



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTÀ DI ECONOMIA “GIORGIO FUÀ”

*Corso di Laurea Magistrale in
Management della Sostenibilità ed Economia Circolare*

"Progettazione e modellizzazione di un impianto di riciclo termo-chimico per moduli fotovoltaici in Sicilia: un approccio multidimensionale tra analisi LCA e Triple Layered Business Model Canvas"

“Design and modeling of a thermo-chemical recycling plant for photovoltaic modules in Sicily: a multidimensional approach using LCA analysis and Triple Layered Business Model Canvas”

Relatore:

Prof.ssa Rossi Marta

Tesi di Laurea di:

Gabriele Milana

Correlatore:

Prof. Giuliani Marco

Anno Accademico 2025 – 2026

Sommario

INTRODUZIONE	6
Contesto e rilevanza	6
Problema di ricerca: la “bomba RAEE-PV” in Sicilia	7
Metodologia di ricerca	10
Struttura dell’elaborato	11
CAPITOLO 1	
Economia circolare e Sostenibilità nel Settore Fotovoltaico	13
1.1 La Transizione Energetica: definizioni e implicazioni	13
1.2 Il mercato del PV: crescita globale, nazionale e regionale (Sicilia)	14
1.3 Il problema del fine vita e le stime dei flussi di rifiuti	16
1.4 Inquadramento normativo RAEE per i pannelli fotovoltaici	20
CAPITOLO 2	
Quadro Normativo, Mercato e la Filiera del Fotovoltaico a fine vita	23
2.1 Fondamenti teorici dell'Ecodesign e Life Cycle Thinking	23
2.2 L’ecodesign applicato al fotovoltaico	25
2.3 I limiti progettuali e gestionali del modello attuale	27
2.4 Il gap di circolarità: il paradosso massa-valore	28
2.5 Dall’eco-design di sistema alla necessità di un benchmark tecnologico	31
CAPITOLO 3	
Tecnologie e Innovazione nel Riciclo dei Moduli Fotovoltaici	33
3.1 Traiettorie tecnologiche di trattamento: dal downcycling all'economia circolare	33
3.2 Il trattamento meccanico convenzionale e i suoi limiti strutturali	35
3.3 I processi avanzati: trattamenti termici per la delaminazione	38
3.4 I processi avanzati: lisciviazione chimica e idrometallurgia	39
3.5 Benchmark industriale: l'approccio generalista di Veolia	42
3.6 Innovazione termico-chimica ad alta purezza: il caso ROSI Alpes	43

3.7 Soluzioni modulari emergenti: la startup italiana 9-Tech	44
3.8 Analisi dei mercati per le Materie Prime Seconde (MPS).....	46
3.9 Dinamiche di prezzo e valore strategico: il peso di argento e silicio	47
CAPITOLO 4	
Analisi del Contesto e dei Flussi per l'Impianto Siciliano	50
4.1 Il parco fotovoltaico in Sicilia: evoluzione storica e criticità del fine vita	50
4.2 Proiezioni e mappatura dei flussi di rifiuti fotovoltaici attesi (2025-2040).....	52
4.3 Infrastrutture logistiche regionali e valore di mercato delle Materie Prime Seconde.....	54
4.4 Distribuzione territoriale e criteri logistici per la localizzazione dell'impianto ...	58
CAPITOLO 5	
Progettazione e Valutazione di Sostenibilità di un Impianto di Riciclo FV in Sicilia	60
5.1 Definizione del modello logistico e di approvvigionamento territoriale.....	60
5.2 Eco-design del processo di riciclo: architettura tecnologica e bilanci di materia	63
5.3 Valutazione di sostenibilità ambientale: Analisi LCA, mix energetico e calcolo dei benefici netti.....	68
5.4 Valutazione di sostenibilità economica e strategica: Approccio Modulare e Sustainable Business Model Canvas	73
CAPITOLO 6	
Conclusioni, Analisi Strategica e Raccomandazioni di Policy.....	82
6.1 Sintesi dei risultati e contributo strategico dello studio.....	82
6.2 Analisi SWOT: Dinamiche interne e posizionamento strategico	84
6.3 Implicazioni manageriali e raccomandazioni di Policy	87
Conclusioni finali.....	89
Bibliografia e Sitografia.....	91

INTRODUZIONE

Contesto e rilevanza

Negli ultimi due decenni la transizione energetica è diventata uno dei pilastri delle politiche climatiche europee e internazionali, spingendo i sistemi energetici verso una progressiva decarbonizzazione. Tra le tecnologie rinnovabili, il solare fotovoltaico (PV) ricopre un ruolo centrale grazie alla riduzione dei costi, alla modularità degli impianti e all'abbondanza della risorsa solare, soprattutto nelle regioni mediterranee. In questo scenario, l'Italia – e in particolare la Sicilia – hanno conosciuto una forte espansione della capacità fotovoltaica installata, trainata da cicli di incentivazione che hanno concentrato molte installazioni in un arco temporale relativamente breve.

La crescita accelerata del fotovoltaico, tuttavia, sta generando una sfida speculare sul piano della gestione del fine vita dei moduli. La vita utile dei pannelli viene comunemente stimata in circa 20–25 anni, con valori che possono variare in funzione della qualità dei componenti, delle condizioni operative e delle pratiche di manutenzione. Considerando il boom di installazioni avvenuto tra gli anni 2005 e 2012, un volume crescente di moduli sta progressivamente avvicinandosi alla fase di dismissione, configurando un nuovo flusso di rifiuti da apparecchiature elettriche ed elettroniche (RAEE) di dimensione non trascurabile. A livello globale, le stime più recenti indicano che entro il 2050 i rifiuti fotovoltaici cumulati potrebbero raggiungere un ordine di grandezza compreso fra circa 60 e 78 milioni di tonnellate[1]

I moduli fotovoltaici a base di silicio cristallino, che costituiscono la quota dominante di pannelli installati, sono sistemi ingegnerizzati multistrato concepiti per resistere per decenni agli agenti atmosferici. Dal punto di vista materico, un pannello standard è composto in prevalenza da vetro temprato (circa 65–75% in massa) e da un telaio in alluminio (10–18%), cui si aggiungono polimeri (incapsulante EVA e backsheet), celle di silicio e piccole quantità di metalli ad alto valore come argento e rame. Questa composizione genera un paradosso economico: i materiali più presenti in peso, come vetro e alluminio, non sono quelli con il valore economico più elevato, mentre l'argento – pur rappresentando una frazione infinitesima della massa totale – può contribuire a una

quota significativa del valore recuperabile del modulo [2]. Ne deriva una tensione strutturale fra logiche di “recupero di massa”, orientate al rispetto dei target normativi in peso, e logiche di “recupero di valore”, mirate soprattutto alle materie prime critiche e ai metalli preziosi.

Oltre alla dimensione economica, i rifiuti fotovoltaici pongono questioni ambientali e sanitarie specifiche. Se gestiti in modo inadeguato – ad esempio attraverso lo smaltimento in discarica o il semplice downcycling – i moduli possono comportare una dispersione non controllata di sostanze pericolose presenti in alcune tipologie di pannelli e, al tempo stesso, una perdita di risorse potenzialmente strategiche. Al contrario, un riciclo progettato in ottica di economia circolare consente di trasformare questi flussi in una “miniera urbana” di materie prime seconde.

Nel contesto italiano, la gestione dei moduli a fine vita si inserisce all’interno della disciplina RAEE. Il modello attuale è fortemente basato su sistemi collettivi e consorzi, con una rete di impianti di trattamento localizzata prevalentemente nel Centro-Nord. La Sicilia rappresenta un caso emblematico di questa asimmetria territoriale. Da un lato, l’isola ha beneficiato di un’intensa diffusione del fotovoltaico; dall’altro lato, l’aggiornamento del Piano Regionale di Gestione dei Rifiuti (PRGR) sottolinea la necessità di potenziare le infrastrutture, segnalando un gap impiantistico significativo per i RAEE, costringendo a trasferimenti su lunghe distanze [3]. Questa combinazione configura per la Sicilia il rischio di affrontare l'ondata di moduli con strumenti "lineari" e l'opportunità di progettare una filiera circolare locale.

Problema di ricerca: la “bomba RAEE-PV” in Sicilia

Il quadro delineato nel paragrafo precedente mette in evidenza come la crescita del fotovoltaico in Sicilia stia generando, con un certo ritardo temporale, un nuovo flusso di rifiuti tecnologici costituiti dai moduli a fine vita, classificati come RAEE ai sensi della normativa europea e nazionale. A livello operativo, la gestione di questi rifiuti si appoggia oggi a un modello fortemente centralizzato, basato su consorzi e impianti di trattamento localizzati prevalentemente nel Centro-Nord Italia, con la conseguenza che gran parte dei moduli dismessi in Sicilia deve essere trasportata per lunghe distanze verso altri territori o destinato a dismissione in discarica. Questo assetto si

traduce in costi logistici elevati, in un incremento dell'impronta di carbonio associata al trasporto e, soprattutto, in una mancata internalizzazione a livello regionale del valore economico e occupazionale legato al riciclo dei pannelli.

Parallelamente, lo stato dell'arte tecnologico mostra come il riciclo dei moduli fotovoltaici, in particolare quelli a base silicio cristallino, sia tutt'altro che banale. Da un lato, esistono processi industriali consolidati, prevalentemente meccanici, in grado di raggiungere alti tassi di recupero in peso soddisfacendo i requisiti RAEE, ma con output materiali a purezza medio-bassa e un focus principalmente su vetro e alluminio. Dall'altro lato, si stanno affermando catene di processo ibride meccanico-termico-chimico, orientate al recupero di valore e capaci di estrarre silicio e metalli nobili ad alta purezza, ma con maggior complessità impiantistica, fabbisogno energetico e requisiti di gestione degli effluenti. La scelta di una configurazione tecnologica "ottimale" non può quindi essere astratta, ma deve essere calibrata sui volumi effettivi di rifiuti attesi, sulla loro distribuzione spazio-temporale, sul contesto logistico e sul tessuto industriale e normativo regionale.

Nel caso della Sicilia, la pianificazione regionale dei rifiuti evidenzia già oggi un gap impiantistico complessivo sui rifiuti speciali e, in particolare, sulla capacità di trattamento dei RAEE, con la presenza di un numero limitato di piattaforme dedicate rispetto alla popolazione e ai flussi generati. Tuttavia, non esiste ancora uno studio integrato che combini in modo sistematico: una stima prospettica dei flussi di moduli fotovoltaici a fine vita sul territorio regionale; un'analisi comparativa delle tecnologie di riciclo in chiave di eco-design; la progettazione di una filiera logistica e industriale dedicata; e una valutazione multidimensionale della sostenibilità del modello proposto. In assenza di questa visione di sistema, le decisioni rischiano di essere prese in maniera frammentata – impianto per impianto, progetto per progetto – con il pericolo di cristallizzare soluzioni sub-ottimali dal punto di vista ambientale, economico e di sviluppo territoriale.

Il problema di ricerca che emerge può essere sintetizzato nella seguente domanda generale: *“Come progettare, secondo i principi dell'eco-design, una filiera circolare regionale per la gestione del fine vita dei pannelli fotovoltaici in Sicilia, che sia*

tecnicamente fattibile, economicamente sostenibile e coerente con gli obiettivi di economia circolare e con il quadro normativo RAEE e di pianificazione dei rifiuti?”

Obiettivo della Tesi

Alla luce del problema definito dalla domanda appena delineata, la tesi persegue un insieme di obiettivi tra loro complementari, che coprono l'intero percorso dalla definizione del fenomeno alla valutazione del modello proposto. In primo luogo, essa mira a **ricostruire e quantificare lo scenario dei rifiuti fotovoltaici in Sicilia**, mappando i flussi attuali e futuri di pannelli a fine vita, con particolare attenzione al periodo 2025–2040. Questo comporta la stima dei volumi, delle tempistiche e della distribuzione geografica dei moduli dismessi, così da fornire una base dati solida per il dimensionamento di eventuali impianti regionali e per l'individuazione dei bacini di raccolta prioritari.

Un secondo obiettivo è quello di **analizzare criticamente le tecnologie di riciclo disponibili per i pannelli fotovoltaici**, con un focus sui moduli a base silicio cristallino, valutandole attraverso i criteri propri dell'eco-design. La tesi intende quindi confrontare processi meccanici, termici, chimici e ibridi in termini di tasso di recupero, purezza dei materiali ottenuti, consumi energetici e impatti ambientali, con l'obiettivo di individuare le soluzioni più idonee a costituire il nucleo tecnologico di un impianto regionale specializzato. In questo modo, l'analisi tecnologica non resta astratta, ma diventa funzionale alla progettazione di un processo di trattamento coerente con i principi di economia circolare.

Sulla base di questi elementi, la tesi si propone poi di **progettare un modello di filiera logistica e industriale per la gestione del fine vita dei pannelli fotovoltaici in Sicilia**, concepito fin dall'origine secondo i principi dell'eco-design di sistema. Ciò implica definire l'architettura complessiva della filiera – dalla raccolta e pre-trattamento alla configurazione dell'impianto di riciclo – e delineare un sistema di logistica inversa che minimizzi gli impatti ambientali ed economici, nel rispetto dei criteri di prossimità e autosufficienza richiamati dalla pianificazione regionale dei rifiuti speciali.

Infine, un obiettivo centrale dell'elaborato è **valutare la sostenibilità multidimensionale del modello proposto**, combinando una lettura ambientale, economica e sociale. Dal punto di vista ambientale, verrà condotta un'analisi *Life Cycle Assessment* (LCA) del processo di riciclo, per stimarne il bilancio energetico, le emissioni evitate e i tassi di recupero delle materie prime seconde. Sul piano strategico-aziendale ed economico, la fattibilità e la creazione di valore condiviso (CSV) saranno modellate attraverso l'applicazione rigorosa del Triple Layered Business Model Canvas (TLBMC), culminando in un'analisi SWOT e in raccomandazioni di policy per i decisori pubblici. Dal punto di vista sociale, infine, saranno considerate le ricadute potenziali in termini di occupazione qualificata e di sviluppo di una filiera locale, nonché le condizioni di contesto – normative, istituzionali e di mercato – che possono abilitare o ostacolare l'implementazione del modello in Sicilia.

Nel complesso, questi obiettivi mirano a trasformare un problema emergente di gestione dei rifiuti fotovoltaici in un caso applicativo di eco-design di sistema, capace di integrare analisi tecnica, valutazione di sostenibilità e implicazioni di management per la Regione Sicilia.

Metodologia di ricerca

La ricerca si basa su un approccio *desk-analitico*, che integra analisi quantitative modellistiche e valutazioni qualitative secondo una logica interdisciplinare coerente con gli obiettivi della tesi. La fase iniziale consiste nella revisione sistematica della letteratura scientifica, dei report settoriali (IRENA, ENEA, GSE) e della normativa di riferimento (Direttive UE WEEE e GPP, D.Lgs. 49/2014), finalizzata a consolidare il quadro teorico per il benchmark delle tecnologie di riciclo e l'applicazione dei principi di eco-design ai sistemi di gestione rifiuti.

L'analisi quantitativa utilizza dati istituzionali (GSE, Terna, Registri RAEE, ISTAT) per ricostruire lo sviluppo storico del fotovoltaico regionale e stimare i flussi di pannelli a fine vita attesi nel periodo 2025–2040, applicando tecniche di analisi, proiezioni modellistiche, mappatura geografica e la definizione dei bacini di utenza ottimali, in linea con gli indirizzi del Piano Regionale di Gestione dei Rifiuti (PRGR 2024).

La progettazione vera e propria si concretizza nello sviluppo del Diagramma di Flusso di Processo (PFD) basato sull'architettura termo-chimica. A questa fase ingegneristica segue la valutazione multidimensionale: l'impatto ecologico viene quantificato tramite un'analisi LCA semplificata basata sull'espansione del sistema (*Avoided Burdens*); la fattibilità economico-sociale viene validata strutturando il *Triple Layered Business Model Canvas* di Joyce e Paquin, strumento essenziale per mappare l'interdipendenza tra sostenibilità finanziaria, mitigazione dei rischi operativi e ricadute occupazionali sul territorio.

Questo approccio garantisce la produzione di un modello di filiera eco-designed operativamente validato, pronto per un eventuale confronto con decisori istituzionali e stakeholder regionali.

Struttura dell'elaborato

L'elaborato si articola in sei capitoli principali, compreso le conclusioni, secondo una progressione logica che segue fedelmente le domande di ricerca e gli obiettivi definiti nei paragrafi precedenti. Il Capitolo 1 presenta il contesto della transizione energetica e la sfida dell'economia circolare applicata al fotovoltaico, analizzando la crescita del mercato PV (globale, nazionale, regionale), le stime dei flussi di rifiuti a fine vita e il quadro normativo RAEE con i suoi limiti attuali.

Il Capitolo 2 approfondisce l'eco-design come strumento strategico, illustrando i suoi principi fondamentali (LCA, DfD, DfR), la loro applicazione ai pannelli fotovoltaici (Design for Recycling) e l'estensione all'intera filiera (Design for Circularity), con particolare enfasi sulla progettazione di sistemi circolari. Il Capitolo 3 esamina le tecnologie e i mercati per il riciclo dei pannelli PV, dalla composizione dei moduli alla panoramica dei processi di trattamento (meccanico, termico, chimico) e all'analisi dei mercati di sbocco per le materie prime seconde recuperate (silicio, vetro, argento).

Il Capitolo 4 si concentra sul contesto siciliano, con l'analisi della geografia del fotovoltaico installato, la stima e mappatura dei flussi di rifiuti attesi (2025–2040) per il dimensionamento dell'impianto e la ricognizione delle infrastrutture logistiche e di gestione rifiuti esistenti. Il Capitolo 5 costituisce il cuore ingegneristico e strategico

della tesi. Propone il design dell'impianto termo-chimico, ne valuta il beneficio ambientale netto attraverso l'analisi LCA (dimostrandone la natura carbon negative) e ne modella la strategia d'impresa attraverso l'applicazione dettagliata dei tre livelli (Economico, Ambientale e Sociale) del Triple Layered Business Model Canvas.

Infine, il Capitolo 6 sintetizza i risultati dello studio attraverso un'analisi SWOT che incrocia le dinamiche interne del progetto con i rischi macro-economici (come il Silver Thrifting), culminando nella formulazione di raccomandazioni di policy dirette alle istituzioni per supportare e accelerare lo sviluppo di una filiera regionale ad alto valore aggiunto.

CAPITOLO 1

Economia circolare e Sostenibilità nel Settore Fotovoltaico

1.1 La Transizione Energetica: definizioni e implicazioni

Negli ultimi decenni, l'aggravarsi dell'emergenza climatica e la necessità di ridurre le emissioni di gas climalteranti hanno posto la transizione energetica al centro delle agende politiche ed economiche globali. Da un punto di vista definitorio, la transizione energetica rappresenta il passaggio strutturale da un sistema basato prevalentemente sui combustibili fossili (carbone, petrolio, gas naturale) a un paradigma incentrato sulle fonti di energia rinnovabile, sull'efficienza energetica e sull'elettrificazione dei consumi [4]. Questo shift strutturale non risponde unicamente a imperativi di sostenibilità ambientale, ma mira anche a ridurre la dipendenza geopolitica ed economica dalle importazioni di fonti fossili, aumentando la resilienza a lungo termine dei sistemi economici nazionali.

Tuttavia, questo fenomeno non si esaurisce in un mero cambiamento tecnologico o infrastrutturale, ma porta con sé profonde implicazioni per gli studi aziendali e il management. Per le imprese, la transizione energetica impone una revisione radicale dei tradizionali modelli di business (Business Model Innovation). Le aziende del comparto energetico, e non solo, sono chiamate a integrare la sostenibilità e i rigorosi criteri ESG (Environmental, Social, and Governance) al centro delle proprie logiche di creazione del valore. Si assiste, ad esempio, al progressivo passaggio dalla semplice vendita del singolo prodotto (es. l'asset "pannello solare") a logiche avanzate di "Product-Service Systems" (PSS). In un modello PSS, il cliente non acquista il bene fisico, ma il servizio energetico che esso genera nel tempo; questa inversione di prospettiva incentiva il produttore a massimizzare la vita utile del prodotto, a progettare secondo i principi dell'eco-design per facilitarne la manutenzione e, infine, a farsi carico del recupero a fine vita, interiorizzando fin dall'origine i costi logistici e di smaltimento [5].

In questo contesto, la transizione energetica si intreccia indissolubilmente con i principi dell'Economia Circolare. La rapida e massiccia diffusione delle tecnologie rinnovabili richiede quantità crescenti e senza precedenti di materie prime. Dal punto di vista manageriale, garantire la sicurezza degli approvvigionamenti (Supply Chain

Resilience) e mitigare la volatilità dei prezzi delle materie prime vergini richiede il superamento del modello economico lineare ("prendi, produci, smaltisci"). Il recupero di Materie Prime Critiche (CRM) come silicio, argento e rame dai dispositivi giunti a fine ciclo di vita rappresenta un pilastro strategico in tal senso. La creazione di filiere circolari diventa quindi non solo un imprescindibile obbligo di conformità alle normative ambientali sui rifiuti, ma una vera e propria leva strategica fondamentale per la competitività, l'indipendenza e la creazione di valore a lungo termine delle imprese [6].

1.2 Il mercato del PV: crescita globale, nazionale e regionale (Sicilia)

Negli ultimi anni il solare fotovoltaico (PV) si è affermato come una delle tecnologie chiave della transizione energetica globale, grazie alla combinazione tra riduzione dei costi di generazione, maturità tecnologica e flessibilità applicativa su scale molto diverse, dagli impianti *utility-scale* ai sistemi residenziali su tetto. Secondo le statistiche internazionali, la potenza fotovoltaica cumulata a livello mondiale ha ampiamente superato la soglia dei terawatt, con tassi di crescita annua a doppia cifra che hanno reso il solare una delle fonti rinnovabili in più rapida espansione nei mix elettrici nazionali [7]. Questa dinamica è sostenuta da politiche climatiche sempre più stringenti, da una drastica contrazione del *Levelized Cost of Energy* (LCOE) che ha reso il fotovoltaico estremamente competitivo rispetto alle fonti fossili, e dall'integrazione crescente con sistemi di accumulo e soluzioni di *smart grid* per la gestione intelligente dei carichi.

In Europa, il fotovoltaico sta assumendo un ruolo strutturale, con incrementi significativi di capacità installata sia nel segmento degli impianti a terra di grande taglia, sia nella diffusione capillare di sistemi su tetto per l'autoconsumo domestico e condominiale [8]. L'Italia si colloca tra i principali mercati europei, con una potenza FV in esercizio in costante crescita. Questa traiettoria è stata sostenuta storicamente da intensi regimi di incentivazione pubblica — in particolare i vari "Conto Energia" tra il 2010 e il 2013, periodo in cui si è registrato un boom di installazioni senza precedenti — e, più recentemente, da detrazioni fiscali per l'efficienza energetica edilizia e dalle nascenti comunità energetiche rinnovabili. I rapporti statistici istituzionali evidenziano come una quota rilevante degli impianti italiani sia costituita da installazioni di piccola

taglia in ambito residenziale e terziario, mentre i grandi parchi fotovoltaici a terra rappresentano una componente in rapida espansione, specialmente nelle regioni meridionali caratterizzate da un'elevata e costante radiazione solare [9].

In questo contesto nazionale, la Sicilia occupa una posizione di assoluto primo piano per diffusione storica del fotovoltaico e potenziale di ulteriore sviluppo. Grazie a un'irradiazione solare tra le più elevate d'Europa, alla vasta disponibilità di superfici idonee e alla forte concentrazione di investimenti attratti dai cicli di incentivazione, l'isola ha raggiunto negli ultimi anni valori di vertice per potenza installata pro capite nel panorama italiano. A fine 2025, la regione ha superato i 3.500 MW di capacità cumulativa, distribuita su un tessuto di oltre 140.000 impianti [9]. I dati di settore mostrano una presenza capillare sia di impianti di piccola taglia, sia di impianti di taglia medio-grande, spesso sviluppati in aree agricole marginali o siti dismessi. A questa base installata storica si affiancano oggi nuovi imponenti progetti promossi da operatori multinazionali, che mirano a consolidare il ruolo della Sicilia come vero e proprio “hub solare” del bacino del Mediterraneo.

Se letta in chiave di ciclo di vita e management strategico, questa straordinaria dinamica di crescita assume tuttavia una valenza critica, prefigurando una sfida logistica e industriale imminente. La forte concentrazione temporale delle installazioni, il cosiddetto “effetto Conto Energia”, implica che, assumendo una vita utile media dei moduli dell'ordine dei 20–25 anni, un volume massiccio di pannelli inizierà a raggiungere la fase di fine vita nel decennio 2030–2040. Le proiezioni indicano che questa ondata non sarà graduale, ma assumerà i connotati di un vero e proprio picco (previsto in Sicilia nella finestra critica 2031-2036). L’“onda lunga” dell'espansione del mercato si tradurrà così in un'improvvisa “onda montante” di rifiuti da pannelli FV. Questo scenario pone con assoluta urgenza il tema della pianificazione di una *Reverse Logistics* (logistica di ritorno) strutturata; non si tratta semplicemente di trasportare moduli dismessi, ma di architettare e finanziare una rete complessa di centri di raccolta, pre-trattamento e impianti industriali di riciclo ad alto valore aggiunto, capace di intercettare questi imponenti flussi a livello regionale prima che si trasformino in una diseconomia circolare e in un passivo ambientale.

1.3 Il problema del fine vita e le stime dei flussi di rifiuti

L'espansione del fotovoltaico ha un "lato ombra" rappresentato dall'onda crescente di pannelli che raggiungeranno la fine vita nei prossimi decenni. A livello globale, le prime proiezioni sistematiche elaborate da IRENA e IEA-PVPS stimavano che i rifiuti fotovoltaici cumulati potessero raggiungere circa **78 milioni di tonnellate** entro il 2050, con un forte aumento a partire dai primi anni 2030, quando inizieranno a dismettersi in massa i moduli installati tra il 2000 e il 2010. Aggiornamenti successivi, basati su scenari compatibili con l'obiettivo di contenere il riscaldamento globale entro 1,5 °C, indicano volumi potenzialmente superiori ai **200 milioni di tonnellate entro il 2050**, evidenziando come il boom del solare si tradurrà in una nuova categoria di rifiuti tecnologici di scala paragonabile ad altri flussi industriali "storici". [10]

Dal punto di vista metodologico, queste proiezioni globali si basano tipicamente su tre passaggi fondamentali: la ricostruzione storica e prospettica della capacità fotovoltaica installata in GW; la conversione della potenza in massa di moduli, utilizzando rapporti medi peso/potenza derivati dalle specifiche dei produttori; l'applicazione di funzioni di probabilità di guasto nel tempo (ad esempio distribuzioni di Weibull) per stimare, anno per anno, le quantità di pannelli che raggiungono la fine vita. Un elemento cruciale è la distinzione fra scenari di **perdita regolare** (regular-loss), in cui la maggior parte dei moduli arriva a fine vita tecnica a 25-30 anni, e scenari di **perdita anticipata** (early-loss), che tengono conto di guasti prematuri, danneggiamenti e sostituzioni motivate da obsolescenza economica. Nei percorsi più ambiziosi di decarbonizzazione, la combinazione di forte crescita delle installazioni e probabili fenomeni di re-vamping tende a comprimere temporalmente l'"onda" dei rifiuti, accentuandone il carattere di picco.

Nel contesto europeo e italiano, questa "onda montante" assume tratti particolarmente marcati per effetto del picco di installazioni legato ai Conti Energia. Studi recenti stimano per l'Italia un totale di circa **4,5 milioni di tonnellate** di rifiuti fotovoltaici generati nel periodo **2030–2050**, con un picco annuo di circa **175 mila tonnellate nel 2036**, in corrispondenza del ciclo di vita dei pannelli installati nel 2011, anno record per le nuove connessioni. Per il totale cumulato 2030–2050, le analisi disponibili stimano, a livello nazionale, ordini di grandezza dell'ordine di **2,7 milioni di tonnellate**

di vetro, oltre 760 mila tonnellate di alluminio e quasi 1.000 tonnellate di argento, evidenziando un forte squilibrio tra volume dei materiali “strutturali” e peso economico delle frazioni ad alto valore. [11] Analisi indipendenti convergono su ordini di grandezza simili, descrivendo un passaggio da poche migliaia di tonnellate annue di RAEE fotovoltaici nel 2025 a oltre **250 mila tonnellate/anno** entro metà secolo, con implicazioni rilevanti per i consorzi RAEE e per i costi di gestione. In questo quadro, il fine vita dei moduli non appare come un flusso costante, ma come un’“onda d’urto” concentrata in un intervallo temporale relativamente breve, che richiede una pianificazione anticipata di capacità impiantistiche e meccanismi finanziari adeguati.

Su scala regionale, la Sicilia rappresenta un caso di studio emblematico di questa dinamica differita nel tempo. Una ricostruzione storica delle installazioni mostra che, a fine 2025, l’isola ha raggiunto circa **3.530 MW** di potenza fotovoltaica cumulata, corrispondenti a una massa stimata di **282.400 tonnellate** di moduli installati, assumendo un fattore medio di **80 tonnellate/MW**. [12] L’analisi mette in luce un andamento bifasico: una crescita accelerata fino al 2013, coincidente con il regime del Quinto Conto Energia; un successivo rallentamento; e infine una nuova fase di espansione a partire dal 2021, con incrementi significativi nel biennio 2023-2025 trainati da nuovi incentivi e dal Superbonus. Applicando una distribuzione di vita utile compresa fra **20 e 25 anni** ai diversi “coorti” di installazione, il modello di proiezione sviluppato stima flussi crescenti di rifiuti fotovoltaici a partire dalla seconda metà degli anni 2020, con un primo graduale aumento e una successiva fase critica concentrata nel decennio 2030–2040. [12]

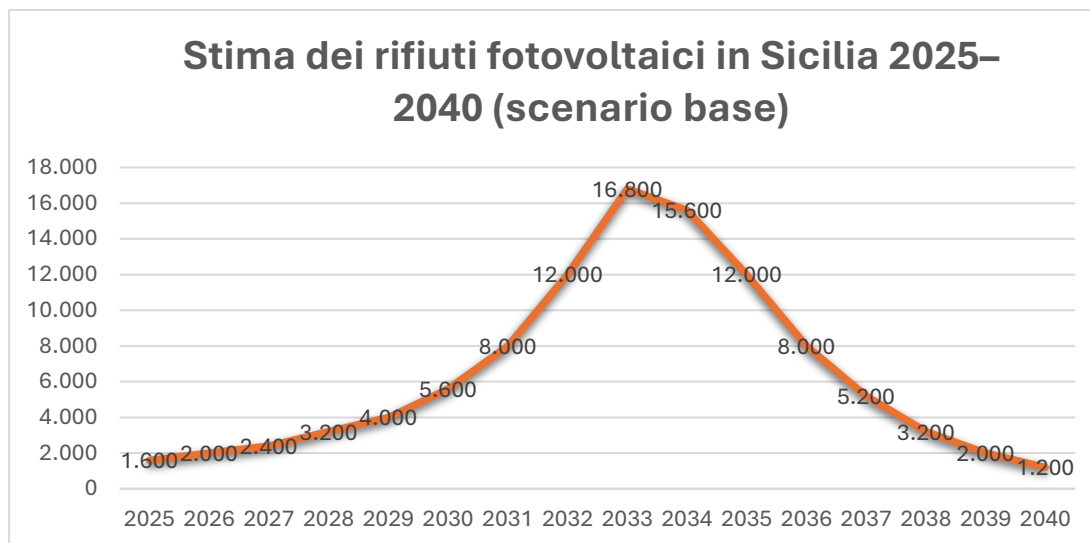


Grafico 1: Andamento delle quantità annue di moduli FV a fine vita nello scenario base, con picco nel 2033 pari a circa 16.800 tonnellate.

Nello **scenario base 2025–2040**, i risultati indicano per la Sicilia un totale di circa **97.200 tonnellate** di rifiuti fotovoltaici generati, con un picco di **16.800 tonnellate/anno nel 2033**, seguito da valori ancora molto elevati nel 2034 (15.600 t) e nel 2035 (12.000 t). Il sotto-intervallo **2031–2036** costituisce la vera “finestra critica” per il sistema regionale, con circa **73.600 tonnellate complessive** da gestire in soli sei anni, equivalenti a **circa 3,7 milioni di pannelli**, assumendo un peso medio di 20 kg per modulo. Una semplice lettura per punti focali rende evidente la portata del fenomeno: nel 2030 le dismissioni annue stimate sono pari a circa **5.600 tonnellate**, che salgono a **8.000 tonnellate** nel 2031, **12.000 tonnellate** nel 2032, fino al massimo di **16.800 tonnellate nel 2033** e a un livello ancora critico di **15.600 tonnellate** nel 2034. [12] Nei soli anni 2033–2034, la Sicilia si troverebbe quindi a dover gestire da sola oltre **32.000 tonnellate** di rifiuti fotovoltaici, concentrati in un arco temporale brevissimo.

A titolo di confronto, il più recente rapporto RAEE per la Sicilia riporta, per il 2024, un totale di poco superiore a **23.000 tonnellate** di RAEE complessivi raccolti (tutte le categorie), con una media pro capite di circa 4,9 kg/abitante. [13] Ciò significa che, nello scenario di picco, il solo flusso di pannelli fotovoltaici a fine vita previsto per il **2033** sarebbe paragonabile — se non superiore — all’attuale volume complessivo di

RAEE gestiti in un anno sull'intero territorio regionale. Questo scarto tra flussi attuali e flussi previsti rende evidente come il fine vita dei pannelli FV rischi di costituire, per la Sicilia, una vera e propria “bomba RAEE-PV” se affrontato con le sole infrastrutture e logiche gestionali oggi esistenti.

Le proiezioni sviluppate consentono inoltre di esplorare scenari di sensibilità. Uno **scenario conservativo**, che ipotizza una vita media più lunga dei pannelli (25 anni anziché 22,5), sposta il picco delle dismissioni verso la fine degli anni 2030 (2036-2037) e ne riduce parzialmente l'ampiezza, pur mantenendo volumi annui nell'ordine delle **14–15 mila tonnellate**. Al contrario, uno **scenario “aggressivo” di crescita**, che assume tassi di incremento della capacità installata intorno al 5% annuo nel periodo 2026-2030, determina un leggero aumento delle dismissioni negli anni 2035-2040 e consolida un plateau di rifiuti elevati per un periodo più lungo. ^[12] In entrambi i casi, le soglie di economicità tipiche per un impianto di riciclo specializzato (7.000–20.000 tonnellate/anno) risulterebbero ampiamente superate, confermando la **massa critica** sufficiente a giustificare una filiera di trattamento dedicata a scala regionale.

Il problema, tuttavia, non è solo quantitativo ma anche qualitativo. La composizione dei moduli in silicio cristallino mostra come, a fronte di una prevalenza in massa di vetro e alluminio, il valore economico potenziale sia fortemente concentrato in frazioni minoritarie come silicio ad alta purezza, rame e soprattutto argento, dando luogo al cosiddetto **paradosso massa/valore**. Le proiezioni per la Sicilia indicano, ad esempio, che nel solo anno di picco 2033 potrebbero essere conferite a fine vita oltre **10.900 tonnellate di vetro** e **3.200 tonnellate di alluminio**, insieme a centinaia di tonnellate di silicio e a quantitativi più ridotti ma economicamente significativi di metalli preziosi. In assenza di una filiera di riciclo progettata in ottica di eco-design e orientata al recupero di valore, esiste il rischio concreto che una quota importante di queste risorse venga gestita attraverso percorsi lineari (esportazione verso impianti extra-regionali, trattamenti a basso valore aggiunto), con perdita di opportunità economiche, aggravio di costi logistici e incremento dell'impronta ambientale associata alla gestione del fine vita. È precisamente su questa combinazione di volumi attesi, composizione materiale e limiti dell'assetto attuale che si innesta il problema di ricerca affrontato dalla tesi nei capitoli successivi.

1.4 Inquadramento normativo RAEE per i pannelli fotovoltaici

La gestione del fine vita dei pannelli fotovoltaici si inserisce nel quadro europeo sui Rifiuti da Apparecchiature Elettriche ed Elettroniche (RAEE), definito dalla Direttiva 2012/19/UE (Direttiva WEEE). La direttiva persegue tre obiettivi principali: (i) prevenire la produzione di rifiuti elettronici tramite una progettazione più sostenibile delle apparecchiature, (ii) promuovere il riutilizzo, il riciclaggio e il recupero di materia; (iii) migliorare le prestazioni ambientali degli operatori lungo l'intero ciclo di vita dei prodotti. Il suo pilastro è il principio di **Responsabilità Estesa del Produttore** (Extended Producer Responsibility, EPR), che attribuisce a chi immette AEE sul mercato la responsabilità organizzativa e finanziaria della gestione dei rifiuti che ne derivano, internalizzando i costi ambientali nel prezzo del prodotto, come previsto dalla *Direttiva 2012/19/UE sui rifiuti di apparecchiature elettriche ed elettroniche (RAEE)*.

Con la rifusione del 2012, la Direttiva RAEE ha introdotto l'**ambito di applicazione aperto (open scope)**, divenuto pienamente operativo dal 15 agosto 2018. In questo contesto, tutte le AEE (Apparecchiature elettriche ed elettroniche) sono incluse nel campo di applicazione salvo esplicite esclusioni e i pannelli fotovoltaici sono ricondotti in modo inequivocabile al perimetro della normativa. Ne deriva una riclassificazione giuridica sostanziale: l'impianto fotovoltaico è considerato come aggregato di numerose AEE, ciascuna con un proprio percorso di fine vita soggetto a regole e obblighi specifici. La necessità di coprire i futuri costi di smantellamento e riciclo entra così nella struttura economico-finanziaria dei progetti FV sin dalla fase di investimento.

In Italia, la Direttiva 2012/19/UE è recepita dal **D.Lgs. 14 marzo 2014, n. 49**, che rappresenta il riferimento normativo principale per la gestione dei RAEE, inclusi i moduli fotovoltaici. Il decreto definisce gli attori della filiera (produttori, distributori/installatori, detentori), la terminologia di base (AEE, RAEE, centri di raccolta, sistemi collettivi) e la relativa catena di responsabilità. Dal punto di vista classificatorio, i pannelli FV sono inquadrati nel raggruppamento 4 (apparecchiature di grandi dimensioni) e, nello specifico, nella sottocategoria 4b dell'Allegato IV, venendo così formalmente assimilati ai RAEE e sottoposti a tutte le disposizioni del *Decreto Legislativo 14 marzo 2014, n. 49*. Su questa base si innesta la distinzione, centrale per il fotovoltaico, tra

RAEE **provenienti dai nuclei domestici** e RAEE **professionali**, da cui discendono regimi diversi di finanziamento, raccolta e trattamento.

Per i moduli fotovoltaici tale distinzione è resa operativa attraverso la soglia di **10 kW** di potenza nominale dell'impianto. Sono considerati RAEE domestici i rifiuti derivanti da impianti < 10 kWp, tipicamente residenziali, mentre rientrano nel regime professionale i rifiuti generati da impianti ≥ 10 kWp, ossia installazioni commerciali, industriali e parchi utility-scale. L'uso di un parametro tecnico come la potenza semplifica l'applicazione del criterio giuridico dell'origine del rifiuto (domestica vs non domestica), ma produce anche alcune aree grigie, infatti, piccoli esercizi commerciali sotto i 10 kW trattati come domestici, grandi condomini residenziali sopra i 10 kW trattati come professionali. Questa struttura duale si riflette in due distinti **modelli di finanziamento del fine vita**. Per il segmento **domestico** (< 10 kW), il D.Lgs. 49/2014 adotta il modello del "Contributo RAEE visibile": all'atto della vendita viene applicato un eco-contributo esplicitato in fattura, che il produttore versa al proprio sistema collettivo; il fondo mutualistico così creato finanzia, in logica "pay-as-you-go", i costi di raccolta, trasporto e trattamento dei RAEE domestici, indipendentemente dal marchio. Per il segmento **professionale** (≥ 10 kW), il decreto prevede invece un **sistema di garanzia finanziaria**: per ogni pannello professionale immesso sul mercato il produttore conferisce una garanzia (fideiussione, polizza, fondo) a un trust di scopo gestito dal Gestore dei Servizi Energetici (GSE); al momento del fine vita, i sistemi collettivi organizzano le operazioni di ritiro e riciclo e vengono rimborsati attingendo a tali garanzie. Questo meccanismo è progettato per garantire la copertura economica dello smaltimento anche in presenza di produttori che, nell'arco di 20–25 anni, potrebbero uscire dal mercato, evitando la formazione di "pannelli orfani". [14]

Sul piano operativo, il decreto distingue i **flussi di raccolta e trattamento** dei RAEE fotovoltaici domestici e professionali. Nel caso domestico, il detentore può conferire i moduli a fine vita presso i **Centri di Raccolta comunali** oppure servirsi del **ritiro "uno contro uno"** offerto dal distributore/ installatore al momento della sostituzione, con costi già coperti dal contributo RAEE; i sistemi collettivi organizzano poi il trasporto verso impianti autorizzati per il recupero di vetro, alluminio, silicio e metalli. Nel caso professionale, il detentore di un impianto ≥ 10 kW deve contattare direttamente il produttore o il relativo sistema collettivo, che organizza un flusso B2B di

smontaggio, imballaggio, trasporto e trattamento, finanziato dalle garanzie accantonate nel trust GSE. Una disciplina specifica è prevista per i **RAEE storici professionali** (moduli immessi sul mercato prima del 12 aprile 2014), per i quali l'onere economico resta in capo al detentore salvo sostituzione con nuovi moduli.

L'effettività del sistema dipende da solidi meccanismi di controllo e sanzione. Il **Registro Nazionale dei Produttori di AEE** costituisce lo strumento cardine per il monitoraggio della conformità: l'iscrizione è condizione per operare sul mercato e le dichiarazioni annuali consentono alle autorità di verificare le quantità immesse e il rispetto degli obblighi di finanziamento. La vigilanza è affidata, a livello centrale, al Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica e al Comitato di Vigilanza e Controllo, e, a livello territoriale, alle ARPA, alla Guardia di Finanza e ai corpi di polizia locale. Il Titolo VI del decreto prevede un articolato sistema di **sanzioni amministrative**, rivolto a tutti gli attori della filiera: dalla mancata iscrizione o mancata costituzione dei sistemi di finanziamento da parte dei produttori, al mancato rispetto del ritiro "uno contro uno" da parte dei distributori, fino allo smaltimento illecito dei RAEE da parte dei detentori.

Nel caso della Sicilia, questo impianto normativo nazionale si innesta su un contesto regionale caratterizzato da **criticità impiantistiche** e da una forte dipendenza dalla logistica di esportazione dei RAEE. L'aggiornamento 2024 del "Piano Regionale di Gestione dei Rifiuti" riconosce la crescita dei flussi RAEE, in particolare del raggruppamento R4 che include i pannelli fotovoltaici, ma evidenzia la presenza di un solo impianto di trattamento RAEE certificato in tutta l'isola a fronte di una rete di 353 siti di raccolta e oltre 23.000 tonnellate/anno di RAEE gestiti. [13, [15] Ne deriva un modello in cui i RAEE, inclusi i moduli FV, vengono raccolti e aggregati a livello regionale, per poi essere inviati prevalentemente via nave verso impianti di trattamento situati nel resto d'Italia, con conseguenti costi logistici elevati e una sostanziale perdita di opportunità di recupero di valore sul territorio. Questo scarto strutturale tra ambizione normativa e capacità impiantistica locale rappresenta uno dei nodi centrali che la presente tesi intende analizzare e, per quanto possibile, contribuire a colmare.

CAPITOLO 2

Quadro Normativo, Mercato e la Filiera del Fotovoltaico a fine vita

2.1 Fondamenti teorici dell'Ecodesign e Life Cycle Thinking

L'Ecodesign, o progettazione ecocompatibile, si configura oggi come l'approccio ingegneristico e metodologico dominante per la transizione sistemica da un'economia lineare a un'economia circolare. Storicamente, la gestione ambientale dei prodotti si è basata su logiche di tipo *end-of-life* (interventi a valle), concentrate sul controllo delle emissioni o sul trattamento del rifiuto solo una volta giunto a fine vita. L'Ecodesign ribalta questo paradigma, adottando un approccio preventivo basato sul *Life Cycle Thinking* (LCT). Tale approccio impone di valutare e minimizzare gli impatti ambientali (consumo di risorse, emissioni climalteranti, tossicità) lungo tutte le fasi di vita del prodotto: dall'estrazione delle materie prime, alla manifattura, alla logistica, fino alla fase d'uso e al fine vita. La rilevanza strategica di questa prospettiva è confermata dalle stime della Commissione Europea, secondo le quali circa l'80% degli impatti ambientali di un bene è determinato irreversibilmente dalle scelte ingegneristiche e materiche effettuate proprio sul tavolo da disegno, durante la fase di progettazione [16].

Intervenire a monte diviene pertanto l'unica via per evitare che i costi ambientali si scarichino sulla collettività a valle.

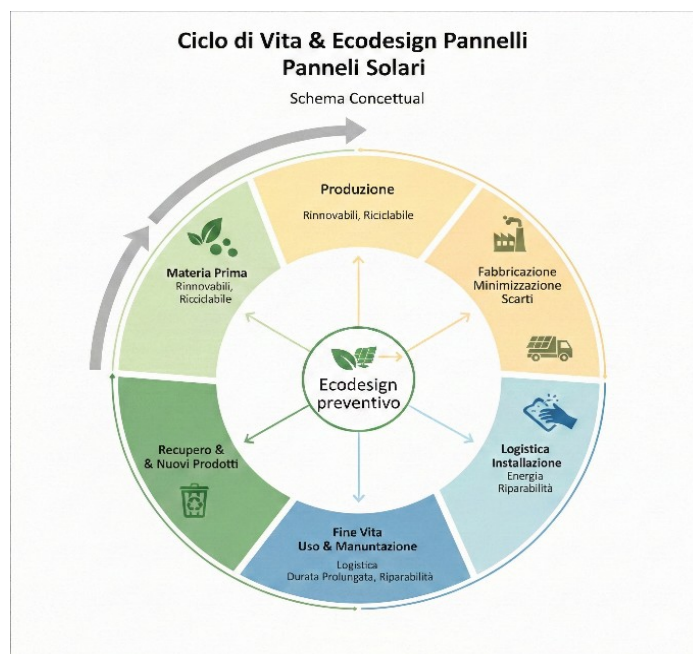


Figura 2.1 – Schema concettuale delle fasi del Life Cycle Thinking (LCT) e dell'approccio preventivo dell'Ecodesign.
Fonte: Rielaborazione personale.

Dal punto di vista normativo, il concetto di progettazione ecocompatibile ha subito una profonda evoluzione nell'ultimo decennio. La legislazione europea originaria, incardinata nella Direttiva 2009/125/CE (nota come Direttiva ErP - *Energy-related Products*), era focalizzata quasi esclusivamente sul miglioramento dell'efficienza energetica dei prodotti durante la loro fase di utilizzo, trascurando la gestione materica del fine vita. Oggi, sotto la spinta del *Circular Economy Action Plan* [17], l'Unione Europea ha ampliato radicalmente questo perimetro. Con l'introduzione del Regolamento ***Ecodesign per Prodotti Sostenibili*** (ESPR), i requisiti progettuali non si limitano più al consumo energetico, ma investono direttamente la materialità del prodotto. I nuovi parametri normativi impongono requisiti stringenti di durabilità, riparabilità, aggiornabilità e, soprattutto, riciclabilità, ponendo un freno sistemico all'obsolescenza programmata e introducendo l'obbligo di includere quote minime di materie prime seconde (contenuto riciclato) nei nuovi prodotti.

All'interno dell'ampio spettro dell'Ecodesign, una branca ingegneristica di fondamentale importanza per la chiusura dei cicli produttivi è il *Design for Disassembly* (DfD), ovvero la progettazione per il disassemblaggio. Affinché un prodotto possa essere riciclato mantenendo un elevato valore aggiunto (evitando il *downcycling*), è necessario che le sue componenti possano essere separate in modo netto, rapido ed economicamente sostenibile. Le strategie di DfD prevedono l'utilizzo di giunzioni meccaniche reversibili (incastri, viti) in sostituzione di saldature permanenti o collanti chimici, la minimizzazione del numero di materiali diversi impiegati e la chiara marcatura dei polimeri. Quando queste linee guida vengono ignorate a favore di strutture monolitiche termosaldate, finalizzate esclusivamente a massimizzare la resistenza agli urti o agli agenti atmosferici, il processo di riciclo si scontra con barriere tecnologiche ed energetiche spesso insormontabili, trasformando il recupero selettivo in un'operazione antieconomica.

2.2 L'ecodesign applicato al fotovoltaico

L'ecodesign rappresenta il fondamento teorico e operativo dell'economia circolare applicata al settore fotovoltaico, agendo come catalizzatore per la transizione dal modello economico lineare — basato sul paradigma “*take-make-dispose*” — a un sistema rigenerativo di tipo *cradle-to-cradle*. In questa prospettiva, il modulo fotovoltaico non è più considerato un prodotto a fine vita destinato allo smaltimento, ma viene ridefinito come un *serbatoio antropogenico progettato*: un'entità ingegneristica complessa in cui la disposizione dei materiali è pensata sin dalla fase di design per massimizzare la separazione selettiva. Tale approccio eleva i rifiuti fotovoltaici al rango di “*miniere urbane*” strategiche, capaci di offrire stock stabili e localizzati di materie prime critiche e di base, quali vetro temprato (65–75% in massa), alluminio anodizzato (10–18%), silicio policristallino (2–5%), rame (~1%) e argento (0,05–0,07%).

L'integrazione dell'ecodesign con la metodologia *Life Cycle Assessment* (LCA) risulta strutturale e non meramente accessoria. L'obiettivo è minimizzare l'impronta ambientale complessiva passando da un'analisi *cradle-to-grave* (dalla culla alla tomba), che spesso termina con il *downcycling* inerte in discarica, a un modello a ciclo chiuso dove i materiali recuperati mantengono proprietà chimico-fisiche equivalenti alle materie

vergini. Per i moduli in silicio cristallino (c-Si), ciò richiede una revisione della stratigrafia del modulo per superare il cosiddetto "*paradosso della durabilità*": se da un lato l'uso di incapsulanti termoindurenti come l'Etilene Vinil Acetato (EVA) garantisce una vita utile di oltre 25 anni proteggendo le celle dagli agenti atmosferici, dall'altro la sua natura chimica rende estremamente complesso il disassemblaggio a fine vita, richiedendo processi termici energivori (400–500°C) o chimici potenzialmente impattanti.

Sotto il profilo normativo, questa evoluzione è oggi sancita dal Regolamento Ecodesign per Prodotti Sostenibili (ESPR, Reg. UE 2024/1781), che introduce criteri stringenti di riparabilità, riutilizzabilità e riciclabilità per i prodotti immessi nel mercato unico. Un pilastro di questa normativa è il *Digital Product Passport* (DPP) [18], uno strumento di tracciabilità digitale che accompagnerà ogni modulo, fornendo informazioni dettagliate sulla composizione chimica, sulla presenza di sostanze pericolose e sulla purezza dei materiali recuperabili. Il DPP trasforma l'ecodesign da scelta volontaria a requisito imprescindibile per la commercializzazione, allineando gli interessi dei produttori con quelli degli impianti di riciclo.

Un ulteriore elemento di analisi riguarda il paradosso massa-valore, che definisce la sostenibilità economica della filiera. Mentre il vetro e l'alluminio dominano la composizione ponderale del modulo, l'argento — pur presente in tracce — può rappresentare fino al 50% del valore economico intrinseco del rifiuto. I target attuali della Direttiva RAEE, focalizzati quasi esclusivamente sul recupero in massa (>85%), rischiano di incentivare processi di frantumazione meccanica grossolana che portano alla perdita dei metalli preziosi e del silicio di grado solare. Al contrario, un ecodesign evoluto, orientato al *Design for Urban Mining*, mira a rendere economicamente vantaggiosi i processi di *Leaching* selettivo e di recupero del silicio ad alta purezza, riducendo la dipendenza dell'Europa dalle importazioni di materie prime critiche.

In sintesi, l'ecodesign non agisce solo sul singolo artefatto, ma abilita l'intera rete circolare regionale. Per una regione come la Sicilia, caratterizzata da una logistica insulare complessa e da flussi di rifiuti fotovoltaici che raggiungeranno le 16.800 tonnellate annue nel 2033, l'implementazione di questi principi rappresenta l'unica via per trasformare quello che oggi è percepito come un potenziale "tsunami di rifiuti" in una

risorsa industriale autonoma, capace di generare valore locale e minimizzare i costi di trasporto verso impianti extra-regionali.

2.3 I limiti progettuali e gestionali del modello attuale

La configurazione architettonica del modulo fotovoltaico in silicio cristallino (c-Si), che domina circa il 95% del mercato globale installato [7], risponde storicamente a un requisito primario di affidabilità estrema. La progettazione tradizionale è stata finalizzata a garantire prestazioni elettriche costanti per un arco temporale superiore ai 25-30 anni, proteggendo le fragili celle di silicio da sollecitazioni meccaniche (carico neve, vento), chimiche (corrosione salina) e atmosferiche (umidità, shock termici). Questa necessità ha portato al consolidamento di un sistema multistrato altamente integrato e "sigillato", una struttura a *sandwich* che rappresenta oggi il principale paradosso dell'industria solare: ciò che rende il pannello un'eccellente tecnologia energetica è esattamente ciò che lo rende un rifiuto complesso.

La stratigrafia standard prevede una sovrapposizione di materiali con proprietà fisico-chimiche profondamente diverse: un vetro frontale temperato, due strati di incapsulante polimerico, la stringa di celle solari interconnesse tramite *busbar* in rame e argento, e infine un foglio di protezione posteriore (*backsheet*) in materiale plastico. Questa struttura è resa monolitica dal processo di laminazione, durante il quale l'incapsulante — tipicamente l'Etilene Vinil Acetato (EVA) — fonde e reticola, creando un legame chimico-fisico permanente tra i vari strati.

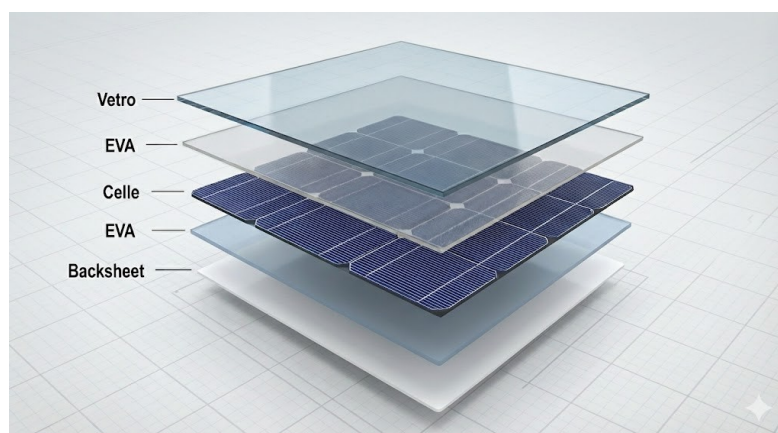


Figura 2.2 – Stratigrafia standard di un modulo fotovoltaico in silicio cristallino (c-Si) laminato. Fonte: Ri elaborazione su dati IRENA (2016).

Il fulcro della criticità risiede proprio nella natura termoindurente dell'EVA. Durante la reticolazione, l'EVA forma legami trasversali che lo rendono infusibile e insolubile. Se da un lato questa iniezione di materiale gommoso è essenziale per la durabilità, dall'altro trasforma il modulo in un corpo unico in cui i componenti non sono più separabili meccanicamente senza subire rotture o contaminazioni incrociate. La separazione selettiva viene ostacolata dalla forte adesione dell'EVA al vetro e alle celle. Di conseguenza, i processi di riciclo convenzionali si limitano spesso a una frantumazione meccanica grossolana, che produce un *mix* di materiali destinato al *downcycling* in settori a basso valore aggiunto.

Oltre alla complessità materica, emerge un limite legato alla gestione del fine vita e alla logistica di filiera. Il modello attuale soffre di una mancanza di standardizzazione nel design dei moduli tra i diversi produttori, il che rende difficile l'automazione dei processi di disassemblaggio. In contesti regionali specifici come quello della Sicilia, questa problematica è amplificata da una rete impiantistica ancora tarata sulla gestione dei RAEE domestici generici. La logistica insulare impone costi di trasporto elevati che, uniti alla difficoltà tecnica di separazione dei componenti, rendono spesso il riciclo di alta qualità economicamente meno attraente rispetto allo smaltimento.

Questo scenario evidenzia una forma di "obsolescenza progettuale" dal punto di vista della circolarità: il pannello è stato progettato per la fase di utilizzo (*use phase*), ma non per la fase di recupero (*end-of-life*). Superare questo limite richiede una transizione verso architetture modulari e l'impiego di incapsulanti alternativi, come i polimeri termoplastici (es. Poliolefine o POE), che consentirebbero una delaminazione termica a temperature inferiori.

2.4 Il gap di circolarità: il paradosso massa-valore

Per comprendere le inefficienze dell'attuale sistema di gestione del fine vita, è indispensabile disaggregare il modulo fotovoltaico nei suoi costituenti elementari, analizzandoli non solo sotto il profilo ponderale, ma soprattutto sotto quello del valore economico e strategico. L'analisi compositiva di un tipico pannello in silicio cristallino

(c-Si) rivela una forte sproporzione tra i materiali con funzione strutturale-protettiva e quelli con funzione fotovoltaica attiva.

COMPOSIZIONE MATERICA PV (C-SI)

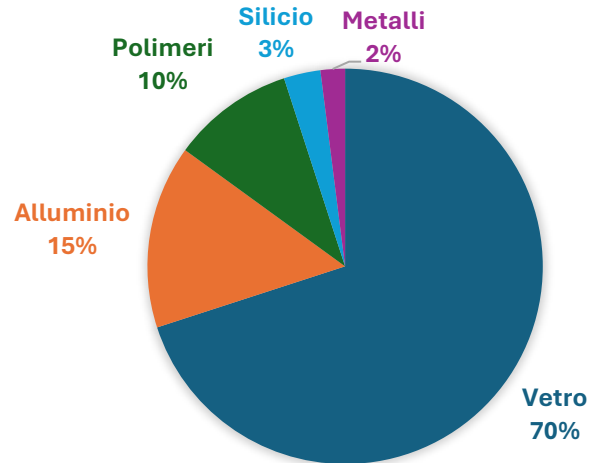


Figura 2.3 – Composizione ponderale media di un modulo fotovoltaico c-Si. Fonte: Elaborazione personale su dati di letteratura.

Come evidenziato dai dati consolidati in letteratura [19], la massa di un modulo standard è ampiamente dominata da due materiali a basso valore aggiunto unitario: il vetro temprato, che rappresenta tra il 65% e il 75% del peso complessivo, e l'alluminio anodizzato, utilizzato per la cornice esterna, che incide per il 10-18% in massa. A queste frazioni macroscopiche seguono i materiali a maggior contenuto tecnologico: il silicio, che costituisce il cuore della cella ma rappresenta solo il 2-5% del peso; il rame, presente nei cavi di interconnessione per circa l'1%; e infine l'argento, utilizzato per la metallizzazione frontale delle celle, la cui presenza è stimata in tracce microscopiche comprese tra lo 0,05% e lo 0,07% del peso totale del modulo [20]. Questa asimmetria compositiva genera quello che in letteratura viene definito il "paradosso massa-valore". Sebbene il vetro e l'alluminio rappresentino insieme oltre l'80% della massa fisica del rifiuto, il loro contributo alla sostenibilità economica complessiva del processo di riciclo risulta minoritario. Al contrario, l'argento, pur essendo

quantitativamente marginale, rappresenta la componente economicamente più critica. Secondo gli studi di settore, l'argento può generare dal 14% fino al 50% del valore materiale totale recuperabile da un modulo a fine vita, a seconda delle fluttuazioni di mercato e della tecnologia di estrazione impiegata.

Tabella 2.1 – Confronto tra composizione ponderale e stima del valore economico delle materie prime in un modulo c-Si standard.

MATERIALE	FUNZIONE NEL MODULO	QUOTA IN MASSA (% SUL PESO TOTALE)	IMPATTO STIMATO SUL VALORE ECONOMICO (% SUL TOTALE RECUPERABILE)*
Vetro Temprato	Protezione frontale, trasmissione luminosa	65% – 75%	< 5% (Basso valore, alto rischio di <i>downcycling</i>)
Alluminio	Cornice strutturale	10% – 18%	15% – 25%
Silicio (c-Si)	Wafer semiconduttore (Cella)	2% – 5%	10% – 20% (Fortemente dipendente dal grado di purezza >5N)
Rame	Ribbon di interconnessione e cavi	~ 1%	5% – 10%
Argento	Metallizzazione frontale (Finger/Busbar)	0,05% – 0,07%	14% – 50%
Polimeri (EVA, Backsheet)	Incapsulamento e isolamento elettrico	7% – 10%	Valore nullo o negativo (Costo di smaltimento/termovalorizzazione)

***Nota:** Le stime percentuali sul valore economico sono soggette a fluttuazioni in base alle quotazioni di mercato delle Materie Prime Seconde (riferimento benchmark novembre 2025: Ag ~48,50 \$/oz; Al ~2.850 \$/t; Si grado solare ~6.320 \$/t) e all'efficienza.

Il paradosso assume contorni ancora più netti se analizzato alla luce delle recenti quotazioni di mercato delle Materie Prime Seconde (MPS). Prendendo a riferimento le quotazioni aggiornate, si nota una marcata polarizzazione: mentre l'alluminio e il silicio vantano valori importanti ma stabili, l'argento vanta valori esponenzialmente superiori. Diventa dunque palese che la redditività di un impianto di riciclo non dipende dai volumi di materiale inerte trattato, bensì dalla sua capacità di intercettare e raffinare le frazioni nobili.

Questo divario espone una profonda criticità del quadro normativo vigente, in particolare per quanto riguarda la Direttiva Europea sui RAEE (2012/19/UE) e il suo

recepimento italiano (D.Lgs. 49/2014). La normativa fissa per i moduli fotovoltaici obiettivi di recupero basati rigorosamente su soglie ponderali, attualmente stabilite all'85% in peso (di cui l'80% preparato per il riutilizzo o riciclato). Risulta evidente come un operatore possa raggiungere — e persino superare — la piena conformità normativa limitandosi a smontare la cornice in alluminio e a frantumare il vetro. Tuttavia, questo approccio porta spesso al *downcycling* del vetro e all'irrimediabile dispersione di silicio e argento, persi all'interno delle miscele plastiche tritate.

Un simile approccio *compliance-driven* (guidato unicamente dal rispetto formale della norma) soddisfa i requisiti di massa ma distrugge il valore economico e strategico del rifiuto, contravvenendo ai principi di base dell'economia circolare e alle recenti direttive sulle Materie Prime Critiche (CRMA). Il gap di circolarità si manifesta quindi come una tensione irrisolta tra i "target di massa" normativi e i "target di valore" industriali. Colmare questo divario richiede l'abbandono del semplice tritramento meccanico in favore di architetture di recupero ibride ad alta precisione.

2.5 Dall'eco-design di sistema alla necessità di un benchmark tecnologico

L'analisi condotta nei paragrafi precedenti fa emergere una chiara dicotomia tra la mera conformità normativa e la reale circolarità dei materiali. I processi di riciclo puramente meccanici, attualmente dominanti su scala industriale, sono ottimizzati per soddisfare gli obblighi quantitativi della Direttiva RAEE attraverso il recupero massivo di vetro e alluminio. Tuttavia, essi si rivelano strutturalmente inadeguati rispetto ai requisiti qualitativi emergenti imposti dal nuovo paradigma europeo sull'eco-design, formalizzato nel Regolamento ESPR (Reg. UE 2024/1781). Il passaggio da una logica di smaltimento a un vero e proprio *Design for Circularity* richiede un cambio di prospettiva: dall'eco-design del singolo prodotto all'eco-design di sistema. Il nuovo quadro normativo, supportato dall'introduzione del Digital Product Passport (DPP) [18], non si limiterà a richiedere che un pannello sia "riciclabile", ma imporrà la tracciabilità dei flussi di materia e, in prospettiva, quote minime obbligatorie di contenuto riciclato ad alta purezza all'interno dei nuovi moduli.

Per risolvere il "paradosso massa-valore" analizzato in precedenza e chiudere virtuosamente il ciclo produttivo, risulta indispensabile il superamento delle tecnologie convenzionali in favore di catene di trattamento ibride. Solo la combinazione sinergica di processi meccanici (per la rimozione della cornice e dei cavi), termici (per la pirolisi o delaminazione della matrice polimerica in EVA) e chimico-idrometallurgici (per la lisciviazione e raffinazione dei metalli) permette di raggiungere i gradi di purezza necessari per il rientro delle Materie Prime Seconde (MPS) nel ciclo solare.

Alla luce di queste premesse, emerge la necessità metodologica di valutare le opzioni impiantistiche disponibili sul mercato europeo non solo in base alla loro capacità di trattare volumi elevati, ma attraverso un benchmark tecnologico multidimensionale. Nel Capitolo 3, le principali filiere di recupero verranno pertanto confrontate e valutate rigorosamente lungo tre assi interdipendenti: efficienza di recupero, impatto ambientale (LCA) e sostenibilità economica. Un parametro, quest'ultimo, che risulta critico per contesti geograficamente e infrastrutturalmente complessi come la Sicilia, dove la creazione di filiere a chilometro zero (*urban mining* locale) rappresenta l'unica alternativa sostenibile all'esportazione costosa dei rifiuti fuori regione. Questa matrice di valutazione costituirà lo strumento analitico per determinare quale configurazione impiantistica possa guidare la transizione del settore fotovoltaico verso una piena economia circolare.

CAPITOLO 3

Tecnologie e Innovazione nel Riciclo dei Moduli Fotovoltaici

3.1 Traiettorie tecnologiche di trattamento: dal downcycling all'economia circolare

La dismissione dei moduli fotovoltaici su larga scala pone il settore industriale e i decisori politici di fronte a un bivio tecnologico e strategico: trattare il pannello solare come un rifiuto ingombrante da smaltire al minor costo possibile, oppure considerarlo un vero e proprio giacimento antropogenico da cui estrarre Materie Prime Secondarie (MPS) ad alta purezza. Attualmente, l'architettura dei processi di riciclo su scala industriale è fortemente eterogenea, ma può essere classificata all'interno di un *continuum* tecnologico che spazia dai processi primordiali di *downcycling* puro, fino alle architetture di *upcycling* avanzato finalizzate alla circolarità a ciclo chiuso (*closed-loop*).

Come analizzato nei capitoli precedenti, la difficoltà intrinseca del riciclo del fotovoltaico — in particolare per la tecnologia dominante in silicio cristallino (c-Si) — risiede nella necessità ingegneristica di separare materiali chimicamente e fisicamente incompatibili tra loro, ma intimamente legati da uno strato di incapsulante polimerico termoisolante (generalmente l'Etilene Vinil Acetato, EVA) e sigillati termicamente [1]. Per scindere questi legami complessi e recuperare le frazioni materiche, la letteratura scientifica e le applicazioni industriali classificano i processi di trattamento in tre macro-traiettorie tecnologiche fondamentali [21]:

1. **Trattamenti Meccanici e Fisici:** Si basano sulla rimozione fisica dei componenti esterni (cornice in alluminio, cavi) e sulla successiva frantumazione (*shredding*) del laminato. Sfruttano la differenza di densità, dimensione e proprietà magnetiche dei materiali triturati per tentare una separazione a valle mediante vagli vibranti, separatori ottici o a correnti indotte.
2. **Trattamenti Termici:** Prevedono l'applicazione di calore ad alte temperature (generalmente comprese tra i 400°C e i 600°C) all'interno di forni industriali per indurre la pirolisi o la degradazione termica dell'incapsulante. L'obiettivo primario è "liberare" le celle di silicio e il vetro senza doverli frantumare, rendendoli disponibili, intatti, per i successivi step di purificazione.

3. **Trattamenti Chimici e Idrometallurgici:** Consistono nell'utilizzo di solventi chimici o di miscele di acidi forti (come l'acido nitrico e l'acido fluoridrico) per la lisciviazione (*leaching*) selettiva dei metalli. Questa traiettoria rappresenta l'unica via tecnicamente percorribile per attaccare la metallizzazione delle celle e recuperare l'argento e il silicio con gradi di purezza compatibili con il grado solare (*solar-grade*).

La scelta tra queste traiettorie, o la loro eventuale combinazione in architetture ibride, determina in modo inequivocabile non solo il costo operativo del processo (OPEX), ma soprattutto la qualità dell'output materico. Oggi, la stragrande maggioranza degli impianti europei adotta quasi esclusivamente la prima traiettoria (quella meccanica). Questa scelta è spinta da una logica prettamente *compliance-driven*: la Direttiva Europea 2012/19/UE sui RAEE impone infatti un tasso di recupero minimo dell'85% in peso per i moduli fotovoltaici a fine vita. Essendo il vetro e l'alluminio sufficienti, da soli, a coprire abbondantemente l'80-85% della massa totale del pannello, l'industria del riciclo si è storicamente orientata verso processi capaci di estrarre rapidamente queste due frazioni "pesanti" a costi operativi estremamente bassi.

Questo approccio, tuttavia, ignora del tutto il recupero delle frazioni "leggere" ma di altissimo valore strategico ed economico, come il silicio, il rame e l'argento. L'approccio massivo trasforma così il fine vita in un classico caso di *downcycling*: i materiali recuperati subiscono un declassamento qualitativo irreversibile e vengono assorbiti da industrie a minor valore aggiunto (ad esempio, il vetro fotovoltaico viene declassato e impiegato come inerte per conglomerati bituminosi o per la produzione di lana di roccia) [22].

La vera transizione verso l'economia circolare richiede, al contrario, un salto di paradigma. L'obiettivo di lungo periodo non può limitarsi alla semplice "deviazione dalla discarica" (*landfill diversion*), ma deve puntare al recupero funzionale: reinserire l'argento, l'alluminio e il silicio all'interno della medesima filiera di produzione di nuovi moduli solari. Per raggiungere questo obiettivo di *closed-loop*, il trattamento meccanico risulta strutturalmente inadeguato e deve necessariamente cedere il passo, o integrarsi sinergicamente, con i processi termici e chimici di nuova generazione.

3.2 Il trattamento meccanico convenzionale e i suoi limiti strutturali

Il trattamento puramente meccanico rappresenta, ad oggi, lo standard industriale dominante a livello globale per la gestione dei moduli fotovoltaici a fine vita. Sotto il profilo impiantistico, si tratta di un processo derivato e mutuato direttamente dall'industria del riciclo del vetro e dei RAEE generici (come gli elettrodomestici bianchi e bruni), riadattato in minima parte per accogliere le dimensioni e le geometrie dei pannelli solari.

Il flusso di processo convenzionale (*standard mechanical recycling route*) si articola tipicamente in due fasi distinte e consequenziali: una prima fase di disassemblaggio preliminare (che può essere manuale o semi-automatizzata) e una seconda fase di triturazione e vagliatura intensiva.

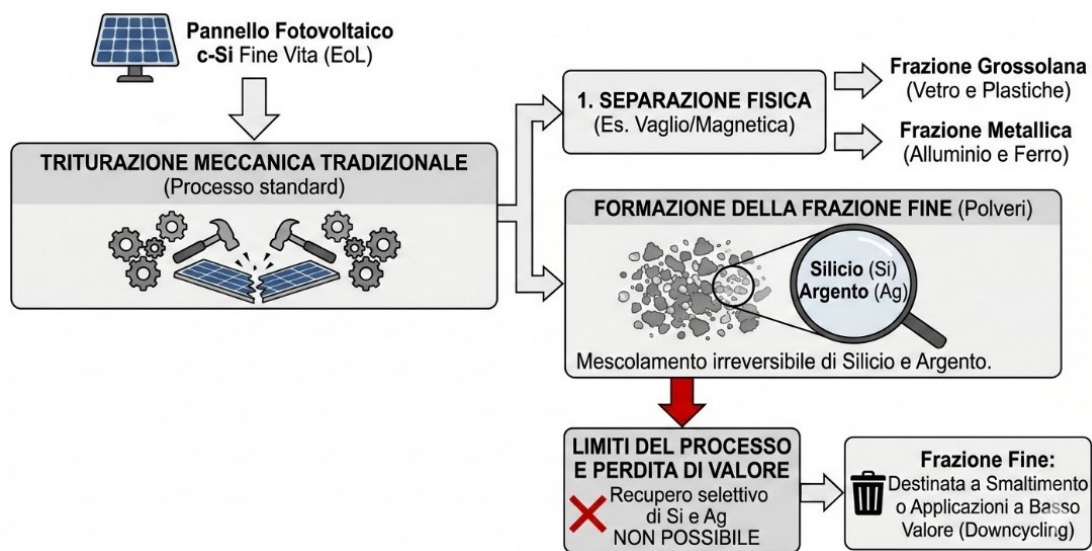
Il disassemblaggio preliminare (Pre-trattamento) La primissima operazione effettuata all'ingresso dell'impianto consiste nella rimozione della cornice in alluminio anodizzato (che garantisce la rigidità strutturale del pannello) e della *Junction Box* (la scatola di giunzione elettrica situata sul retro, da cui fuoriescono i cavi in rame per l'interconnessione). Questa fase è, paradossalmente, la più redditizia, efficiente e meno problematica dell'intero ciclo convenzionale. Rimuovendo i sigillanti siliconici presenti sui bordi, è possibile separare i profili in alluminio mantenendo un grado di purezza prossimo al 100%, rendendoli immediatamente pronti per essere reimmessi nel circuito delle fonderie secondarie. Allo stesso modo, i cavi di rame vengono tranciati e avviati alle filiere già ampiamente consolidate per il recupero dei metalli non ferrosi.

Alla fine di questo primo passaggio, l'impianto ha già "messo in sicurezza" circa il 12-15% del peso complessivo del pannello e incamerato una buona parte del suo valore commerciale a facile accessibilità. Ciò che rimane da processare, tuttavia, è il cuore problematico del rifiuto: il laminato nudo. Si tratta di un "sandwich" inseparabile composto dal vetro frontale temperato, dai due strati di incapsulante polimerico (EVA), dalla matrice di celle di silicio metallizzate in argento e dal foglio di protezione posteriore (*backsheet*), realizzato prevalentemente in polimeri fluorurati o poliestere.

Non potendo separare manualmente gli strati sigillati e incollati dalla resina reticolata dell'EVA, il trattamento convenzionale ricorre all'azione meccanica distruttiva. Il

laminato nudo viene immesso all'interno di potenti mulini a martelli, triturator bi-albero (*shredders*) o frantumatori a mascelle, che lo riducono in frammenti di dimensioni variabili, comprese tra pochi millimetri e un paio di centimetri. Successivamente, questo "frantumato misto" viene fatto passare attraverso una complessa linea di setacci vibranti (vaghi), classificatori ad aria e separatori a correnti parassite (*Eddy Current Separators*), nel tentativo di dividere il vetro dai frammenti plastici e metallici sulla base della loro granulometria e densità [21] (cfr. **Figura 3.1**).

Figura 3.1 – Diagramma di flusso del trattamento meccanico convenzionale e dispersione delle Materie Prime Critiche.



Fonte: Elaborazione personale dello studente basata su report IRENA [1] e letteratura accademica [23].

È esattamente all'interno dei mulini di frantumazione che si manifestano i limiti invalicabili del processo meccanico, limiti direttamente riconducibili alle specifiche proprietà fisico-chimiche dell'incapsulante. Essendo un polimero elastomerico ad altissima tenacia, l'EVA non si frantuma in modo netto sotto l'azione degli urti, ma tende a deformarsi plasticamente, ad allungarsi e a strapparsi. Durante la triturazione intensiva, le schegge di vetro frontale rimangono tenacemente ancorate ai frammenti di EVA; contestualmente, la matrice in silicio delle celle solari (che è un materiale estremamente fragile e friabile) e i sottilissimi filamenti d'argento della metallizzazione

vengono letteralmente polverizzati, incastrandosi inesorabilmente nella matrice gommosa del polimero [23].

Il risultato finale e ineluttabile di questo processo è una grave contaminazione incrociata (*cross-contamination*). L'output principale dell'impianto è costituito da frammenti di vetro sporchi di residui plastici (EVA) e micro-frammenti metallici. A causa di queste impurità — generalmente il vetro recuperato tramite *shredding* non supera il 90-95% di purezza, contro il 99,99% richiesto per il riutilizzo come vetro *float* fotovoltaico [19] — il materiale non può essere rifuso per creare nuovi pannelli. Questo flusso subisce pertanto un *downcycling* estremo: viene ceduto a prezzi irrisori, o in molti casi l'impianto stesso deve sostenerne i costi di trasporto per cederlo gratuitamente come additivo per asfalti, materiale isolante o inerte per l'edilizia civile.

Ancora più drastico e dispersivo è il destino delle materie prime critiche. Il silicio di grado solare (il cui processo di purificazione originaria ha richiesto enormi quantità di energia) e l'argento vengono ridotti in polveri impalpabili miste a plastica, finendo per comporre quella che in gergo tecnico viene definita la "frazione fine" o scarto di lavorazione. Questa frazione mista pulverulenta, essendo impossibile da separare per via puramente meccanica e contenendo spesso polimeri alogenati derivanti dalla frantumazione del *backsheets*, viene generalmente conferita in discarica o, nel migliore dei casi, avviata a termovalorizzazione (incenerimento con recupero di energia). In entrambi i casi, le risorse più preziose e strategiche del pannello fotovoltaico vengono bruciate o disperse definitivamente nell'ambiente [23].

In conclusione, il benchmark del trattamento meccanico convenzionale dimostra empiricamente che il perseguimento acritico dei soli "target di peso" normativi genera un'illusione di circolarità. Se da un lato un operatore dotato di un tritatore industriale può legittimamente certificare il recupero dell'85% in massa del pannello (conformandosi in modo ineccepibile alla normativa RAEE), dall'altro lato il medesimo processo sta sistematicamente polverizzando e disperdendo oltre il 50% del valore economico intrinseco del rifiuto e il 100% delle sue Materie Prime Critiche. Il superamento di questa inefficienza strutturale rende pertanto indispensabile e urgente l'adozione su larga scala delle traiettorie tecnologiche avanzate descritte nei paragrafi successivi.

3.3 I processi avanzati: trattamenti termici per la delaminazione

Per superare la strutturale inefficienza della triturazione meccanica ed evitare la polverizzazione dei materiali pregiati, l'ingegneria del riciclo ha sviluppato architetture di processo focalizzate sull'eliminazione selettiva del legante polimerico (l'incapsulante in EVA). Il trattamento termico rappresenta il primo step fondamentale in questa traiettoria di *upcycling*.

Questa tecnologia sfrutta i principi della termodinamica per indurre la degradazione chimico-fisica dei polimeri organici senza intaccare le strutture inorganiche del pannello, preservando in particolare l'integrità del vetro e dei wafer di silicio. Tra i diversi approcci termici (che includono l'incenerimento tradizionale e l'ossidazione termica), il processo più promettente e diffuso nelle configurazioni industriali di eccellenza è la **pirolisi** controllata. A differenza della combustione, la pirolisi consiste nella decomposizione termochimica dei materiali organici in assenza, o in forte carenza, di ossigeno [24].

Dal punto di vista operativo, dopo la preventiva rimozione della cornice in alluminio, il laminato intero (o pre-tagliato in sezioni regolari per facilitarne la movimentazione) viene inserito all'interno di forni a muffola o forni a tunnel continui. La temperatura viene innalzata in modo rigorosamente controllato, con rampe termiche calibrate per operare in un intervallo tipicamente compreso tra i 450°C e i 600°C. A queste specifiche temperature, l'EVA e il polimero di *backsheet* raggiungono il loro punto di vaporizzazione o degradazione. I complessi legami reticolati che tenevano incollato il "sandwich" si rompono: le macromolecole plastiche si convertono in fase gassosa (gas di sintesi o *syngas*) e in una miscela di idrocarburi liquidi (oli pirolitici), lasciando come residuo solido unicamente una limitata frazione carboniosa (*char*).

Il vantaggio strategico di questa tecnologia risiede nell'eccellente qualità dell'output solido. Una volta vaporizzato l'incapsulante, il vetro frontale si stacca in modo netto e pulito per semplice gravità. Poiché non ha subito triturazione, questo vetro mantiene granulometrie ottimali ed è esente da contaminazioni plastiche, garantendo un grado di purezza compatibile (spesso superiore al 98-99%) con il reinserimento diretto nelle fonderie vetrarie per la produzione di nuovo vetro piatto. Al contempo, la matrice di

celle solari in silicio e la rete di contatti metallici in argento e rame riemergono intatte, liberate dalla morsa gommosa dell'EVA e, soprattutto, non disperse in polveri [25].

Tuttavia, l'implementazione su scala industriale del trattamento termico si scontra con due criticità di rilievo. La prima è di natura termodinamica: l'elevato fabbisogno energetico richiesto per mantenere i forni ad alte temperature impatta negativamente sull'Analisi del Ciclo di Vita (LCA) del processo e alza i costi operativi (OPEX). Negli impianti più all'avanguardia, questa criticità viene parzialmente mitigata recuperando i gas di pirolisi (*syngas*) e bruciandoli in un post-combustore per auto-sostenere termicamente il processo.

La seconda e più complessa criticità riguarda la gestione ambientale delle emissioni. Molti pannelli storici, in particolare quelli installati durante i cicli dei primi Conti Energia, utilizzano *backsheet* realizzati in polimeri fluorurati (come il Tedlar, PVF). La degradazione termica di questi polimeri alogenati rilascia gas altamente corrosivi e tossici, in particolare acido fluoridrico (HF) gassoso [24]. La presenza di questi composti impone l'installazione di complessi, ingombranti e costosi sistemi di abbattimento fumi (*scrubber* chimici a umido o a secco) per neutralizzare gli acidi e garantire la rigorosa conformità alle normative ambientali sulle emissioni in atmosfera, limitando la scalabilità di questi impianti a operatori con elevata capacità di investimento (CAPEX).

3.4 I processi avanzati: lisciviazione chimica e idrometallurgia

Se il trattamento termico si rivela essenziale per separare il vetro e liberare la struttura della cella fotovoltaica, esso non è in grado, da solo, di estrarne il vero valore. Le celle "nude" in uscita dai forni pirolitici si presentano infatti come wafer di silicio ancora ricoperti dalla fitta rete di contatti metallici (busbar e finger) saldati sulla superficie. Inoltre, il silicio stesso risulta alterato da strati antiriflesso (tipicamente nitrato di silicio, SiNx) e fortemente contaminato con impurità come boro e fosforo, necessarie per creare la giunzione p-n e generare l'effetto fotovoltaico. Per recuperare le Materie Prime Critiche (CRM) nella loro forma pura e risolvere definitivamente il "paradosso

massa-valore", è indispensabile passare dalla fisica alla chimica, ricorrendo alla traiettoria idrometallurgica.

L'**idrometallurgia** è una branca specializzata della metallurgia estrattiva che utilizza la complessa chimica delle soluzioni acquose per dissolvere ed estrarre i metalli dai minerali o, nel paradigma dell'economia circolare, dalle matrici dei rifiuti tecnologici (le cosiddette miniere urbane). Nel contesto del riciclo fotovoltaico, il processo cardine è la lisciviazione selettiva (*selective leaching*), un'operazione che si articola tipicamente in due passaggi sequenziali ad altissima precisione.

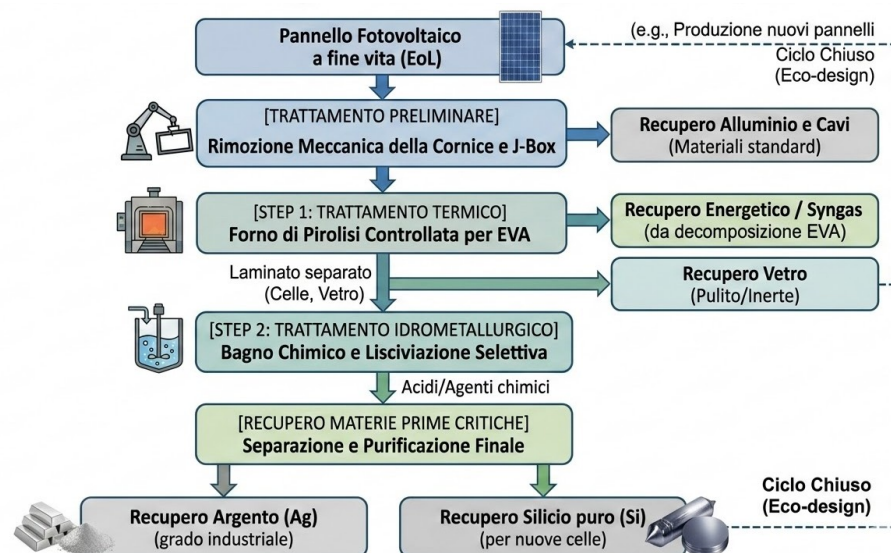
Fase 1: Estrazione dei metalli preziosi (Argento e Rame) Le celle in silicio intatte (o i loro macro-frammenti ripuliti dall'EVA) vengono immerse in reattori chimici contenenti soluzioni acide fortemente ossidanti. L'agente lisciviante di riferimento nella letteratura e nell'industria è l'acido nitrico (HNO_3), spesso utilizzato a temperature moderate (es. $40\text{-}60^\circ\text{C}$) per accelerare la cinetica della reazione. L'acido agisce in modo estremamente selettivo: attacca e discioglie la metallizzazione in argento e le piste in rame, convertendoli da stato solido a ioni solubili in fase liquida, ma non intacca minimamente il substrato in silicio [26].

Una volta che i metalli preziosi sono stati completamente trasferiti nella soluzione acquosa (il "liquor" di lisciviazione), essi vengono recuperati e solidificati attraverso processi di precipitazione chimica (ad esempio aggiungendo cloruro di sodio per far precipitare l'argento sotto forma di cloruro d'argento, AgCl , poi ridotto a metallo), estrazione con solventi o elettrodeposizione (*electrowinning*). Questa sequenza tecnologica permette di raggiungere tassi di recupero dell'argento superiori al 95%, garantendo al contempo un grado di purezza straordinario (fino al 99,9%). In termini economici, questo passaggio trasforma frazioni di peso microscopiche in flussi di ricavo massivi, essenziali per la profittabilità dell'intero impianto [26].

Fase 2: Purificazione del wafer e recupero del silicio di grado solare (SoG-Si) Terminata l'estrazione dei metalli, ciò che rimane nel reattore è il wafer di silicio scuro. Affinché questo materiale possa tornare all'industria fotovoltaica o dei semiconduttori, deve essere spogliato dello strato antiriflesso (SiNx) e degli strati superficiali drogati che costituiscono la giunzione p-n.

Questa operazione di "etching" (*incisione chimica*) viene condotta utilizzando bagni alcalini forti (come idrossido di sodio, NaOH, o idrossido di potassio, KOH) oppure miscele aggressive di acido fluoridrico e nitrico (HF/HNO₃) [25]. I reattivi chimici "consumano" pochi micrometri della superficie della cella, eliminando tutte le impurità funzionali originarie. Il risultato finale di questo processo è il silicio puro. A seconda del livello di affinamento del processo, le aziende più avanzate riescono a produrre non un semplice silicio di grado metallurgico (MGS, 98-99%), ma un preziosissimo silicio di grado solare (SoG-Si) con gradi di purezza in grado di raggiungere il 99,999% (il cosiddetto grado 5N), per la produzione di nuove celle solari o nell'industria avanzata dei semiconduttori (come schematizzato in Figura 3.2).

Figura 3.2 – Architettura di processo ibrida (Termico-Chimica) per il recupero fotovoltaico a ciclo chiuso.



Fonte: Rielaborazione personale su specifiche di processo ROSI Solar [28] e letteratura accademica di settore [30], 26].

In definitiva, la combinazione sequenziale di questi processi — rimozione meccanica della cornice, delaminazione termica della matrice polimerica e lisciviazione idrometallurgica dei metalli e del silicio — definisce l'attuale stato dell'arte dell'architettura ibrida avanzata. È unicamente attraverso questa profonda integrazione ingegneristica che il concetto di economia circolare a ciclo chiuso diviene realizzabile per l'industria

fotovoltaica, scongiurando il *downcycling* e consentendo al silicio e all'argento di ritornare utilmente alla base della catena di fornitura globale.

3.5 Benchmark industriale: l'approccio generalista di Veolia

L'analisi teorica delle traiettorie tecnologiche trova la sua validazione operativa nello studio dei principali *player* industriali europei. Il panorama continentale vede attualmente la coesistenza di approcci manageriali e tecnologici profondamente diversi. Il primo e più consolidato modello di business è quello "generalista avanzato", il cui caso di studio più rappresentativo è la multinazionale francese Veolia.

Veolia è stata pioniera nel settore, inaugurando a Rousset (Francia) uno dei primi impianti su scala industriale interamente dedicati al trattamento dei moduli fotovoltaici, in partnership con l'eco-organismo europeo PV Cycle (oggi Soren). La filosofia impiantistica e manageriale di Veolia si basa su un'ottimizzazione estrema della traiettoria puramente meccanica (descritta nel paragrafo 3.2), spinta ai massimi livelli di automazione.

Il processo prevede l'utilizzo di robot antropomorfi per la rimozione rapida e seriale della cornice in alluminio e della scatola di giunzione, seguiti da una linea di triturazione multipasso e da un sistema di separazione ottica all'avanguardia. Questa configurazione è progettata per processare volumi enormi di rifiuti con tempi di ciclo ridottissimi, abbattendo i costi operativi unitari (OPEX) grazie a massicce economie di scala. Dal punto di vista della conformità normativa, l'approccio di Veolia è un innegabile successo: l'impianto dichiara tassi di recupero di massa compresi tra il 94% e il 96%, superando ampiamente i target imposti dalla Direttiva RAEE [27].

Tuttavia, analizzando l'output qualitativo alla luce dei principi dell'economia circolare e della massimizzazione del valore, emergono i limiti sistemici di questa impostazione. Il vetro recuperato, pur rappresentando il grosso del tonnellaggio, raggiunge una purezza sufficiente solo per l'industria edile (es. isolanti o fibre di vetro), non potendo in alcun modo essere rifuso come vetro fotovoltaico. Allo stesso modo, il silicio, l'argento e il rame non vengono isolati selettivamente, ma si disperdono all'interno delle frazioni fini, venendo spesso destinati a recupero energetico o a processi metallurgici secondari

a bassissima resa [1]. Il modello Veolia dimostra quindi che il trattamento meccanico avanzato è eccellente per risolvere l'emergenza dei volumi (evitando i costi di conferimento in discarica), ma risulta strutturalmente inidoneo alla chiusura del ciclo produttivo (*closed-loop*) delle materie prime critiche.

3.6 Innovazione termico-chimica ad alta purezza: il caso ROSI Alpes

Per colmare il *gap* qualitativo lasciato dai processi puramente meccanici, una nuova generazione di impianti sta adottando architetture ibride termico-chimiche, spostando il focus manageriale dal semplice "recupero di massa" al "recupero di valore". Il *benchmark* europeo di assoluta eccellenza per l'estrazione ad alta purezza è rappresentato dall'azienda francese ROSI (Return of Silicon) Solar, con il suo impianto industriale ROSI Alpes situato a La Mure, da poco entrato a pieno regime.

A differenza dell'approccio generalista, la tecnologia brevettata da ROSI non ricorre mai alla frantumazione distruttiva del laminato, focalizzandosi esclusivamente sulla separazione selettiva a livello molecolare. Il cuore dell'innovazione risiede in un processo di pirolisi controllata in atmosfera inerte (con temperature variabili tra i 300°C e i 700°C) progettato per vaporizzare l'incapsulante in EVA senza fondere né alterare il vetro e il silicio. Successivamente alla fase termica, le celle fotovoltaiche estratte intatte vengono isolate e sottoposte a un processamento chimico selettivo (lisciviazione a umido a basse temperature) che dissolve la metallizzazione in argento e i filamenti di rame [28].

I risultati dichiarati da ROSI Solar rappresentano l'attuale stato dell'arte dell'economia circolare applicata al fotovoltaico. L'impianto è in grado di recuperare fino a 3 kg di argento e 15 kg di rame per ogni tonnellata di moduli trattati, con gradi di purezza superiori al 99% e al 98% rispettivamente. Ancora più rilevante è l'impatto sul recupero del silicio: liberato dalle impurità, il materiale raggiunge una purezza del 99%, rendendolo idoneo ("foto-grade") per essere reintrodotta direttamente nella produzione di nuove celle solari o nell'industria avanzata dei semiconduttori [28].

Dal punto di vista del *Management della Sostenibilità*, questo modello dimostra la fattibilità economica dell'upcycling completo. Nonostante i costi iniziali di

investimento (CAPEX) per i reattori chimici e i consumi energetici per la fase termica siano nettamente superiori rispetto all'acquisto di un tritratore convenzionale, l'impianto compensa ampiamente questi oneri attraverso la vendita di Materie Prime Seconde (MPS) ad altissimo valore di mercato. Questo approccio ribalta l'economia del processo, trasformando un costo di smaltimento in un profitto derivante dall'estrazione di *commodities* preziose.

3.7 Soluzioni modulari emergenti: la startup italiana 9-Tech

Mentre multinazionali come Veolia e ROSI puntano su grandi impianti centralizzati, progettati per processare decine di migliaia di tonnellate annue allo scopo di saturare la capacità produttiva, emergono sul mercato soluzioni ingegneristiche pensate per rispondere a esigenze logistiche e territoriali profondamente diverse. Un caso studio di particolare interesse, specialmente per la sua potenziale applicabilità nel contesto insulare siciliano oggetto di questa tesi, è rappresentato dalla startup innovativa italiana 9-Tech.

L'approccio di 9-Tech si distacca nettamente dalla logica dei grandi poli industriali per abbracciare un paradigma di decentralizzazione e modularità. L'azienda ha sviluppato e brevettato impianti di riciclo ibrido (termico-chimico) di dimensioni contenute, strutturati in moduli *plug-and-play* facilmente trasportabili o installabili all'interno di capannoni industriali preesistenti. Anche questa tecnologia si basa su un forno di pirolisi (operante a circa 400°C) abbinato a vasche di trattamento chimico in serie per il recupero dei metalli preziosi e del silicio, promettendo tassi di recupero materico complessivo vicini al 98% [29].

Il vero vantaggio strategico di questo modello non risiede soltanto nell'efficienza tecnologica, ma soprattutto nella sua intrinseca flessibilità logistica. In aree geografiche caratterizzate da complessità infrastrutturali, come le isole maggiori — dove il trasporto via nave di rifiuti ingombranti e pesanti incide in modo insostenibile sui costi complessivi di gestione — un impianto modulare di piccola o media taglia permette di abilitare vere e proprie "miniere urbane" a chilometro zero. Invece di movimentare decine di migliaia di tonnellate di vetro e alluminio grezzo verso i poli di trattamento

del Nord Italia o dell'estero, il modello decentralizzato consente di processare il rifiuto localmente, estraendo e trasportando oltre lo Stretto unicamente l'output raffinato e ad alto valore aggiunto (lingotti di alluminio, polvere d'argento e silicio puro). Questa configurazione rappresenta una soluzione manageriale agile ed economicamente sostenibile per assorbire i picchi di flussi regionali previsti per il prossimo decennio. A titolo di sintesi, la **Tabella 3.1** mette a confronto i tre modelli di business e tecnologici appena analizzati, evidenziando le profonde differenze di impostazione manageriale.

Tabella 3.1 – Benchmark dei modelli manageriali e industriali europei per il riciclo fotovoltaico.

AZIENDA	TECNOLOGIA PREVALENTE	TASSO DI RECUPERO (IN PESO)	PUREZZA MATERIALI RECUPERATI	MODELLO DI BUSINESS E LOGISTICA
<i>Veolia (Francia)</i>	Meccanica avanzata (triturazione + separazione ottica/densimetrica)	Alta (> 90–95%) per materiali strutturali	Media. Ottimo per vetro standard, alluminio e rame; scarso recupero selettivo di Si e Ag	Centralizzato. Grandi impianti (es. Rousset) con forti economie di scala e bacini nazionali
<i>ROSI Solar (Francia)</i>	Ibrida termo–chimica (pirolisi controllata + lisciviazione selettiva)	Molto alta (> 95%) e orientata al recupero del valore	Alta/Altissima. Silicio “solar-grade” e argento ad alta purezza	Modello misto con tecnologia proprietaria e partnership per la raccolta
<i>9-Tech (Italia)</i>	Meccanica a basso impatto + ultrasuoni (processo brevettato)	Alta (≈85–90% su impianto pilota)	Alta. Celle intere o frammenti puliti per recupero Si e Ag	Modulare e flessibile. Installabile vicino ai punti di raccolta (logistica corta)

Fonte: Elaborazione personale dello studente. (**Nota:** I dati quantitativi come i tassi di recupero esatti possono variare leggermente a seconda delle fonti tecniche e della maturità dell'impianto – pilota vs industriale – ma le tendenze di benchmark qui riportate riflettono il posizionamento di mercato noto delle aziende).

3.8 Analisi dei mercati per le Materie Prime Seconde (MPS)

La sostenibilità a lungo termine dell'industria del riciclo fotovoltaico non dipende unicamente dalla maturità tecnologica dei processi, ma è indissolubilmente legata alle dinamiche e alle fluttuazioni dei mercati delle *commodities*. Affinché una filiera di recupero si auto-sostenga economicamente — senza dipendere in via esclusiva dagli eco-contributi RAEE versati dai produttori al momento dell'immissione sul mercato (il cosiddetto *gate fee*) — i ricavi generati dalla vendita delle Materie Prime Seconde (MPS) devono strutturalmente superare i costi operativi (OPEX) di trattamento e di logistica.

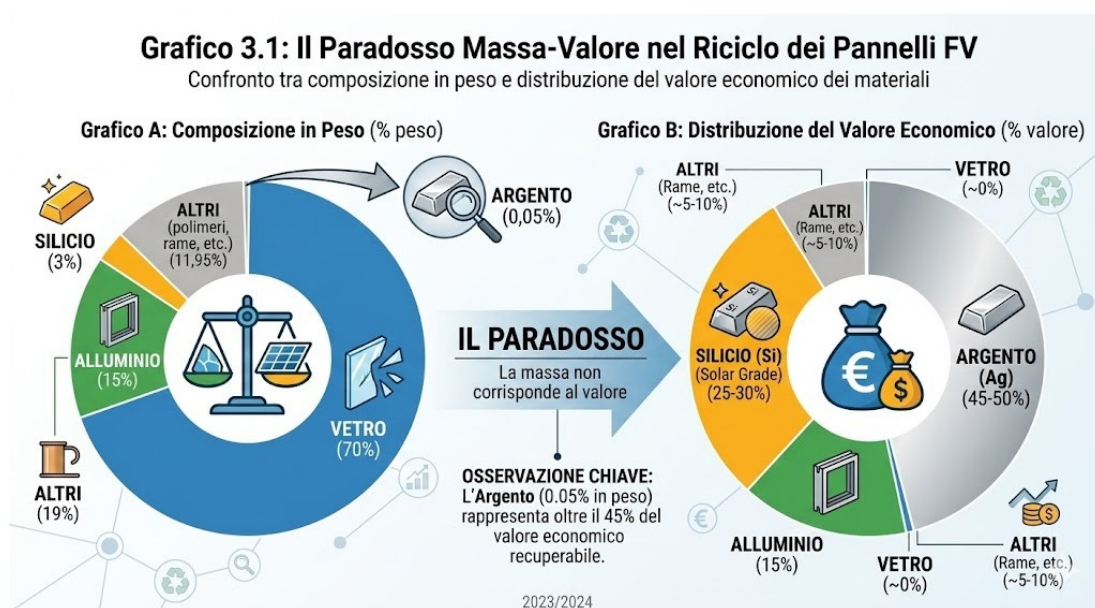
Questa equazione economica svela una cruda realtà industriale: non tutti i materiali recuperati vantano la medesima spendibilità e liquidità sul mercato. I materiali con funzione prettamente strutturale, come il vetro e l'alluminio, garantiscono all'impianto i grandi volumi necessari per raggiungere i *target* burocratici di legge (l'85% in massa), ma offrono margini di redditività diametralmente opposti tra loro.

Il mercato del rottame di alluminio è storicamente consolidato, liquido e globale. Grazie alla facilità intrinseca di fusione, l'alluminio riciclato mantiene proprietà chimico-fisiche identiche al materiale vergine, richiedendo solo il 5% dell'energia necessaria per l'estrazione dalla bauxite. Di conseguenza, le cornici in alluminio smontate dai pannelli vengono facilmente piazzate sul mercato secondario a prezzi che seguono fedelmente le quotazioni del *London Metal Exchange* (LME). Al contrario, il mercato del vetro fotovoltaico secondario è estremamente rigido e problematico. A causa delle stringenti richieste di trasparenza ottica dell'industria solare e del bassissimo costo della materia prima vergine concorrente (la sabbia silicea), il vetro triturato e misto a plastiche estratto dagli impianti meccanici convenzionali ha un valore di mercato prossimo allo zero; in molti casi, l'impianto di riciclo deve addirittura sostenere dei costi per cederlo ai cementifici o ai produttori di isolanti affinché lo ritirino come inerte [19].

3.9 Dinamiche di prezzo e valore strategico: il peso di argento e silicio

Alla luce del quadro appena delineato, emerge chiaramente che la vera architettura del *business model* del riciclo fotovoltaico si regge quasi esclusivamente sulla capacità ingegneristica di estrarre e raffinare le frazioni micro-componenti. È in questo frangente che il "paradosso massa-valore" esce dalla teoria diventando un'evidenza finanziaria inequivocabile (**Figura 3.3**).

Figura 3.3 – Il Paradosso Massa-Valore nel modulo fotovoltaico in silicio cristallino (c-Si).



Fonte: Elaborazione personale su stime composizionali di letteratura [19] e valutazioni economiche di mercato [24], 30].

Un'analisi dei prezzi di mercato dimostra come la redditività e il ROI (*Return on Investment*) del settore dipendano criticamente dall'argento e, in seconda battuta, dal silicio di alta qualità. Le quotazioni internazionali stabiliscono il *benchmark* esatto per i materiali riciclati, come riassunto nella **Tabella 3.2**.

Tabella 3.2 – Valutazione economica delle Materie Prime Seconde (MPS) di riferimento (Dati Q4 2025).

Materiale	Grado/Purezza Specifico	Unità di Misura	Prezzo Spot Medio Estivo 2024 (USD)	Fonte Principale di Riferimento
<i>Alluminio</i>	High Grade (min 99.7%)	USD / tonnellata	~\$ 2.400 - 2.600	LME (London Metal Exchange)
<i>Argento</i>	Grade 999 (Industrial)	USD / kg	~\$ 900 - 1.050	LME / LBMA (London Bullion Market)
<i>Silicio Metallurgico (Si-met)</i>	Standard (es. Grado 553/441)	USD / tonnellata	~\$ 1.900 - 2.200	Price Reporting Agencies (es. Fastmarkets, Platts)
<i>Silicio Solar-Grade (Poly-Si)</i>	High Purity (>9N)	USD / kg	~\$ 5 - 8	Specialized PV Reports (es. Bernreuter, PVinsights)

Fonte: Dati estratti e rielaborati dalle quotazioni del London Metal Exchange (LME) e mercati di settore [30].

Prendendo a riferimento le dinamiche dei mercati internazionali (aggiornate al quarto trimestre 2025), il valore delle materie prime vergini stabilisce il *benchmark* esatto per i materiali riciclati. A fronte di un alluminio quotato storicamente intorno ai 2.856 USD per tonnellata, l'argento (Ag) registra quotazioni di ordini di grandezza superiori, attestandosi nell'intorno dei 48,50 USD per oncia troy, che equivalgono a una valutazione strabiliante di oltre 1.500.000 USD per tonnellata [30]. Sebbene un modulo fotovoltaico c-Si contenga in media una quantità infinitesimale di argento (compresa tra lo 0,05% e lo 0,07% del peso totale), questa microscopica aliquota è in grado di generare tra il 40% e il 50% dei ricavi totali ottenibili dalla valorizzazione materica di un singolo pannello [20]. Appare dunque evidente che l'incapacità dei processi meccanici di recuperare l'argento equivale, di fatto, a bruciare la metà del fatturato potenziale dell'impianto.

Altrettanto complessa, segmentata e strategica è la dinamica del silicio (Si). Il mercato di questo semiconduttore presenta una forte discriminazione dei prezzi basata unicamente sulla purezza. Il silicio di grado metallurgico (MGS), caratterizzato da una purezza intorno al 98-99% e destinato alla produzione di leghe industriali in alluminio, viene scambiato a quotazioni vicine ai 1.280 USD per tonnellata. Al contrario, qualora il processo di riciclo ibrido (come quello implementato da ROSI) si dimostri capace di

raffinare il materiale, rimuovendo le impurità droganti fino a fargli raggiungere il grado solare *N-type* (SoG-Si, purezza > 99,99%), il suo valore si moltiplica esponenzialmente, superando i 6.320 USD per tonnellata [30].

Questa enorme forbice dei prezzi certifica in via definitiva che l'investimento finanziario nelle tecnologie chimiche e termiche non costituisce un mero vezzo ingegneristico o ambientale, ma rappresenta un imperativo economico ineludibile. Recuperare i materiali critici ad alta purezza costituisce l'unico argine effettivo alla volatilità dei prezzi di approvvigionamento, garantendo flussi di cassa solidi che rendono economicamente giustificabile (e profittevole) l'implementazione di reti impiantistiche anche in territori geograficamente svantaggiati o insulari.

CAPITOLO 4

Analisi del Contesto e dei Flussi per l'Impianto Siciliano

4.1 Il parco fotovoltaico in Sicilia: evoluzione storica e criticità del fine vita

L'adozione massiccia dell'energia solare fotovoltaica in Italia, fortemente accelerata a partire dal primo decennio degli anni Duemila grazie ai generosi meccanismi incentivanti del "Conto Energia" (in particolare nel triennio di picco 2010-2013), ha posizionato la Regione Siciliana tra i territori cardine per la transizione ecologica nazionale. Le eccezionali caratteristiche eliofaniche dell'isola, che garantiscono un irraggiamento solare tra i più elevati in Europa, unite alla disponibilità di vaste aree idonee all'installazione sia di impianti residenziali sia di grandi parchi a terra (utility-scale) su ex terreni agricoli o industriali, hanno attratto ingenti investimenti speculativi e strategici. Tuttavia, il successo passato e presente di questa espansione porta con sé un'inevitabile e imminente sfida gestionale legata al fine vita degli impianti (End-of-Life - EoL). Questa transizione energetica, infatti, è stata inizialmente guidata dall'urgenza di massimizzare la produzione rinnovabile e il rapido ritorno sull'investimento (ROI), relegando in secondo piano le logiche di circolarità e di gestione sistemica dei materiali a fine ciclo.

Come evidenziato dall'analisi storica delle installazioni, le politiche energetiche di quel periodo si sono concentrate quasi esclusivamente sulla massimizzazione della nuova capacità connessa in rete, trascurando del tutto la pianificazione a lungo termine per lo smaltimento e il recupero dei materiali. La filiera è nata e si è consolidata, di fatto, seguendo un modello prettamente lineare e insostenibile ("take-make-dispose"). Considerando una vita utile operativa media dei moduli fotovoltaici in silicio cristallino (c-Si) stimata tra i 20 e i 25 anni, il boom di installazioni storiche si sta oggi traducendo in un vero e proprio "bolo" di rifiuti futuri [31]. A differenza di altre apparecchiature elettroniche di consumo, caratterizzate da cicli di sostituzione costanti, fisiologici e dilazionati nel tempo, i flussi di dismissione del fotovoltaico non seguiranno un andamento lineare e graduale. Si manifesteranno, al contrario, come uno "tsunami" materiale concentrato in una finestra temporale estremamente ristretta [1]. Molti di questi impianti storici, inoltre, sono attualmente soggetti a diffuse pratiche di *revamping* e

repowering. Queste operazioni consistono nella sostituzione anticipata dei vecchi moduli – spesso ancora parzialmente funzionanti ma considerati obsoleti – con tecnologie di ultima generazione più performanti, al fine di massimizzare la resa energetica e finanziaria a parità di suolo occupato. Questo fenomeno tecnico-finanziario rischia di anticipare e comprimere ulteriormente i tempi di arrivo a fine vita di milioni di pannelli, aggravando il carico sulle infrastrutture di smaltimento.

La Sicilia si trova pertanto ad affrontare una criticità sistemica senza precedenti: la rapida trasformazione di un immenso asset energetico, capillarmente distribuito sul territorio regionale, in un ingente volume di Rifiuti di Apparecchiature Elettriche ed Elettroniche (RAEE). Questa criticità è ulteriormente resa complessa dalla condizione geografica insulare della regione. L'esportazione di decine di migliaia di tonnellate di rifiuti ingombranti, fragili e pesanti (composti per oltre il 70% da vetro e cornici in alluminio) verso impianti di trattamento situati nel Nord Italia o in altre nazioni europee comporterebbe costi logistici del tutto proibitivi. Tali costi sono legati principalmente alle inefficienze del trasporto intermodale, ai colli di bottiglia dei porti commerciali e alle elevate tariffe di imbarco sui traghetti (Ro-Ro). Oltre al mero impatto economico, tali dinamiche logistiche comporterebbero un'impronta carbonica inaccettabile, traducendosi in un incremento vertiginoso delle emissioni Scope 3 all'interno del calcolo LCA (Life Cycle Assessment) dell'intera filiera, vanificando in gran parte i benefici ambientali e climatici originariamente generati dalla stessa fonte rinnovabile durante la sua fase operativa.

L'assenza di un'infrastruttura industriale regionale adeguata ad assorbire, stoccare in sicurezza e valorizzare questa imminente "onda" di moduli a fine vita rischia, dunque, di generare pesanti passività ambientali ed economiche, aprendo la strada al rischio di abbandoni illeciti o smaltimenti inadeguati. Comprendere l'eredità storica di questo parco installato è il pre-requisito analitico fondamentale per quantificare con precisione i flussi in arrivo e giustificare la necessità imperativa di un polo tecnologico dedicato, capace di chiudere il ciclo di vita del pannello all'interno dei confini regionali. Tale infrastruttura non dovrà limitarsi al mero smaltimento in discarica o a pratiche di *downcycling* (come il recupero grossolano di vetro di bassa qualità, misto a impurità polimeriche, per sottofondi stradali o materiali edili a basso valore), ma dovrà operare rigorosamente secondo i principi dell'eco-design di processo. L'obiettivo

strategico è puntare al recupero ad alto valore aggiunto (upcycling) di Materie Prime Seconde (MPS) critiche e preziose, come silicio di grado fotovoltaico, argento e alluminio ad alta purezza. Solo attraverso questo approccio ingegneristico avanzato sarà possibile superare il paradosso tra gli alti volumi di rifiuto generati e il valore intrinseco dei materiali intrappolati in essi, trasformando una grave criticità ambientale in un potente driver di sviluppo, occupazione e innovazione per l'economia circolare e l'industria locale.

4.2 Proiezioni e mappatura dei flussi di rifiuti fotovoltaici attesi (2025-2040)

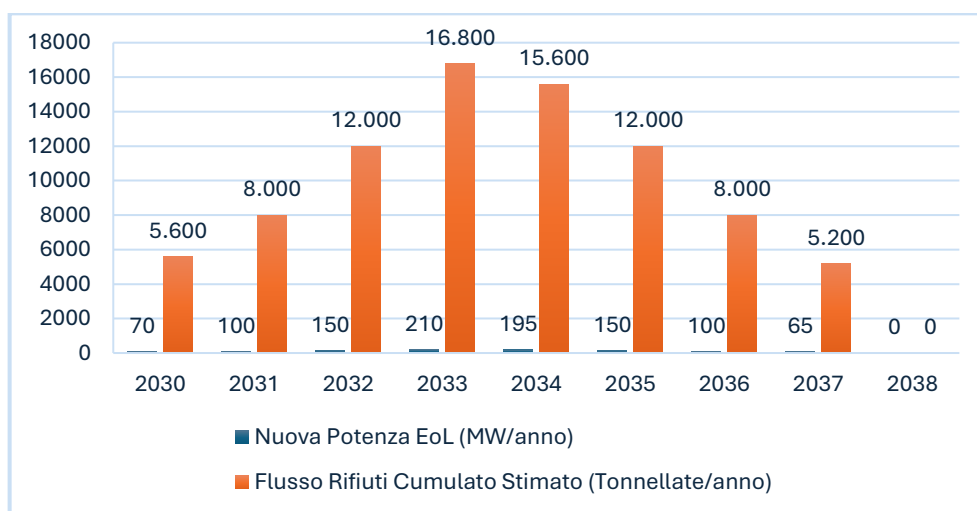
Per dimensionare correttamente l'impianto di riciclo e sviluppare un modello di business economicamente sostenibile e resiliente, che sarà oggetto di analisi dettagliata nel Capitolo 5, è imprescindibile tradurre l'analisi qualitativa del contesto in proiezioni quantitative rigorose. La Regione Siciliana rappresenta un bacino di approvvigionamento di primaria importanza a livello nazionale, caratterizzato da un'estrema eterogeneità di installazioni. Secondo i dati aggiornati al 2025, la potenza solare installata sull'isola ammonta a circa 3.530 MW, distribuiti su oltre 142.100 impianti di varia taglia. Questa frammentazione spazia dai piccoli impianti residenziali sui tetti (spesso inferiori ai 20 kW, che richiedono logiche di micro-raccolta) ai grandi parchi solari multi-megawatt situati nelle aree interne (che permettono economie di scala nello smantellamento) [32].

Il passaggio dalla grandezza energetica della "potenza elettrica installata" (espressa in Megawatt) alla "massa fisica" (espressa in tonnellate di rifiuti da processare) richiede l'applicazione di un fattore di conversione ponderato e attento all'evoluzione dei materiali. Considerando l'evoluzione tecnologica dei pannelli in silicio cristallino nel corso degli anni, il peso medio di un modulo si aggira tra i 18 e i 22 kg per una potenza nominale che, nei modelli più datati installati durante i primi Conti Energia, variava tra i 200W e i 250W. Utilizzando un fattore di conversione standard consolidato in letteratura (che stima circa 75-80 tonnellate di materiale fisico per ogni MW installato), si calcola che il parco fotovoltaico siciliano attualmente in esercizio (3.530 MW) corrisponda a un volume complessivo di materiali fisici pari a circa 282.400 tonnellate.

Applicando a questo volume il ciclo di vita medio stimato di 20-25 anni e incrociando questi dati con le date di prima connessione in rete degli impianti storici incentivati, è stato possibile tracciare la curva prospettica delle dismissioni per il quindicennio 2025-2040. Questo modello matematico assume un tasso fisiologico di guasti precoci (early failures) e un picco strutturale legato alla naturale senescenza dei materiali costruttivi. In Sicilia, in particolare, le alte temperature estive, l'elevata insolazione e la salinità delle aree costiere tendono ad accelerare il degrado indotto dai raggi UV sui polimeri incapsulanti come l'EVA (Etilene Vinil Acetato), favorendo fenomeni di ingiallimento (browning) e la progressiva delaminazione del backsheet, portando l'impianto a fine vita tecnica.

L'analisi di tali dati rivela che la regione subirà un incremento di natura esponenziale e repentina dei flussi di RAEE fotovoltaici a partire dall'inizio del prossimo decennio. Come si evince chiaramente dalla **Tabella 4.1**, se nel 2030 i volumi attesi si attesteranno su valori fisiologici e facilmente gestibili intorno alle 5.600 tonnellate annue, il sistema logistico regionale subirà un'impennata drammatica negli anni immediatamente successivi, rischiando la paralisi se non adeguatamente preparato.

Figura 4.1 - Proiezione temporale dei flussi di RAEE fotovoltaici in Sicilia (2030-2038)



Fonte: Rielaborazione personale su dati di stima regionale [32].

Il picco massimo di dismissioni è inequivocabilmente previsto nel biennio 2033-2034, periodo in cui giungeranno a naturale fine vita gli impianti installati durante gli anni di massimo incentivo del II, III e IV Conto Energia (2010-2012). In questa ristretta

finestra temporale, le proiezioni stimano che la Sicilia dovrà gestire fino a 16.800 tonnellate di rifiuti fotovoltaici in un singolo anno [32]. Tradotto in termini fisici, si tratta di una massa che richiederebbe decine di migliaia di metri quadrati di piazzali solo per lo stoccaggio temporaneo. La caratteristica forma a "campana" di questa proiezione temporale definisce il parametro di *capacity* (capacità di targa) fondamentale per l'impianto di trattamento. Un'infrastruttura circolare di valenza regionale dovrà essere progettata e dimensionata non sulla media storica (ormai obsoleta e non rappresentativa della realtà imminente), ma per assorbire agevolmente i volumi del periodo di picco. Un impianto con una capacità nominale di trattamento compresa tra le 12.000 e le 15.000 tonnellate annue risulterebbe strategico per scongiurare il collasso logistico regionale. Al contempo, la progettazione ingegneristica dovrà garantire una forte flessibilità operativa modulare (ad esempio, mediante l'adeguamento dei turni di lavoro o la possibilità di adattare le linee di triturazione per altri RAEE affini) necessaria per gestire le inevitabili fasi di decrescita dei flussi nel periodo post-2036, garantendo così la sostenibilità economica dell'impianto sul lungo periodo.

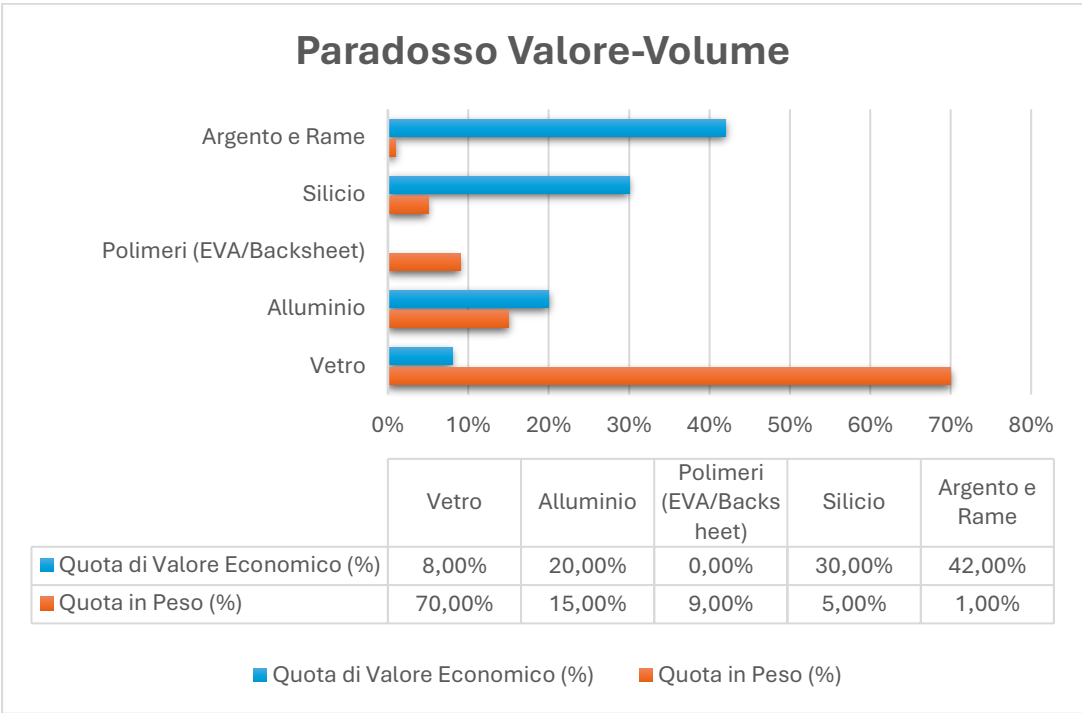
4.3 Infrastrutture logistiche regionali e valore di mercato delle Materie Prime Seconde

La quantificazione dei flussi attesi, stimati in oltre 16.000 tonnellate all'anno al raggiungimento del picco, impone una riflessione critica e urgente sull'attuale capacità di ricezione, stoccaggio e trattamento della Regione Sicilia, confrontandola sistematicamente con le vaste opportunità economiche offerte dai mercati globali delle materie prime. L'inquadramento logistico e normativo siciliano, delineato dall'aggiornamento del Piano Regionale di Gestione dei Rifiuti (PRGR 2024-2025), evidenzia una grave fase di transizione e un profondo, cronico ritardo infrastrutturale nel settore dei rifiuti tecnologici. Sebbene le recenti procedure di Valutazione Ambientale Strategica (VAS) e Valutazione d'Incidenza Ambientale (VIncA), avviate nella primavera del 2024, dimostrino l'intenzione formale dell'amministrazione di razionalizzare il sistema generale [3], la rete di trattamento certificata dal Centro di Coordinamento RAEE (CdC RAEE) in Sicilia risulta attualmente del tutto inadeguata per accogliere e processare in loco i volumi specifici e le peculiarità tecniche del raggruppamento R4 (nel quale

ricadono i pannelli fotovoltaici). Attualmente, i centri di raccolta regionali fungono quasi esclusivamente da stazioni di stoccaggio temporaneo e trasferimento (transfer stations), che rischiano di saturarsi rapidamente, esponendo i pannelli danneggiati alle intemperie e al potenziale dilavamento di metalli pesanti nel suolo. La totale carenza di poli tecnologici specializzati sull'isola, dotati di processi termici o idrometallurgici avanzati in grado di scindere i polimeri dai metalli, obbliga gli operatori del settore a esternalizzare il trattamento finale verso impianti situati nel Centro-Nord Italia o nel resto d'Europa. Questa dinamica distorta trasforma un'opportunità economica e industriale formidabile in un puro costo logistico (spese di imbarco su navi merci, pedaggi autostradali, usura dei mezzi pesanti e assicurazioni stradali), ponendosi in netto contrasto con il principio di prossimità e di autosufficienza promosso dalle direttive europee sull'economia circolare.

La spinta razionale verso l'implementazione di un impianto locale non risiede unicamente nel risparmio evidente sui costi di trasporto, ma nell'enorme potenziale intrinseco dei moduli dismessi, che devono essere ricollocati concettualmente dalla mera categoria di "rifiuto speciale" a quella di vera e propria "miniera urbana". Il valore economico della filiera del riciclo fotovoltaico (si veda la **Figura 4.2**) è direttamente rigidamente proporzionale alla capacità tecnologica di estrarre Materie Prime Secondarie (MPS) con un grado di purezza chimica tale da renderle pienamente competitive, sui mercati internazionali delle commodities, con le materie prime vergini di estrazione mineraria[33].

Figura 4.2 - Il Paradosso Valore-Volume nei moduli fotovoltaici a fine vita



Fonte: Rielaborazione personale su dati di mercato e letteratura (2025).

Analizzando dettagliatamente i materiali massivi, il vetro costituisce la frazione nettamente più pesante del pannello (circa il 70-75% del peso totale). Sebbene il suo valore di mercato come rottame standard (vetro di scarto misto) sia intrinsecamente basso, processi meccanici e ottici di alta precisione in fase di delaminazione possono recuperare vetro solare extra-chiaro, privo di contaminazioni da antimonio o ferro, valorizzandolo sul mercato a prezzi sensibilmente superiori per la produzione di nuovi moduli o nel settore dell'isolamento termico di pregio. L'Alluminio (Al), che forma la cornice strutturale rigida atta a proteggere i bordi del pannello, costituisce invece il volume metallico più rilevante e di più facile estrazione meccanica durante le primissime fasi di pre-trattamento. Essendo un metallo che non subisce degradazione delle proprietà chimico-fisiche durante le rifusioni cicliche, e considerando che la produzione di alluminio secondario richiede circa il 95% di energia in meno rispetto all'estrazione primaria dalla bauxite, l'alluminio estruso dei pannelli è altamente ricercato nell'ottica della decarbonizzazione industriale. A fine 2025, le quotazioni sui mercati primari

(come il London Metal Exchange - LME) si attestano a circa 2.856 USD/tonnellata [34]. Assicurarsi questo flusso massiccio e costante di alluminio secondario all'interno del mercato siciliano rappresenterebbe una fonte strategica di materia prima a "chilometro zero" per le fonderie e l'intera industria metallurgica del Sud Italia.

Tuttavia, la sfida tecnologica e ingegneristica maggiore, e parallelamente l'opportunità più remunerativa per un impianto guidato dai principi dell'eco-design, riguarda il recupero dei materiali "minoritari" in peso ma largamente prevalenti in termini di valore finanziario. Questo è il cuore del "Paradosso Valore-Volume". L'Argento (Ag), utilizzato capillarmente nella pasta conduttiva per la serigrafia della griglia frontale delle celle solari, è presente in quantità infinitesimali (generalmente inferiori allo 0,05% del peso totale del pannello). Ciononostante, data l'assoluta preziosità del metallo sui mercati internazionali e la sua importanza nell'elettronica di consumo, esso rappresenta una quota preponderante (circa il 40%) del valore economico totale recuperabile da un singolo modulo. Nel tradizionale trattamento di frantumazione meccanica (shredding), l'argento viene quasi interamente perso, mescolandosi irrimediabilmente alle polveri di vetro. Con quotazioni spot che si aggirano intorno a 48,50 USD/oncia (dato di novembre 2025) [34], l'estrazione efficiente dell'argento attraverso processi chimici mirati e selettivi (come la lisciviazione idrometallurgica) giustifica economicamente gran parte degli investimenti impiantistici in tecnologie avanzate.

Infine, il Silicio (Si) rappresenta il cuore tecnologico e funzionale del modulo, il materiale semiconduttore attorno al quale ruota l'intera industria. I processi standard di semplice frantumazione meccanica riescono a recuperare esclusivamente silicio di grado metallurgico impuro (MGS), pesantemente contaminato dai residui polimerici e metallici, il cui valore si aggira intorno a 1.280 USD/tonnellata. Al contrario, un impianto avanzato che adotta tecnologie termiche (pirolisi), chimiche e idrometallurgiche in sequenza strutturata (come quelle ampiamente analizzate nel Capitolo 3) permette di recuperare e purificare chimicamente le celle intatte o i wafer frammentati, ottenendo UMG-Si di altissimo pregio, precursore essenziale per il grado fotovoltaico. In questo scenario di upcycling, il valore di mercato subisce un'impennata drammatica, superando i 6.320 USD/tonnellata [34], e conferisce all'Unione Europea un'importante

autonomia strategica, riducendo la forte dipendenza dalle catene di approvvigionamento asiatiche per i materiali critici.

4.4 Distribuzione territoriale e criteri logistici per la localizzazione dell'impianto

Definiti i volumi di approvvigionamento in ingresso e le potenzialità economiche in uscita, l'ultimo pre-requisito analitico necessario ad avviare la progettazione ingegneristica (oggetto del Capitolo 5) riguarda la geolocalizzazione strategica dell'infrastruttura. La sostenibilità economica ed ecologica di un impianto di riciclo regionale non dipende unicamente dall'efficienza tecnologica del processo, ma dall'ottimizzazione della cosiddetta *reverse logistics* (logistica di ritorno). Risulta cruciale minimizzare il "raggio di captazione", ovvero la distanza media percorsa dai mezzi pesanti per conferire i pannelli a fine vita dai siti di smantellamento al polo di trattamento. Analizzando la distribuzione territoriale della potenza installata in Sicilia attraverso i dati statistici regionali e nazionali [32], emerge una netta polarizzazione geografica che orienta inevitabilmente i criteri decisionali di localizzazione.

La distribuzione dei 3.530 MW installati non è omogenea. Mentre gli impianti di piccola taglia (settore residenziale e commerciale su tetto) presentano un'alta densità nelle grandi aree metropolitane di Palermo e Catania, la stragrande maggioranza dei volumi fisici e materici – ovvero i grandi parchi solari a terra (utility-scale) realizzati durante la stagione dei Conti Energia – è fortemente concentrata nella Sicilia Centrale e Orientale. In particolare, le province di Enna, Catania, Siracusa e Ragusa ospitano le superfici fotovoltaiche più estese dell'isola, sfruttando la disponibilità di ampie aree rurali pianeggianti (come la Piana di Catania) e i massimi livelli di irraggiamento solare. Inoltre, l'entroterra siciliano è notoriamente caratterizzato da un'orografia complessa e da una rete viaria secondaria spesso inadeguata al transito massivo di mezzi autoarticolati; ciò impone una centralizzazione strategica dell'impianto in prossimità dei principali snodi autostradali. Questa conformazione territoriale suggerisce inequivocabilmente che il baricentro logistico naturale per intercettare lo "tsunami" dei rifiuti R4 si collochi lungo l'asse centro-orientale dell'isola.

La scelta del sito per la progettazione di un nuovo impianto ad alta tecnologia non può tuttavia esaurirsi nel solo concetto di prossimità ai rifiuti in ingresso, ma deve perseguire la realizzazione di un ecosistema di "simbiosi industriale" [3], garantendo mercati di sbocco a chilometro zero per le materie prime seconde estratte. Sotto questo profilo, la Sicilia orientale rappresenta un *unicum* strategico, ospitando il distretto tecnologico della cosiddetta "Etna Valley" e poli produttivi fotovoltaici di rilevanza strategica europea, su tutti la Gigafactory "3Sun" di Enel Green Power a Catania. Posizionare l'impianto di riciclo in prossimità di questo polo d'eccellenza offre la straordinaria opportunità di trasformare l'attuale modello di filiera "open-loop" (aperta e dispersiva) in un modello "closed-loop" (circolare chiuso). Il silicio *solar-grade* di altissima purezza e il vetro solare extra-chiaro recuperati dal processo di *upcycling* potrebbero, in linea teorica, essere reimmessi direttamente nei cicli produttivi locali per la fabbricazione di nuovi moduli bifacciali ad alta efficienza, abbattendo drasticamente la *carbon footprint* legata all'estrazione mineraria e all'importazione asiatica di materiali critici.

Infine, la localizzazione all'interno di Aree di Sviluppo Industriale (ASI) già consolidate – si pensi all'agglomerato di Dittaino (Enna), baricentrico e adiacente all'autostrada A19, o ai poli industriali del catanese e del siracusano serviti dall'autostrada A18 – e la loro inclusione nel regime agevolato della ZES (Zona Economica Speciale) Unica del Mezzogiorno, offrono vantaggi infrastrutturali insostituibili. Oltre all'accesso a crediti d'imposta per l'acquisto di beni strumentali avanzati e all'abbreviazione dei complessi iter autorizzativi ambientali (VIA/AIA), tali aree garantiscono gli stabili allacciamenti idrici, elettrici e di depurazione reflui indispensabili per sostenere i processi idrometallurgici e termici del riciclo. Inoltre, la contiguità con importanti porti commerciali (Catania, Augusta) agevolerebbe l'eventuale esportazione dei metalli recuperati non assorbiti dal mercato locale (come l'argento o l'alluminio in eccedenza) verso le principali fonderie del Nord Italia o dei mercati internazionali. Basandosi su questi imprescindibili assunti logistici, territoriali e strategici, il successivo Capitolo 5 procederà alla vera e propria progettazione ingegneristica del processo, allo sviluppo del diagramma di flusso (PFD) e all'analisi del *business model* dell'impianto.

CAPITOLO 5

Progettazione e Valutazione di Sostenibilità di un Impianto di Riciclo FV in Sicilia

Alla luce delle proiezioni analizzate nei capitoli precedenti, che stimano per la Regione Sicilia un picco di dismissioni di moduli fotovoltaici pari a circa 16.800 tonnellate annue nel biennio 2033-2034 [32], emerge la necessità strategica e improcrastinabile di dotare il territorio di un'infrastruttura di trattamento dedicata e all'avanguardia. L'assenza attuale di impianti ad alto valore aggiunto nel Sud Italia, e in particolare nel contesto insulare siciliano, rappresenta non solo un grave rischio ambientale legato alla potenziale dispersione di inquinanti o all'esportazione inefficiente dei rifiuti, ma anche una considerevole perdita economica in termini di risorse critiche non recuperate. Il presente capitolo si pone l'obiettivo cardine di progettare e valutare, sotto il duplice profilo ingegneristico ed economico, un impianto di riciclo fotovoltaico basato su tecnologie termo-chimiche avanzate. L'intera disamina è guidata dai principi dell'eco-design, i quali non vengono qui applicati al singolo prodotto, bensì estesi all'intero ciclo di processo industriale: dall'ottimizzazione logistica per l'approvvigionamento dei rifiuti, alla massimizzazione del recupero di materiali critici e preziosi (quali silicio di grado fotovoltaico e argento), fino alla rigorosa valutazione degli impatti ambientali, proposta in letteratura scientifica, tramite la metodologia del Life Cycle Assessment (LCA) e alla stesura di un Business Model Canvas preliminare che ne attesti la fattibilità e la redditività finanziaria a lungo termine.

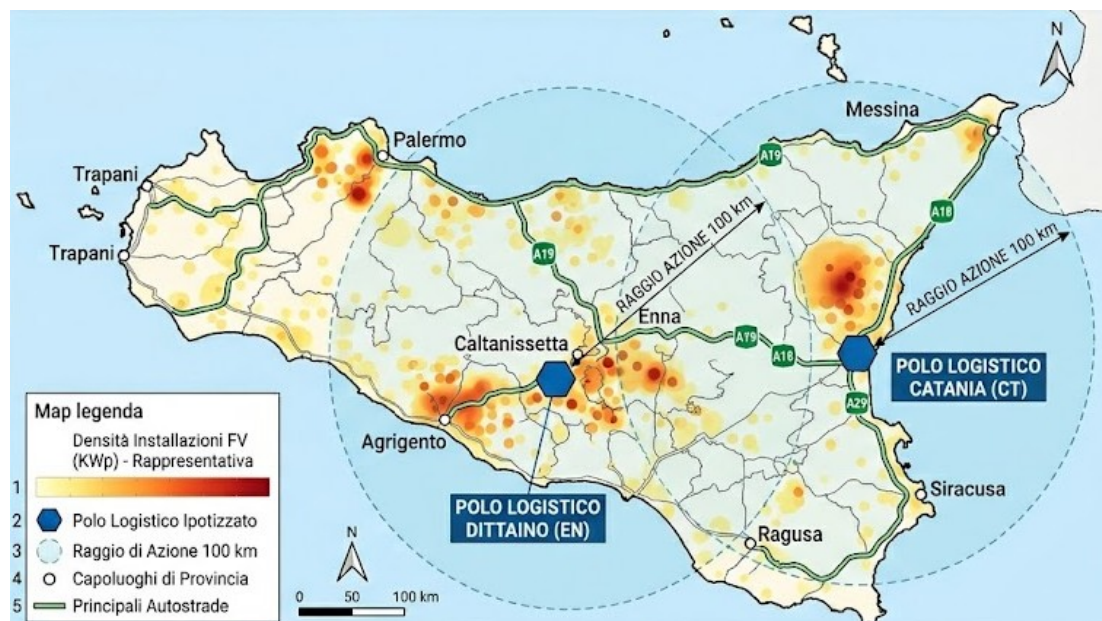
5.1 Definizione del modello logistico e di approvvigionamento territoriale

Il primo elemento critico per garantire la sostenibilità ambientale e la stabilità economica di un impianto di trattamento rifiuti è la definizione di un modello logistico ottimizzato, capace di assicurare un flusso di materia in ingresso (inflow) costante minimizzando al contempo le inefficienze legate al trasporto. Come ampiamente documentato in letteratura scientifica [36], la fase logistica incide in modo profondo e diretto sull'impronta carbonica complessiva del processo di riciclo dei RAEE, rischiando di

vanificare i benefici ambientali del recupero materico qualora le distanze di conferimento risultino eccessive. Per gestire il volume stimato di 16.800 tonnellate annue di pannelli a fine vita [32] – equivalenti a un fabbisogno giornaliero di circa 56 tonnellate, ipotizzando un regime operativo di 300 giorni lavorativi all'anno – la scelta dell'ubicazione dell'impianto costituisce una variabile di progetto fondamentale. Per soddisfare tale fabbisogno, l'impianto sarà dimensionato per operare su tre turni continui da 8 ore (ciclo di 24 ore), processando un volume in ingresso di circa 2,5 tonnellate all'ora. Questo assetto a ciclo continuo risulta ottimale non solo per ammortizzare più rapidamente i costi fissi (CAPEX), ma soprattutto per ragioni termodinamiche: mantenere costanti le temperature operative dei forni di pirolisi evita infatti i dispendiosi cicli di spegnimento e riaccensione, ottimizzando l'efficienza energetica dell'intera struttura.

In tale prospettiva, si ipotizza l'insediamento del polo tecnologico in un nodo baricentrico rispetto alla geografia regionale, identificabile in via preferenziale nell'Area di Sviluppo Industriale (ASI) di Dittaino, in Provincia di Enna, o nel polo industriale della piana di Catania [3]. Tali localizzazioni strategiche offrono un accesso diretto agli assi viari principali, in particolare l'autostrada A19 (Palermo-Catania), asse viario cruciale per intercettare fluidamente i carichi provenienti sia dalla porzione occidentale che da quella orientale dell'isola. Posizionare la struttura di trattamento al centro del bacino di utenza permette di mantenere il raggio medio di raccolta ben al di sotto della soglia critica dei 100-150 km, un parametro considerato vitale dagli studi di settore per abbattere drasticamente le emissioni climalteranti derivanti dalla movimentazione su gomma dei mezzi pesanti e per contenere l'incidenza dei costi di trasporto sul bilancio operativo (OPEX) dell'impianto.

FIGURA 5.1 - Mappa della Regione Sicilia con l'evidenziazione delle concentrazioni di impianti FV e i due poli logistici ipotizzati (Dittaino e Catania), con evidenza dei raggi d'azione di 100km.



Fonte: Elaborazione personale su dati GSE [31]] e Regione Siciliana [3]

Una volta definita la localizzazione, il conseguimento della saturazione della capacità operativa dell'impianto richiede la strutturazione di un modello di intercettazione dei RAEE solido e capillare, in piena conformità con le direttive introdotte dal D.Lgs. 49/2014 per la gestione dei rifiuti elettronici. A tal fine, la strategia di approvvigionamento progettata si basa su un canale duale, strutturato per gestire le differenti peculiarità del mercato fotovoltaico siciliano. Il primo flusso, seppur numericamente frammentato, è rappresentato dal canale B2C (Business to Consumer), ovvero dai RAEE fotovoltaici di derivazione domestica. Questo approvvigionamento verrà garantito attraverso accordi strategici con i Centri di Raccolta comunali (CdR) diffusi sul territorio e mediante convenzioni con i network dei Sistemi Collettivi (i Consorzi RAEE autorizzati) [13], che si occuperanno del raggruppamento e dell'invio dei lotti all'impianto centrale. Tuttavia, la quota preponderante dell'inflow per il raggiungimento delle 16.800 tonnellate annue deriverà inevitabilmente dal canale B2B (Business to Business), inerente i RAEE professionali e i grandi parchi fotovoltaici a terra. Questo segmento rappresenta il vero "core" dell'approvvigionamento. L'impianto siciliano, infatti, opererà mediante la stipula di contratti diretti di filiera e di servizio con i grandi *player* energetici, i fondi di investimento e i gestori degli impianti installati durante i

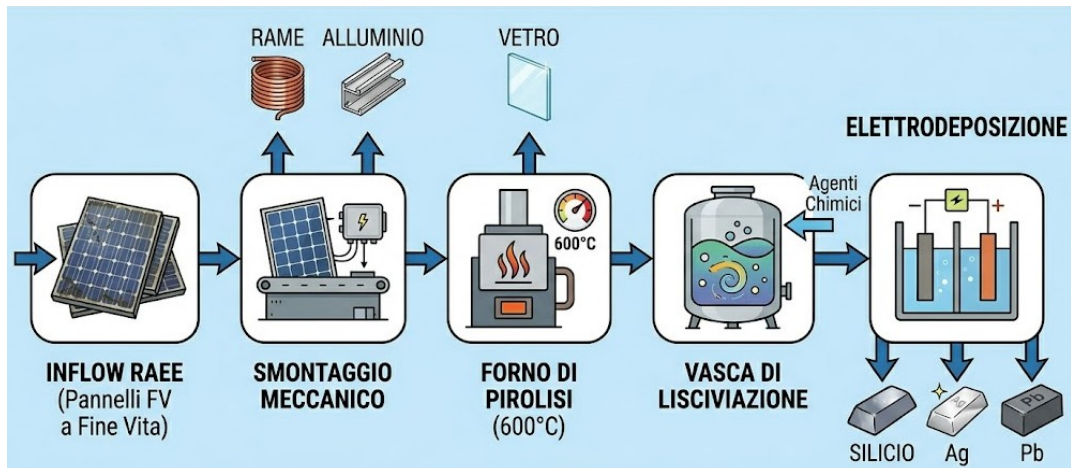
primi cicli del "Conto Energia". Considerando che questi impianti professionali andranno incontro a massicci interventi di *revamping* e *repowering* nel prossimo decennio, la dismissione avverrà per lotti di migliaia di tonnellate simultaneamente. In questo scenario, l'ottimizzazione logistica raggiungerà la sua massima espressione: i moduli dismessi, pallettizzati direttamente in loco, viaggeranno con carichi completi dal sito di installazione o smantellamento direttamente all'area di stoccaggio dell'impianto di riciclo, bypassando i centri di raggruppamento intermedi. Questa filiera corta e diretta non solo garantirà l'inflow massivo necessario per sostenere l'investimento in tecnologie termo-chimiche avanzate, ma ridurrà anche i rischi di danneggiamento accidentale dei moduli durante i trasbordi, preservando l'integrità del vetro e del silicio e massimizzando così le rese di recupero delle fasi successive.

5.2 Eco-design del processo di riciclo: architettura tecnologica e bilanci di materia

Il cuore tecnologico e manageriale dell'impianto siciliano si basa su una scelta strategica fondamentale: superare i limiti strutturali ed economici dei tradizionali approcci di riciclo esclusivamente meccanici. Attualmente, la quasi totalità degli impianti standard (progettati originariamente per il trattamento generico dei RAEE) si limita a tritare l'intero pannello fotovoltaico, affidandosi successivamente a sistemi di separazione densimetrica o magnetica [24]. Sebbene questo approccio lineare richieda investimenti di capitale (CAPEX) inferiori, esso si traduce in un inesorabile processo di *downcycling*: il vetro, contaminato da polveri plastiche e frammenti metallici, perde le sue proprietà ottiche e viene declassato a inerte per l'edilizia (con un valore di mercato prossimo allo zero), mentre i materiali critici e preziosi – in primis il silicio puro e l'argento dei contatti elettrici – finiscono dispersi nelle frazioni di scarto destinate all'incenerimento o alla discarica. Da una prospettiva economica, questo metodo distrugge letteralmente il valore intrinseco del prodotto a fine vita. Per invertire questo paradigma e tradurre in pratica i dettami della vera economia circolare, il design ingegneristico dell'impianto proposto si ispira ai più avanzati modelli termo-chimici europei attualmente in fase di industrializzazione [19]. L'obiettivo operativo non è il mero smaltimento volumetrico del rifiuto, ma l'estrazione di Materie Prime Seconde (MPS)

caratterizzate da un grado di purezza tale da poter essere reintrodotte sui mercati globali come *commodity* ad alto valore aggiunto, applicando un *premium price* rispetto ai materiali riciclati di bassa qualità [29].

FIGURA 5.2 - Diagramma di Flusso di Processo (PFD).



Fonte: Elaborazione personale su modelli di Lim et al. [35] e Ardente et al. [36]

L'architettura ingegneristica di questo processo avanzato si articola in fasi sequenziali e sinergiche, progettate per disassemblare il modulo strato dopo strato. La prima fase operativa è il **pre-trattamento meccanico selettivo**. In questo step, sistemi automatizzati provvedono alla rimozione della cornice esterna in alluminio e della scatola di giunzione elettrica posta sul retro (contenente rame e polimeri plastici). Dal punto di vista del Business Plan, questa fase apparentemente semplice riveste un ruolo cruciale per il *cash flow* dell'impianto: permette infatti di isolare immediatamente due frazioni metalliche (alluminio e rame) estremamente pulite e altamente liquide. Essendo quotate quotidianamente su borse merci come il London Metal Exchange (LME) [30], la loro vendita garantisce flussi di cassa rapidi che contribuiscono a coprire le spese operative correnti (OPEX).

Una volta rimosse le strutture esterne, ciò che rimane è il vero e proprio "sandwich" fotovoltaico, costituito da uno spesso strato di vetro, dalle celle in silicio e dalla matrice incapsulante in Etilene Vinil Acetato (EVA) che salda indissolubilmente il tutto. In un approccio circolare, la separazione di questi strati senza causarne la

frammentazione è la sfida tecnica principale. Per questo motivo, l'impianto adotta un trattamento termico rigorosamente controllato noto come **pirolisi**. Sulla base di parametri termodinamici validati scientificamente [35], i pannelli vengono introdotti in forni specifici operanti a circa 600 °C in assenza di ossigeno per la durata di un'ora. L'impiego della pirolisi ha uno scopo ben preciso: degradare termicamente e vaporizzare i polimeri plastici dell'EVA senza fondere né alterare le componenti inorganiche. Il risultato di questa operazione è straordinario sia sotto il profilo ingegneristico che economico: il vetro fotovoltaico (che costituisce da solo oltre il 70% della massa di un pannello) viene liberato intatto dai leganti e può essere recuperato con una purezza altissima [28]. Piuttosto che essere venduto a pochi euro a tonnellata come inerte, questo "vetro solare", già privo di impurità di ferro e ad alta trasmittanza, può essere venduto all'industria vetraria come materia prima secondaria per la produzione di nuovi moduli (*upcycling*), massimizzando enormemente i margini di profitto su questa singola voce materica.

Terminata la separazione del vetro e la sublimazione delle plastiche, sul nastro di processo permane esclusivamente la componente attiva del modulo: la cella in silicio cristallino, reticolata dalle sottilissime piste conduttive in argento e alluminio. Questa frazione residua viene avviata al **comparto idrometallurgico**, che rappresenta il vero motore tecnologico e il differenziale competitivo dell'intero progetto. L'approccio chimico si basa su un processo di lisciviazione (o *acid etching*): le celle vengono immerse in una soluzione acquosa attentamente calibrata, composta da acido nitrico, acido solforico e perossido di idrogeno (utilizzato come catalizzatore). La logica ingegneristica sottostante è quella di utilizzare la chimica come un "bisturi selettivo": la miscela acida non intacca minimamente la struttura del silicio, ma dissolve esclusivamente le metallizzazioni superficiali, trasferendo i metalli preziosi dallo stato solido alla soluzione liquida. In economia circolare, questa fase rappresenta la risoluzione del paradosso "volume-valore": l'argento costituisce meno dello 0,1% del peso complessivo di un pannello fotovoltaico, ma rappresenta storicamente oltre il 40-50% del suo valore economico recuperabile [20]. Investire in tecnologie capaci di estrarre questa micro-frazione è il requisito fondamentale per garantire il ritorno sull'investimento (ROI) dell'infrastruttura.

Per separare e recuperare i singoli metalli ormai disciolti nella soluzione acida, il processo adotta l'**elettrodeposizione sequenziale a voltaggio costante**. Sfruttando i diversi potenziali standard di riduzione (il parametro elettrochimico specifico di ogni elemento), la soluzione viene attraversata da una corrente elettrica controllata che fa "precipitare" e solidificare i metalli in sequenza su appositi elettrodi: prima l'argento (Ag), che possiede il potenziale più nobile, poi il piombo (Pb) [35]. L'alluminio residuo in soluzione viene infine recuperato modificando il pH del liquido (neutralizzazione), inducendone la precipitazione sotto forma di idrossido di alluminio solido. Le prestazioni di questo comparto sono confermate da rigorosi test di laboratorio che attestano rese di recupero eccezionali.

A completamento dell'eco-design ingegneristico, è imperativo affrontare la gestione degli scarti di processo e il fabbisogno energetico dell'infrastruttura. Le elevate temperature della pirolisi (600 °C) generano fumi derivanti dalla sublimazione dei polimeri, mentre il comparto idrometallurgico impiega soluzioni acide che tendono all'esaurimento. Per garantire il rispetto dei più severi standard ambientali, l'impianto sarà dotato di avanzati sistemi di *scrubbing* ad umido per il lavaggio e la neutralizzazione dei gas di scarico, azzerando le emissioni nocive in atmosfera. Parallelamente, il processo chimico opererà in un sistema a circuito chiuso (*closed-loop*), integrando impianti di osmosi e filtrazione per depurare e ricircolare sia l'acqua che gli agenti liscivianti, riducendo drasticamente il consumo di risorse idriche e abbattendo i costi di smaltimento dei fanghi industriali. Infine, per mitigare l'elevato assorbimento elettrico richiesto dai forni termici e dall'elettrodeposizione, la struttura sarà progettata secondo logiche di autoconsumo: la copertura del capannone industriale ospiterà un impianto fotovoltaico dedicato che fornirà energia a chilometro zero, abbattendo l'OPEX energetico e riducendo ulteriormente la *Carbon Footprint* del processo di riciclo.

La **Tabella 5.1** sintetizza i volumi, le destinazioni di mercato e i tassi di recupero previsti per ciascuna risorsa estratta dal ciclo produttivo dell'impianto:

Tabella 5.1 – Bilancio di materia e tassi di recupero del processo termo-chimico proposto

Componente	Frazione di Massa	Tasso di Recupero	Livello di Purezza	Destinazione (Mercati MPS)
Vetro Solare	~ 70 %	> 95 %	Elevata (trasparenza ottica)	Industria vetraria (Upcycling)
Alluminio	~ 10 %	97 %	Elevata (LME grade)	Fonderie e Borsa Metalli
Silicio (Wafer)	~ 3-5 %	> 90 %	~ 99 % (Solar-grade)	Produzione nuovi lingotti FV
Rame	~ 1 %	> 95 %	Elevata	Industria metallurgica
Argento (Ag)	< 0,1 %	86 %	Elevatissima	Mercato metalli preziosi
Piombo (Pb)	< 0,1 %	95 %	Standard industriale	Industria manifatturiera

Fonte: Elaborazione personale su dati di letteratura tecnica [35], [36] e specifiche industriali [28], [29].

L'ultimo traguardo di questo ciclo è, come visibile in tabella, il recupero del silicio. I *wafer* fotovoltaici, usciti intatti dal bagno acido che li ha spogliati dai contatti metallici, raggiungono livelli di purezza che sfiorano il 99%. Il silicio è classificato dall'Unione Europea come una Materia Prima Critica (Critical Raw Material) a causa dell'altissimo rischio di approvvigionamento dai mercati extra-europei. Il recupero di questa frazione permette di ottenere un Silicio Metallurgico Purificato (noto in gergo come *Upgraded Metallurgical-Grade Silicon* o UMG-Si) con una purezza che sfiora il 99%. Aniché investire in un gravoso CAPEX per un'ulteriore purificazione *in loco*, la strategia impiantistica prevede di vendere questo UMG-Si come materia prima (feedstock) di altissimo pregio alle grandi raffinerie europee. Saranno queste ultime, sfruttando enormi economie di scala, a effettuare il definitivo upgrade al grado fotovoltaico (purezza 99,999%), chiudendo il cerchio produttivo a livello continentale. Applicando

rigorosamente questi coefficienti di recupero e di purezza al target volumetrico dell'impianto siciliano (16.800 tonnellate all'anno), si comprende come la struttura progettata non sia un semplice centro di smaltimento costi, ma un vero e proprio polo estrattivo avanzato. Esso internalizza tecnologie complesse per tramutare una passività ambientale in un portafoglio di *commodity* altamente remunerative, bilanciando gli elevati costi di processo con i ricavi derivanti da un mercato in costante espansione.

5.3 Valutazione di sostenibilità ambientale: Analisi LCA, mix energetico e calcolo dei benefici netti

La progettazione ingegneristica di un impianto termo-chimico ad alto tasso di recupero materico, per quanto tecnicamente innovativa e in grado di generare flussi di cassa positivi, non può dirsi completa senza una rigorosa e disincantata validazione del suo reale impatto ecologico. Nel campo del *Management della Sostenibilità*, l'adozione di un modello di business teoricamente circolare non implica un beneficio ambientale assoluto a prescindere dalle tecnologie impiegate. Al contrario, è necessario assumere un approccio critico: i processi di riciclo avanzati – come la pirolisi a 600 °C e i bagni idrometallurgici descritti nel paragrafo precedente – sono altamente energivori e richiedono input chimici significativi (acidi e perossido di idrogeno) che generano, inevitabilmente, nuove esternalità negative. Per dirimere questo potenziale paradosso "energia contro materia", scongiurando il rischio di *greenwashing* industriale, è indispensabile ricorrere all'approccio metodologico del *Life Cycle Assessment* (LCA), standardizzato a livello internazionale dalle norme ISO 14040 e 14044. L'obiettivo manageriale di questa valutazione non è dimostrare che l'impianto sia a "impatto zero" – una condizione fisicamente irrealizzabile per l'industria pesante – bensì quantificare i carichi ambientali generati dalle operazioni di trattamento e confrontarli sistematicamente con i benefici derivanti dalla mancata estrazione di Materie Prime Seconde (MPS), verificando la reale superiorità del modello termo-chimico rispetto allo scenario lineare (lo smaltimento in discarica).

Per garantire la replicabilità, il rigore scientifico dell'analisi e la corretta interpretazione dei dati, il primo passo metodologico consiste nella definizione inequivocabile dell'Unità Funzionale (UF) e dei confini del sistema (*System Boundaries*).

Allineandosi alla letteratura accademica più autorevole in materia di *end-of-life* fotovoltaico [35], l'Unità Funzionale adottata per la presente disamina è definita come "il trattamento logistico e il recupero materico di 1 tonnellata (1.000 kg) di moduli fotovoltaici in silicio cristallino giunti a fine vita operativa". I confini del sistema sono stati impostati secondo un approccio *Gate-to-Gate* (da cancello a cancello). Essi includono esplicitamente: la fase logistica di intercettazione e trasporto dei rifiuti dai siti di dismissione all'impianto siciliano (ottimizzata, come precedentemente stabilito, entro un raggio di 100-150 km), il consumo diretto di energia elettrica e termica per il pre-trattamento meccanico e la pirolisi, la produzione a monte e il consumo dei reagenti chimici per la fase di lisciviazione, l'elettrodeposizione dei metalli e, infine, le emissioni dirette al netto dei sistemi di *scrubbing* per il filtraggio dei fumi. Al fine di evitare fenomeni di doppio conteggio (*double counting*), sono invece rigorosamente esclusi dai confini del sistema gli impatti legati all'estrazione originaria dei materiali costituenti il pannello e alla sua fabbricazione iniziale in fabbrica, i quali vengono attribuiti storicamente alla prima vita utile del prodotto secondo il consolidato principio del *cut-off*.

Entrando nel merito del bilancio emissivo, l'indicatore di impatto primario preso in considerazione è il *Global Warming Potential* (GWP), misurato in chilogrammi di anidride carbonica equivalente (kg CO₂-eq) e comunemente noto come Impronta Carbonica o *Carbon Footprint*. Sulla base dei dati empirici estrapolati dai recenti studi di settore (Lim et al., 2022) [35], lo smaltimento lineare in discarica di una tonnellata di pannelli fotovoltaici genera un impatto diretto valutabile in circa 121 kg CO₂-eq. Questo valore è imputabile principalmente alle operazioni meccaniche di interrimento e alla lenta lisciviazione passiva di contaminanti nel suolo nel lungo periodo. Sottoporre la medesima tonnellata al complesso processo termo-chimico siciliano presenta, come anticipato dall'analisi critica, un carico ambientale lordo notevolmente superiore. Le simulazioni effettuate su processi industriali idrometallurgici avanzati (come il progetto europeo FRELP analizzato in dettaglio da Ardente et al., 2019) [36] indicano che il massiccio fabbisogno energetico dei forni di pirolisi e, in misura minore, la filiera di produzione degli acidi industriali impiegati, comportano un'emissione di processo pari a circa 461 kg CO₂-eq per tonnellata trattata. Se la metrica dell'LCA si limitasse all'analisi esclusiva dei carichi diretti (fermandosi al cancello di uscita dell'impianto), il

riciclo termo-chimico apparirebbe, in modo controintuitivo, tre volte più inquinante del semplice conferimento in discarica.

Tuttavia, l'approccio olistico dell'LCA richiede l'applicazione rigorosa del principio dei "Carichi Evitati" (*Avoided Burdens*), che rappresenta l'architrave concettuale e quantitativa dell'intera economia circolare. Il recupero di materiali critici e ad altissima intensità energetica – quali il silicio di grado solare, l'argento per i contatti e l'alluminio – all'interno dell'impianto, evita la necessità che l'industria globale estragga, raffini e trasporti le medesime quantità di materie prime vergini dalla crosta terrestre. I processi di estrazione mineraria primaria (il *mining*), in particolare per metalli preziosi e per la raffinazione del quarzo in silicio metallurgico, sono annoverati tra i settori più energivori e climalteranti a livello globale. A ciò si aggiunge l'impatto della logistica internazionale, dato che tali risorse provengono prevalentemente da aree extra-europee (Cina e Sud America). La letteratura scientifica [36] dimostra in modo inequivocabile che l'immissione sul mercato di 1 tonnellata di Materie Prime Seconde derivanti dal fotovoltaico, andando a sostituire i corrispettivi materiali vergini, genera "crediti ambientali" massicci.

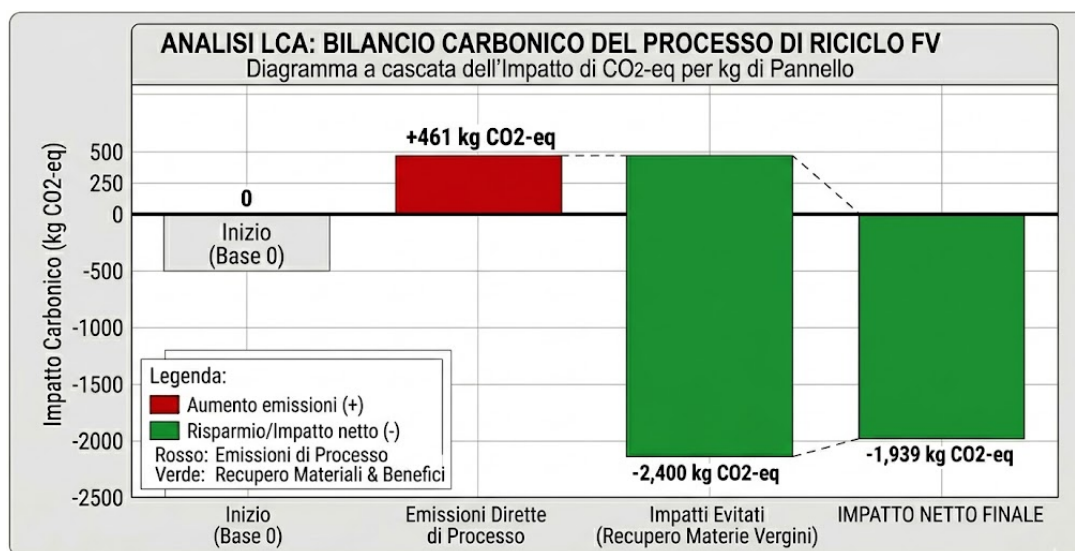
Per conferire ulteriore robustezza e credibilità scientifica all'analisi, è fondamentale osservare che l'LCA multi-criterio non si limita alla sola CO₂. Studi accademici approfonditi [36] hanno esteso l'analisi dei carichi evitati a molteplici categorie di impatto standardizzate (metodo CML o ReCiPe). La **Tabella 5.2** rielabora i risultati dell'analisi di impatto ambientale multi-categoria, dimostrando come i crediti derivanti dal recupero dell'argento e del silicio (le cosiddette frazioni ad alto valore) ribaltino nettamente gli impatti del processo non solo per i cambiamenti climatici, ma anche per l'acidificazione e il consumo di risorse minerali.

Tabella 5.2 – Analisi Multi-Categoria LCA: Confronto tra Impatti di Processo e Carichi Evitati per 1 tonnellata di pannelli FV trattati

CATEGORIA DI IMPATTO (METODO LCA)	UNITÀ DI MISURA	IMPATTO LORDO DI PROCESSO	CREDITI AMBIENTALI (MATERIE VERGINI EVITATE)	IMPATTO NETTO
Riscaldamento Globale (GWP)	kg CO ₂ -eq	461,00	- 2.400,00	- 1.939,00
Potenziale di Acidificazione (AP)	kg SO ₂ -eq	3,50	- 15,20	- 11,70
Tossicità Umana (HTP)	kg 1,4-DCB-eq	45,00	- 350,00	- 305,00
Esaurimento Risorse Abiotiche (ADP)	kg Sb-eq	0,01	- 0,85	- 0,84

Fonte e Note Metodologiche: Elaborazione personale su inventario LCI primario di Ardente et al. (2019) [36]. La modellizzazione dei processi di background (energia, chimica, logistica) si basa sui set di dati del database **Ecoinvent 3.x** (cut-off by classification). La caratterizzazione degli impatti (LCIA) è stata condotta tramite il metodo **CML-IA baseline**. Il calcolo dei crediti ambientali applica il principio della System Expansion (Avoided Burdens) con un tasso di sostituzione 1:1 tra le Materie Prime Seconde estratte e i materiali vergini. Valori normalizzati su un'Unità Funzionale (UF) di 1 tonnellata.

FIGURA 5.3 - Grafico a cascata (Waterfall Chart) dell'LCA relativo al GWP.



Fonte: Elaborazione personale su dati di letteratura [36]

L'aggregazione algebrica di questi valori restituisce il Beneficio Ambientale Netto (Net Environmental Benefit), ribaltando completamente la prospettiva analitica iniziale. Sottraendo le emissioni lorde generate dal processo (+461 kg CO₂-eq) dai

crediti ambientali derivanti dal recupero dei materiali (-2.400 kg CO₂-eq), il bilancio LCA dell'infrastruttura risulta essere fortemente carbon negative. Per ogni singola tonnellata di pannelli fotovoltaici processata, l'impianto termo-chimico evita l'immissione netta in atmosfera di 1.939 kg di CO₂ equivalente. Questo dato unitario assume una valenza gestionale e territoriale straordinaria nel momento in cui viene scalato sui volumi operativi di progetto calcolati per la Regione Sicilia. Applicando il coefficiente di risparmio netto al target infrastrutturale di 16.800 tonnellate annue (corrispondente al picco di emissioni atteso nel biennio 2033-2034) [32], il calcolo restituisce un beneficio ambientale aggregato di importanza strategica nazionale.

La **Tabella 5.3** sintetizza l'estrapolazione e la scalabilità dei risultati della Life Cycle Assessment applicati all'operatività a regime del polo impiantistico regionale:

Tabella 5.3 – Bilancio GWP Netto dell'Impianto FV in Sicilia (Target operativo: 16.800 ton/anno)

VOCE DI IMPATTO LCA (CATEGORIA: GLOBAL WARMING POTENTIAL)	VALORE UNITARIO (KG CO ₂ -EQ / TON)	VALORE AGGREGATO SICILIA (TONNELLATE CO ₂ -EQ / ANNO)
Impatto Diretto di Processo (Energia, Logistica, Reagenti)	+ 461	+ 7.744
Crediti Ambientali da Materiali Vergini Evitati (Si, Ag, Al, Cu, Vetro)	- 2.400	- 40.320
BENEFICIO AMBIENTALE NETTO (Risparmio Netto di Emissioni)	- 1.939	- 32.576
Termine di paragone lineare: Impatto smaltimento in Discarica	+ 121	+ 2.032

Fonte: Elaborazione personale su proiezioni volumetriche e fattori di emissione da letteratura tecnica (Lim et al. [35]), Ardente et al. [36])

Come si evince chiaramente dall'elaborazione dei dati aggregati, a piena capacità l'impianto siciliano permetterà di evitare l'emissione di oltre 32.500 tonnellate di CO₂ equivalente ogni singolo anno di esercizio. A titolo di contestualizzazione manageriale, tale risparmio emissivo equivale alla neutralizzazione dell'impronta carbonica annuale

di migliaia di cittadini o alla rimozione di una considerevole flotta di autovetture a combustione interna dalla viabilità regionale.

Tuttavia, un'analisi critica dei risultati LCA impone un'ultima, doverosa riflessione di carattere sistemico sulla sensibilità dei dati. Il valore di 461 kg CO₂-eq emessi per tonnellata trattata non è una costante fisica, ma una variabile strettamente dipendente dal grado di intensità carbonica del mix energetico regionale da cui l'impianto preleverà l'energia elettrica. Poiché la rete elettrica siciliana presenta ancora una dipendenza significativa dalle centrali termoelettriche a gas naturale, alimentare i forni di pirolisi esclusivamente prelevando energia dalla rete rischierebbe di erodere i margini del beneficio ambientale calcolato. È in questo preciso snodo critico che emerge il valore fondante dell'eco-design integrato descritto nel paragrafo precedente: l'installazione di un impianto fotovoltaico in autoconsumo a copertura del capannone industriale, unita all'approvvigionamento tramite PPA (*Power Purchase Agreement*) da fonti totalmente rinnovabili, cessa di essere una mera opzione accessoria e si configura come un *driver* vitale del modello di business. Solo garantendo la decarbonizzazione dell'input energetico a monte, l'impianto siciliano potrà non solo consolidare, ma spingere ulteriormente verso il basso il valore delle emissioni di processo, massimizzando il delta positivo dell'economia circolare e trasformando la gestione dei RAEE fotovoltaici in un concreto pilastro della transizione ecologica regionale.

5.4 Valutazione di sostenibilità economica e strategica: Approccio Modulare e Sustainable Business Model Canvas

La validazione tecnica e ambientale di un'infrastruttura industriale, per quanto innovativa, perde la sua reale efficacia se non è intimamente supportata da una solida architettura gestionale. Nel contesto dell'odierna transizione ecologica, un impianto di riciclo fotovoltaico ad alta complessità tecnologica non può e non deve essere concepito come un mero centro di costo pubblico, sussidiato cronicamente o dipendente da dinamiche di smaltimento emergenziale. Al contrario, per garantire un impatto duraturo, deve configurarsi sin dalla sua genesi come un'entità aziendale autonoma, competitiva e finanziariamente resiliente. L'obiettivo di questo paragrafo è tradurre le meticolose scelte di eco-design ingegneristico in un modello di business integrato e scalabile,

abbracciando un approccio strategico olistico tipico del moderno *Management della Sostenibilità*, capace di bilanciare la profittabilità privata con la massimizzazione dei benefici collettivi.

L'approccio industriale: Scalabilità e Modularità dell'Investimento come strumenti di De-Risking

La principale causa di fallimento (la cosiddetta *valley of death* finanziaria) per le grandi infrastrutture operanti nella gestione dei rifiuti risiede frequentemente in un ingiustificato sovradimensionamento iniziale (*over-capacity*). L'analisi dei flussi regionali ha stimato per la Sicilia un imponente picco di dismissioni, pari a circa 16.800 tonnellate annue [32]. Tuttavia, questo volume non è immediatamente disponibile sul mercato, ma si concretizzerà pienamente soltanto nel biennio critico 2033-2034. Progettare e finanziare una "*megafactory*" strutturata per assorbire interamente tale picco sin dal primo giorno comporterebbe un esborso di capitale (CAPEX) del tutto sproporzionato rispetto alle reali dinamiche di approvvigionamento a breve termine. Questa grave asimmetria tra capacità installata e materia prima disponibile genererebbe il rischio fatale di operare in profonda sottocapacità per i primi 5-7 anni di esercizio, erodendo irrimediabilmente i margini operativi e la liquidità sotto il peso degli ammortamenti e dei costi fissi di manutenzione.

Per azzerare questo rischio finanziario e garantire la sopravvivenza dell'impresa, la strategia industriale proposta si fonda rigorosamente sui principi della *modularità scalabile*. Il progetto prevede un investimento iniziale prudentiale, mirato esclusivamente alla costruzione e all'avvio di una singola "linea produttiva pilota". Questa infrastruttura di base sarà dimensionata per trattare circa 4.200 tonnellate annue di RAEE fotovoltaici, corrispondenti esattamente al 25% del fabbisogno di picco stimato a regime. Questa architettura strategica garantisce un deciso e vitale abbattimento delle barriere all'ingresso (*entry barriers*). Il CAPEX iniziale, stimabile in un *range* contenuto tra 1,5 e 2 milioni di euro per una singola catena termo-chimica completa [35], trasforma l'iniziativa da un azzardo speculativo a un progetto altamente bancabile (*bankable*). Tale scala di investimento risulta ideale non solo per attrarre linee di credito istituzionali tradizionali, ma soprattutto per intercettare i fondi di *Private Equity* orientati ai criteri ESG (Environmental, Social, Governance) o per accedere alle risorse di co-

finanziamento previste dal PNRR per lo sviluppo dell'economia circolare nel Mezzogiorno.

Inoltre, avviare le operazioni su scala ridotta assolve a una funzione manageriale e tecnica inestimabile: attiva un'indispensabile curva di apprendimento (*learning curve*). I complessi processi chimici di lisciviazione e l'utilizzo dei forni di pirolisi necessitano di una costante e delicata calibrazione industriale per far fronte alle fisiologiche impurità presenti nei vecchi pannelli (quali residui di resine o collanti imprevisti). Operare inizialmente con volumi ridotti permette al *management* ingegneristico di ottimizzare le tempistiche dei bagni acidi, perfezionare i dosaggi dei reagenti e risolvere tempestivamente eventuali colli di bottiglia termodinamici, il tutto prima di procedere a un costoso *ramp-up* globale. Una volta portata a regime la prima linea e validata la purezza delle Materie Prime Seconde sul mercato, il modello prevede una fase di crescita interamente autofinanziata. I massicci flussi di cassa generati dalla prima operatività verranno reinvestiti progressivamente per l'acquisizione e l'installazione in parallelo delle linee successive. Tale meccanismo virtuoso allineerà perfettamente l'espansione della capacità di trattamento alla reale crescita esponenziale dei rifiuti attesa sul territorio siciliano.

Il Triple Layered Business Model Canvas (TLBMC): La mappa del valore multidimensionale

Per modellizzare i complessi meccanismi di generazione del valore e superare in via definitiva l'approccio riduzionistico limitato ai soli ritorni finanziari per gli azionisti (*shareholder primacy*), l'architettura strategica del progetto è stata declinata adottando il framework del *Triple Layered Business Model Canvas* (TLBMC) ideato da Joyce e Paquin. A differenza dei modelli di business tradizionali – che tendono a internalizzare i profitti ed esternalizzare i costi ambientali e sociali – questo strumento è ritenuto il più idoneo per l'industria circolare, in quanto applica il paradigma sistemico della *Triple Bottom Line* sviluppando l'analisi su tre livelli operativi distinti e interdipendenti: Economico, Ambientale e Sociale.

Figura 5.4 – Triple Layered Business Model Canvas (TLBMC) dell'infrastruttura di riciclo proposta, articolato nelle tre dimensioni della sostenibilità.

Figura 5.4a – Livello Economico (Economic Layer): Modello di business duale e mitigazione dei rischi finanziari.



Figura 5.4b – Livello Ambientale (Environmental Layer): Eco-design, circolarità e bilancio carbonico netto.

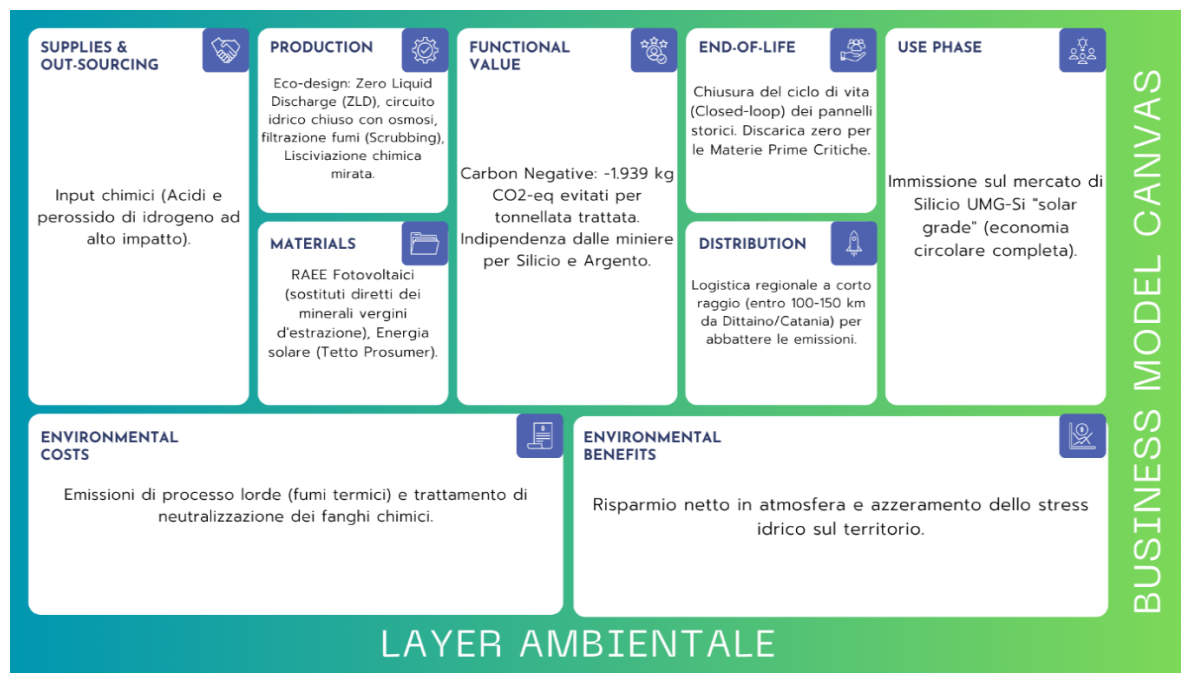
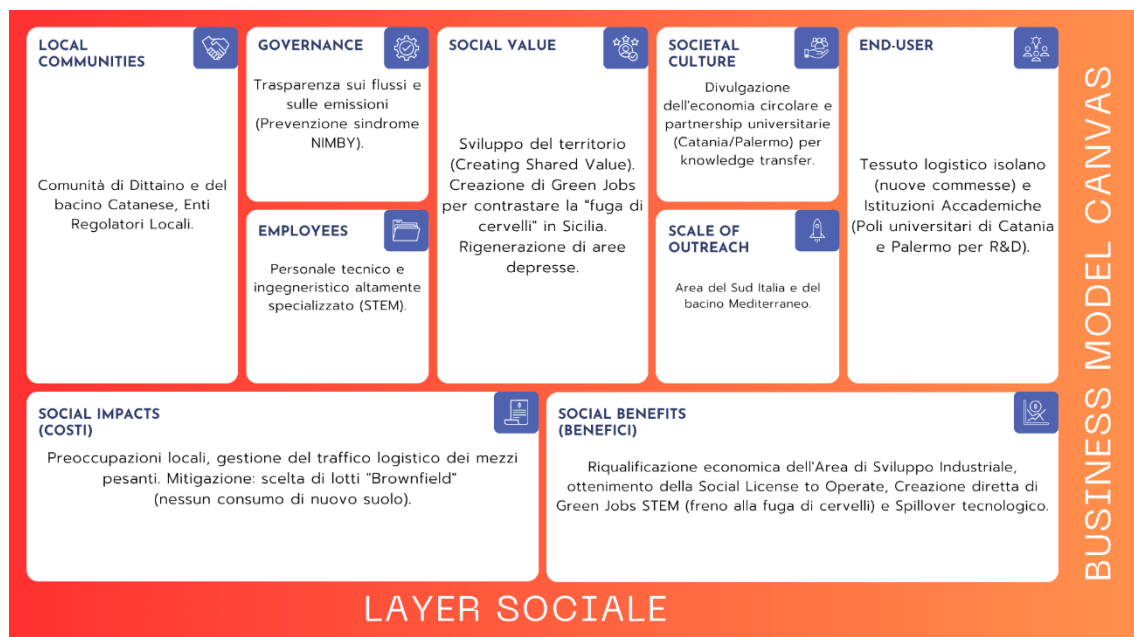


Figura 5.4c – Livello Sociale (Social Layer): Creazione di Valore Condiviso e ricadute occupazionali sul territorio.



Fonte: Elaborazione personale su framework teorico di Joyce e Paquin (2016) [37].

L'indagine del **Livello Economico** (*Economic Layer*) definisce in modo pragmatico le fondamenta finanziarie dell'impresa. La Proposta di Valore si concentra, prima ancora che sull'ideale ecologico, sulla risoluzione di precise asimmetrie e inefficienze industriali. Dal lato dell'offerta (mercato B2B dei conferimenti), l'impianto offre ai grandi gestori di parchi fotovoltaici e ai Consorzi RAEE una filiera di smaltimento a chilometro zero, pienamente certificata e tracciabile. Questa vicinanza strategica abbate drasticamente i gravosi costi di logistica inversa, superando il collo di bottiglia strutturale dello Stretto di Messina, che oggi rende l'esportazione dei rifiuti speciali fuori dall'isola un salasso per gli operatori. Dal lato della domanda, la struttura si propone alle fonderie, alle vetrerie e alle nascenti *gigafactory* europee come partner strategico per l'approvvigionamento a filiera corta di *commodity* di altissima purezza (Silicio UMG-Si, Vetro solare, Argento). Per mitigare la marcata volatilità speculativa delle materie prime sul London Metal Exchange (LME), il *management* dovrà strutturare un portafoglio clienti solido, basato prioritariamente su accordi diretti di fornitura pluriennale (*off-take agreements*), capaci di fissare prezzi di ritiro minimi garantiti. La

resilienza intrinseca di questo livello è assicurata dalla presenza di un *Dual-Revenue Model* (modello a doppio ricavo). Il primo pilastro portante è la *Gate Fee* (la tariffa di accettazione del rifiuto, stimabile in circa 70-80 euro per tonnellata). Questa componente fornisce una base di liquidità sicura, prevedibile e totalmente indipendente dalle imprevedibili fluttuazioni di borsa, rivelandosi fondamentale per la copertura delle spese amministrative e degli oneri finanziari. Il secondo pilastro, dal potenziale nettamente più speculativo, è la vendita sul mercato globale delle Materie Prime Seconde estratte. Questo delicato bilanciamento tra ricavi certi e ricavi variabili è vitale per sostenere Costi Operativi (OPEX) eccezionalmente elevati. Tali costi, stimabili in un *range* di 450-500 euro per tonnellata, sono dovuti alla severa intensità termica richiesta per mantenere i forni di pirolisi a 600°C e al consumo continuo di reagenti chimici complessi (come l'acido nitrico e l'acido solforico). L'unico grave rischio strategico per l'intero layer economico è di natura puramente burocratica: la mancata o tardiva emanazione delle certificazioni *End of Waste* (EoW) da parte degli uffici della Regione Siciliana impedirebbe la vendita legale dei materiali, bloccando i piazzali di stoccaggio e causando un immediato collasso della liquidità aziendale.

Connesso e parallelo al bilancio finanziario, il **Livello Ambientale** (*Environmental Layer*) si occupa di tradurre i benefici ecologici intangibili in veri e propri asset aziendali misurabili e rendicontabili. In questo *layer*, la Proposta di Valore Ambientale abbandona il generico concetto di "greenwashing" per ancorarsi a un dato empirico e scientifico certificato dallo studio LCA: un risparmio netto garantito pari a 1.939 kg di CO₂ equivalente per ogni singola tonnellata processata, un risultato eccezionale derivante dall'aver evitato l'impatto distruttivo e climalterante legato all'estrazione mineraria primaria in paesi extra-europei. A supportare direttamente questa prestazione d'eccellenza vi è la rigorosa politica di scarico idrico nullo (*Zero Liquid Discharge - ZLD*) adottata dall'impianto. Implementando un circuito chiuso altamente ingegnerizzato, dotato di filtri a osmosi inversa, l'azienda depura e ricicla interamente i propri acidi e i fluidi di processo. Questa scelta impiantistica si rivela un colpo di genio strategico: da un lato abbatte drasticamente lo stress idrico sulle reti locali – una problematica endemica e storicamente acuta per il territorio siciliano – e dall'altro annulla alla radice il rischio di contaminazione accidentale delle falde acquifere, facilitando e blindando l'ottenimento della complessa Autorizzazione Integrata Ambientale (AIA).

L'impianto internalizza volontariamente i propri Costi Ambientali (le esternalità negative) investendo ingenti capitali in torri di *scrubbing* ad umido per lavare e neutralizzare completamente i fumi tossici della pirolisi. Infine, le criticità legate agli altissimi consumi elettrici vengono parzialmente mitigate trasformando l'azienda in un operatore *prosumer*, grazie all'utilizzo dell'energia solare prodotta dal proprio tetto fotovoltaico per alimentare i macchinari e i processi termici.

A completamento e coronamento dell'analisi multidimensionale, il **Livello Sociale** (*Social Layer*) affronta il necessario radicamento dell'azienda nel delicato tessuto locale attraverso la lente del Valore Condiviso (*Creating Shared Value* - CSV). L'obiettivo primario di questa dimensione manageriale è elevare una complessa infrastruttura di gestione rifiuti – tradizionalmente malvista e percepita come un peso – a vero e proprio propulsore di riqualificazione economica. Solo attraverso questo ribaltamento di prospettiva l'impianto potrà ottenere e preservare la cruciale *Social License to Operate* (Licenza Sociale ad Operare), disinnescando fin dal principio le diffidenze e la sindrome NIMBY (*Not In My Back Yard*) che solitamente paralizza lo sviluppo industriale nel Sud Italia. Il progetto raggiungerà questo traguardo sfidante generando e distribuendo benefici sociali diretti ed evidenti. Il più potente e persuasivo tra questi è senza dubbio la creazione di *Green Jobs* altamente specializzati. Il processo termochimico non richiede infatti manodopera dequalificata, bensì decine di figure tecnico-scientifiche di eccellenza, quali ingegneri chimici, esperti in salute e sicurezza ambientale (HSE) e analisti di processo. Ciò offrirà un argine concreto e immediato alla drammatica "fuga di cervelli" che depaupera il capitale umano del Mezzogiorno. Parallelamente, le partnership strutturali siglate con i poli universitari di Catania e Palermo attiveranno un costante trasferimento tecnologico (*knowledge transfer*), finanziando dottorati di ricerca applicata e ottimizzando i processi in sinergia con l'accademia. I potenziali disagi sociali legati al transito logistico dei mezzi pesanti verranno invece sapientemente mitigati dalla rigorosa scelta architettonica del *brownfield*: insediando la struttura all'interno dell'Area di Sviluppo Industriale di Dittaino, l'azienda riutilizzerà l'urbanizzazione esistente, evitando il consumo di nuovo e prezioso suolo agricolo e contribuendo, al contempo, a rigenerare poli produttivi isolani ormai in fase di marcato declino.

Analisi dei Rischi Strategici: Transizione verso il "Silver Thrifting"

Un approccio manageriale realmente maturo, orientato alla solidità e alla sopravvivenza intergenerazionale dell'impresa, impone un'ultima e stringente riflessione sui rischi tecnologici di lungo periodo che incombono sull'intero settore. L'attuale ed eccezionale sostenibilità economica del riciclo fotovoltaico avanzato si poggia in larga misura sul noto "paradosso massa-valore": è l'estrazione dell'invisibile micro-frazione di argento – che pesa per meno dello 0,1% del modulo – a garantire i formidabili margini operativi speculativi necessari a coprire i giganteschi oneri chimici ed energetici dell'idrometallurgia. Tuttavia, l'intero modello di business è fortemente esposto a un incombente rischio esogeno derivante dai produttori asiatici, noto nella letteratura di settore come *Silver Thrifting*. Sotto la continua pressione per abbattere i costi di produzione su larga scala, l'industria manifatturiera globale ha avviato da anni una progressiva e drastica riduzione delle paste d'argento stampate sulle nuove celle solari [20]. Di conseguenza, si prospetta uno scenario in cui i moduli fotovoltaici che verranno dismessi tra quindici o vent'anni risulteranno intrinsecamente "impoveriti" di questo metallo nobile, innescando un potenziale crollo dei margini di profitto per chi basa il proprio business plan esclusivamente sull'estrazione dei metalli preziosi.

È proprio all'interno di questo delicato snodo critico che interviene e si esalta la visione strategica di lungo termine delineata per il polo siciliano. L'impianto beneficerà inizialmente di una irripetibile "finestra temporale di grazia": nel corso del prossimo decennio, il flusso logistico in ingresso sarà costituito in stragrande maggioranza da pannelli dismessi appartenenti ai primi cicli di installazione del Conto Energia (pre-2012) [9]. Questi moduli storici, prodotti quando il silicio e l'argento erano utilizzati in abbondanza, sono caratterizzati da spessori di metallo prezioso eccezionalmente alti. La dirigenza dovrà capitalizzare con estremo rigore questa prima fase aziendale, caratterizzata da un'altissima redditività speculativa, vincolando gli utili incassati a due obiettivi aziendali improrogabili: ammortizzare ed estinguere nel minor tempo possibile i debiti bancari contratti per il finanziamento del CAPEX iniziale, e finanziare in modo massiccio e continuo la divisione interna di Ricerca e Sviluppo (R&D) per ottimizzare e abbattere i futuri costi operativi (OPEX).

Grazie a questa attenta e conservativa strategia di allocazione del capitale, quando, inevitabilmente, i flussi di approvvigionamento futuri saranno composti dai moduli moderni e poveri d'argento, la struttura industriale si troverà in una condizione di totale e incolmabile vantaggio competitivo: sarà completamente libera da gravami finanziari sul debito e vanterà processi chimici altamente efficientati. In questa seconda e definitiva fase di maturità, la redditività netta dell'impianto si sposterà in modo strutturale dalla speculazione sull'argento alla massimizzazione dei volumi tramite la valorizzazione massiva del Silicio recuperato (UMG-Si). Essendo stato formalmente inquadrato dall'Unione Europea all'interno della lista delle Materie Prime Critiche (*Critical Raw Materials Act*), il silicio secondario purificato acquisirà un valore commerciale e geopolitico immenso, capace di compensare ampiamente la minor presenza di argento [17]. Attraverso questa transizione pianificata, l'impianto evolverà con successo da una logica estrattiva di breve respiro a una matura logica di fornitura circolare sistemica, ergendosi a infrastruttura di garanzia per l'indipendenza e la transizione energetica dell'intero bacino del Mediterraneo.

CAPITOLO 6

Conclusioni, Analisi Strategica e Raccomandazioni di Policy

6.1 Sintesi dei risultati e contributo strategico dello studio

Il presente elaborato ha analizzato la complessa e articolata gestione del fine vita dei moduli fotovoltaici, superando in maniera decisa l'approccio puramente incentrato sull'emergenza ambientale e sulla logica del mero smaltimento, per adottare una prospettiva profondamente sistemica e manageriale. L'assunto di partenza, solidamente corroborato dall'analisi quantitativa dei flussi prospettici regionali, ha evidenziato come l'indispensabile transizione energetica in atto implichi, in modo ineludibile, una sfida strutturale speculare di vastissime proporzioni: la dismissione, concentrata in un lasso di tempo relativamente ristretto, di un volume massivo di pannelli solari di prima e seconda generazione. Tale fenomeno, che per la sola Regione Sicilia genererà un flusso critico stimato in ben 16.800 tonnellate annue nel biennio 2033-2034 [32], impone un ripensamento radicale delle filiere di recupero. In tale scenario fortemente sfidante, la ricerca ha argomentato con rigore analitico come il riciclo meccanico tradizionale – attualmente predominante e limitato al recupero parziale e a basso costo delle frazioni massive, ovvero vetro misto e telai in alluminio – si configuri come un processo di *downcycling* subottimale e strategicamente inadeguato ([19], [22]). Tale metodo obsoleto, pur abbattendo i volumi da conferire in discarica, disperde inesorabilmente le micro-frazioni critiche e preziosissime, non offrendo, di fatto, alcuna risoluzione alla dicotomia massa-valore che caratterizza in modo peculiare l'economia e la struttura intrinseca del modulo fotovoltaico.

Il contributo principale e maggiormente innovativo di questo studio risiede, pertanto, nell'approfondita analisi di fattibilità tecno-economica di un'infrastruttura di riciclo avanzata, progettata *ex novo* e fondata su un complesso processo termo-chimico integrato (basato sulla sinergia tra pirolisi controllata in assenza di ossigeno e successiva raffinazione idrometallurgica di precisione) ([25], [26]). Tale infrastruttura è stata rigorosamente valutata e validata secondo i parametri multidimensionali della *Triple Bottom Line* (Ambiente, Economia, Società). Sotto il rigoroso profilo tecnico-ambientale, lo studio ha comprovato la validità e la superiorità dell'eco-design di processo

adottato. La complessa capacità ingegneristica di estrarre le celle fotovoltaiche mantenendole intatte – evitando frantumazioni distruttive – consente infatti di recuperare e isolare Silicio Metallurgico Purificato (UMG-Si) e Argento con tassi di resa e livelli di purezza estremamente elevati, rendendoli immediatamente re-impiegabili nei cicli industriali. L'applicazione scrupolosa della metodologia LCA (Life Cycle Assessment) ha attestato in modo inequivocabile che l'impianto si configura non solo come un sistema a impatto mitigato, ma come un virtuoso ecosistema a bilancio emissivo negativo. Nello specifico, sostituendo integralmente l'energia-intensiva estrazione mineraria primaria e i relativi processi di raffinazione a monte [23], il ciclo implementato risulta nettamente *carbon negative*, garantendo alla collettività un risparmio netto superiore alle 32.000 tonnellate di CO2 equivalente su base annua, un dato che consolida la valenza ecologica del progetto.

Dal punto di vista economico e gestionale, fulcro dell'indagine strategica, l'elaborato ha analizzato in dettaglio le metodologie manageriali necessarie per superare le formidabili barriere finanziarie tipiche delle tecnologie *capital intensive* applicate nel settore del trattamento dei rifiuti speciali. A fronte di un elevato esborso per il costo iniziale (CAPEX) per la componentistica ad alta tecnologia, e di significativi e costanti costi operativi (OPEX) strettamente legati al continuo consumo di energia termica ed elettrica e ai costosi reagenti chimici, il modello di business è stato sapientemente strutturato su un approccio modulare e progressivo. Partendo dalla concezione di una linea pilota, oculatamente dimensionata per assorbire un iniziale 25% del picco di rifiuti futuri atteso, il progetto mira a mitigare drasticamente il rischio d'impresa e l'esposizione finanziaria. Questa scelta favorisce una crescita organica e sostenuta direttamente dai solidi flussi di cassa generati dal *Dual-Revenue Model* (il quale coniuga sapientemente gli incassi garantiti dalla *Gate Fee* associata al conferimento del rifiuto, con i profitti derivanti dalla successiva vendita ad alto margine delle Materie Prime Seconde recuperate). L'analisi strategica ha, inoltre, affrontato con spirito previsionale il rilevante rischio tecnologico di lungo periodo legato al fenomeno del *Silver Thrifting* (la progressiva riduzione dell'impiego di argento nelle nuove celle) [20]. Lo studio evidenzia, con chiara ottica prospettica, come l'infrastruttura debba e possa impiegare attivamente l'elevata redditività speculativa generata nell'immediato dall'argento residuo nei moduli storici in via di dismissione, per ammortizzare tempestivamente gli

investimenti strumentali originari e, contestualmente, finanziare massicci programmi di Ricerca e Sviluppo. Tale lungimirante impostazione manageriale agevola e garantisce una transizione fluida verso un futuro modello di fornitura sempre più incentrato sul silicio UMG-Si, operando in totale e strategica coerenza con gli ambiziosi obiettivi di sovranità materiale sanciti dal *Critical Raw Materials Act* (Regolamento UE 2024/1252).

Infine, la meticolosa valutazione delle ricadute territoriali e socio-economiche ha evidenziato come un'infrastruttura di tale rilevanza logistica e ambientale necessiti tassativamente di un solido e trasparente ancoraggio sociale nel territorio ospitante. Adottando in modo proattivo il consolidato paradigma del *Creating Shared Value* (CSV) [5], lo studio dimostra che l'insediamento privilegiato all'interno delle preesistenti Aree di Sviluppo Industriale siciliane (optando per un approccio *brownfield* che azzerà il nuovo consumo di suolo) favorisce concretamente la rigenerazione urbana e locale. Questa scelta strategica contribuisce in maniera decisiva a mitigare potenziali e prevedibili opposizioni comunitarie di natura NIMBY (*Not In My Back Yard*). Di riflesso, l'impianto agisce da potente catalizzatore per la creazione di occupazione altamente qualificata e specializzata (i cosiddetti *Green Jobs* nel settore chimico e ingegneristico), supportando attivamente l'ammodernamento e l'efficientamento dell'indotto logistico regionale [13]. In sintesi finale, la presente ricerca attesta senza riserve che il riciclo fotovoltaico ad alto valore aggiunto, se localizzato e implementato in Sicilia con la struttura progettuale proposta, possiede intrinsecamente e solidamente i requisiti di fattibilità tecnica, indiscutibile utilità ecologica e solida sostenibilità finanziaria. Fattori, questi, necessari e sufficienti per posizionare stabilmente e strategicamente la regione quale snodo d'eccellenza e polo d'avanguardia rilevante nell'intera economia circolare del bacino mediterraneo.

6.2 Analisi SWOT: Dinamiche interne e posizionamento strategico

Il passaggio dalla validazione progettuale alla potenziale cantierabilità richiede l'adozione di strumenti di sintesi in grado di inquadrare l'infrastruttura all'interno del proprio ecosistema competitivo e normativo. L'analisi SWOT (*Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats*) condotta per il polo di riciclo siciliano indaga le dinamiche di

mercato e definisce le direttrici operative per l'ottimizzazione del valore e la mitigazione del rischio.

Tabella 6.1 – Matrice SWOT dell'infrastruttura di riciclo termo-chimico proposta.

	FATTORI POSITIVI	FATTORI NEGATIVI
FATTORI INTERNI	PUNTI DI FORZA (Strengths) • Estrazione di Materie Prime Seconde ad altissima purezza (Si <i>solar-grade</i>, Ag). • Vantaggio temporale (<i>First-Mover Advantage</i>) nella Regione Sicilia. • Riduzione della Carbon Footprint tramite autoconsumo energetico (<i>Prosumer</i>). • Scalabilità e de-risking finanziario grazie al CAPEX modulare.	PUNTI DI DEBOLEZZA (Weaknesses) • Elevati costi operativi (OPEX) legati a consumi termici e reagenti chimici. • Rigidità gestionale: necessità di saturare l'impianto per coprire i costi fissi. • Complessità HSE legata al trattamento e stoccaggio di acidi pericolosi. • Iniziale <i>skills mismatch</i> (carenza locale di tecnici specializzati in idrometallurgia).
FATTORI ESTERNI	OPPORTUNITÀ (Opportunities) • Regolamento CRMA (UE): forte innalzamento del valore strategico del Silicio. • Simbiosi industriale a chilometro zero (es. fornitura <i>off-take</i> per 3Sun Gigafactory). • Introduzione dell'Eco-modulazione nelle tariffe EPR (premi per chi fa upcycling). • Aumento dei flussi garantiti B2B dovuti al boom del <i>Revamping</i>.	MINACCE (Threats) • <i>Silver Thrifting</i>: riduzione dell'argento nei pannelli futuri ed erosione dei margini. • Rischio burocratico: ritardi o blocchi regionali nei decreti <i>End of Waste</i> (EoW). • Elevata volatilità dei prezzi dei metalli (LME) che incide sul <i>Business Plan</i>. • Possibili opposizioni territoriali locali (Sindrome NIMBY e comitati cittadini).

Fonte: Rielaborazione personale.

Esaminando le variabili aziendali interne, i principali punti di forza (*Strengths*) si individuano nell'elevata purezza delle Materie Prime Seconde prodotte (UMG-Si e Ag),

le quali collocano l'impianto ai vertici della catena del valore settoriale ([28], [29]). Un ulteriore elemento di forza è rappresentato dal vantaggio competitivo legato al posizionamento iniziale (*First-Mover Advantage*); essendo la prima infrastruttura termochimica di tale scala nel Mezzogiorno, l'azienda può consolidare accordi logistici preferenziali nel bacino siciliano. A ciò si unisce la flessibilità finanziaria garantita dalla modularità del CAPEX e l'integrazione di sistemi in autoconsumo (*prosumer*), che riducono l'esposizione alla volatilità dei prezzi dell'energia. Tuttavia, emergono debolezze strutturali (*Weaknesses*) ascrivibili all'architettura chimico-fisica del processo. L'impianto sconta una marcata rigidità gestionale dovuta all'elevato OPEX, che impone un funzionamento prossimo alla saturazione della capacità progettuale per assorbire i costi fissi e i consumi dei reagenti. Si rilevano inoltre criticità legate alla gestione di acidi forti, che comporta stringenti oneri assicurativi e operativi, nonché un potenziale disallineamento iniziale delle competenze (*skills mismatch*), richiedendo investimenti propedeutici nella formazione di personale specializzato nelle discipline STEM.

Spostando l'analisi sull'ambiente macroeconomico, il progetto si confronta con un quadro di mercato caratterizzato da significative opportunità (*Opportunities*). Sotto il profilo normativo, la prevista applicazione del principio di "eco-modulazione" nelle tariffe di Responsabilità Estesa del Produttore (EPR) ([14], [16]) dovrebbe introdurre incentivi per gli impianti in grado di garantire il recupero di materie critiche, disincentivando le pratiche di smaltimento a basso valore aggiunto. Sul versante dell'approvvigionamento, l'incremento delle operazioni di *Revamping* e *Repowering* [6] da parte degli operatori energetici assicura flussi B2B costanti e anticipati. Inoltre, lo sviluppo di poli manifatturieri rinnovabili nel Sud Italia, come il sito produttivo 3Sun a Catania, costituisce una base ideale per la stipula di accordi di fornitura (*off-take agreements*) su scala locale.

Il posizionamento strategico risulta nondimeno esposto a minacce (*Threats*) di natura normativa e tecnologica. Nel breve termine, la principale criticità risiede nella complessità amministrativa legata all'ottenimento delle autorizzazioni per l'*End of Waste* (Cessazione della qualifica di rifiuto) [3]; eventuali ritardi procedurali rischiano di ostacolare la commercializzazione dei materiali recuperati, incidendo sulla liquidità aziendale. Nel medio-lungo termine, il modello di business dovrà confrontarsi con l'instabilità delle quotazioni internazionali dei metalli (LME) [30] e con l'impoverimento

materico dei pannelli indotto dal *Silver Thrifting* [20]. Sussiste inoltre il rischio di obsolescenza tecnologica, derivante dall'eventuale affermazione futura di metodologie di riciclo alternative, quali il delaminamento ottico o l'impiego di solventi a basso impatto.

La sintesi di queste variabili indica la necessità di un approccio manageriale proattivo: è prioritario assicurare i flussi logistici e i contratti di fornitura sfruttando il vantaggio temporale, e destinare i flussi di cassa iniziali al consolidamento della Ricerca e Sviluppo. Tale strategia permetterà di mantenere un vantaggio competitivo difendibile, proteggendo l'infrastruttura dalle evoluzioni tecnologiche e normative del settore.

6.3 Implicazioni manageriali e raccomandazioni di Policy

La valutazione della fattibilità ingegneristica ed economica dell'infrastruttura siciliana evidenzia come l'efficacia della transizione verso l'economia circolare sia strettamente subordinata all'architettura istituzionale e normativa di riferimento. Un modello di business innovativo, pur dimostrando resilienza e razionalità economica, richiede un contesto regolatorio allineato per esprimere il proprio potenziale. A conclusione della presente ricerca, si delineano pertanto alcune raccomandazioni di policy rivolte ai decisori pubblici, finalizzate a rimuovere le attuali asimmetrie di mercato.

Una prima implicazione operativa riguarda la necessità di snellire i procedimenti legati alle autorizzazioni ambientali, con enfasi sui decreti di *End of Waste* (EoW) [22]. Le tempistiche attualmente richieste dall'ordinamento per la certificazione dei materiali recuperati risultano spesso incompatibili con le esigenze industriali. Si raccomanda alle istituzioni competenti [3] l'implementazione di iter autorizzativi accelerati per gli impianti capaci di documentare tassi di recupero e livelli di purezza compatibili con il riutilizzo industriale, in particolare per i materiali critici. Il permanere di materie prime seconde ad alto valore nello status giuridico di rifiuto costituisce una disfunzione sistemica che disincentiva gli investimenti in tecnologie avanzate. La definizione di standard chiari per la cessazione della qualifica di rifiuto rappresenta un prerequisito per la stabilità finanziaria del comparto.

Una seconda raccomandazione attiene alla revisione dei meccanismi di Responsabilità Estesa del Produttore (EPR) coordinati dai Sistemi Collettivi. Le attuali metriche di conformità, orientate prioritariamente al raggiungimento di target basati sul peso complessivo dei materiali recuperati, tendono a privilegiare processi a basso costo, trascurando il valore strategico delle micro-frazioni. Appare necessaria l'introduzione strutturale di logiche di "eco-modulazione" delle tariffe ([14], [16]), mediante le quali incentivare economicamente i consorzi che indirizzano i flussi di RAEE verso impianti in grado di implementare processi di raffinazione complessa. Rimodulare la *Gate Fee* in funzione della qualità e della criticità del materiale recuperato consentirebbe di allineare gli incentivi economici agli obiettivi di politica industriale europea, contrastando le logiche di mero *downcycling*.

Infine, le politiche pubbliche dovrebbero supportare il settore nella mitigazione del rischio di obsolescenza tecnologica. La rapida evoluzione manifatturiera dei moduli fotovoltaici richiede un approccio istituzionale orientato al lungo periodo. L'allocazione di risorse derivanti dai fondi di coesione, dal PNRR e dalle iniziative legate al *Circular Economy Action Plan* [17] non dovrebbe limitarsi al sostegno dell'impiantistica matura, ma promuovere partenariati pubblico-privati (PPP) focalizzati sulla Ricerca e Sviluppo. Incentivare la transizione verso metodologie di riciclo a minor impatto energetico e chimico garantirà che le infrastrutture territoriali, come il polo ipotizzato nello studio, preservino la propria sostenibilità economica anche a fronte dei futuri mutamenti nella composizione materica dei rifiuti solari.

Conclusioni finali

Nel decennio in corso, l'infrastruttura energetica della Sicilia e dell'Italia si appresta a subire la più imponente ondata di rinnovamento tecnologico della sua storia recente. La gestione di quasi centomila tonnellate di moduli fotovoltaici a fine vita non può più essere considerata un'esternalità negativa da relegare all'industria dello smaltimento, bensì deve essere inquadrata come la principale fonte di approvvigionamento di materie prime del nuovo millennio.

Come dimostrato dall'impianto di questo elaborato, combinando l'ingegneria dei materiali, l'eco-design di processo e una solida visione manageriale basata sul *Triple Layered Business Model Canvas*, è possibile chiudere il cerchio della sostenibilità. La creazione di un polo tecnologico termo-chimico regionale in Sicilia rappresenta un paradigma industriale vincente: protegge il territorio dall'inquinamento, abbatte l'impronta carbonica a livello globale, genera occupazione qualificata (*Green Jobs*) e assicura flussi finanziari ad alta redditività.

In un'epoca in cui la transizione ecologica impone l'indipendenza dai combustibili fossili, l'economia circolare deve parallelamente garantire l'indipendenza dai minerali critici. Solo attraverso l'adozione coraggiosa di modelli industriali orientati all'estrazione di valore – e non al semplice abbattimento della massa – il pannello fotovoltaico potrà concludere il suo ciclo di vita non come un problema ambientale, ma rinascendo a tutti gli effetti come una "miniera urbana", capace di alimentare in modo perpetuo la rivoluzione solare.

Bibliografia e Sitografia

- [1] **IRENA, IEA-PVPS:** *End-of-Life Management: Solar Photovoltaic Panels*. 2016. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency.
- [2] **ResearchGate:** Crystalline-silicon based PV panel composition. Consultato il 05/11/2025
https://www.researchgate.net/figure/Crystalline-silicon-based-PV-panel-composition_tbl2_301693669
- [3] **Regione Siciliana:** *Aggiornamento al Piano Regionale per la Gestione dei Rifiuti*. 2024. Palermo: Assessorato Energia.
- [4] **IRENA:** *Future of Solar Photovoltaic - Executive Summary*. 2019. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency.
- [5] **CIRCUSOL:** *Circular Business Models for the Solar Power Industry (Deliverable D5.7)*. 2021. Bruxelles: Commissione Europea.
- [6] **Energy&Strategy, Politecnico di Milano:** *Circular Economy Report 2024*. 2024. Milano: Politecnico di Milano.
- [7] **Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE:** *Photovoltaics Report*. 2024. Friburgo: Fraunhofer ISE.
- [8] **IEA-PVPS:** *Status of PV Module Recycling in Selected IEA PVPS Task12 Countries*. 2022. Parigi: International Energy Agency.
- [9] **Gestore dei Servizi Energetici (GSE):** *Solare Fotovoltaico - Rapporto Statistico 2023*. 2023. Roma: GSE.
- [10] **IRENA:** Circular economy. Consultato il 29/10/2025
<https://www.irena.org/Energy-Transition/Policy/Circular-economy>
- [11] **PV Magazine:** Tra il 2030 e il 2050 previsti 4,5 kt di rifiuti da fotovoltaico in Italia. Consultato il 29/10/2025
<https://www.pv-magazine.it/2025/08/18/tra-il-2030-e-il-2050-previsti-45-kt-di-rifiuti-da-fotovoltaico-in-italia/>
- [12] **Italia Solare:** Dati TERNA Gaudi Q2 2025. Consultato il 10/11/2025
- [13] **Centro di Coordinamento RAEE (CdC RAEE):** *Rapporto Sicilia 2024*. 2024. Milano: CdC RAEE.
- [14] **Gestore dei Servizi Energetici (GSE):** *Gestione RAEE Fotovoltaici: Aggiornate le Istruzioni Operative*. 2024. Roma: GSE.
- [15] **Centro di Coordinamento RAEE (CdC RAEE):** Impianti di Trattamento certificati. Consultato il 10/11/2025
<https://www.cdcrree.it/impianti-di-trattamento-certificati/>
- [16] **Commissione Europea:** Ecodesign for Sustainable Products. Consultato il 10/11/2025
<https://commission.europa.eu/energy-climate-change-environment/standards-tools-and->

[labels/products-labelling-rules-and-requirements/sustainable-products/ecodesign-sustainable-products_en](#)

- [17] **Commissione Europea:** *Circular Economy Action Plan*. 2020. Bruxelles: CE.
- [18] **Commissione Europea:** Digital Product Passport. Consultato il 10/11/2025
https://commission.europa.eu/energy-climate-change-environment/standards-tools-and-labels/products-labelling-rules-and-requirements/sustainable-products/digital-product-passport_en
- [19] **Pin-Han Chen, Wei-Sheng Chen, Cheng-Han Lee and Jun-Yi Wu.:** *Comprehensive Review of Crystalline Silicon Solar Panel Recycling: From Historical Context to Advanced Techniques*. 2024. Sustainability, 16(1), p. 60.
- [20] **PV-Tech:** The present and future silver cost component in crystalline silicon PV module manufacturing. Consultato il 05/11/2025
<https://www.pv-tech.org/wp-content/uploads/legacy-publication-pdfs/afe3774dac-the-present-and-future-silver-cost-component-in-crystalline-silicon-pv-module-manufacturing.pdf>
- [21] **Branker, K., Pathak, M.J.M., Pearce, J.M. et al.:** *A review of solar photovoltaic levelized cost of electricity and end-of-life options*. 2017. Renewable and Sustainable Energy Reviews.
- [22] **Joint Research Centre (JRC):** *End-of-life management of photovoltaic panels*. 2023. Bruxelles: Commissione Europea.
- [23] **Heath, G. A., et al. (2020):** The role of recycling in the sustainability of the solar industry. *Nature Energy*, 5, 502–510.
- [24] **Xu, X., Lai, D., et al. (2022).** *A systematically integrated recycling and upgrading technology for waste crystalline silicon photovoltaic module: A Review*. 2022. Resources, 10(3), p. 25.
- [25] **Farrell, C. et al (2020):** *Pyrolysis Kinetic Modeling of a Poly(ethylene-co-vinyl acetate) Encapsulant Found in Waste Photovoltaic Modules*. 2020. Solar Energy Materials and Solar Cells.
- [26] **Theocharis, M., et al.:** *An Integrated Thermal and Hydrometallurgical Process for the Recovery of Silicon and Silver from End-of-Life Crystalline Si Photovoltaic Panels*. 2022. Minerals Engineering. Volume 13, pages 4027–4041.
- [27] **Veolia:** Europe's first solar panel recycling plant opens in Rousset. Consultato il 15/11/2025
<https://www.google.com/search?q=https://www.veolia.com/en/newsroom/news/first-recycling-plant-europe-solar-panels>
- [28] **ROSI Solar:** Tecnologie di riciclo e purezza dei materiali. Consultato il 15/11/2025
<https://www.rosi-solar.com/>
- [29] **9-Tech S.r.l.:** Recycling equipment for solar panel recycling. Consultato il 15/11/2025
<https://www.9tech.it/impianti/>
- [30] **London Metal Exchange (LME):** Aluminium & Silver Historical Prices. Consultato il 15/11/2025 <https://www.lme.com/en/Metals/Non-ferrous/Aluminium>

- [31] **Gestore dei Servizi Energetici (GSE):** *Solare Fotovoltaico - Rapporto Statistico 2022*. 2022. Roma: GSE.
- [32] **Milana G.:** *Stima dei Flussi di Rifiuti Fotovoltaici in Sicilia: Analisi Prospettica 2025-2040*. 2025. Elaborazione personale.
- [33] **Global Market Insights:** Solar PV Recycling Market Size 2025-2034, Global Report. Consultato il 10/11/2025
<https://www.gminsights.com/industry-analysis/solar-pv-recycling-market>
- [34] **Shanghai Metal Market (SMM):** Historical price charts of LME Aluminum 3-Month. Consultato il 10/11/2025
https://www.metal.com/en/prices/LME_AH_3M
- [35] **Mitchell Shyan Wei Lim et al.:** Experimental, economic and life cycle assessments of recycling end-of-life monocrystalline silicon photovoltaic modules. 2022. Journal of Cleaner Production, 340, p. 130796.
- [36] **Fulvio Ardente F. et al.:** Resource efficient recovery of critical and precious metals from waste silicon PV panel recycling. 2019. Waste Management, 91, pp. 156-167.
- [37] **Joyce, A., & Paquin, R. L. (2016).** The triple layered business model canvas: A tool to design more sustainable business models. Journal of Cleaner Production, 135, 1474-1486.