere aggiornamenti: quasi il 50% dei partecipanti ha scelto questa opzione, dimostrando un elevato interesse per il tema del riciclo fotovoltaico. Il sondaggio ha inoltre contribuito ad aumentare la visibilità del progetto sui social media e a colmare una lacuna informativa nell’UE, dove le ricerche sulle scienze sociali applicate al riciclo del fotovoltaico sono ancora limitate.

I risultati costituiscono una base fondamentale per i successivi workshop di co-creazione, dove saranno discussi consapevolezza, barriere e fattori trainanti del riciclo fotovoltaico e dell’approccio all’economia circolare. L’interesse della rivista PV e dell’Agenzia Internazionale dell’Energia/PVPS testimonia la rilevanza del tema, con l’obiettivo di stimolare il dibattito scientifico e politico sul riciclo dei moduli solari attraverso pubblicazioni e partecipazione a conferenze come EUSEW, la settimana europea dell’energia sostenibile e il più grande evento annuale dedicato alle energie rinnovabili e all’uso efficiente dell’energia in Europa.

3.4.1. Metodologia

Il questionario è stato concepito da una revisione della letteratura in cui il tema del riciclaggio del fotovoltaico in UE è stato trattato da una prospettiva di scienze sociali, solo marginalmente nella letteratura scientifica. Tuttavia, sono stati pubblicati alcuni articoli sulla situazione in Australia⁴⁷, sulla base delle indagini tra le parti interessate e sull'identificazione di fattori e barriere del riciclo del fotovoltaico a cui PHOTORAMA si è ispirata. Idealmente il questionario avrebbe dovuto suscitare l'interesse degli esperti ma essere accessibile anche ad un pubblico più ampio nel settore dell'energia, in particolare delle energie rinnovabili. Il questionario online⁴⁸ conteneva:

- un'introduzione con lo scopo dell'indagine ed un modulo di consenso, da accettare prima di poter accedere al questionario stesso,
- una raccolta dei dati demografici (ad es. fascia d'età, paese di residenza),
- una valutazione del livello di consapevolezza del riciclaggio del fotovoltaico (es. domande circa l'installazione da parte dell'intervistato di pannelli fotovoltaici, stime dei tassi di riciclaggio attuali e dei metalli critici da recuperare),
- domande sulle barriere e i fattori trainanti del riciclaggio del fotovoltaico.

Il questionario è stato redatto e diffuso solamente in lingua inglese ed è stata utilizzata una scala a 5 punti per valutare le motivazioni e le barriere del riciclo del fotovoltaico nell'UE, che va da 1 "non è affatto un problema" a 5 "è estremamente importante". Inoltre, sono state fornite le opzioni "Non so" e "Nessuna risposta".

L'ipotesi di fondo è stata che le informazioni e la consapevolezza siano limitate per quanto riguarda:

- le attuali procedure di riciclaggio dei pannelli fotovoltaici
- i problemi dei rifiuti legati ai pannelli fotovoltaici
- la necessità di recuperare materiali preziosi e critici in un approccio di economia circolare e di reintegrarli nella produzione, per ridurre la dipendenza dei produttori europei e delle importazioni da alcuni Paesi

Inoltre, è stato ipotizzato che i riciclatori di fotovoltaico fossero ben consapevoli dei problemi legati alle attuali tecnologie di riciclaggio del fotovoltaico e della situazione

⁴⁷ Salim, H.K., Stewart, R., Sahin, O., Dudley M. (2019). End-of-life management of solar photovoltaic and battery energy storage systems: A stakeholder survey in Australia. *Resources, Conservation and Recycling*, Resources, Conservation & Recycling 150 (2019) 104444.

⁴⁸ Il questionario era disponibile a questo link <https://survey3.zsi.at/index.php/515342?lang=en> ma essendo scaduto non è più consultabile.

nell'UE, mentre i fornitori di energia e le organizzazioni di servizi pubblici lo fossero molto meno.

3.4.2. Divulgazione

Dalla data di lancio al 24 gennaio 2022, il sondaggio è stato diffuso a circa 16.720 contatti individuali e ad istituti di ricerca, produttori e installatori di impianti fotovoltaici, progetti UE, associazioni di rifiuti, aziende e cooperative energetiche, società di riciclaggio di impianti fotovoltaici, fornitori di energia elettrica, agenzie per l'energia e media. La divulgazione è avvenuta principalmente via mail ed è stata presa in carico sia da ZSI che dai partner di PHOTORAMA che hanno beneficiato della ricca rete del consorzio. Ogni partner ha contribuito diffondendo il sondaggio attraverso campagne sui social media, e-mail di sensibilizzazione e richieste personali. Con questo metodo è stato raggiunto un minimo stimato di almeno 1.479 contatti individuali. La tabella seguente riporta una serie di organizzazioni con un numero significativo di individui contattati. Inoltre, sono state contattate molte altre organizzazioni, tra cui Energie de France (EDF), PV magazine, ENGIE, IPCEI e COBATRAEE, il consorzio per la raccolta e il riciclo dei RAEE, che si avvale dell'esperienza trentennale di Cobat nella gestione dei rifiuti tecnologici.

Nome dell'organizzazione	Tipo di organizzazione raggiunta	Persone raggiunte	Paese
CEA - Solar Technology Department	Organizzazione di ricerca	300	FR
National Energy Agency - France	Organizzazione senza scopo di lucro	40	FR
SPE	Organizzazione senza scopo di lucro - Lobby fotovoltaiche	240	FR
Contatti corporate e linkedin ENEL	Industriale - fornitore di elettricità	45	IT
ENEA energy Technologies	Unità interna per energie rinnovabili	300	IT
Gornalisti italiani nel settore delle energie rinnovabili	Media	300	IT
Associazioni sui rifiuti	Business/pubblico	50	DE
Austrian PV Technology Platform	Business e ricerca	22	AT

Tabella 23. Esempio di organizzazioni e numero di persone contattate per il sondaggio

Parte della strategia è stata quella di rivolgersi a specifici moltiplicatori di informazioni in settori rilevanti per il sondaggio (fotovoltaico, energia, rifiuti) che hanno la possibilità di raggiungere un gran numero di stakeholder attraverso le loro reti. Considerando il numero di follower che questi account hanno su Twitter, la diffusione attraverso i loro canali ha il potenziale di raggiungere 15.077 persone. Il sondaggio è stato così diffuso sui social media dalle organizzazioni presenti nella seguente tabella:

Nome	Descrizione	Seguaci	Mezzo
FEDARENE	Federazione Europea delle Agenzie e Regioni per l'Energia e l'Ambiente	3.203	Tweet
ManagEnergy	Iniziativa della Commissione Europea per la sostenibilità delle agenzie energetiche	364	Tweet
REScoop EU	Federazione Europea delle Cooperative Energetiche dei Cittadini	6.628	Tweet
WEEE Forum	Associazione internazionale di organizzazioni per la responsabilità dei produttori di rifiuti elettronici	1.808	Tweet
ICLEI Europe Energy	Governi Locali per la Sostenibilità Europa: Energia	1.256	Tweet
PV recycle Japan	Media	1.237	Tweet
Circusol	Progetto H2020 (FV, batterie)	408	Tweet
Tipping plus	Progetto H2020	173	Tweet

Tabella 24. “Multipliers” (una traduzione letterale dall’inglese corrisponderebbe alla parola italiana *Moltiplicatori*, tuttavia sono da intendersi piuttosto come divulgatori di notizie e informazioni)

La stima complessiva dei contatti raggiunti nelle tre fasi del processo di diffusione è di circa 16.720 persone. Questo dato è indicativo, poiché non sempre è stato possibile conoscere il numero esatto di destinatari delle newsletter, dei post sui social media e delle mailing personali. Inoltre, alcuni colleghi hanno condiviso il sondaggio tramite i propri profili LinkedIn, rendendo difficile una quantificazione precisa. Pur considerando

possibili duplicazioni, si può affermare che la diffusione è stata ampia tra gli stakeholder sia nei Paesi UE che a livello globale.

3.4.3. Dati demografici

In totale le risposte totali sono state 411; 251 sono state quelle complete, di cui 222 provenienti da paesi UE e 29 da paesi terzi. Per l'analisi dei dati sono state prese in considerazioni soltanto le risposte complete.

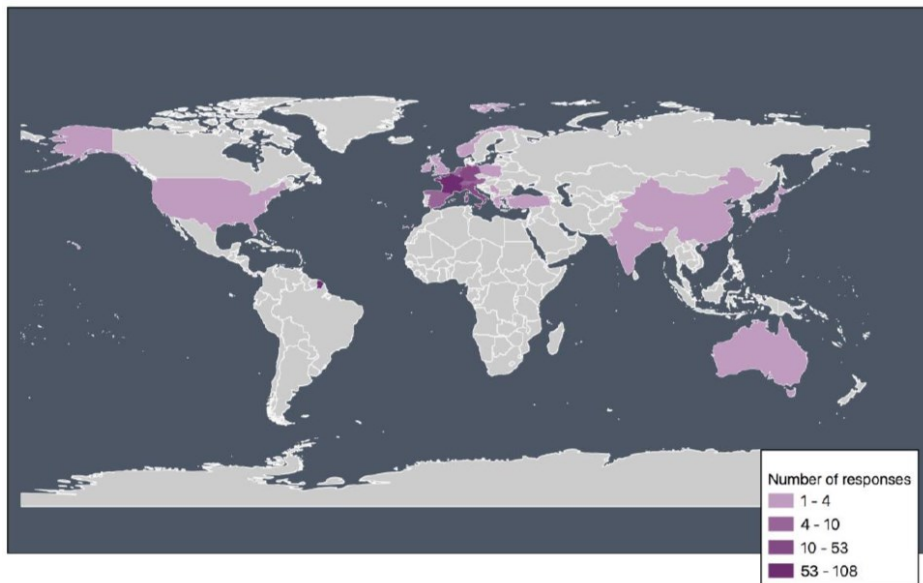


Figura 36. Numero di risposte per paese

La figura sopra illustra la ripartizione delle risposte per Paese. Al di fuori dell'Europa, PHOTORAMA ha ricevuto risposte complete da Australia (4), Stati Uniti (3), Bangladesh (1), Cina (1) e India (1).

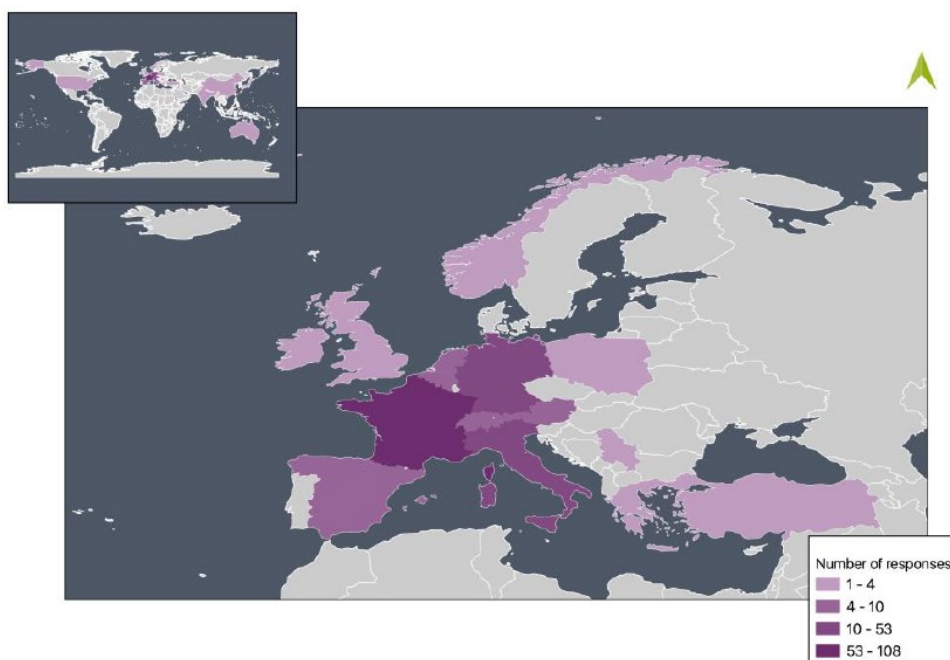


Figura 37. Numero di risposte per paese in Europa

La distribuzione delle risposte a livello europeo mostra una forte rappresentanza di Francia (108 risposte) e Italia (53 risposte), evidenziando l'attivo coinvolgimento e la buona divulgazione da parte dei partner nazionali in questi paesi. Il campione è prevalentemente maschile (67%), mentre il 31% è femmina e il 2% si identifica come non binario o altro; 5 persone non hanno risposto. La maggioranza degli intervistati è in età lavorativa, con una netta prevalenza nella fascia 25-44 anni (141 intervistati).

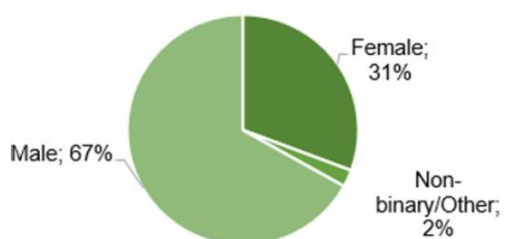


Figura 38. Divisione per genere

Età	
Nessuna risposta	3
16-24	10
25-44	141
45-64	93
65+	4

Tabella 25. Divisione per età

In termini di rappresentanza settoriale, il 48% degli intervistati lavora nel mondo accademico e/o della ricerca. La quota rimanente è per lo più distribuita tra coloro che lavorano per società di servizi energetici (18%), nel settore manifatturiero (8%) e nella pubblica amministrazione (6%). La ripartizione per settore di attività è riportata nella figura seguente.

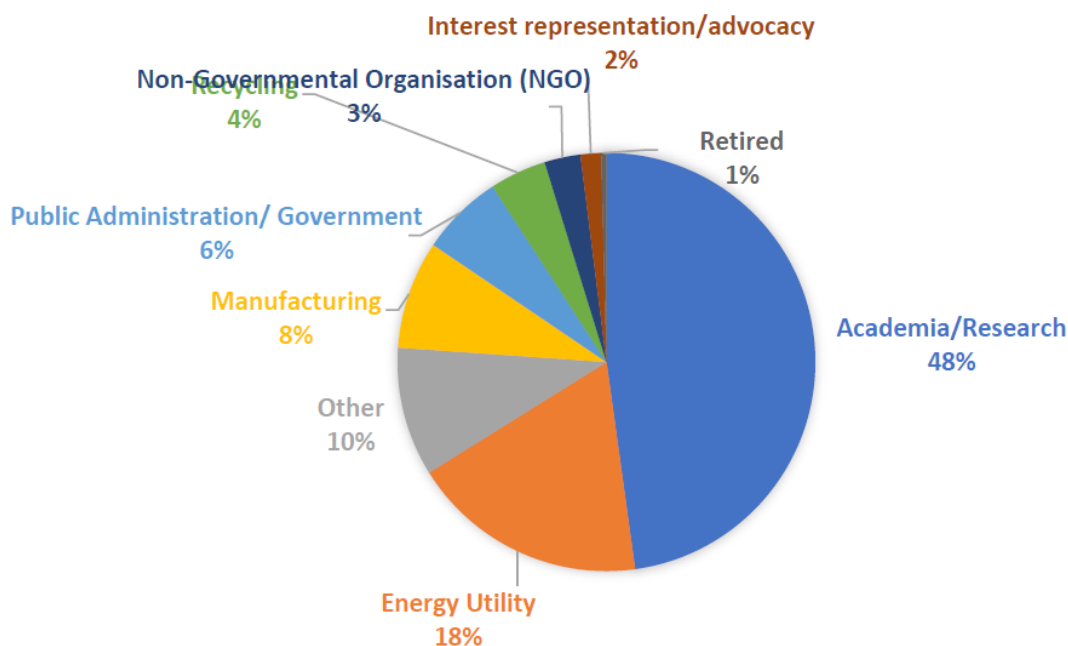


Figura 39. Settore di attività

La maggior parte degli intervistati (79%) ha esperienza lavorativa attuale o passata in aziende, organizzazioni o istituti di ricerca nel settore fotovoltaico, con un'esperienza media di 7 anni, confermando così la loro competenza e il successo delle attività di sensibilizzazione nella comunità fotovoltaica.

3.4.4. Consapevolezza

Gli stakeholder sono stati invitati a esprimere la propria valutazione sulle modalità di riciclo dei pannelli fotovoltaici, sugli aspetti tecnici e sulle criticità principali che il riciclo incontra nell'UE, con particolare attenzione al recupero delle materie prime. Inoltre, il 23% degli intervistati ha dichiarato di avere pannelli fotovoltaici installati nella propria abitazione o condominio.

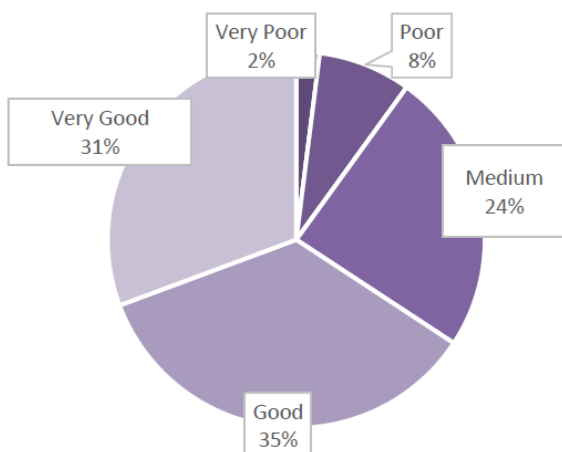


Figura 40. Autovalutazione circa il livello di conoscenza dei pannelli fotovoltaici in generale

Gli intervistati hanno valutato il loro livello di conoscenza del fotovoltaico come generalmente alto, con due terzi che si considerano “molto buoni” o “buoni”, il 25% con conoscenze medie e circa il 10% con conoscenze scarse. Riguardo alla durata media dei pannelli fotovoltaici, la stima media è di circa 25 anni, in linea con l’esperienza di PHOTORAMA, con il 50% degli stakeholder che indica una durata tra 20 e 30 anni; solo pochi ritengono che possa arrivare fino a 50 anni o essere molto breve (1 anno).

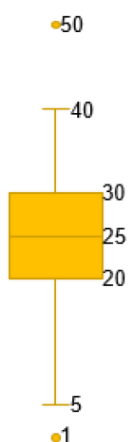


Figura 41. Box Plot della stima della durata media del pannello fotovoltaico (in anni)

Alla domanda sul fine vita dei pannelli fotovoltaici nell’UE, gli intervistati hanno sottolineato la complessità della situazione, dovuta alle diverse pratiche di riciclo tra Paesi europei. Secondo il loro parere, una parte dei pannelli viene riciclata (ad esempio il vetro), mentre un’altra parte viene smaltita in discarica, con percentuali rispettivamente del 35% e del 28% tra gli stakeholder. La modalità di gestione varia notevolmente da Paese a Paese: alcuni riciclano, altri effettuano il downcycling o altre pratiche.

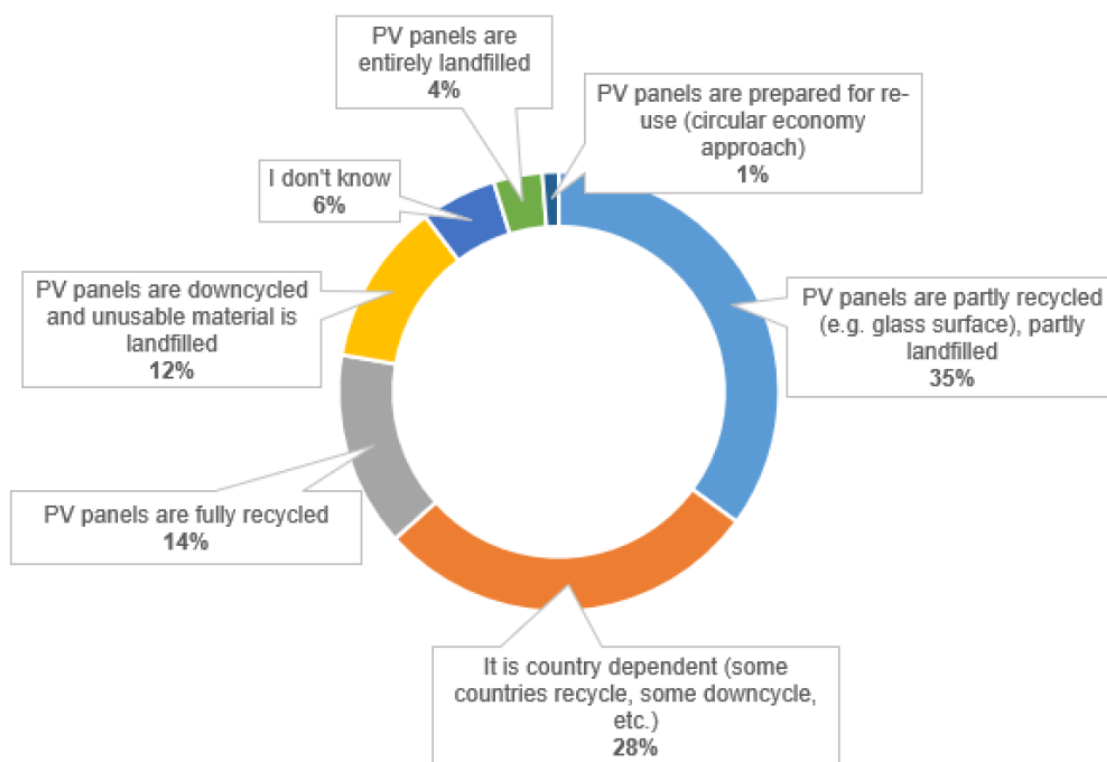


Figura 42. Cosa succede con la maggior parte dei pannelli fotovoltaici a fine vita nell'UE?

La maggior parte dei settori coinvolti (Accademico/Ricerca, Produzione, Riciclaggio, ONG, Pubblica Amministrazione/Governo, Altro) ha confermato la variabilità delle risposte sul fine vita dei pannelli fotovoltaici. Nel settore energetico, il 50% degli stakeholder ritiene che i pannelli siano completamente riciclati, mentre il 25% pensa che siano in parte riciclati e in parte smaltiti in discarica.

Sulla quota di pannelli a fine vita effettivamente riciclati in Europa, le stime sono molto variabili e dipendono dal Paese: ad esempio, in Francia la percentuale è molto alta (circa 95%), mentre in altri Stati dell'UE risulta molto bassa, con prevalenza di smaltimento in discarica. Tra gli intervistati non c'è stato un consenso forte: più della metà ha stimato una quota pari o inferiore al 30%, mentre un quarto ha stimato valori superiori al 70%; solo una piccola parte ha indicato una quota intermedia tra il 30% e il 70%.

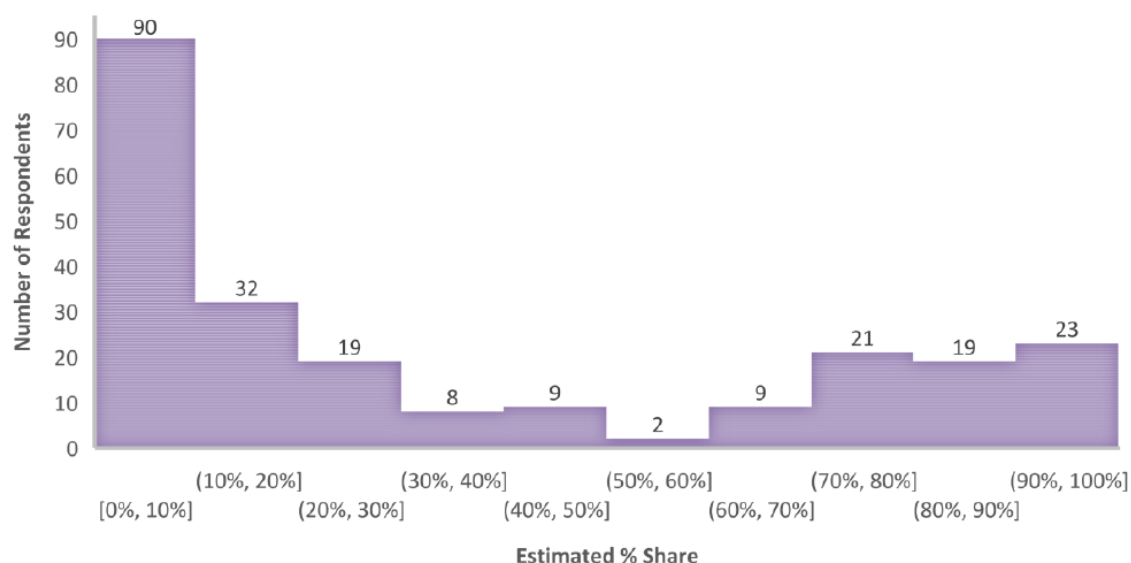


Figura 43. Quota stimata in % di pannelli fotovoltaici EoL attualmente completamente riciclati.

Il questionario ha chiesto ai partecipanti di stimare la quantità di rifiuti di pannelli fotovoltaici attesi in Europa entro il 2050. Secondo PHOTORAMA e altri esperti, in Europa si prevedono circa 10 milioni di tonnellate di rifiuti cumulativi tra il 2021 e il 2050, mentre a livello mondiale la stima varia tra 60 e 78 milioni di tonnellate. Le risposte degli intervistati sono risultate molto differenziate: il 26% ha indicato proprio la cifra di 10 milioni di tonnellate, il 25% ha stimato più di 10 milioni, un altro quarto meno di 10 milioni, mentre il restante quarto non ha saputo fornire una stima precisa.

Stime degli stakeholder sui rifiuti dei pannelli fotovoltaici (N=251)	
500 000 tonn	4%
1 milione tonn	7%
5 milioni tonn	13%
10 milioni tonn	26%
50 milioni tonn	24%
Non so	26%

Tabella 26. Stima dei rifiuti di pannelli fotovoltaici

Riguardo ai metalli critici e preziosi recuperabili dai pannelli fotovoltaici a fine vita, gli esperti di PHOTORAMA propongono questa suddivisione:

- **Metalli critici:** Indio, Gallio, Silicio
- **Metalli preziosi e di valore:** Argento
- **Altri metalli preziosi:** Rame, Alluminio, Cadmio, Tellurio

Gli intervistati hanno menzionato oltre 30 metalli diversi tra critici, preziosi e di valore, ma i 10 più citati sono riportati nella tabella seguente.

Metalli critici e preziosi	Numero di stakeholder
Rame	116
Argento	112
Alluminio	95
Silicio	90
Vetro	23
Indio	21
Piombo	14
Cadmio	13
Gallio	13
Stagno	13

Tabella 27. I 10 metalli più critici e preziosi

I metalli critici e preziosi indicati dagli esperti di PHOTORAMA coincidono con i dieci più citati dagli intervistati, ad eccezione del tellurio, che risulta all'11° posto con 11 risposte. Il rame è stato il metallo più menzionato, seguito da argento, alluminio e silicio; indio, cadmio e gallio sono invece risultati meno noti, citati solo da pochi partecipanti. Il 6% degli stakeholder ha dichiarato di non sapere quali metalli critici e preziosi possano essere recuperati.

Alla domanda sulla quantità di metalli critici e preziosi recuperabili con le attuali tecnologie industriali, gli esperti di PHOTORAMA stimano che con la loro tecnologia sia possibile recuperare il 90-98% di questi materiali, ma le tecnologie oggi utilizzate industrialmente non raggiungono questi livelli. Inoltre, mentre il recupero in massa del modulo fotovoltaico completo viene solitamente comunicato, il recupero specifico dei metalli critici e preziosi spesso rimane poco noto.

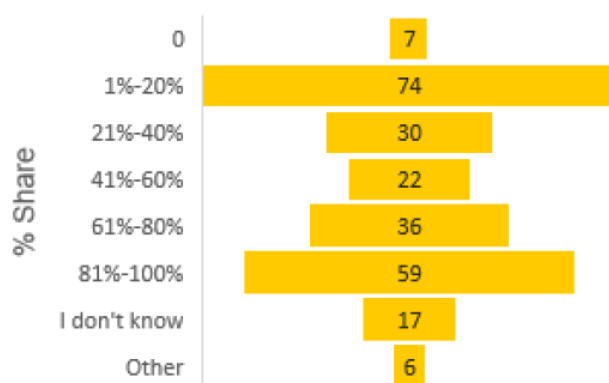


Figura 44. Quota % stimata di metalli critici e preziosi che possono essere recuperati dai pannelli fotovoltaici

Le stime degli intervistati sul recupero di metalli critici e preziosi dai pannelli fotovoltaici con le tecnologie attuali variano dallo 0 al 100%, ma solo il 24% ritiene che si possa superare l'80% di recupero. La maggioranza degli stakeholder ritiene che, con le tecnologie oggi disponibili, solo una piccola parte di questi metalli possa essere recuperata. Sulle questioni più critiche relative ai pannelli a fine vita, circa l'80% degli intervistati ha indicato come principali problemi la dipendenza dell'UE da metalli critici e preziosi e lo spreco o la perdita di risorse. L'accumulo di rifiuti e le preoccupazioni etiche legate all'estrazione delle materie prime sono stati ritenuti altrettanto rilevanti, ma meno critici rispetto ai precedenti. I rischi per la salute associati allo smaltimento dei pannelli sono stati considerati di minore importanza.

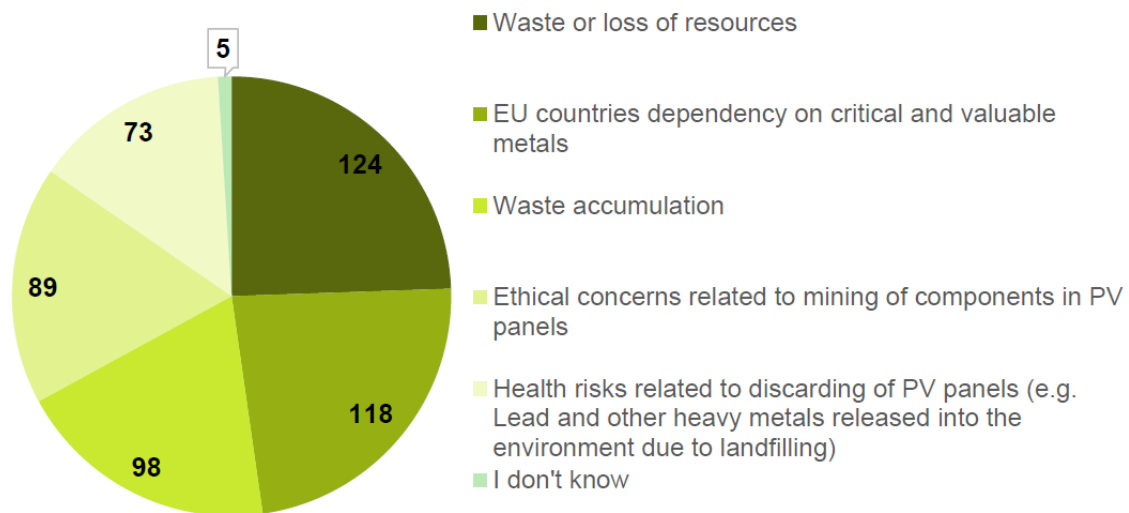


Figura 45. Questioni più critiche relative ai pannelli fotovoltaici a fine vita. Nota che: (i) era possibile selezionare più di un'opzione e che (ii) i temi sono ordinati in base alle risposte

3.4.5. Fattori trainanti e barriere

Nell'ultima sezione del questionario, è stato chiesto ai partecipanti di valutare 10 fattori trainanti e 13 barriere al riciclo dei pannelli fotovoltaici nell'UE, per comprendere meglio quali siano, secondo ciascun gruppo di partecipanti, quelli più importanti per il riciclo dei pannelli fotovoltaici in Europa. Le barriere sono state valutate in tre dimensioni: tutte insieme, per settore⁴⁹ e per Paesi UE e non UE. In particolare, per ogni fattore descritto occorre valutare in che misura questo motivasse gli intervistati a contribuire al riciclo del fotovoltaico nell'UE. I partecipanti dovevano classificare 10 fattori da 1 a 5, dove 5 è

⁴⁹ Salim H.K., Stewart R.A., Sahin O., Dudley M. (2019), *End-of-life management of solar photovoltaic and battery energy storage systems: A stakeholder survey in Australia*. Resources, Conservation and Recycling, 150, art. no. 104444

“estremamente importante” e 1 “non è affatto un problema”. I 10 fattori, insieme al punteggio medio totale delle risposte e alla relativa classifica, sono riportati nella tabella seguente.

Driver		Media	Classifica
D1	Regolamentazione UE, in particolare la direttiva sui RAEE	4.43	1
D2	Regolamentazione UE: la futura direttiva ecodesign per il riciclo dei pannelli PV potrebbe incentivare il riutilizzo di metalli critici e preziosi	4.26	2
D3	Riutilizzare i materiali permette di risparmiare sui costi di nuova produzione	3.80	5
D4	Opportunità di creazione di posti di lavoro	3.27	9
D5	Immagine <i>green</i> delle aziende	3.42	8
D6	Ridurre la dipendenza dall'importazione di metalli critici e preziosi verso l'UE	3.75	6
D7	Ridurre i rischi per la salute umana	3.16	10
D8	Ridurre le emissioni di gas serra e il consumo energetico	3.62	7
D9	Politiche nazionali dei singoli Stati membri dell'UE sul riciclo	3.93	3
D10	Prospettiva di un'enorme quantità di pannelli fotovoltaici a fine vita e di conseguenza un'attività redditizia	3.83	4

Tabella 28. Fattori che incentivano il riciclo dei pannelli fotovoltaici nell'UE

Tra i fattori che incentivano il riciclo dei pannelli fotovoltaici, vi è un consenso generale sull'importanza della normativa, sia a livello europeo che nazionale. La Direttiva UE sui RAEE è considerata il driver più rilevante, seguita dal Regolamento UE sulla progettazione ecocompatibile, che incentiva il riutilizzo di metalli critici e preziosi. Le politiche nazionali degli Stati membri si collocano al terzo posto, anche se il gruppo delle utility energetiche le considera meno influenti.

Tra i driver di natura commerciale, la prospettiva di un'attività redditizia legata al riciclo di grandi quantità di pannelli a fine vita e il risparmio sui costi di nuova produzione sono rispettivamente al quarto e quinto posto. I gruppi di advocacy e riciclo attribuiscono maggiore importanza alla prima e minore alla seconda.

La riduzione dei rischi per la salute umana e la creazione di posti di lavoro sono valutate meno importanti, pur mantenendo un ruolo motivante con punteggi medi di 3,16 e 3,27.

Tutti e dieci i driver indagati sono comunque riconosciuti come almeno moderatamente rilevanti nel motivare gli stakeholder a partecipare al riciclo dei pannelli fotovoltaici nell'UE.

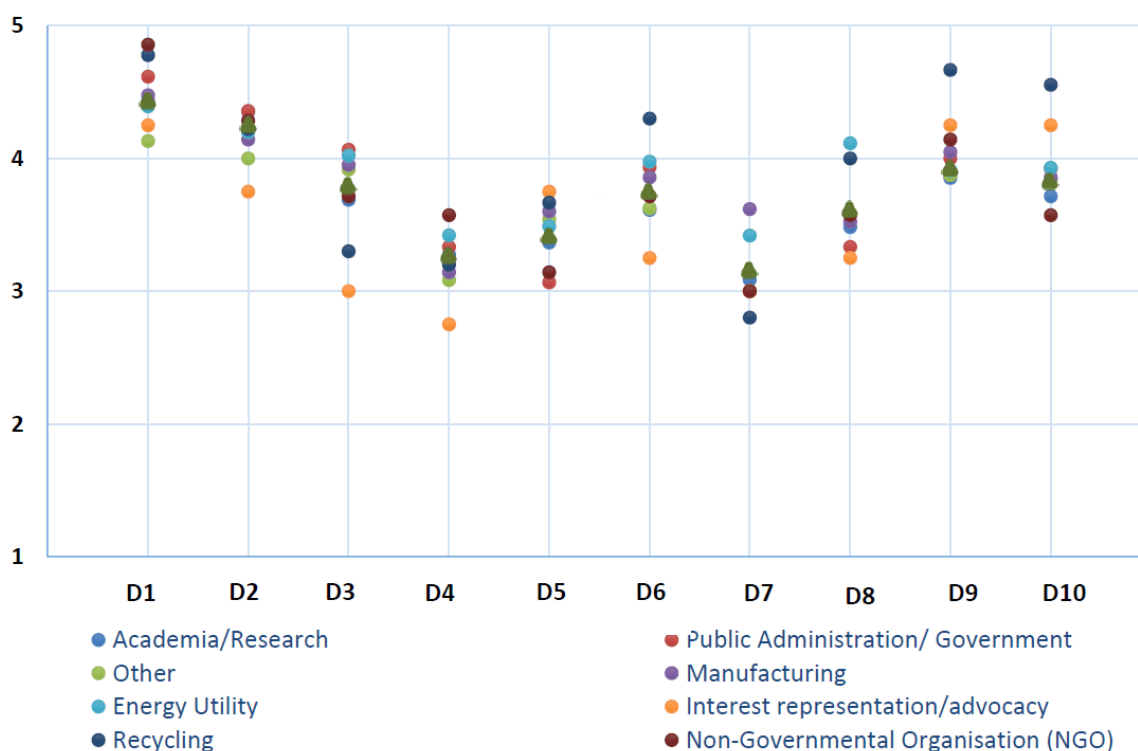


Figura 45. Punteggio medio dei fattori trainanti per settore di intervistati

Nonostante i partecipanti dell'UE e quelli extra-UE concordino sull'importanza relativa di ciascun driver⁵⁰, lo stesso non vale per il livello di importanza di alcuni singoli driver.

Gli stakeholder extra-UE attribuiscono un peso maggiore alle politiche europee e nazionali rispetto a quelli dell'UE, probabilmente perché sopravvalutano il potere normativo delle istituzioni europee e non sono pienamente consapevoli che le direttive UE devono essere recepite a livello nazionale. Per quanto riguarda i driver legati agli interessi commerciali (risparmio sui costi, creazione di posti di lavoro, immagine verde e prospettive di business), gli stakeholder non UE li considerano leggermente più importanti rispetto agli europei. Entrambi i gruppi concordano invece che la riduzione dei rischi per la salute umana sia il driver meno rilevante, anche se gli europei gli attribuiscono un punteggio superiore di 0,41.

⁵⁰ L'analisi che mette a confronto gli intervistati dell'UE e quelli non UE è limitata dal basso numero di intervistati non UE; a seguito della scadenza sono infatti state rilevate soltanto 29 risposte non UE che corrispondono al 12% degli intervistati.

Per le barriere, sono state valutate 13 criticità che ostacolano il riciclo dei pannelli fotovoltaici nell'UE, con punteggi da 1 (“non è affatto un problema”) a 5 (“estremamente importante”).

Barriere		Media	Classifica
B1	Il riciclo dei pannelli PV non è redditizio: i costi superano i benefici	4.04	1
B2	La tecnologia di riciclo non è sufficientemente matura per il recupero e il riutilizzo completo dei materiali	3.56	6
B3	Mancanza di linee industriali di riciclo per i pannelli PV nell'UE	3.88	3
B4	Mancanza di incentivi per i produttori di PV a progettare pannelli più riciclabili (eco-design)	3.97	2
B5	Mancanza di coordinamento lungo la filiera: i produttori non condividono informazioni con i riciclatori	3.33	8
B6	Attualmente non sono disponibili abbastanza pannelli PV a fine vita nell'UE per sostenere le attività di riciclo	3.34	7
B7	Il mercato tende a diffidare della qualità dei materiali recuperati dai pannelli PV	3.04	12
B8	La durata di vita attesa dei pannelli PV varia a seconda del tipo	2.63	13
B9	I nuovi produttori di pannelli PV offrono prezzi competitivi rispetto alle opzioni più sostenibili	3.73	5
B10	Il riciclo dei pannelli PV richiede l'uso di sostanze chimiche inquinanti, non completamente recuperate	3.28	9
B11	Il riciclo dei pannelli PV richiede l'uso di macchinari ad alto consumo energetico	3.14	11
B12	Componenti e design dei pannelli PV possono cambiare nei prossimi anni, complicando il riciclo	3.27	10
B13	Situazione legale: la direttiva UE sui RAEE non offre incentivi sufficienti per il recupero completo e il riutilizzo dei materiali dei pannelli PV, favorendo il downcycling	3.85	4

Tabella 29. Barriere o ostacoli al riciclo dei pannelli fotovoltaici nell'UE

La maggior parte degli intervistati è concorde nel ritenere che le principali barriere al riciclo dei pannelli fotovoltaici nell'UE siano la mancanza di redditività (costi superiori ai benefici), la carenza di incentivi per la progettazione di pannelli riciclabili (eco-design),

la scarsità di linee industriali di riciclo e le limitazioni della direttiva RAEE, che non favorisce il pieno recupero dei materiali.

Tuttavia, gli stakeholder del settore riciclaggio e dei gruppi di interesse/advocacy hanno opinioni differenti: considerano più rilevante la scarsa disponibilità di pannelli a fine vita, che ostacola le attività di riciclo, mentre attribuiscono minor peso alle mancanze di eco-design e alle criticità della direttiva RAEE. I gruppi di stakeholder concordano invece che la variabilità della durata di vita dei pannelli sia la barriera meno importante, ad eccezione del settore riciclaggio, che invece ritiene meno rilevante la diffidenza del mercato verso la qualità dei materiali recuperati.

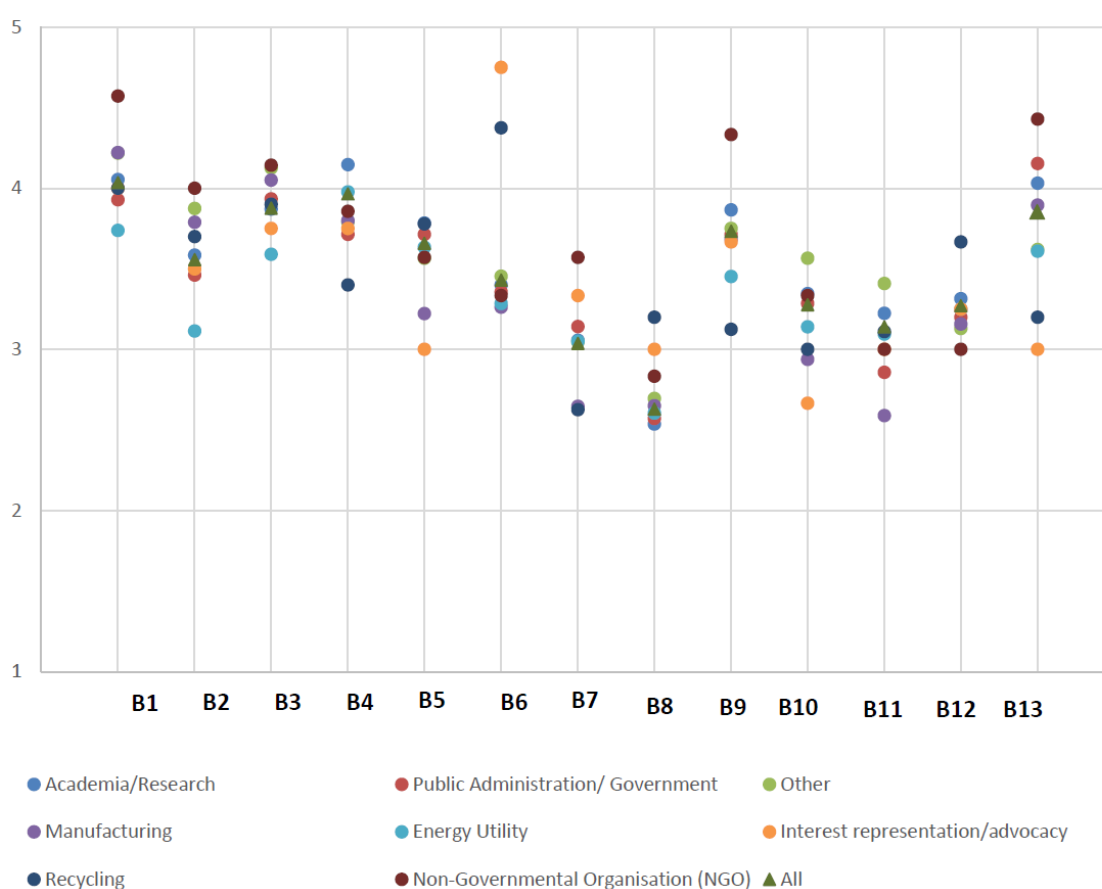


Figura 46. Punteggio medio delle barriere per settore

Gli intervistati dell'UE e quelli dei Paesi terzi concordano anche sull'importanza relativa di ciascuna barriera. Gli europei hanno valutato B1, B4 e B13 come le tre barriere principali mentre per gli extra-europei lo sarebbero le barriere B1, B3 e B13. Gli stakeholder non appartenenti all'UE hanno votato collettivamente la barriera B1 un punteggio di 0,42 superiore a quello degli stakeholder dell'UE.

Per quanto riguarda le tre barriere meno rilevanti, gli stakeholder dell'UE hanno considerato B8, B7 e B11 relativamente poco importanti, mentre gli stakeholder non UE hanno scelto B8, B11 e B10.

3.4.6. Stato dell'arte

La raccolta e l'analisi delle informazioni emerse rappresentano un punto di partenza indispensabile per le fasi successive del progetto, che si concentreranno prevalentemente sulla sensibilizzazione e sull'accettazione sociale del riciclo dei pannelli fotovoltaici nell'UE.

Le percezioni degli stakeholder sulle pratiche di fine vita dei pannelli e sulla quota effettivamente riciclata variano notevolmente, così come la consapevolezza riguardo ai metalli critici e preziosi recuperabili: argento e silicio sono più noti, mentre indio e gallio risultano meno conosciuti. Le politiche europee e nazionali, in particolare la direttiva RAEE, sono considerate fondamentali ma ancora insufficienti per incentivare il riciclo e il riutilizzo dei materiali. Le principali barriere riguardano la mancanza di incentivi finanziari e di infrastrutture adeguate, sottolineando la necessità di una maggiore consapevolezza e collaborazione tra Paesi e settori.

Questo quadro iniziale di conoscenze e percezioni è quindi essenziale per indirizzare le attività future del progetto, che saranno focalizzate su sensibilizzazione e accettazione sociale, temi chiave per lo sviluppo sostenibile del settore fotovoltaico.

Considerazioni conclusive

La transizione verso un modello di economia circolare è ormai un elemento imprescindibile delle politiche europee, in particolare in settori cruciali come quello energetico. I tre capitoli di questa tesi hanno consentito di analizzare in modo approfondito le principali sfide, opportunità e strategie associate all'integrazione della circolarità nella catena del valore dell'energia, con un focus particolare sul fotovoltaico. Dall'analisi delle politiche europee all'implementazione concreta di modelli circolari nelle utilities, fino allo studio di un caso applicativo come il progetto PHOTORAMA, questa tesi ha messo in luce come l'economia circolare possa costituire non solo una soluzione alle criticità ambientali, ma anche una leva di sviluppo competitivo per l'industria energetica.

In primo luogo, il percorso tracciato dimostra il ruolo fondamentale delle politiche europee per l'economia circolare, senza le quali sarebbe impensabile una transizione su larga scala. Le normative europee stabiliscono le fondamenta di un modello industriale che si distanzia dal paradigma lineare, per adottare un approccio sistemico fondato sulla valorizzazione continua delle risorse. I cinque pilastri dell'economia circolare – input sostenibili, estensione della vita utile, utilizzo condiviso, prodotto come servizio e valorizzazione del fine vita – rappresentano oggi un quadro di riferimento non solo teorico, ma operativo, che orienta il settore energetico verso una maggiore sostenibilità. La chiave dell'approccio europeo è la creazione di un ciclo chiuso in cui ogni fase del ciclo di vita è finalizzata al mantenimento del valore, una visione che è destinata a guidare l'industria e la ricerca nella formulazione di soluzioni sempre più efficienti e innovative.

Il secondo punto rilevante emerso è l'importanza della circolarità come strumento di decarbonizzazione per le utilities energetiche. I casi pratici analizzati, relativi alle tecnologie principali come l'eolico, il solare, le infrastrutture energetiche, i sistemi di accumulo e le infrastrutture di ricarica, hanno evidenziato come un approccio circolare permetta non solo di minimizzare l'impatto ambientale, ma anche di aumentare l'efficienza operativa e di generare nuove opportunità di business. L'estensione del ciclo di vita dei componenti, l'utilizzo di input sostenibili, lo *sharing*, il *Product as a Service* e la valorizzazione del fine vita consentono di ridurre i costi, allungare la durata delle infrastrutture e migliorare la sostenibilità complessiva. L'economia circolare, pertanto,

non è solo una strategia ambientale, ma un modello di business che conferisce un vantaggio competitivo alle utilities, aiutandole a rispondere alle esigenze del mercato e alle normative di decarbonizzazione. L'adozione di modelli di business circolari può, quindi, supportare le aziende energetiche nella gestione più responsabile delle risorse, massimizzando al contempo il valore degli asset e ottimizzando le prestazioni.

Infine, il progetto PHOTORAMA offre un caso di applicazione pratica dell'economia circolare al settore fotovoltaico, mettendo in evidenza l'importanza della gestione sostenibile dei moduli a fine vita. La metodologia adottata del case study ha permesso un'analisi approfondita e longitudinale delle innovazioni tecnologiche e degli impatti ambientali delle pratiche di riciclo e la robustezza dei risultati è stata rafforzata dalla combinazione di fonti quali documentazione aziendale, dati longitudinali e survey mirate, compensando così i limiti di ciascuna fonte informativa. Sebbene la generalizzabilità dei risultati possa essere limitata dalle specificità del caso PHOTORAMA, la conoscenza approfondita acquisita offre contributi significativi alla comprensione scientifica dell'economia circolare applicata al fotovoltaico.

L'analisi del Ciclo di Vita (LCA) condotta sui moduli fotovoltaici ha evidenziato benefici ambientali significativi per entrambe le tipologie di pannelli analizzati, dimostrando l'efficacia della tecnologia di riciclo sviluppata da PHOTORAMA nel minimizzare gli impatti ambientali rispetto ai rispettivi processi benchmark di riferimento. L'analisi di eco-efficienza ha confermato la sostenibilità economica e ambientale del progetto PHOTORAMA, evidenziando la superiorità della tecnologia sviluppata rispetto ai metodi di riciclo tradizionali. I risultati documentano miglioramenti significativi sia nell'indice ecologico che nell'indice dei costi per entrambe le tipologie di moduli fotovoltaici esaminati. Queste valutazioni costituiscono elementi fondamentali per il proseguimento del progetto, fornendo dati essenziali per lo sviluppo del business plan, per la valutazione finanziaria e per il calcolo della redditività dell'investimento.

L'indagine condotta su oltre 400 stakeholder del settore fotovoltaico ha fornito informazioni fondamentali per comprendere i fattori che influenzano l'adozione di pratiche di economia circolare. L'analisi ha permesso di identificare i principali driver e le barriere percepite dagli operatori del settore, valutando al contempo il livello di consapevolezza relativo all'importanza della gestione sostenibile del fine vita dei moduli fotovoltaici e alla disponibilità di tecnologie di riciclo avanzate.

I risultati hanno evidenziato come i principali fattori motivanti includano la riduzione della dipendenza dalle importazioni di materie prime critiche e la creazione di nuove opportunità occupazionali a livello locale. Parallelamente, sono emerse come barriere significative i costi iniziali elevati per l'implementazione delle tecnologie circolari e la frammentazione del quadro normativo europeo, che ostacola l'armonizzazione delle pratiche di riciclo tra i diversi Paesi membri. Questi risultati hanno sottolineato l'esigenza di sviluppare campagne di sensibilizzazione mirate e specifiche per il settore, che verranno implementate nelle fasi successive del progetto per favorire una maggiore diffusione e accettazione delle soluzioni di economia circolare nel comparto fotovoltaico.

In sintesi, la tesi ha evidenziato che l'economia circolare non è solo una soluzione di carattere ambientale, ma un approccio integrato che può trasformare l'industria energetica in un settore più sostenibile e competitivo. I tre capitoli della tesi hanno sottolineato come la circolarità possa generare valore in ogni fase della catena produttiva, riducendo l'impatto ambientale, aumentando l'efficienza e rafforzando la resilienza delle imprese energetiche. Questo studio mostra come un futuro energetico sostenibile non possa prescindere da modelli di business innovativi che vadano oltre il semplice utilizzo di energie rinnovabili, integrando la sostenibilità in tutto il ciclo di vita delle risorse. La transizione verso un'economia circolare richiede dunque un impegno congiunto da parte di istituzioni, imprese e consumatori per trasformare i rifiuti in risorse e promuovere una cultura della sostenibilità a lungo termine.

In conclusione, il contributo di questo lavoro risiede nella dimostrazione del potenziale dell'economia circolare come strategia di crescita sostenibile per l'industria energetica. L'adozione su vasta scala di pratiche circolari, sostenuta da politiche e investimenti mirati, potrebbe favorire la realizzazione di una catena del valore energetica resiliente e indipendente. La strada verso la sostenibilità energetica passa quindi attraverso l'adozione di modelli circolari che, partendo da un ripensamento del design e del fine vita dei prodotti, arrivino a consolidare l'industria europea come leader nell'innovazione e nella sostenibilità. La circolarità applicata al settore fotovoltaico, come dimostrato da PHOTORAMA, rappresenta un'opportunità strategica per ridurre le emissioni, creare valore economico e promuovere un approccio sostenibile che garantisca risorse anche per le generazioni future.

Appendice

Processo di benchmark iniziale e impostazione del modello associato per la LCA

L'analisi finale della LCA è presentata nel capitolo 3.2 di questo elaborato. Tuttavia, al fine di garantire una visione completa, in questa sezione verranno illustrati i risultati intermedi ottenuti dalle analisi preliminari, fondamentali per l'elaborazione dell'LCA definitiva. Durante questa analisi preliminare, sono stati raccolti dati per modellare e implementare benchmark sui processi di riciclo dei moduli fotovoltaici a fine vita, utili a confrontare i progressi tecnologici e ambientali dei nuovi processi sviluppati nel progetto PHOTORAMA. La metodologia segue le norme DIN EN ISO 14040 e 14044, il PEF e le PEFCR.

L'unità funzionale è la massa di pannelli riciclati e la quantità di metalli recuperati, considerando due flussi principali: moduli in silicio (Si) e celle a etero-giunzione o film sottile (CIS/CIGS). Il confronto riguarda i processi di riciclo attuali (benchmark) e quelli innovativi di PHOTORAMA.

I confini del sistema coprono tutte le fasi dalla produzione allo smaltimento, includendo materie prime, emissioni, produzione, lavorazione, smaltimento, flussi di materiali ed energia, e dove possibile il recupero di materie prime naturali e le emissioni ambientali. Per garantire la comparabilità, processi upstream con meno dell'1% in peso rispetto al flusso di riferimento sono trascurati, purché la somma totale degli input esclusi non superi il 3%. Non sono generalmente inclusi risorse ubiquitarie (es. aria) e infrastrutture. Lo smaltimento è modellato solo se rilevante o se i dati disponibili lo indicano.

Oltre al prodotto principale, si considerano benefici aggiuntivi come il riciclo o la valorizzazione energetica dei rifiuti (elettricità, calore), che evitano la produzione di materie prime primarie e riducono gli impatti ambientali. Questi benefici sono quantificati e attribuiti tramite un "fattore di sostituzione" che considera la qualità dei materiali secondari rispetto a quelli primari, semplificando l'interpretazione della LCA e migliorandone il valore informativo.

La validità dei risultati dipende dal contesto geografico e temporale: i dati riflettono principalmente l'Europa occidentale e globale, con alcuni produttori cinesi inclusi. Le analisi si basano su database aggiornati come Ecoinvent 3.8 e GaBi.

L'inventario del ciclo di vita (LCI) comprende: raccolta dati input/output, modellazione del sistema e calcolo dei flussi per l'intero sistema o sezioni specifiche, base per la valutazione degli impatti (LCIA). La modellazione, effettuata con GaBi ts Professional, include processi upstream e downstream, e prevede:

- Specifica e descrizione del sistema
- Definizione chiara dei processi inclusi
- Documentazione dettagliata delle fonti dati, anno, rappresentatività, trasporto e processi a monte
- Registrazione delle ipotesi e accordi
- Documentazione completa dei dati LCI

I dati LCI sono stati raccolti da partner, database, letteratura e studi precedenti, con procedure standard per trasporto e smaltimento.

Attualmente, i pannelli fotovoltaici a fine vita sono principalmente riciclati tramite triturazione, che genera rifiuti misti di bassa qualità, difficili da riutilizzare con alto valore aggiunto. Questo comporta scarsi incentivi economici e perdita di materie prime critiche, nonostante alti tassi di recupero conformi alla direttiva europea RAEE.

Il riciclo meccanico in centri specializzati per vetro laminato è il metodo più comune per moduli in silicio cristallino (c-Si), separando vetro (>75% peso), alluminio (~8%) e polimeri (~10%) senza grandi investimenti. Questo processo è stato scelto come benchmark per l'analisi LCI, rappresentando lo stato dell'arte nel riciclo dei moduli c-Si.

I dati benchmark considerano una distanza media di trasporto di 300 km e processi quali rimozione cornice e scatola di giunzione, triturazione, separazione manuale impurità, separazione metalli ferrosi e non ferrosi, rimozione di materiali inerti, setacciatura e rimozione pellicole con interconnettori. Gli output principali sono: vetro riciclato 640 kg/t, alluminio 135 kg/t, polimeri/film plastici 150 kg/t e scarti misti 60 kg/t.

Process information**Sources:**

Held et al (2021): Update and Evaluation of the Life Cycle Assessment of Wind Energy and Photovoltaic Systems Considering Current Technology Developments (UBA-Text climate change 35/2021)
 Wambach et. al. (2017): Life Cycle Inventory of Current Photovoltaic Module Recycling Processes in Europe (Report IEA-PVPS T12-12:2017)

Type of plant: Glass recycling plant
 Transport distance to the plant: 300 km

Process description and outputs: 1. Removal of frame and junction box → outputs: aluminium, junction box, cable
 2. Shredding the bar laminates
 3. Pre-Sorting of impurities (manually)
 4. Crushing
 5. Separation into metals and separation of ferrous metal → output: ferrous metal
 6. Extraction of metals and separation of non-ferrous metals → output: non-ferrous metals (aluminium, copper)
 7. Removal of stones, porcelain, ceramics
 8. Sieving and removal of foil (with interconnector) and solar cells → outputs: glass, foil with Si, Ag, Cu

Process values:

Functional unit (for all input and output values of this page): 1,000 kg c-Si panels

Name	Currently latest information			Recycling / disposal path	Benefit / Credit
	Value	Unit	Comment		
Energies / Fuels					
Electricity	46	kWh	10 t/h throughput		
	84	kWh	3.4 t/h throughput		
Diesel	2.5	l	internal traffic		
Outputs (Products)					
Glass cullet	640	kg		Foam and fiber glass production	Glass cullet substitutes primary materials for glass production such as limestone, silica sand and soda powder
Aluminium	135	kg		Aluminium smelter	Secondary aluminium substitutes primary aluminium production
Junction box	9	kg		Electronic recycler	Secondary copper substitutes primary copper production
Cable	6	kg		Cable recycler	Secondary copper substitutes primary copper production
Ferrous metal	no info	kg		Steel works	Steel scrap substitutes pig iron feedstock in converter steel production
Polymers / Foils	150	kg		Waste incineration	Electricity and heat substitutes energy from fossile fuels
Mixture of Glass cullet, foil, metals	60	kg		Landfill	-

Figura 47. Dati LCI per il processo meccanico del riciclo dei pannelli c-Si

Per quanto riguarda i pannelli CIS/CIGS (Copper Indium Selenide/Copper Indium Gallium Selenide), non esistono ancora processi consolidati su larga scala in Europa. Attualmente, il processo prevede la rimozione della cornice seguita dalla frantumazione dei materiali per l'utilizzo in processi downstream.

Poiché mancano dati primari specifici sul riciclo CIS/CIGS, l'analisi è stata modellata utilizzando dati relativi al riciclo dei moduli CdTe (Tellururo di Cadmio), con un fattore correttivo basato sulle differenze tra le tecnologie.

Gli output principali sono vetro riciclato: 684 kg/t; alluminio: 129 kg/t; miscela plastica: 53 kg/t; rifiuti misti non recuperabili: 134 kg/t.

Process information

Sources:

Held et al (2021): Update and Evaluation of the Life Cycle Assessment of Wind Energy and Photovoltaic Systems Considering Current Technology Developments (UBA-Text climate change 35/2021)
 Stolz et al (2016): PEF screening report of electricity from photovoltaic panels in the context of the EU Product Environmental Footprint Category Rules (PEFRC) Pilots
 Stolz et al (2018): Life Cycle Assessment of Current Photovoltaic Module Recycling, Report IEA-PVPS T12-13:2018

Type of plant: Model based on recycling of CdTe modules (no primary data on CIGS panel recycling are available)
 Transport distance to the plant: 700 km

Total weight of module: 14.9 kg/m² (unframed module)
 17.1 kg/m² (module including frame)

Process description and outputs: 1. Removal of frame → output: aluminium
 2. Shredding the bar laminates
 3. Dissolving the shredder output in chemical bath
 4. Sorting of material gained and preparation for recycling → outputs: glass cullet, plastics and disposal

Process values:

Functional unit (for all input and output values of this page): 1,000 kg CIGS panels

Name	Currently latest information				
	Value	Unit	Comment	Recycling / disposal path	Benefit / Credit
Energies / Fuels					
Electricity	384	kWh	5.72 kWh/m2		
Auxiliaries					
Water, deionised	475	kg			
Sulphuric acid	7	kg			
Hydrogen peroxide	50	kg	50% in H2O		
Sodium hydroxide	9	kg	50% in H2O		
Outputs (Products)					
Glass cullet	684	kg	Recycling efficiency of 90 % is assumed	Foam and fiber glass production	Glass cullet substitutes primary materials for glass production such as limestone, silica sand and soda powder
Aluminium	129	kg	Recycling efficiency of 100 % is assumed	Aluminium smelter	Secondary aluminium substitutes primary aluminium production
Waste / Waste water					
Plastic mixture	53	kg	Recycling efficiency of 50 % is assumed	Waste incineration	Electricity and heat substitutes energy from fossile fuels
Disposal (mixture of glass cullet, plastics, metals and wafer/semiconductor)	134	kg	None of the semiconductor materials (Cd, In, Se, Ga) is assumed to be recovered	Inert material landfill	-
Waste water	0.42	m3		Waste water treatment	-
Air emissions (instead of single values regarding functional unit the amount of exhaust and declaration analysis would also be useful)					
Copper	0.21	mg			
Selenium	0.12	mg			
Cadmium	0.006	mg			
Water emissions (instead of single values regarding functional unit the amount of exhaust and declaration analysis would also be useful)					
Copper	0.93	mg			
Selenium	3.21	mg			
Cadmium, ion	1.85	mg			

Figura 48. Dati LCI per il processo di riferimento Riciclaggio dei pannelli CIS/CIGS

Il lavoro presentato si propone di creare un set iniziale di dati per confrontare i miglioramenti nel progetto, in particolare la riduzione del consumo di energia, materiali e risorse in ogni fase del processo. La raccolta dati coinvolge i partner esperti lungo la catena del valore del fotovoltaico (PV).

È stata effettuata una prima raccolta dati per i nuovi processi PHOTORAMA, focalizzata sul recupero di argento e silicio dai moduli a base di silicio. Alcuni partner hanno però avuto difficoltà a fornire stime precise senza un impianto pilota.

I dati LCI raccolti serviranno a valutare i flussi di uscita dei processi di riciclo, con l'obiettivo di ottimizzarne l'impatto ambientale, applicando criteri quali:

- Quantità prodotte, per valutare la fattibilità su larga scala o sistemi chiusi.
- Rischio ambientale e sanitario legato ai materiali nei flussi di uscita.
- Identificazione di materie prime critiche secondo il CRMA (cfr. 1.8).
- Verifica della riduzione della dipendenza da minerali da conflitto.
- Valutazione del potenziale economico del riciclo rispetto ai materiali convenzionali.
- Classificazione dei materiali come “end of waste” secondo la Direttiva RAEE e relative implicazioni normative.

Gran parte degli impatti ambientali negativi derivano dall'estrazione e lavorazione delle risorse naturali. L'economia circolare è quindi fondamentale per contrastare questi effetti, e saranno valutati indicatori come i tassi di riciclo e l'indice europeo dell'uso circolare dei materiali (CMU).

Per la modellazione LCA è stata sviluppata una struttura preliminare che permette di analizzare separatamente i sottosistemi del processo, facilitando la valutazione e la presentazione chiara dei contributi ai risultati complessivi. Le emissioni sono suddivise in ambiti (scope) per una migliore categorizzazione.

Categoria di emissione	Definizione (fonte: protocollo GHG)	Contenuto relativo a questo studio
Ambito 1	Emissioni dirette da fonti che sono possedute o controllate dall'entità che redige il report.	- Processi di riciclo benchmark e PHOTORAMA - Fornitura energetica interna - Trasporti interni
Ambito 2	Emissioni indirette derivanti dal consumo di elettricità, calore o vapore acquistati.	- Fornitura energetica esterna
Ambito 3	Altre emissioni indirette (produzione di materiali ausiliari e combustibili, attività di trasporto non possedute o controllate dall'entità che redige il report, attività legate all'elettricità non incluse nell'Ambito 2, attività esternalizzate, smaltimento dei rifiuti, ecc.).	- Produzione di materiali ausiliari e operativi - Fornitura di combustibili - Trasporti esterni - Smaltimento/Riciclo

Tabella 30. Ambiti delle categorie di emissioni

Oltre ai processi benchmark descritti in precedenza, è stata data attenzione alla strutturazione dei nuovi processi sviluppati nel progetto per garantire integrazione e comparabilità. La seguente figura illustra la suddivisione attuale nei principali sottoprocessi e categorie di emissioni.

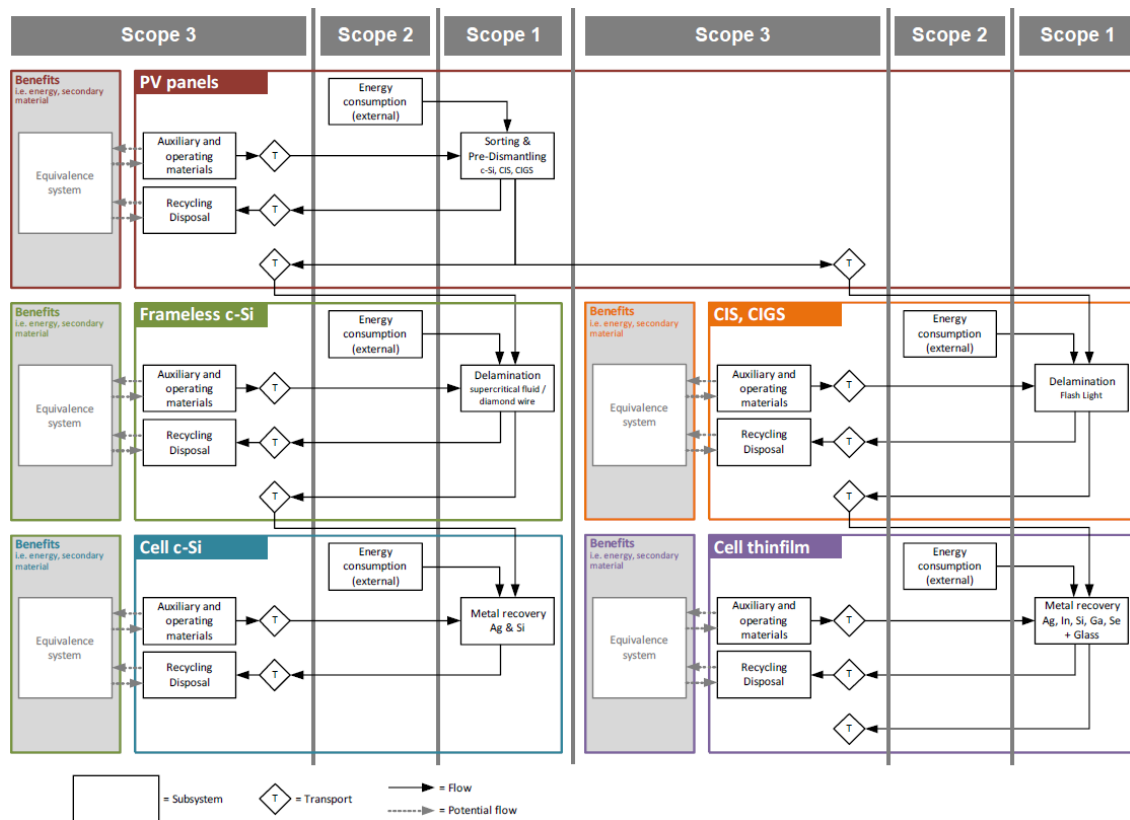


Figura 48. Struttura del modello LCA suddivisa in sottosistemi e scopi

Il successo del progetto dipende sia dal miglioramento tecnico dei processi di riciclo dei materiali che dalla qualità dei materiali recuperati, valutata nella fase di dimostrazione del riutilizzo. La qualità influisce sui crediti ambientali e sull'efficacia del progetto. In collaborazione con i partner, è stato definito un primo schema per gli strumenti di riciclo dei moduli fotovoltaici, convalidato dal team. Verrà creato un modello di flusso GaBi per preparare una Valutazione del Ciclo di Vita (LCA) e calcolare i primi risultati per valutare le opportunità di mitigazione e l'economia circolare.

Valutazione del ciclo di vita (LCA) intermedia (PEF)

Il lavoro ha riguardato la raccolta preliminare di dati per un'Analisi del Ciclo di Vita (LCA) intermedia e un'analisi di eco-efficienza, finalizzate a valutare i miglioramenti tecnologici del progetto PHOTORAMA in termini di riduzione di consumo energetico, materiali e risorse lungo tutte le fasi del ciclo di vita (*"cradle to grave"*). Sono stati creati

modelli di flusso di materiali ed energia per confrontare i processi benchmark iniziali con quelli sviluppati nel progetto.

Nonostante i progressi, permangono sfide soprattutto nelle interfacce operative tra fasi, che saranno affrontate con soluzioni come l'introduzione di un sistema a getto d'acqua ad alta pressione per la delaminazione di moduli fotovoltaici. Le analisi attuali mostrano già potenziali risparmi energetici, riduzione dell'impronta di carbonio e dei rifiuti.

Nell'ambito dell'Analisi dei Costi del Ciclo di Vita (LCC), sono ancora da integrare dati su investimenti, manutenzione e personale, che saranno raccolti con l'avanzare della fase pilota. Il partner BIFA ha monitorato i progressi, utilizzando i dati per creare benchmark e fornire feedback iterativi per ottimizzazioni.

Il lavoro segue una metodologia consolidata per LCA, con definizione di scopi, confini, unità funzionali e inventario ciclo di vita, e ha definito due scenari di riferimento per valutare i progressi tecnologici. Attualmente, il riciclo dei moduli fotovoltaici a fine vita (EoL) avviene principalmente tramite triturazione, con riciclo su larga scala non ancora consolidato per moduli CIS/CIGS; per questi ultimi si è fatto riferimento ai dati sul riciclo di moduli CdTe per modellare i processi.

L'obiettivo è misurare i progressi nella riduzione di consumi e risorse in ogni fase, numerate secondo lo schema del progetto, con una tabella riassuntiva che descrive le fasi tecniche e i partner responsabili.

Fase PL	Nome	Descrizione	Partner coinvolti
1	Smontaggio automatico	Smontaggio automatico dei componenti esterni dei moduli fotovoltaici: telaio in alluminio, alimentazione elettrica e scatola di giunzione. Dettagli ulteriori sulla raccolta dati: 1.1 Ordinamento e pre-smontaggio 1.2 Perforazione del <u>backsheet</u> 1.3 Rifilatura dei bordi.	LUX, MASS
2 - Var A	Filo diamantato	Filo diamantato: nuovo metodo per la separazione meccanica dello strato di vetro dalle celle solari e separazione del <u>backsheet</u> .	LUX, CEA, MASS
2 - Var B*	Fluido supercritico	Fluido supercritico: soluzione avanzata per la delaminazione dei moduli fotovoltaici che separa ogni strato senza mescolare i componenti; vetro, celle solari, EVA, <u>backsheet</u> .	LUX, CEA, DFD
3	Recupero metalli c-Si	Recupero metalli: processi di <u>ionometallurgia</u> /elettrodeposizione per recuperare Ag e Si. Dettagli ulteriori sulla raccolta dati: 3.1 <u>Dealuminazione</u> 3.2 <u>Lisciviazione</u> 3.3 <u>Elettroestrazione</u> .	LUX, SINTEF, CEA, IDEN R&D

Tabella 31. Fasi tecniche della linea pilota PHOTORAMA per il PV EoL c-Si

Fase PL	Nome	Descrizione	Partner coinvolti
1	Smontaggio automatico	Smontaggio automatico dei componenti esterni dei moduli fotovoltaici: telaio in alluminio, alimentazione elettrica e scatola di giunzione. Dettagli ulteriori sulla raccolta dati: 1.1 Ordinamento e pre-smontaggio.	LUX, MASS
4.1	Delaminazione ottica	Delaminazione ottica dei moduli a film sottile (TF). I moduli TF sono esposti a radiazioni ottiche che raggiungono il laminato EVA, consentendo una separazione fisica dei moduli in vetro doppio.	LUX
4.2 + 4.3	Recupero metalli (film sottile)	Recupero metalli dai moduli a film sottile: utilizzo di acido metansolfonico per estrarre In e Ga dai pannelli CIGS-CIS e In dai rifiuti HJT (c-Si). Dettagli ulteriori sulla raccolta dati: 4.2 Idrometallurgia 4.3 Elettroestrazione.	LUX

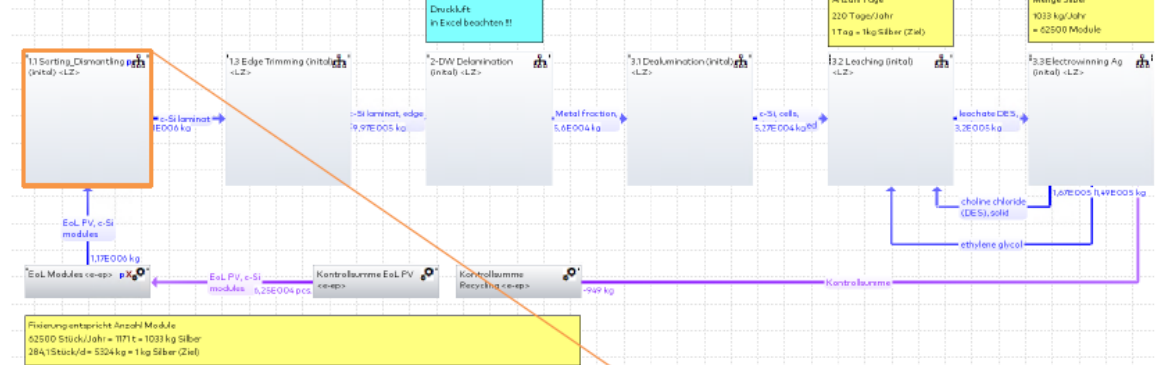
Tabella 32. Fasi tecniche per la linea pilota PHOTORAMA per il PV EoL CI(G)S

Per quantificare i miglioramenti ecologici ed economici ottenuti nel progetto PHOTORAMA rispetto ai dati iniziali, sono stati sviluppati modelli di flusso di materiali ed energia per i processi benchmark e quelli innovativi del progetto. Questi modelli, che coprono l'intero ciclo di vita "dalla culla alla tomba", costituiscono la base per le analisi di sistema e sono stati realizzati con il software GaBi. La modellazione è strutturata su più livelli, ciascuno rappresentante componenti o fasi specifiche dell'impianto, permettendo così analisi dettagliate e l'identificazione dei principali fattori di impatto durante la Valutazione dell'Impatto del Ciclo di Vita (LCIA). I grafici di seguito illustrano la struttura e i livelli del modello utilizzato.

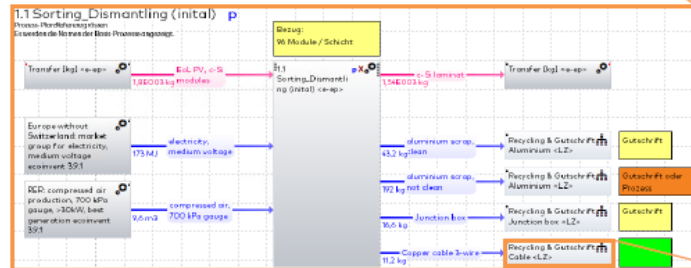
Level 1

c-Si modules (PHOTORAMA DW initial) 1171 t

Prozess-Plan Referenzprozess
Es werden die Namen der Basis-Prozesse angezeigt.



Level 2



Level 3

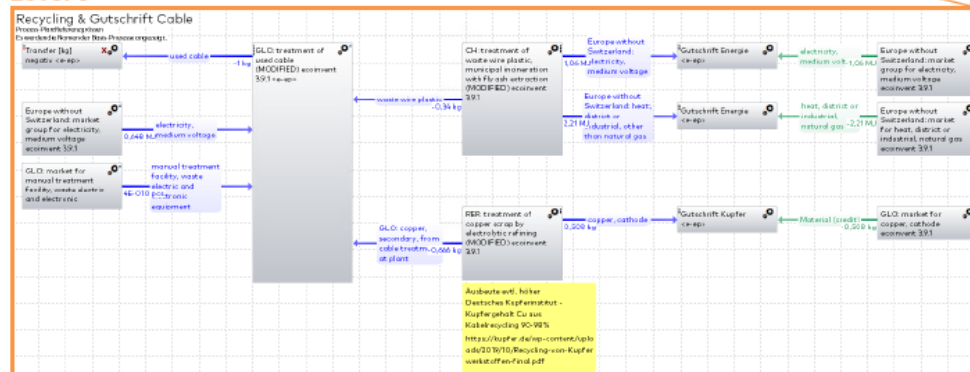


Figura 49. Modello LCA - vista LEVEL (utilizzando l'esempio dei moduli c-Si)

Nell'ambito della Valutazione dell'Impatto del Ciclo di Vita (LCIA), i dati dell'Inventario del Ciclo di Vita (LCI) vengono sintetizzati e organizzati per valutare gli impatti ambientali potenziali. Questi dati sono aggregati in categorie di impatto, ciascuna collegata a meccanismi complessi che possono causare effetti negativi sull'ambiente, derivanti dal rilascio di sostanze o interferenze ambientali del sistema analizzato. Ad esempio, il rilascio di protoni è un indicatore della categoria di impatto "acidificazione", illustrando come i dati dell'LCI vengano trasformati in indicatori rappresentativi degli effetti ambientali finali.

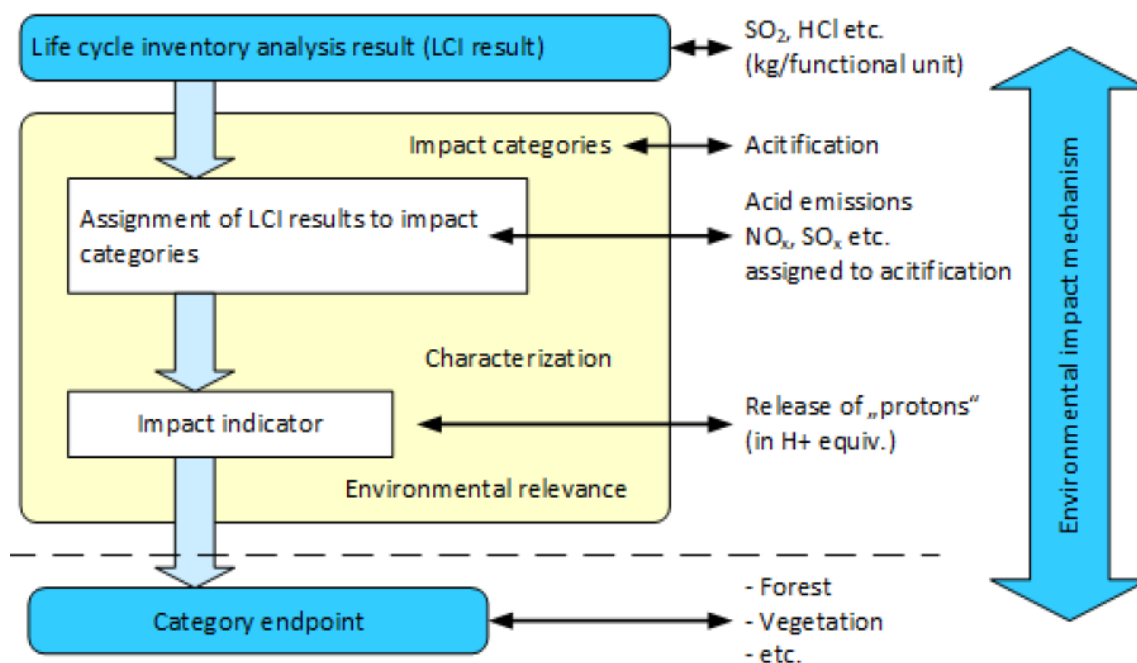


Figura 50. Conversione dei risultati dell'inventario del ciclo di vita in indicatori di impatto che rappresentano i punti finali dell'impatto, utilizzando l'esempio dell'acidificazione [DIN 2000]

La selezione delle categorie d'impatto in una LCA dipende dalle conoscenze ambientali attuali e dagli obiettivi del progetto. In questo studio si utilizzano le categorie definite dal Joint Research Centre della Commissione Europea, escludendo temporaneamente tre categorie legate alla tossicità (tossicità umana e ecotossicità delle acque dolci) perché non ancora sufficientemente affidabili per comunicazioni esterne. La valutazione si basa su indicatori che combinano vari parametri LCI tramite modelli di caratterizzazione, che convertono i dati in unità comuni per ottenere un impatto finale quantificabile. La tabella allegata illustra le categorie d'impatto selezionate, i metodi LCIA, gli indicatori e le unità usate per misurare gli effetti ambientali dei processi analizzati.

Categoria di impatto	Metodo LCIA raccomandato	Indicatore	Unità	Classificazione ^d
Cambiamento climatico	Modello di base di 100 anni dell'IPCC	Forzatura radiativa come Potenziale di Riscaldamento Globale (GWP100)	kg CO ₂ eq.	I
Deplezione dell'ozono	ODP in stato stazionario	Potenziale di Deplezione dell'Ozono (ODP)	kg CF-11 eq.	I
Particolato	Metodo PM raccomandato dall'UNEP	Effetti sulla salute umana associati all'esposizione a PM2.5	Incidenza della malattia	I
Radiazioni ionizzanti, salute umana	Modello degli effetti sulla salute umana sviluppato da Dreicer 1995	Efficienza dell'esposizione umana relativa a U235	kBq U ²³⁵ eq.	II
Formazione di ozono fotochimico, salute umana	LOTOS-EUROS	Incremento della concentrazione di ozono troposferico	kg NMVOC eq.	II
Acidificazione	<u>Accumulated Exceedance</u>	<u>Accumulated Exceedance</u>	mole H ⁺ eq.	II
Eutrofizzazione terrestre	<u>Accumulated Exceedance</u>	<u>Accumulated Exceedance</u>	mole N eq.	II
Eutrofizzazione d'acqua dolce	Modello EUTREND implementato in ReCiPe	Frazione di nutrienti che raggiungono compartimenti d'acqua dolce	kg P eq.	II
Eutrofizzazione marina	Modello EUTREND implementato in ReCiPe	Frazione di nutrienti che raggiungono compartimenti marini	kg N eq.	II
Uso del suolo	Indice della qualità del suolo basato sul modello LANCA	Indice della qualità del suolo ^a (produzione biotica, resistenza all'erosione, filtrazione meccanica e ricarica delle acque sotterranee)	Pt ^b	III
Uso dell'acqua	AWARE (Available Water REremaining)	Potenziale di privazione dell'acqua (consumo ponderato per privazione)	kg world eq. deprived	III
Uso delle risorse, minerali e metalli	CML	Deplezione delle risorse abiotiche – combustibili fossili (riserve finali ADP)	kg Sb eq.	III
Uso delle risorse, vettori energetici	CML	Deplezione delle risorse abiotiche - combustibili fossili (ADP-fossili) ^c	MJ	III

Tabella 33. Metodi raccomandati per lo schema EF (impronta ambientale), compresi indicatore, unità e livello di raccomandazione (Estratto della categoria di impatto applicata utilizzata in questo studio)

Note:

- **a)** L'indice della qualità del suolo è il risultato dell'aggregazione, effettuata dal JRC, dei 4 indicatori forniti dal modello LANCA per la valutazione degli impatti dovuti all'uso del suolo
- **b)** Pt = Punti; Indice aggregato senza dimensione che include:
 - kg produzione biotica/(m²*a) – si riferisce a occupazione e trasformazione.
 - kg suolo/(m²*a).
 - m³ acqua/(m²*a).
- **c)** Nell'elenco dei flussi ILCD, l'Uranio è incluso tra i vettori energetici ed è misurato in MJ.
- **d)** Livello di raccomandazione secondo i livelli ILCD:
 - Livello I: Raccomandato e soddisfacente.
 - Livello II: Raccomandato ma necessita miglioramenti.
 - Livello III: Raccomandato ma da applicare con cautela.

Le categorie di impatto ambientale sono così suddivise:

- **Cambiamento climatico:** Le emissioni di gas serra modificano temperatura e clima, con effetti negativi anche sulla salute umana.

- **Deplezione dell'ozono:** Le emissioni riducono lo strato di ozono, aumentando la radiazione ultravioletta e i rischi per la pelle e le piante.
- **Particolato:** Le particelle fini emesse causano malattie respiratorie e smog invernale.
- **Radiazioni ionizzanti (salute umana):** L'esposizione aumenta il rischio di tumori.
- **Formazione di ozono fotochimico (salute umana):** Le emissioni favoriscono lo smog estivo e problemi respiratori.
- **Acidificazione:** Le emissioni provocano piogge acide, deteriorando aria, acqua e suolo.
- **Eutrofizzazione terrestre:** L'eccesso di nutrienti, ad esempio da fertilizzanti, altera l'equilibrio naturale del suolo.
- **Eutrofizzazione delle acque dolci:** Troppi nutrienti nelle acque dolci causano fioriture algali che possono uccidere la fauna ittica.
- **Eutrofizzazione marina:** L'eccesso di nutrienti nelle acque marine altera l'ecosistema attraverso fioriture algali.
- **Uso del suolo:** L'uso intensivo minaccia la fertilità del terreno e la biodiversità.
- **Uso dell'acqua:** L'estrazione di risorse idriche riduce la disponibilità futura.
- **Uso delle risorse (metalli e minerali):** L'utilizzo di minerali limita la loro disponibilità nel tempo.
- **Uso delle risorse (vettori energetici):** L'impiego di combustibili fossili riduce le riserve energetiche future.

L'Analisi del Ciclo di Vita (LCA) fornisce tre tipi di risultati:

1. **Impatto ambientale lordo:** carichi ambientali dei processi, indicati da barre verso l'alto.
2. **Crediti ambientali:** benefici derivanti da riciclo o processi sostenibili, mostrati da barre verso il basso.
3. **Risultato netto:** bilancio tra carichi e benefici, con barra verso l'alto se dannoso o verso il basso se vantaggioso.

I grafici utilizzano colori distintivi per le sezioni:

- Energia usata: giallo

- Materie prime e ausiliarie: azzurro chiaro
- Riciclo e smaltimento: rosso ruggine
- Risultato netto: blu scuro

I dati iniziali del progetto PHOTORAMA, confrontati con la baseline attuale, evidenziano il cambiamento climatico come categoria d'impatto principale. Analizzando la linea pilota per il trattamento dei moduli fotovoltaici in silicio, la tabella seguente mostra come il riutilizzo di materie prime (alluminio, silicio, argento) generi benefici ambientali significativi. L'impatto maggiore si rileva nella fase di delaminazione con filo diamantato (DW), dove la combustione del backsheet in EVA contribuisce alle emissioni. Tuttavia, complessivamente il riciclo riduce l'impatto ambientale di 3892 tonnellate di CO₂ equivalente.

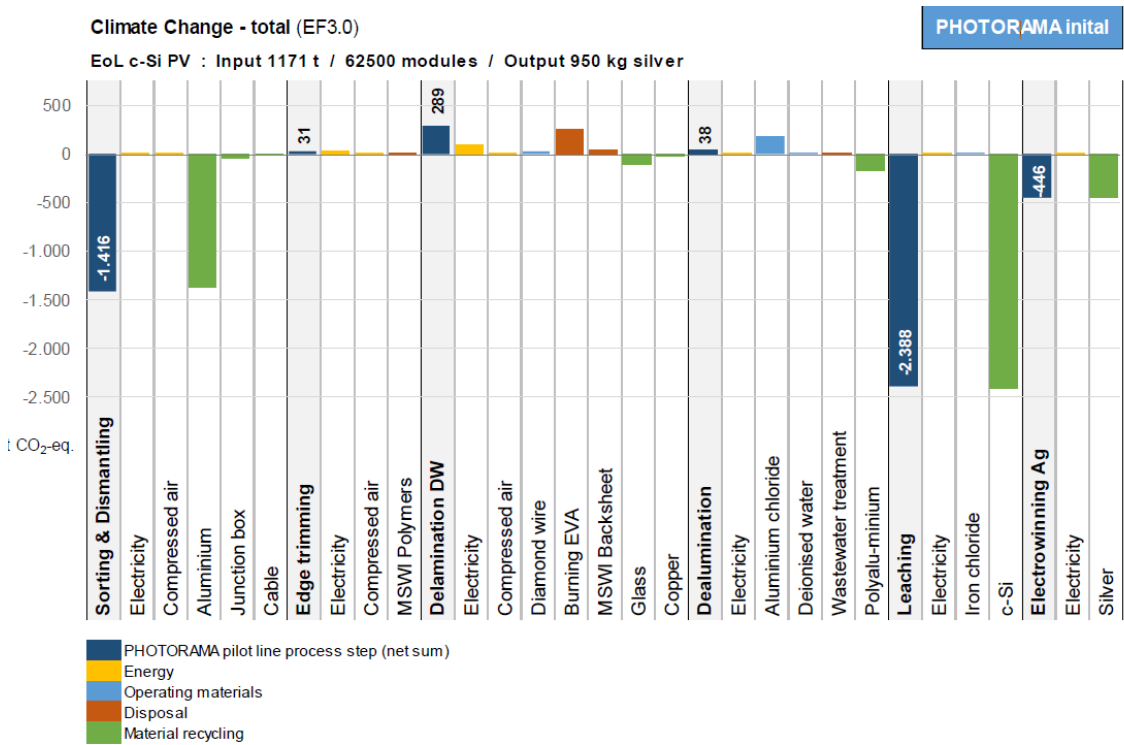


Figura 51. Cambiamento climatico / riciclaggio PHOTORAMA di 62500 EoL c-Si PV / fasi della linea pilota

Il diagramma a step confronta i settori "Processo" e "Smaltimento" con il "Riciclo dei materiali". Gli impatti ambientali più rilevanti sono dovuti al consumo energetico e all'utilizzo di cloruro di alluminio durante il riciclo, oltre alle emissioni derivanti dalla combustione del backsheet in EVA. Le emissioni nette totali sono pari a 679 tonnellate di CO₂ equivalente. Tuttavia, grazie ai crediti ambientali ottenuti dal recupero di silicio,

alluminio e argento (per un totale di -1562 tonnellate di CO₂ equivalente), il bilancio netto finale dopo la compensazione risulta pari a -3892 tonnellate di CO₂ equivalente.

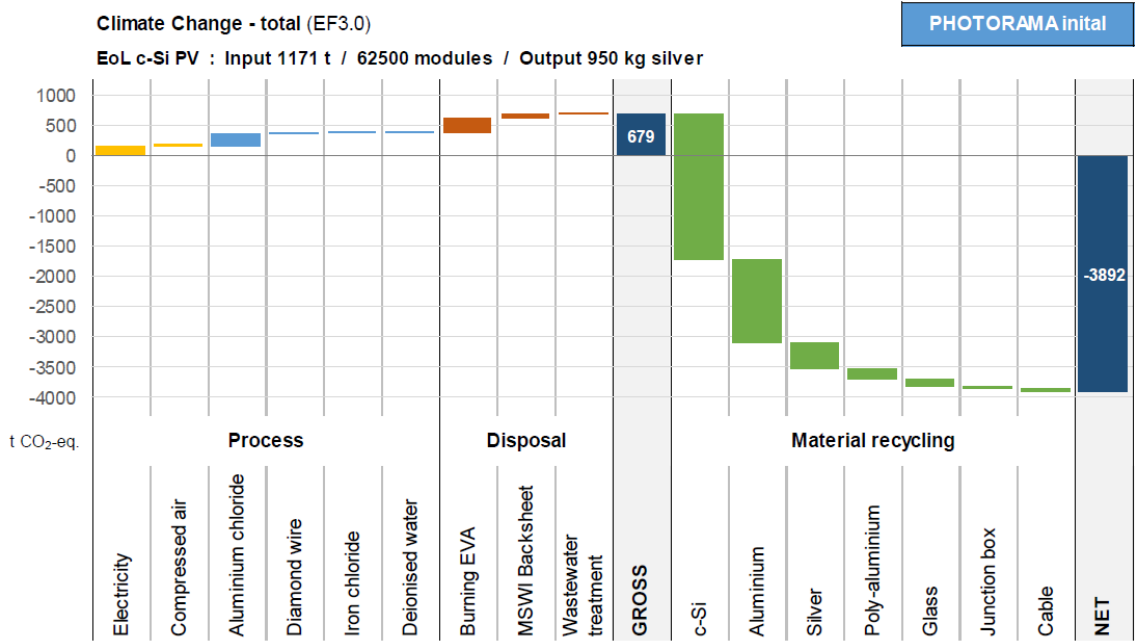


Figura 52. Cambiamento climatico / Riciclaggio PHOTORAMA di 62500 EoL c-Si PV / vista settoriale

Il progetto PHOTORAMA mostra un netto miglioramento ambientale rispetto allo scenario baseline, con minore consumo energetico nel settore “Processo” e emissioni simili nello smaltimento dei polimeri. Le emissioni nette risultano pari a 407 tonnellate di CO₂ equivalente. Tuttavia, la mancata recuperabilità di alcuni materiali riduce il beneficio complessivo: il riciclo dell’alluminio genera crediti ambientali per -1562 tonnellate di CO₂ equivalente, portando le emissioni nette residue a -1155 tonnellate di CO₂ equivalente, circa un terzo dell’impatto iniziale del progetto.

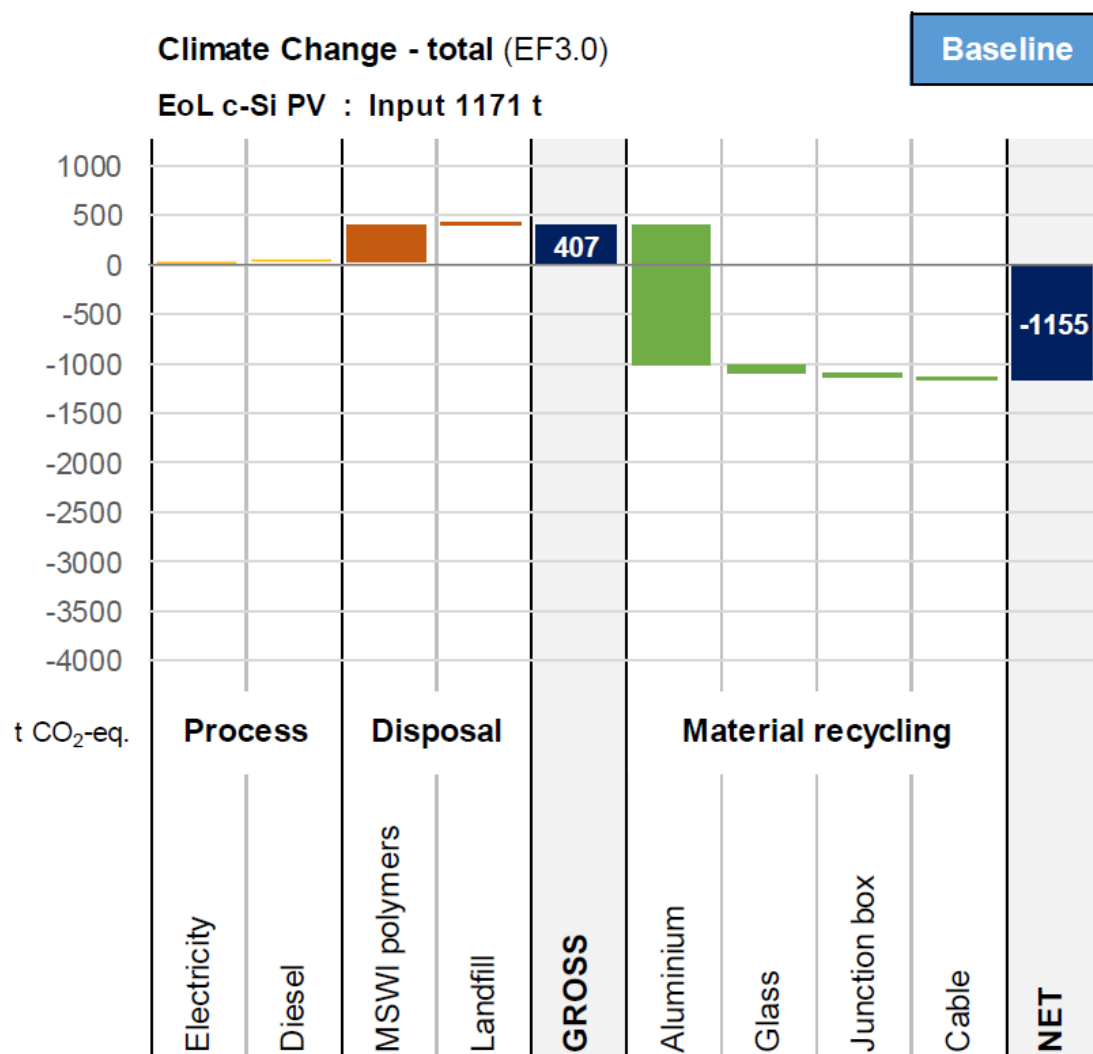


Figura 53. Cambiamento climatico / Riciclaggio BASELINE di 62500 EoL c-Si PV / visione settoriale

Rispetto allo scenario baseline, le emissioni evitate grazie alla fornitura di materie prime tramite il riciclo superano costantemente le emissioni più elevate legate al consumo energetico dei processi PHOTORAMA. Questo evidenzia il valore aggiunto delle innovazioni introdotte nel progetto, che contribuiscono a ridurre l'impatto ambientale complessivo.

Impact category		BASELINE EoL c-Si PV					PHOTORAMA EoL c-Si PV					Delta
		Total	Energy	Process	Disposal	Recycling	Total	Energy	Process	Disposal	Recycling	
		net	gross				net	gross				
Climate Change - total	[t CO2 eq.]	-1155	38	0	369	-1562	-3892	163	213	302	-4571	-2737
	key processes	100%					337%					237%
Particulate matter	[Disease incidences]	-0,111	0,001	0,000	-0,001	-0,110	-0,228	0,003	0,014	0,000	-0,245	-0,117
	key processes	100%					206%					106%
Water use	[1000 m³ world eq.]	-1626	26	0	-49	-1604	-4296	120	92	-18	-4489	-2670
	key processes	100%					264%					164%
Resource use, fossils	[TJ]	-24,0	1,0	0,0	-3,1	-21,8	-59,6	4,0	2,7	-0,4	-66,0	-35,7
	key processes	100%					249%					149%
Land Use	[1000 Pt]	-2689	133	0	-239	-2583	-16105	577	445	-29	-17098	-13415
	key processes	100%					599%					499%
Resource use, mineral and metals	[kg Sb eq.]	-9,5	0,1	0,0	-0,2	-9,4	-792,3	0,4	0,7	0,0	-793,4	-782,8
	key processes	100%					8307%					8207%
Ozone depletion	[kg CFC-11 eq.]	-0,039	0,001	0,000	-0,005	-0,035	-0,093	0,003	0,018	0,000	-0,114	-0,055
	key processes	100%					241%					141%
Acidification	[kMole of H+ eq.]	-12,0	0,2	0,0	-0,3	-11,9	-28,9	0,8	1,3	0,0	-31,0	-16,9
	key processes	100%					241%					141%
Ionising radiation, human health	[1000 kBq U235 eq.]	-204	23	0	-50	-176	-353	103	9	-7	-458	-149
	key processes	100%					173%					73%
Photochemical ozone formation, human health	[kg NMOC eq.]	-5922	109	0	-176	-5855	-17301	406	743	52	-18502	-11379
	key processes	100%					292%					192%
Eutrophication, terrestrial	[kMole of N eq.]	-17,0	0,3	0,0	-0,1	-17,2	-57,5	1,3	2,3	0,3	-61,3	-40,4
	key processes	100%					338%					238%
Eutrophication, marine	[kg N eq.]	-1566	33	0	-1	-1598	-5166	143	223	44	-5576	-3599
	key processes	100%					330%					230%
Eutrophication, freshwater	[kg P eq.]	-748	32	0	-69	-711	-2886	146	75	-7	-3099	-2138
	key processes	100%					386%					286%

Figura 54. Risultati ambientali / riciclo di 62500 EoL c-Si PV / vista settoriale

(Delta = Totale netto PHOTORAMA - Totale netto BASELINE)

Per quanto riguarda il trattamento dei moduli fotovoltaici a fine vita (EoL) a base di CI(G)S, attualmente le quantità di moduli dismessi che tornano dal mercato non sono ancora sufficienti per un utilizzo completo degli impianti. Tuttavia, il modello cerca di stimare il potenziale di un impianto pienamente operativo.

Analizzando l'intera catena di processo della linea pilota PHOTORAMA, i risultati relativi alla categoria di impatto "cambiamento climatico" sono mostrati nella figura seguente. Rispetto ai crediti significativi derivanti dai processi di smistamento e delaminazione, grazie alle emissioni evitate dalla fornitura di alluminio primario, i

risultati delle fasi del processo PHOTORAMA (Delaminazione, Idrometallurgia e Lisciviazione) sono piuttosto bassi. Allo stato attuale del progetto, le emissioni generate da questi nuovi processi non superano ancora i crediti potenziali ottenuti dal riciclo dei materiali, come vetro e indio. Complessivamente, i risultati mostrano una riduzione dell’impatto ambientale pari a -1348 tonnellate di CO₂ equivalente.

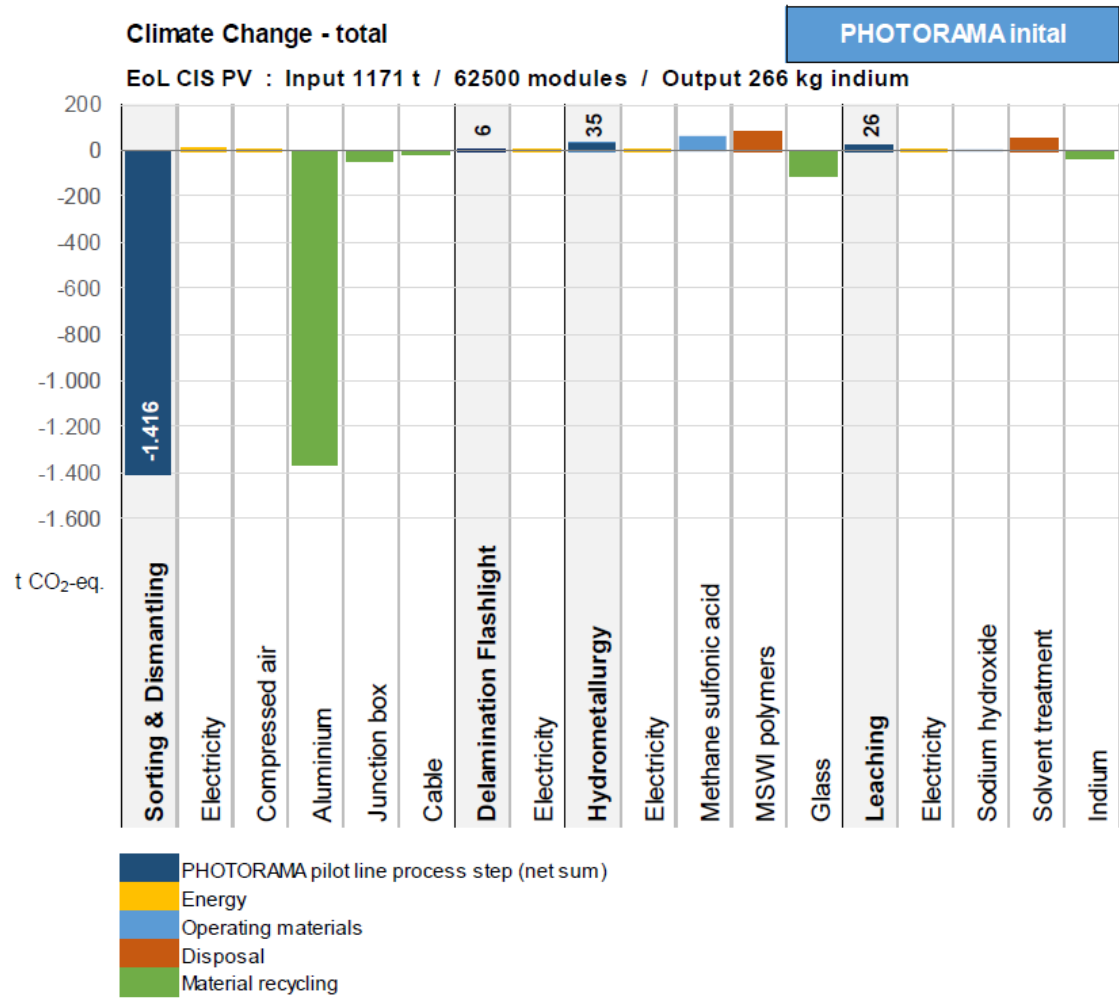


Figura 55. Cambiamento climatico / Riciclaggio PHOTORAMA di 62500 EoL CI(G)S PV / fasi della linea pilota

La figura seguente presenta nuovamente i risultati sotto forma di un diagramma a step, suddiviso nei settori “Processo” e “Smaltimento” e confrontato con il “Riciclo dei materiali”. Nel processo di riciclo, il contributo più significativo deriva dall’uso di acido metansolfonico; si evidenziano poi le emissioni legate al trattamento dei polimeri e dei solventi nella fase di smaltimento. Le emissioni nette ammontano a 222 tonnellate di CO₂ equivalente. I crediti ambientali, mostrati in ordine decrescente in base al loro contributo, sono principalmente attribuibili al recupero del materiale in alluminio già menzionato.

Grazie ai crediti totali pari a -1570 tonnellate di CO₂ equivalente, il risultato netto dopo la compensazione è pari a -1348 tonnellate di CO₂ equivalente.

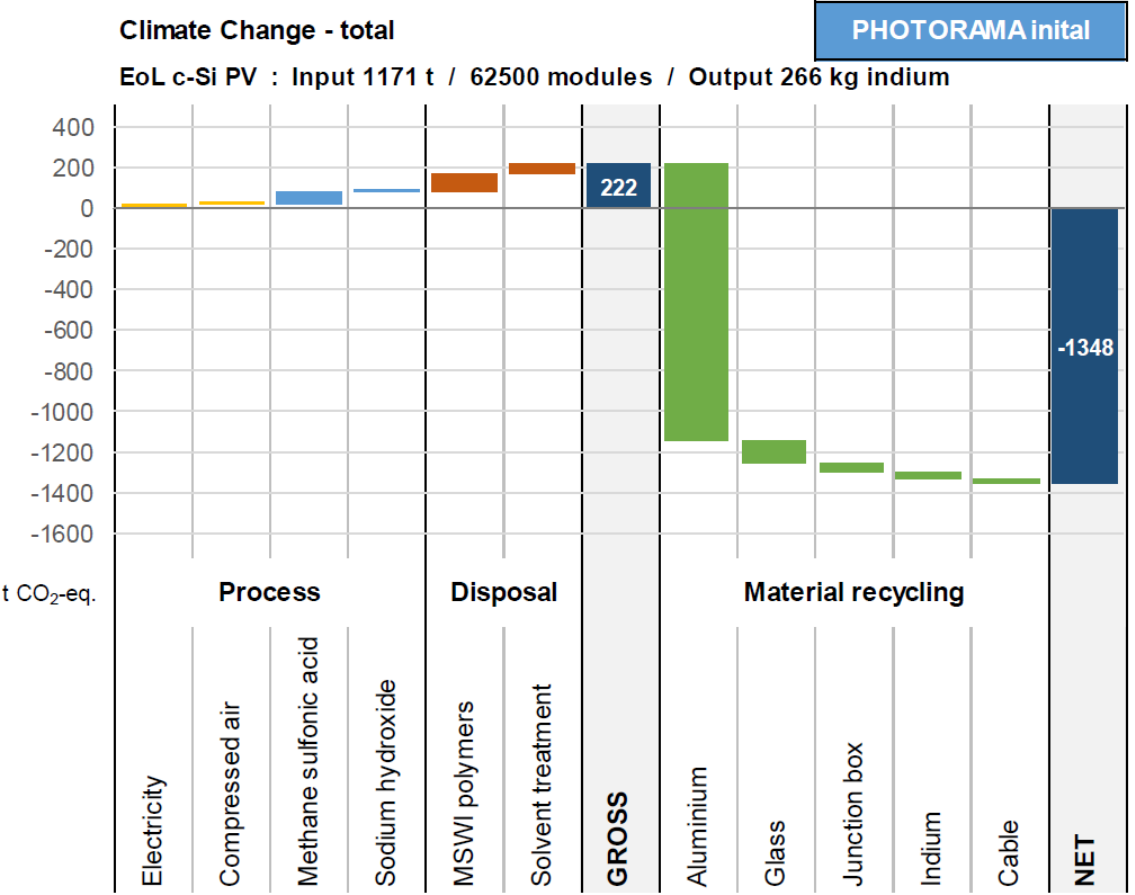


Figura 56. Cambiamento climatico / PHOTORAMA riciclaggio di 62500 EoL CI(G)S PV / visione settoriale

Rispetto alla linea pilota PHOTORAMA, la valutazione dei risultati BASELINE per i moduli fotovoltaici a fine vita (EoL) a base di CI(G)S evidenzia emissioni più elevate legate al consumo energetico nella fase “Processo” (vedi figura seguente; scala identica). Le emissioni derivanti dalla fornitura di sostanze chimiche di processo e dal trattamento termico dei polimeri (“Smaltimento”) risultano invece sostanzialmente allo stesso livello.

Nel complesso, l’impatto ambientale dello scenario BASELINE è pari a -1149 tonnellate di CO₂ equivalente. L’impatto ambientale potenzialmente ridotto della linea pilota PHOTORAMA risulta quindi circa il 20% migliore rispetto al BASELINE.

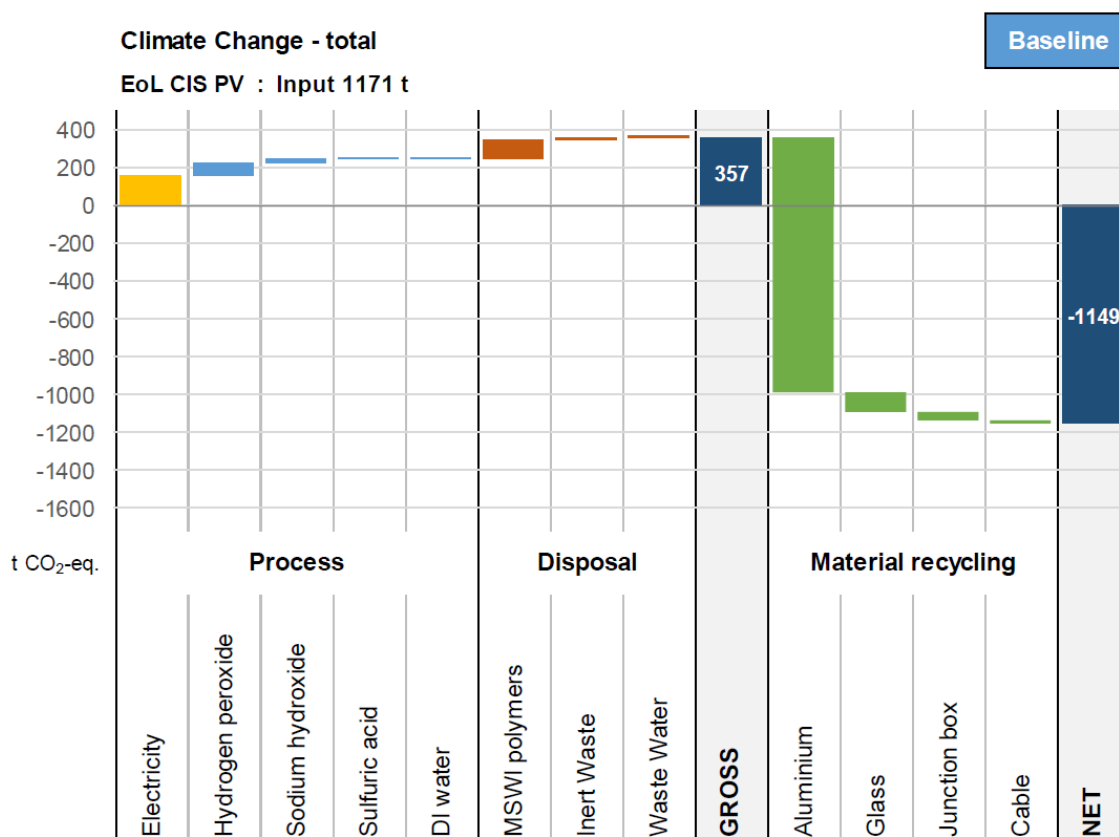


Figura 57. Cambiamento climatico / Riciclaggio di base di 62500 EoL CI(G)S PV / visione settoriale

La figura seguente fornisce una panoramica di tutte le categorie di impatto analizzate, per il riciclo dei moduli fotovoltaici a fine vita (EoL) a base di CI(G)S. Con l'unica eccezione della categoria "Particolato" – che presenta valori complessivamente identici – tutti gli indicatori d'impatto per il riciclo dei moduli EoL CI(G)S mostrano un potenziale positivo per gli sviluppi del progetto PHOTORAMA. Rispetto al riciclo baseline e, in contrasto con gli effetti del riciclo dei moduli fotovoltaici a base di silicio cristallino (c-Si), l'impatto ambientale nella categoria "Energia" è significativamente inferiore. I valori del progetto PHOTORAMA raggiungono circa il 10% di quelli dello scenario BASELINE.

Gli effetti relativi ai materiali grezzi e operativi utilizzati nel "Processo", così come quelli dei processi di "Smaltimento", mostrano un quadro più differenziato. Gli impatti ambientali nel settore "Riciclo" risultano comparativamente elevati, con l'eccezione della categoria "Uso delle risorse, minerali e metalli". In questa categoria, il risultato è significativamente migliore grazie al recupero dell'indio.

Impact category		BASELINE EoL CIS PV					PHOTORAMA EoL CIS PV					Delta
		Total	Energy	Process	Disposal	Recycling	Total	Energy	Process	Disposal	Recycling	Total
		net	gross				net	gross				net
Climate Change - total	[t CO2 eq.]	-1149	163	85	109	-1506	-1348	19	65	138	-1570	-199
	key processes	100%					117%					17%
Particulate matter	[Disease incidences]	-0,101	0,002	0,003	0,000	-0,107	-0,101	0,000	0,009	0,000	-0,111	0,000
	key processes	100%					100%					0%
Water use	[1000 m³ world eq.]	-1233	119	236	-39	-1549	-1514	14	110	-13	-1625	-281
	key processes	100%					123%					23%
Resource use, fossils	[TJ]	-16,5	4,0	1,5	-0,9	-21,1	-22,2	0,5	0,9	-1,6	-22,0	-5,7
	key processes	100%					135%					35%
Land Use	[1000 Pt]	-1888	572	222	-37	-2645	-2716	66	339	-71	-3050	-828
	key processes	100%					144%					44%
Resource use, mineral and metals	[kg Sb eq.]	-9,2	0,3	0,7	0,0	-10,2	-23,6	0,0	4,3	0,0	-27,9	-14,4
	key processes	100%					257%					157%
Ozone depletion	[kg CFC-11 eq.]	-0,021	0,003	0,011	-0,001	-0,033	-0,033	0,000	0,002	-0,002	-0,035	-0,012
	key processes	100%					158%					58%
Acidification	[kMole of H+ eq.]	-10,4	0,8	0,4	-0,1	-11,5	-10,7	0,1	1,4	-0,1	-12,1	-0,3
	key processes	100%					103%					3%
Ionising radiation, human health	[1000 kBq U235 eq.]	-69	103	12	-15	-169	-177	12	7	-16	-180	-108
	key processes	100%					256%					156%
Photochemical ozone formation, human health	[kg NMOC eq.]	-5038	404	266	-43	-5665	-5759	46	318	-102	-6022	-721
	key processes	100%					114%					14%
Eutrophication, terrestrial	[kMole of N eq.]	-14,9	1,3	0,6	0,0	-16,8	-17,1	0,1	0,8	0,0	-18,1	-2,2
	key processes	100%					115%					15%
Eutrophication, marine	[kg N eq.]	-1330	143	67	10	-1549	-1564	16	76	3	-1659	-234
	key processes	100%					118%					18%
Eutrophication, freshwater	[kg P eq.]	-536	145	28	-20	-690	-698	17	37	-7	-745	-162
	key processes	100%					130%					30%

Figura 58. Risultati ambientali / riciclaggio di 62500 EoL CI(G)S PV / vista settoriale

Le tecnologie sviluppate nel progetto PHOTORAMA presentano ancora alcune sfide, in particolare legate ai processi e ai materiali utilizzati nelle interfacce tra le diverse fasi operative. Per superare queste difficoltà, il progetto prevede l'introduzione di nuove soluzioni, come un sistema a getto d'acqua ad alta pressione per la delaminazione di alcuni moduli. Nonostante le criticità, le analisi attuali indicano già un potenziale risparmio significativo in termini di energia, emissioni di carbonio e riduzione dei rifiuti. I risultati intermedi saranno verificati insieme a tutti i partner per definire i prossimi passi verso un eco-bilancio complessivo. Fino alla conclusione del progetto (prevista per

giugno 2025), i dati mancanti saranno raccolti e gli sviluppi tecnici saranno monitorati e integrati nel modello LCA finale (cfr. 3.2).

Valutazione del costo di vita (LCC)

Il Life Cycle Costing (LCC) è svolto insieme all’LCA, con obiettivi allineati al progetto. I dati raccolti permettono valutazioni finanziarie fondamentali per la linea pilota, con controlli positivi sull’avanzamento rispetto alla pianificazione. Sono stati calcolati costi (materiali, energia, smaltimento) e ricavi dai materiali riciclati, attribuiti alla fase operativa dell’impianto, con aggiornamenti costanti nel periodo di rendicontazione.

Flusso	Prezzo	Unità	Fonte
Tariffe per l’energia, per le materie prime e le forniture			
Elettricità	0,11	€/kW h	Feedback del partner del progetto
Aria compressa	0,11	€/kg	Feedback del partner del progetto
Diesel	0,16	€/l	BayWa AG, 2023
Olio idraulico	4,22 ^T	€/l	BayWa AG, 2023
Anidride carbonica	0,40	€/kg	Feedback del partner del progetto
Ghiaccio secco	3,20 ^T	€/kg	Wonsak Kohlensäure Service GmbH, 2023
Acqua	1,95	€/m ³	EUWID, 2023
Acqua/glicole (40%)	1,29 ^T	€/l	Glycol.eu: Ethylene Glycol 40% 1000L IBC, 2023
Cloruro di alluminio	1,55	€/kg	Focus Technology Co., 2023
Soluzione di cloruro di alluminio	0,20	€/l	Feedback del partner del progetto
Cloruro di colina (DES) [Solido]	70	€/kg	Feedback del partner del progetto
Glicole etilenico (DES) [Liquido]	40	€/kg	Feedback del partner del progetto
FeCl ₃ *6H ₂ O (0,033 mol/kg DES) [Solido]	150	€/kg	Feedback del partner del progetto
Idrossido di sodio (50 % in acqua)	1,26	€/kg	Chemieshop24.de, 2023
Perossido di idrogeno (50 % in acqua)	0,94	€/kg	Jaqora® GmbH: Wasserstoffperoxid 49,5 %, 2023

Acido solforico	0,55	€/kg	Jaqora® GmbH: Schwefelsäure, 2023
Tariffe per gli strumenti			
Strumento di perforazione	in attesa di informazioni più dettagliate dall'inizio della linea pilota		
Lame per sega			
Lame vibranti			
Filo diamantato			
Lame/spazzole			
Elettrodi			
Tariffe per lo smaltimento dei rifiuti			
Acqua di scarico	2,60 6,10	€/m³	EUWID, 2023
Moduli fotovoltaici difettosi/inadeguati (eWaste)	in attesa di informazioni più dettagliate dall'inizio della linea pilota		
Sigillatura in silicone con residui di vetro			
Scarti di taglio angolari e polvere di sega			
Prodotti chimici di processo (olio idraulico, lubrificante, refrigerante, ecc.)			
Tessuto filtrante con residui di Si			
Fanghi da trattamento interno delle acque reflue			
Strumenti usati (rottami metallici)			
Cartone	Da 50 a 125	€/t	EUWID, 2022
Imballaggio in plastica	Da 100 a 180	€/t	Come rifiuti commerciali nell'incenerimento dei rifiuti urbani EUWID, 2021
Imballaggio in metallo			
Pallet di legno	25	€/t	EUWID, 2022
Miscela plastica (trattamento termico)	200 ^T	€/t	Feedback del partner del progetto
La ^T indica i costi di trasporto inclusi			

Tabella 34. Tassi di tariffazione da sottoporre all'esame del LCC

I ricavi sono stimati sulle vendite di materiali riciclati (alluminio, vetro, rame, argento, silicio), con prezzi aggiornati tramite ricerca continua. L'alto costo delle materie prime favorisce il progetto PHOTORAMA, ma i prezzi sono volatili: ad esempio, il polisilicio è passato da oltre 30 a circa 8 dollari/kg tra il 2021-2022 e il 2023 a causa di sovracapacità produttiva.

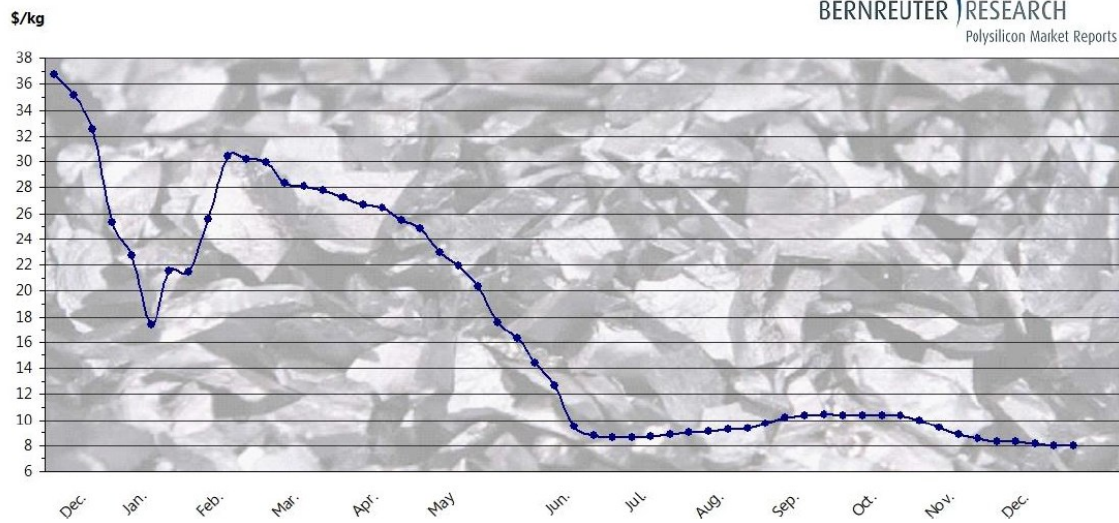


Figura 59. Andamento del prezzo spot del polisilicio da dicembre 2022 - Fonte: EnergyTrend; Immagine: Activ Solar; Grafico: Bernreuter Research

L'analisi dei prezzi dei metalli non ferrosi (argento, alluminio, rame) e dei metalli strategici (indio, gallio) negli ultimi cinque anni mostra forti variazioni e aggiustamenti nei mercati:

- **Argento:** prezzo elevato nel 2023, pari a 1,5 volte quello del 2019.
- **Alluminio:** prezzi stabilizzati nel 2023, 1,3 volte il livello del 2019.
- **Rame:** prezzi ancora alti nel 2023, 1,5 volte quelli del 2019.
- **Indio:** forte aumento, con prezzi 1,6 volte quelli del 2019, raggiungendo i massimi dal 2018.
- **Gallio:** dopo un calo a inizio 2023, i prezzi si stabilizzano a un livello 1,7 volte superiore rispetto al 2019.



Figura 60. Panoramica dell'andamento dei prezzi delle materie prime USD-EUR: 0,92; CNY-EU: 0,13

La tabella seguente fornisce una panoramica delle entrate attualmente applicate per il LCC.

Flusso	Prezzo	Unità	Fonte
Telaio in alluminio, pulito	1,60 / 1,40	€/kg	con una riduzione del 30% come SRM
Telaio in alluminio, con silicone o vernice	1,25	€/kg	
Scatola di giunzione	0,16	€/kg	
Cavi (rame)	3,73	€/kg	
Lastre di vetro	50	€/kg	Feedback dai partner del progetto
Backsheet	Da definire		
EVA	Da definire		
Soluzione di polialluminio	Da definire		
Fili/nastri (rame)	4,00 / 2,48	€/kg	con una riduzione del 30% come SRM
Residuo PV (polisilicio)	5,12	€/kg	con una riduzione del 30% come SRM
Argento	537	€/kg	con una riduzione del 30% come SRM

Tabella 35. Tassi di profitto da considerare per LCC

Nel contesto del Life Cycle Costing (LCC), sono ancora presenti lacune nei dati, specialmente su investimenti, manutenzione, riparazioni e personale. La raccolta e l'aggiornamento dei dati proseguiranno, anche grazie alla futura disponibilità della linea pilota, che permetterà di integrare nuove informazioni finanziarie nei calcoli LCC. I risultati intermedi delle analisi saranno condivisi con i partner di progetto per ottimizzare sia gli aspetti ecologici che economici. Le successive analisi di redditività saranno integrate nell'analisi di eco-efficienza. Il progetto si completerà con un'analisi finale che combinerà LCC, Analisi del Ciclo di Vita (LCA) ed eco-efficienza, confrontando i risultati con gli obiettivi e i KPI iniziali e con il benchmark (cfr. 3.2 e 3.3). Le tecnologie PHOTORAMA presentano ancora alcune sfide tecniche, ma l'LCA mostra già un potenziale positivo in termini di riduzione di consumo energetico, CO₂ e rifiuti. Le lacune nei dati LCC saranno colmate con l'avanzamento del progetto, integrando continuamente i nuovi sviluppi tecnici e mantenendo uno stretto scambio con i partner.

Bibliografia

Capitolo 1

Aurez V., Georgeault L., Stahel W.R., & Bourg D., (2016). Économie circulaire: système économique et finitude des ressources. *De Boeck supérieur*.

Atto Unico Europeo. (1987). *Gazzetta ufficiale delle Comunità europee*, N. L 169/1.

Baldassarre, B., & Carrara, S. (2025). Critical raw materials, circular economy, sustainable development: EU policy reflections for future research and innovation. *Resources, Conservation & Recycling*, 215, 108060. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2025.108060>

Bassot, E., & Hiller, W. (2019). *The Juncker Commission's ten priorities: State of play in autumn 2018*. European Parliamentary Research Service.

Bobba, S., Carrara, S., Huisman, J., Mathieux, F., & Pavel, C. (2020). *Critical Raw Materials for Strategic Technologies and Sectors in the EU*. European Commission, Joint Research Centre.

Cambridge Econometrics, Trinomics, & ICF. (2018). *Impacts of circular economy policies on the labour market*. European Commission.

Calisto Friant, M., Vermeulen, W.J.V., & Salomone, R. (2021). Analysing European Union circular economy policies: Words versus actions. *Sustainable Production and Consumption*, 27, 337–353.

Chabowski, B.R., Gabrielsson, P., Hult, G.T.M. (2025). Sustainable international business model innovations for a globalizing circular economy: a review and synthesis, integrative framework, and opportunities for future research. *J Int Bus Stud* **56**, 383–402. <https://doi.org/10.1057/s41267-023-00652-9>.

COM(2011) 571 final. Tabella di marcia verso un'Europa efficiente nell'impiego delle risorse. Commissione europea.

COM(2014) 398 final. Verso un'economia circolare: Programma per un'Europa a zero rifiuti. Commissione europea.

COM(2015) 614 final. L'anello mancante - Piano d'azione dell'Unione europea per l'economia circolare. Commissione europea.

COM(2018) 28 final. Strategia europea per la plastica nell'economia circolare. Commissione europea.

COM(2018) 32 final. Sull'attuazione del pacchetto sull'economia circolare: Possibili soluzioni all'interazione tra la normativa in materia di sostanze chimiche, prodotti e rifiuti. Commissione europea.

COM(2019) 190 final. Sull'attuazione del piano d'azione per l'economia circolare. Commissione europea.

COM(2019) 640 final. Il Green Deal europeo. Commissione europea.

COM(2020) 98 final. Un nuovo piano d'azione per l'economia circolare: Per un'Europa più pulita e più competitiva. Commissione europea.

COM(2020) 798 final. Relativo alle batterie e ai rifiuti di batterie, che abroga la direttiva 2006/66/CE e modifica il regolamento (UE) 2019/1020. Commissione europea.

COM(2022) 45 final. A Chips Act for Europe. Commissione europea.

COM(2022) 221 final. Strategia dell'UE per l'energia solare. Commissione europea.

Comunicazione (2022/C 80/01). Disciplina in materia di aiuti di Stato a favore del clima, dell'ambiente e dell'energia 2022. Commissione europea.

European Commission. (2025). *Ecodesign for sustainable products and energy labelling working plan for 2025-2030* (COM(2025) 187 final).

Direttiva 94/62/CE sugli imballaggi e i rifiuti di imballaggio.

Direttiva 2008/98/CE relativa ai rifiuti e che abroga alcune direttive.

Direttiva 2009/125/CE relativa all'istituzione di un quadro per l'elaborazione di specifiche per la progettazione ecocompatibile dei prodotti connessi all'energia.

Direttiva UE 2019/904 sulla riduzione dell'incidenza di determinati prodotti di plastica sull'ambiente.

Ellen MacArthur Foundation (2012). *Towards the circular economy—Economic and business rationale for an accelerated transition* (Vol. 1). Ellen MacArthur Foundation, Isle of Wight.

Ellen MacArthur Foundation (2020). *The EU's Circular Economy Action Plan: Setting the world's largest single market on a transition towards a circular economy*. Ellen MacArthur Foundation.

European Commission (2015b). *Taking the EU resource efficiency agenda forward—A policymaker and business perspective*. Final Report for the European Commission, April 2015, Publications Office of the European Union, Luxembourg.

European Commission (2016). *The efficient functioning of waste markets in the European Union—Legislative and policy options*. Final Report for the European Commission, Publications Office of the European Union, Luxembourg.

European Commission (2019). Attuazione del piano d'azione per l'economia circolare COM(2019) 190 final.

FEAD, European Waste Management Association (2025). Circular economy Act: FEAD policy recommendations. <https://fead.be/wp-content/uploads/2025/04/FEAD-PolicyRecommendations.pdf>

Ghisellini, P., Cialani, C., & Ulgiati, S. (2016). A review on circular economy: The expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. *Journal of Cleaner Production*, 114, 11–32.

Hartley, K., van Santen, R., & Kirchherr, J. (2020). Policies for transitioning towards a circular economy: Expectations from the European Union (EU). *Resources, Conservation & Recycling*, 155, Article 104634.

Hawken, P. (2017). *Drawdown: The most comprehensive plan ever proposed to reverse global warming*. Penguin Books.

Mazur-Wierzbicka, Ewa (2021). Circular economy: Advancement of European Union countries in *Environmental Sciences Europe*.

Milios, L. (2018). Advancing to a Circular Economy: Three essential ingredients for a comprehensive policy mix in *Sustainability Science*, 13, 861–878.

Regolamento UE 2020/852 relativo all'istituzione di un quadro che favorisce gli investimenti sostenibili.

Trattato sull'Unione Europea (1992). *Gazzetta ufficiale delle Comunità europee*, N.C191/1.

Trattato di Amsterdam (1997). *Gazzetta ufficiale delle Comunità europee*, C340/1.

von Kolpinski, C., & Kratzer, J. (2024). Zooming Out: Circular Economy Development in the European Union and its Implications on the Economy and Society. *Journal of Circular Economy*, 2(4). <https://doi.org/10.55845/LJOD3552>

Capitolo 2

Atasu, A., Duran, S., & Wassenhove, L. V. (2021). The hidden cost of solar energy. *INSEAD Knowledge*.

Bianchini, A., Rossi, J., & Pellegrini, M. (2019). Overcoming the main barriers of circular economy implementation through a new visualization tool for circular business models. *Sustainability*, 11(23).

Carrara, S., Alves Dias, P., Plazzotta, B., & Pavel, C. (2020). Raw materials demand for wind and solar PV technologies in the transition towards a decarbonised energy system. Luxembourg: Publications Office of the European Union.

Di Stefano, D. (2021). Cemento: il materiale più distruttivo del mondo o una leva dell'evoluzione? *Materia Rinnovabile*, 38.

Ecofys. (2020). *Decarbonising the energy sector: Closing the gap to 2050*.

Ellen MacArthur Foundation. (2019). *Completing the picture: How the circular economy tackles climate change*. Material Economics.

Ellen MacArthur Foundation. (2024). *Building Prosperity: Unlocking the potential of a nature-positive, circular economy for Europe*. Isle of Wight: Ellen MacArthur Foundation. Retrieved from https://ppl-ai-file-upload.s3.amazonaws.com/web/direct-files/28185326/95a81fd4-7200-4177-a8a8-8854e2c008e1/EMF_Building-Prosperity_July_2024.pdf

Enel. (2022). *Viaggio nell'economia circolare del Gruppo Enel: Strategia, progetti e risultati*.

Escobar, J. J. M., Matamoros, O. M., Padilla, R. T., Reyes, I. L., & Espinosa, H. Q. (2021). A comprehensive review on smart grids: Challenges and opportunities. *Sensors*, 21(21), Article 6978.

Firoozi A. A., Hejazi F., Firoozi A. A. (2024) Advancing Wind Energy Efficiency: A Systematic Review of Aerodynamic Optimization in Wind Turbine Blade Design *Energies* 2024, 17, 2919. <https://doi.org/10.3390/en17122919>

Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems (FISES). (2022). *Photovoltaics report*. Freiburg im Breisgau, Germany: Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems.

Geissdoerfer, M., Savageta, P., Bocken, N. M. P., & Hultink, E. J. (2017). The circular economy – A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, 143, 757–768.

Global Battery Alliance. (2019). *A vision for a sustainable battery value chain in 2030*. World Economic Forum.

Global Battery Alliance. (2023). *Battery 2030: Resilient, sustainable, and circular*. McKinsey & Company.

Global Wind Energy Council (GWEC). (2022). *Global wind report*.

Hailemariam, A., & Erdiaw-Kwasie, M. O. (2023). Towards a circular economy: Implications for emission reduction and environmental sustainability. *Business Strategy and the Environment*, 32(4), 1951–1965.

Heath, G.A., Silverman, T.J., Kempe, M., Deceglie, M., Ravikumar, D., Remo, T., Cui, H., Sinha, P., Libby, C., Shaw, S., et al. (2020). Research and development priorities for silicon photovoltaic module recycling to support a circular economy. *Nature Energy*, 5(5), 502–510.

Helmi, A.M., Ramadan, H.S., & Idriss A.I.I. (2023). Modular smart grid intelligence: Replicable concept for diverse scenarios. *Sustainable Cities and Society*, 96, Article 104611.

International Energy Agency (IEA). (2023). *Advancing Clean Technology Manufacturing: An Energy Technology Perspectives Special Report*. Paris: International Energy Agency. Retrieved from <https://ppl-ai-file-upload.s3.amazonaws.com/web/direct-files/28185326/6b3c1ef6-d87b-44ba-8fe4-738722d816bc/CleanTechnologyManufacturingRoadmap.pdf>

IRENA (International Renewable Energy Agency). (2012). Renewable energy technologies: Cost analysis series (Vol. 1), Power Sector Issue 5/5.

IRENA (International Renewable Energy Agency). (2017). Electricity storage and renewables: Costs and markets to 2030.

IRENA (International Renewable Energy Agency). (2020). Electricity storage valuation framework: Assessing system value and ensuring project viability.

Jean J., Brown P.R., Jaffe R.L., Buonassisi T., & Bulović V. (2015). Pathways for solar photovoltaics. *Energy and Environmental Science*, Issue 4.

Joint Research Centre (JRC). (2018). PV status report 2018. Luxembourg: Publications Office of the European Union.

Kastanaki E., & Giannis A. (2022). Energy decarbonisation in the European Union: Assessment of photovoltaic waste recycling potential.

Kotilainen K. (2019). Energy prosumers' role in the sustainable energy system. *Affordable and Clean Energy*. ISBN: 978-3-319-71057-0.

Martin C., Starace F. e Tricoire J. P. (2017), *The Future of Electricity New Technologies Transforming the Grid Edge*, World Economic Forum.

McKinsey & Company (2015). *Europe's circular-economy opportunity*. Report "Growth within".

Mignacca, B., & Locatelli, G. (2021). Modular circular economy in energy infrastructure projects: Enabling factors and barriers. *ASCE*.

Mulvaney D., Richards R. M., Bazilian M. D., Hensley E., Clough G., Sridhar S. (2021), Progress towards a circular economy in materials to decarbonize electricity and mobility, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 137 110604. Mulvaney, D. (2024). *Governing solar supply chains for socio-ecological justice*. In S. Sareen & A. Martin (Eds.), *Geographies of Solar Energy Transitions: Conflicts, controversies and cognate aspects* (pp. 125–136). UCL Press. <http://www.jstor.org/stable/jj.12801259.15>

Omodara, L., Saavalainen, P., Pitkäaho, S., Pongrácz, E., & Keiski, R. (2023). Sustainability assessment of products - Case study of wind turbine generator types. *Environmental Impact Assessment Review*, 98, Article 106943.

Panagoda L.P.S.S et al. (2023). Advancements in photovoltaic technology for solar energy generation. *Journal of Research in Technology and Engineering*, 4(3), 30–72.

Pehlken, A., García Sánchez, R., & Marx Gómez, J. (2013). How critical is wind energy? In *Sustainable Material Life Cycles - Is Wind Energy Really Sustainable?* (pp. 85–102).

Ravi, S. S., & Aziz, M. (2022). Utilization of electric vehicles for vehicle-to-grid services: Progress and perspectives. *Energies*, 15(2), Article 589.

Reinsch, W. A., Broadbent, M., Denamiel, T., & Shammass, E. (2024). *Friendshoring the lithium-ion battery supply chain: Final assembly and end uses*. Center for Strategic and International Studies (CSIS). <http://www.jstor.org/stable/resrep60560>

Schnatmann, A.K.; Schoden, F.; Schwenzfeier-Hellkamp E. (2022). Sustainable PV module design—Review of state-of-the-art encapsulation methods. *Sustainability*, 14(9971). <https://doi.org/10.3390/su14169971>

Solar Power Europe (2021), *EU Market Outlook for Solar Power 2021-2025*.

Tan, J., Jia, S., Ramakrishna, S. (2022), *End-of-Life Photovoltaic Modules*, *Energies* 2022, 15, 5113

The Circularity Gap Report 2024, Circle Economy Foundation.

TOMALA, M. (2024). MANAGEMENT IN THE RENEWABLE ENERGY SECTOR IN THE EUROPEAN UNION COUNTRIES. *Politeja*, 88/2, 273–288. <https://www.jstor.org/stable/27353045>

UNEP (2021) *Resource Efficiency And Climate Change Material Efficiency Strategies for a Low-Carbon Future*

Utilitalia, Federazione Utilities (2021). *UTILITIES PROTAGONISTE DELLA TRANSIZIONE ECOLOGICA: LA SFIDA DELL'ECONOMIA CIRCOLARE*.

van Ewijk, S., & Stegemann, J. (2023). ENERGY RECOVERY AND DISPOSAL. In *An Introduction to Waste Management and Circular Economy* (pp. 256–305). UCL Press. <https://doi.org/10.2307/jj.4350575.16>

Veers P., Bottasso C. L., Manuel L., Naughton J., Pao L., Paquette J., Robertson A., Robinson M., Ananthan S., Barlas T., Bianchini A., Bredmose H., Horcas S. G., Keller J., Madsen H. A., Manwell J., Moriarty P., Nolet S. and Rinker J. (2022), *Grand challenges in the design, manufacture, and operation of future wind turbine systems*, *Wind Energ. Sci.*, 8, 1071–1131, 2023 <https://doi.org/10.5194/wes-8-1071-2023>

Weckend S., Wade, A., Heath, G. (2016), *End-of-Life Management: Solar Photovoltaic Panels*; International Renewable Energy Agency (IRENA): Abu Dhabi, United Arab Emirates

World Resources Institute (2020), *Global Greenhouse Gas Emissions 2020*

World Steel Association, (2008), *Wind energy: the fastest growing power source*, Environmental Case Study - Wind energy

Zheng X.; Imran M., Umair M., Lin C.; Dong Y. (2025). Modern panelizing and optimization techniques for renewable energy projects; perspectives on how CO2 emissions impact the circular economy, *Energy*, Elsevier, vol. 323(C)

Zhang L., et al. (2019), Circular Economy Policies in China: A Comparative Study of Energy and CO2 Emissions, *Energy Policy* 124 (2019): 381-394

Capitolo 3 e Appendice

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

BayWa AG. (2023). Dieselpreisrechner.
<https://www.baywa.de/mobilitaet/dieselmkraftstoffe/diesel-preisrechner/suche/>

BayWa for Agriculture. (2023). Tectrol Eco Hyd 46 ISO VG 46
Hydrauliköl. <https://www.baywa.de/de/schmierstoffe-betriebsmittel/hydraulikoel/>

Bernreuter Research. (2023). Polysilicon price trend. Retrieved
from <https://www.bernreuter.com/polysilicon/price-trend/>

Bos, U., Horn, R., Beck, T., Lindner, J. P., & Fischer, M. (2016). *LANCA® - Characterisation factors for life cycle impact assessment* (Version 2.0). Stuttgart: 978-3-8396-0953-8.

Chemieshop24.de & Staub & Co. – Silbermann GmbH. (2023). Natronlauge 50% LMQ (1300kg Container). Retrieved from <https://www.chemieshop24.de/natronlauge-50-lmq-1300kg-container/>

Corbetta, P. (2015). *La ricerca sociale: metodologia e tecniche*, III. Le tecniche qualitative, Il Mulino, Milano.

De Laurentiis, V., Secchi, M., Bos, U., Horn, R., Laurent, A., & Sala, S. (2018). Soil quality index: Exploring options for a comprehensive assessment of land use impacts in LCA. *Journal of Cleaner Production*.

Deng R., Chang N., Ouyang Z., Chong C., A techno-economic review of silicon photovoltaic module recycling. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 109. 532-550 (2019)

De Schryver, A., & Goedkoop, M. (2009). Mineral resource. In Goedkoop, M., Heijungs, R., Huijbregts, M. A. J., De Schryver, A., Struijs, J., & Van Zelm, R. *ReCiPe 2008 - A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level: Report I: Characterisation factors* (1st ed.).

Deutsches Institut für Normung DIN e.V. (2006). *DIN EN ISO 14040:2006 – Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen*. Beuth Verlag.

Deutsches Institut für Normung DIN e.V. (2006). *DIN EN ISO 14044:2006 – Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen*³. Beuth Verlag.

Deutsche Rohstoffagentur in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (DERA). (2023). *Status Quo des Recyclings bei der Metallerzeugung und -verarbeitung in Deutschland* (DERA Rohstoffinformationen, 57). Berlin.

End-of-Life Management of Photovoltaic panels: *Trends in PV module Recycling technologies* - Recycling Report IEA (2018).

European Commission's Joint Research Centre – Institute for Environment and Sustainability. (2011). *International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook: Recommendations for Life Cycle Impact Assessment in the European context* (1st ed., EUR 24571 EN). Publications Office of the European Union.

European Commission's Joint Research Centre (2012), *Product Environmental Footprint (PEF) Guide*.

European Commission's Joint Research Centre – Institute for Environment and Sustainability. (2017). *International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook*. Publications Office of the European Union. https://eplca.jrc.ec.europa.eu/?page_id=86

European Commission's Joint Research Centre, (2018), *Product Environmental Footprint Category Rules Guidance*.

European Commission's Joint Research Centre – Institute for Environment and Sustainability. (2018). *Supporting information to the characterisation factors of recommended EF Life Cycle Impact Assessment methods. Version 2 from ILCD to EF 3.0* (JRC Technical Reports). Publications Office of the European Union.

European Commission's Joint Research Centre, (2019), *Product Environmental Footprint Category Rules (PEFCR) - Photovoltaic modules used in photovoltaic power systems for electric generation*.

European Commission. (2021). *Recommendation on the use of environmental footprint methods to measure and communicate the life cycle environmental performance of products and organizations* (C(2021) 9332 final).

European Commission, European Health and Digital Executive Agency, (2021), *GRANT AGREEMENT NUMBER 958223 — PHOTORAMA — H2020-LOW-CARBON-CIRCULAR-INDUSTRIES*.

EUWID Europäischer Wirtschaftsdienst GmbH. (2021). *Municipal waste market report. EUWID 50.2021*.

EUWID Europäischer Wirtschaftsdienst GmbH. (2022). *Waste paper market Germany: Waste paper grade B19 (upper value). Own recording and evaluation of the price development since 2013; Status: September 2022*.

EUWID Europäischer Wirtschaftsdienst GmbH. (2022). Waste wood market Germany: Untreated waste wood, absolutely clean, pre-crushed (0-300 mm), region south; Status: August 2022.

EUWID Europäischer Wirtschaftsdienst GmbH. (2023). VEA berichtet über steigende Wasserpreise. Retrieved from <https://www.euwid-wasser.de/news/wirtschaft/vea-berichtet-ueber-steigende-wasserpreise/>

Focus Technology Co., Ltd. (2023). Made-in-China – Aluminium chloride. Retrieved from https://www.made-in-china.com/products-search/hot-china-products/Alcl3_Price.html

Flyvbjerg, B. (2011) Case Study. In Norman K. Denzin and Yvonna S. Lincoln, eds., *The Sage Handbook of Qualitative Research*, 4th edition, Thousand Oaks, CA: Sage, pp. 301-316, <https://ssrn.com/abstract=2278194>

Frischknecht, R., Braunschweig, A., Hofstetter, P., & Suter, P. (2000). Modeling human health effects of radioactive releases in life cycle impact assessment. *Environmental Impact Assessment Review*, 20(2), 159–189.

Glycol.eu. (2023). Ethylene Glycol 40% 1000L IBC. Retrieved from <https://www.glycol.eu/ethylenglycol-40-ibc-1000l-bis-21c.html>

Grandori, A. (1996). Disegni di ricerca in organizzazione. In G. Costa & R. Nacamulli (Eds.). (a cura di) *Manuale di organizzazione aziendale, V. Metodi e tecniche di analisi e di intervento*. Utet.

Guinée, J. B. (Ed.), Gorrée, M., Heijungs, R., Huppes, G., Kleijn, R., de Koning, A., Van Oers, L., Wegener Sleeswijk, A., Suh, S., Udo de Haes, H. A., De Bruijn, J. A., Van Duin R., & Huijbregts, M. A. J. (2002). *Handbook on Life Cycle Assessment: Operational Guide to the ISO Standards*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.

Heath G.A., Silverman T.J., Kempe M., et al., *Research and development priorities for silicon photovoltaic module recycling to support a circular economy*. *Nat Energy* 5, 502–510 (2020).

Horizon 2020, *Annotated Model Grant Agreements*, Version 5.1, 6 Dec 2018.

Horizon 2020, *PHOtovoltaic waste management – advanced Technologies for recOvery and recycling of secondary RAw MAterials from end-of-life modules*, 2021.

IEA-PVPS Task12 report (2017), *LCI of Current PV Module recycling Processes in Europe*. International Energy Agency (IEA). (2022). Special Report on Solar PV Global Supply Chains. Retrieved April 14, 2025, from <https://ppl-ai-file-upload.s3.amazonaws.com/web/direct-files/28185326/02bdf903-89f7-486d-9c8d-ddbb23eccbd9/SpecialReportonSolarPVGlobalSupplyChains.pdf>

IFEU - Institut: Dittrich, M., Limberger, S., Ewers, B., Stalf, M., Knappe, F., & Vogt, R. (2021). Sekundärrohstoffe in Deutschland. Heidelberg: NABU.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2013). Anthropogenic and natural radiative forcing. In *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report. Cambridge University Press.

International Renewable Energy Agency IRENA (2019), Report *Future of Solar Photovoltaic*.

ISO 14040. (2006). *DIN EN ISO 14040: Umweltmanagement - Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen*. Beuth Verlag, Berlin.

ISO 14041. (1998). *DIN EN ISO 14041: Umweltmanagement - Ökobilanz - Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens sowie Sachbilanz*. Beuth Verlag, Berlin.

ISO 14044. (2006). *DIN EN ISO 14044: Umweltmanagement - Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen*. Beuth Verlag, Berlin.

Jaqora® GmbH. (2023). Schwefelsäure. Retrieved from <https://www.joqora.de/anorganika/schwefelsaeure/>

Jaqora® GmbH. (2023). Wasserstoffperoxid 49,5 %. Retrieved from <https://www.joqora.de/wasserstoffperoxid-49-5/4260452042690>

JRC (Joint Research Centre). (2011). Institute for Environment and Sustainability: International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook- Recommendations for Life Cycle Impact Assessment in the European context. First edition November 2011. EUR 24571 EN. Luxembourg. Publications Office of the European Union.

JRC (Joint Research Centre). (2012). *Product Environmental Footprint (PEF) Guide*. <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/EnvironmentalFootprint.html>

JRC (Joint Research Centre). (2017). Institute for Environment and Sustainability: International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook. In: European Platform on LCA, eplca.jrc.ec.europa.eu/?page_id=86, Publications Office of the European Union.

JRC (Joint Research Centre). (2018). *Product Environmental Footprint Category Rules Guidance*. <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/EnvironmentalFootprint.html>

JRC (Joint Research Centre). (2018). Institute for Environment and Sustainability: JRC Technical Reports. Supporting information to the characterisation factors of recommended EF Life Cycle Impact Assessment methods. Version 2 from ILCD to EF 3.0.

JRC (Joint Research Centre). (2018). Institute for Environment and Sustainability: JRC Technical Reports. Development of a weighting approach for the Environmental Footprint.

JRC (Joint Research Centre). (2019). *Product Environmental Footprint Category Rules (PEFCR) – Photovoltaic Modules Used in Photovoltaic Power Systems for Electric Generation*.

Klöpffer, W., & Grahl, B. (2009). *Ökobilanz (LCA) – Ein Leitfaden für Ausbildung und Beruf*. Wiley-VCH Verlag, Weinheim.

Lucidi, F., Alivernini, F., & Pedon, A. (2008). *Metodologia della ricerca quali-tativa*. Il Mulino.

Noda, M., (2014), *Development of the PV recycling system for various kinds of PV modules*, 6th WCPEC, Japan.

Oers, L. van, de Koning, A., Guinée, J.B., & Huppes, G. (2002). Abiotic resource depletion in LCA - Improving characterisation factors for abiotic resource depletion as recommended in the new Dutch LCA Handbook. *DWW Report*. Retrieved from <http://www.cml.leiden.edu/research/industrialecology/researchprojects/finished/abiotic-depletion-lcia.html>

Park, J., Kim, W., Cho, N., Lee, H. and Park, N. , (2016), *Green Chemistry*, 18 1706-1714.

PHOTORAMA Consortium (2025). *Final LCA (PEF) and LCC and the consequential eco-efficiency analysis: Deliverable Report D5.5*.

PHOTORAMA Consortium (2022). *Analysis of survey for social acceptance: Deliverable Report D5.1*.

Posch, M., Seppälä, J., Hettelingh, J. P., Johansson, M., Margni, M., & Jolliet, O. (2008). The role of atmospheric dispersion models and ecosystem sensitivity in the determination of characterisation factors for acidifying and eutrophying emissions in LCIA. *International Journal of Life Cycle Assessment*.

Polverini, D., Espinosa, N., Eynard, U., Leccisi, E., Ardente, F., & Mathieux, F. (2023). Assessing the carbon footprint of photovoltaic modules through the EU Ecodesign Directive. *Solar Energy*, 267, 113436. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.113436>

Report IEA-PVPS T12-16, (2020), *Human Health Risk Assessment Methods for PV Part 3: Module Disposal Risks*.

Sala, S., Cerutti, A. K., & Pant, R. (2018). Development of a weighting approach for Environmental Footprint. Luxembourg: European Commission, Joint Research Centre, Publications Office of the European Union. ISBN 978-92-79-68041-0.

Sareen, S., & Martin, A. (2024). Cognate aspects of solar energy transitions. In S. Sareen & A. Martin (Eds.), *Geographies of Solar Energy Transitions: Conflicts, controversies and cognate aspects* (pp. 1–22). UCL Press. <http://www.jstor.org/stable/jj.12801259.6>

Schrott24 GmbH. (2022). Altmetall Ankauf – Alublech, alt, färbig. Retrieved from <https://www.schrott24.de/altmetall-ankauf/aluminium/alu-blech-alt-faerbig/>

Schrott24 GmbH. (2023). Altmetall Ankauf – Aluprofile, färbig. Retrieved from <https://www.schrott24.de/altmetall-ankauf/aluminium/alu-profile-faerbig/>

Schrott24 GmbH. (2023). Altmetall Ankauf – Elektronikschrott, gemischt. Retrieved from <https://www.schrott24.de/altmetall-ankauf/elektronik/elektronikschrott-gemischt/>

Schrott24 GmbH. (2023). Altmetall Ankauf – Kupferkabel, min. 60% Cu. Retrieved from <https://www.schrott24.de/altmetall-ankauf/kupfer-kabel/kupfer-kabel-min-60-cu/>

Schrott24 GmbH. (2023). Altmetall Ankauf – Kupfer-Messing-Kühler, rein. Retrieved from <https://www.schrott24.de/altmetall-ankauf/kupfer/kupfer-gemischt-alt/>

Seppälä, J., Posch, M., Johansson, M., & Hettelingh, J. P. (2006). Country-dependent characterisation factors for acidification and terrestrial eutrophication based on accumulated exceedance as an impact category indicator. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 11(6), 403–416.

Solar Frontier, (2016), *Development of low-cost cover-glass separation techniques for laminated glass-glass modules*, NEDO.

Solar Power Europe, (2024), *Global Market Outlook For Solar Power 2024-2028*, 2024.

Solar Power Europe, (2024), *End-of-Life Management Best Practice Guidelines*, 2024.

Stolz, P., Frischknecht, R., Wyssa, F., et al. (2016). PEF screening report of electricity from photovoltaic panels in the context of the EU Product Environmental Footprint Category Rules (PEFCR) Pilots.

Struijs, J., Beusen, A., van Jaarsveld, H., & Huijbregts, M. A. J. (2009). Aquatic eutrophication. In Goedkoop, M.; Heijungs, R.; Huijbregts, M.A.J.; De Schryver, A.; Struijs, J.; Van Zelm, R. *ReCiPe 2008 - A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level: Report I: Characterisation factors* (1st ed.).

Trading Economics. (2023). Commodity markets for aluminium, copper, indium and gallium. Retrieved from <https://tradingeconomics.com/commodity/>

UNEP-SETAC Life Cycle Initiative. (2016). *Global guidance for life cycle impact assessment indicators* (Vol. 1).

Van Oers, L., de Koning, A., Guinée, J. B., & Huppes, G. (2002). *Abiotic resource depletion in LCA – Improving characterisation factors for abiotic resource depletion as recommended in the new Dutch LCA Handbook* (DWW report). Delft.

Van Zelm, R., Huijbregts, M. A. J., Den Hollander H. A., Van Jaarsveld H. A., Sauter F. J., Struijs J., Van Wijnen H. J., & Van de Meent D. (2008). European characterization factors for human health damage of PM10 and ozone in life cycle impact assessment. *Atmospheric Environment*, 42(441–453).

Wambach, K., et al. (2017). Life Cycle Inventory of Current Photovoltaic Module Recycling Processes in Europe. Report IEA-PVPS T12-12:2017. ISBN 978-3-906042-67-1.

Wonsak Kohlensäure Service GmbH. (2023). Trockeneis-shop – Trockeneis Blöcke 24 kg. Retrieved from <https://trockeneis-shop.de/produkt/trockeneis-bloecke-24-kg/>

World Meteorological Organization (WMO). (1999). *Scientific assessment of ozone depletion: 1998*. Global Ozone Research and Monitoring Project - Report No. 44.

Yin, R. K. (2018). *Case study research. Design and methods* (Sixth ed.). Sage.