

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in Ingegneria meccanica

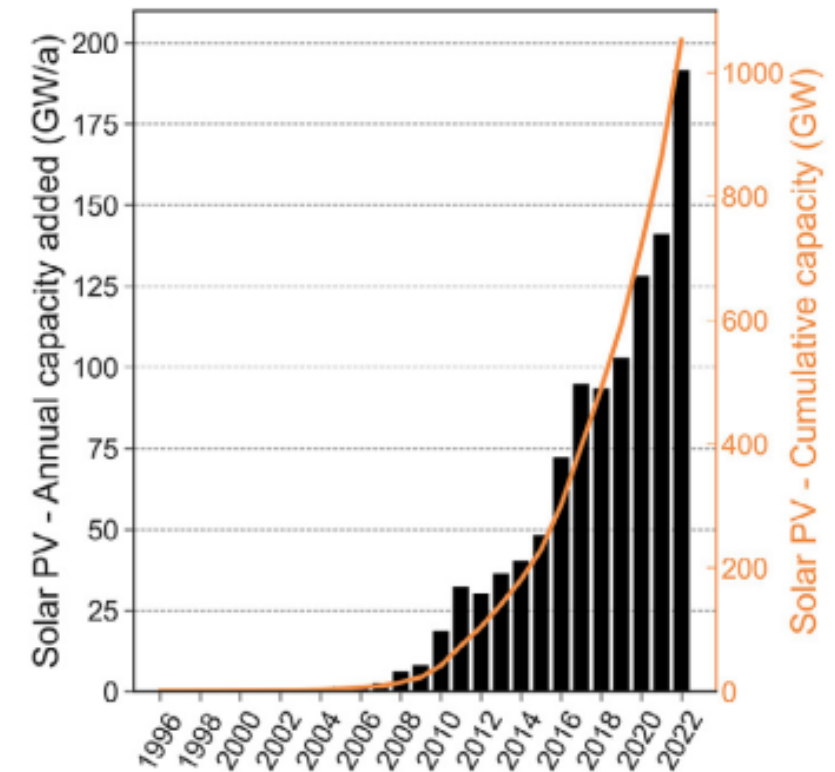
***Relazione per la prova finale
«Il riciclo dei pannelli fotovoltaici:
analisi tecnica, dei materiali e
implicazioni socio-economiche»***

Tutor universitario: Prof. Torchio Riccardo

Laureando: *Camerra Simone*

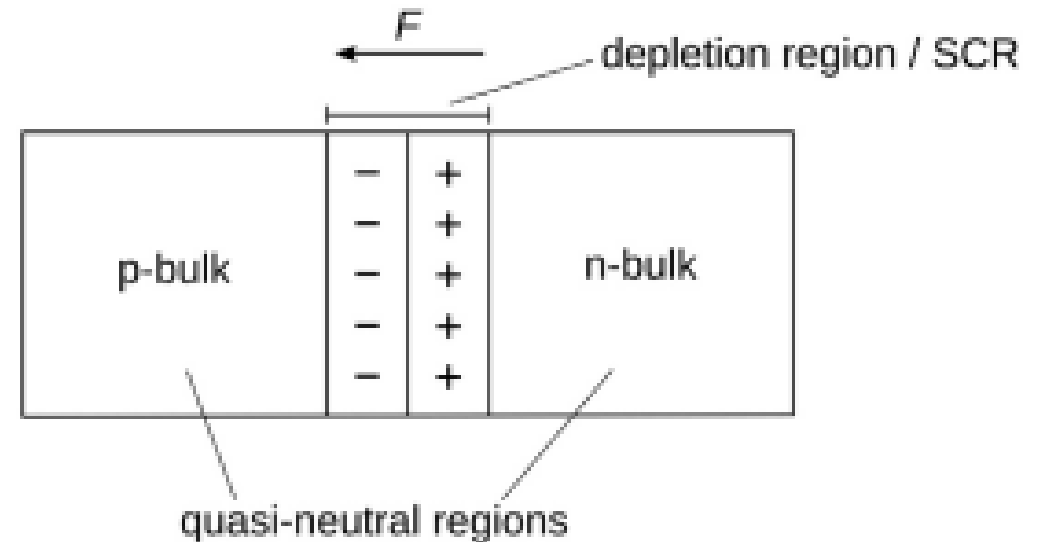
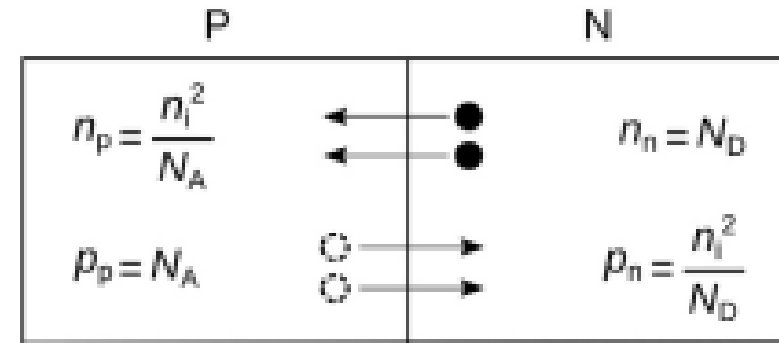
Padova, 16/09/2026

- Domanda energetica globale: 160 PWh, 80% da combustibili fossili.
- Concentrazione crescente di gas serra in atmosfera.
- Energia solare fotovoltaica (PV) come soluzione:
 - distribuzione della risorsa;
 - versatilità e affidabilità;
 - competitività economica, tecnologia modulare.



- **1. Funzionamento** di un sistema fotovoltaico: fisica della conversione, celle e moduli.
- **2. Composizione** dei pannelli: quali materiali ha senso recuperare (silicio, argento, rame vs EVA, backsheet).
- **3. Tecniche di riciclo** disponibili: processi meccanici, chimici e tecnologie emergenti.
- **4. Contesto economico, normativo e geopolitico:** è necessario riciclare il silicio? Sì o no, e perché.

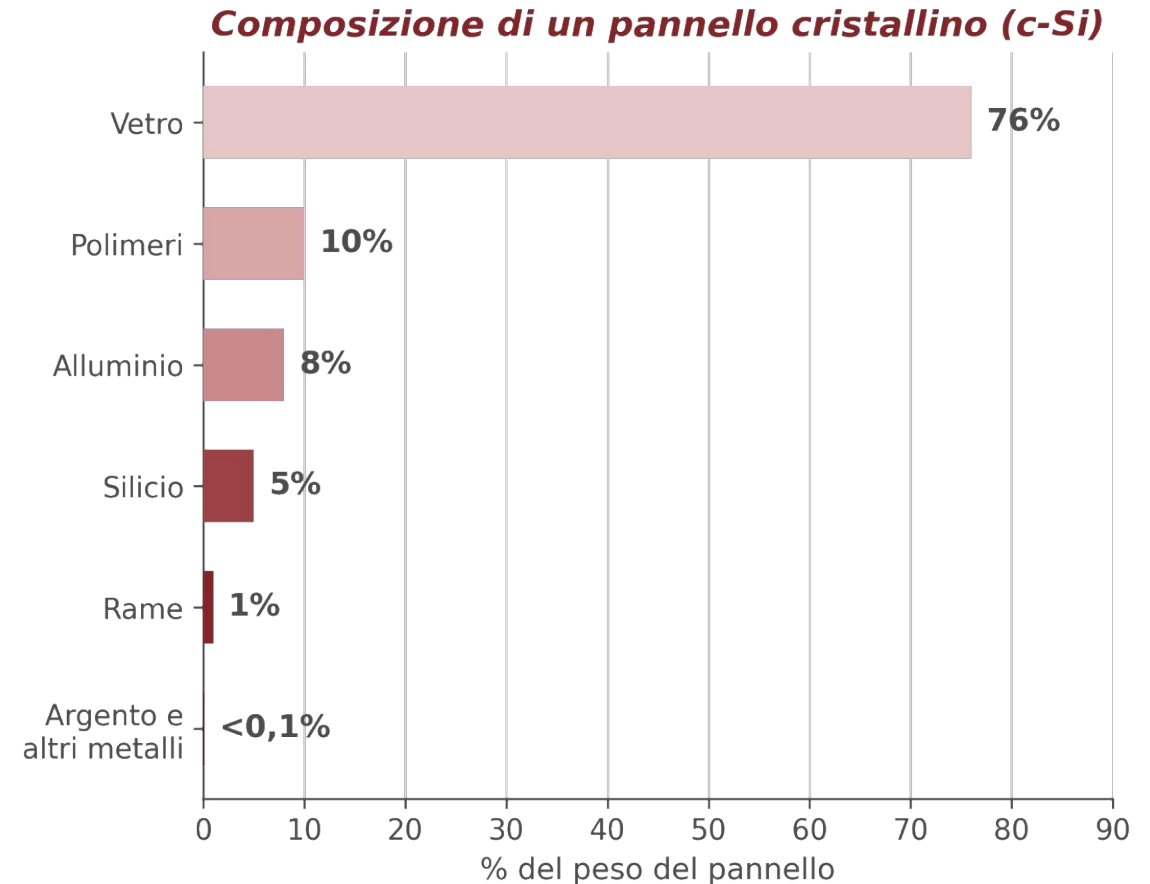
- **Assorbimento del fotone:** un fotone con energia $E_{ph} \geq E_g$ genera una coppia elettrone-lacuna nel semiconduttore.
- **Giunzione p-n:** separa le cariche generate e crea una tensione elettrica ai capi della cella.
- **Bandgap ottimale:** il silicio ($E_g \approx 1,12$ eV) bilancia corrente e tensione, vicino al limite teorico del 33,8%.
- **Perdite principali:** trasmissione (fotoni troppo poco energetici) e termalizzazione (energia in eccesso dispersa come calore).



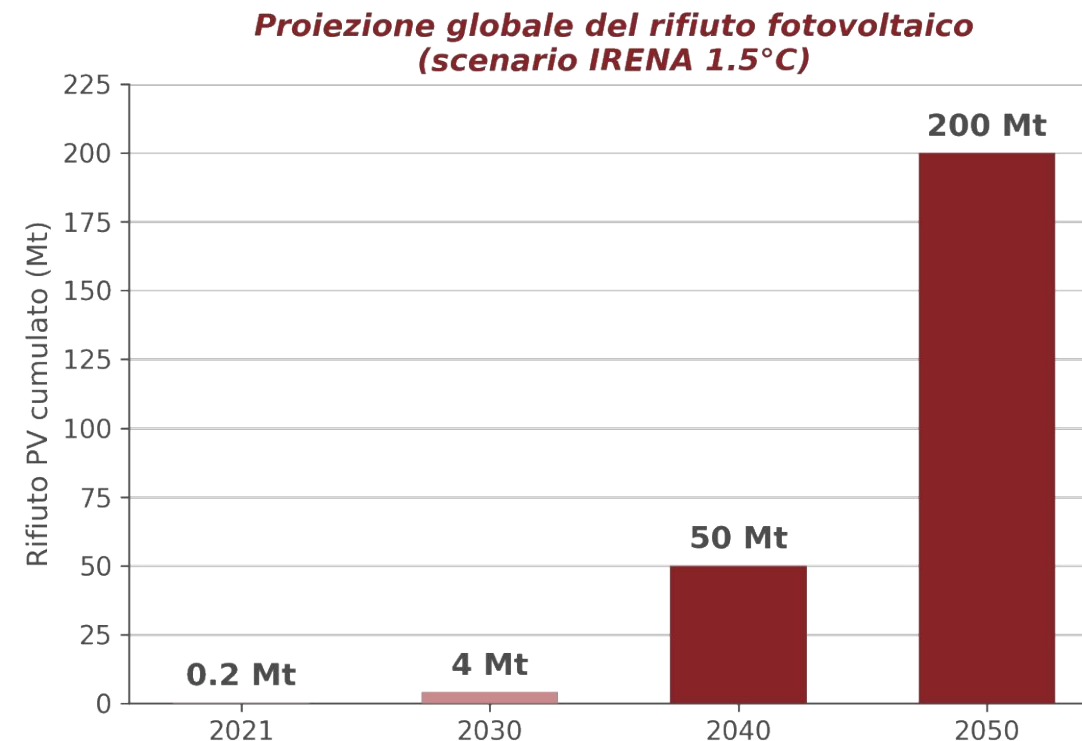
- **Celle in silicio** interconnesse in serie tramite ribbon di rame.
- **Vetro anteriore** temprato, a basso contenuto di ferro, protegge da urti e umidità.
- **Incapsulante (EVA)** e backsheet posteriore multistrato isolano elettricamente le celle.
- **Telaio in alluminio** e scatola di giunzione completano la struttura del modulo.



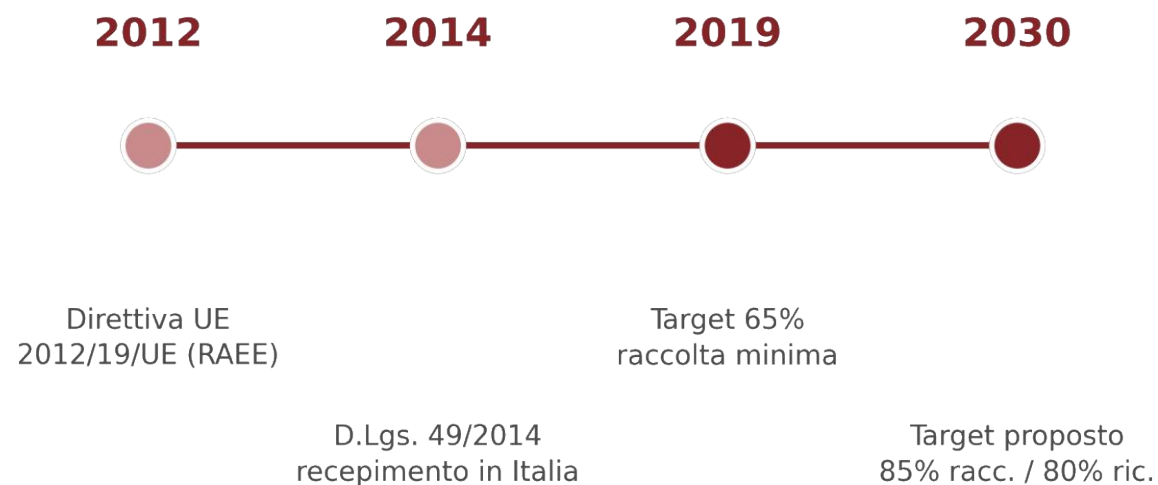
- **Peso del pannello:** 76% vetro, 10% polimeri, 8% alluminio, 5% silicio, 1% rame, <0,1% argento.
- **Peso e valore non coincidono:** argento e rame concentrano gran parte del valore economico recuperabile.
- **Un trend in evoluzione:** entro il 2030 il contenuto di silicio scenderà dal 5% al 3% del peso.
- **L'implicazione:** pannelli futuri più leggeri riducono l'incentivo economico a riciclare i materiali più preziosi.



- **Crescita esponenziale:** il rifiuto fotovoltaico cumulato passa da 0,2 Mt (2021) a oltre 200 Mt entro il 2050.
- **Perché ora:** i moduli del boom 2010-2015 si avvicinano a fine vita (25-30 anni).
- **Un'opportunità economica:** il valore dei materiali recuperabili vale diversi miliardi di dollari l'anno.
- **Distribuzione geografica:** Cina, UE, USA e India genereranno oltre il 60% del rifiuto globale al 2050.



- **Classificazione RAEE:** i pannelli sono RAEE (Direttiva 2012/19/UE, D.Lgs. 49/2014 in Italia).
- **Due categorie:** RAEE domestico (<10 kW) e professionale (≥10 kW).
- **Responsabilità estesa del produttore:** produttori e importatori finanziano raccolta e riciclo (“chi inquina paga”).
- **Target:** 65% di raccolta oggi; in discussione target 2030 più ambiziosi (85%/80%).



- **Il riciclo non è il primo step:** la gerarchia UE antepone prevenzione e riuso.
- **Repowering:** sostituire un impianto genera pannelli ancora funzionanti, non da rottamare.
- **Mercati secondari:** piattaforme come KeepTheSun o SecondSol danno una seconda vita ai moduli usati.
- **Un limite:** un modulo usato rende il 30-60% in meno e spesso perde la garanzia.

Gerarchia UE dei rifiuti



Meccanico: separazione dei componenti macroscopici

- **Rimozione cornice:** telaio in alluminio rimosso manualmente o con macchinari.
- **Rimozione scatola di giunzione:** estrazione di cavi in rame e componenti elettronici.
- **Frantumazione:** vetro, celle e plastica vengono tritati.
- **Separazione densimetrica/magnetica:** flussi d'aria o magneti separano vetro, metalli e plastiche.

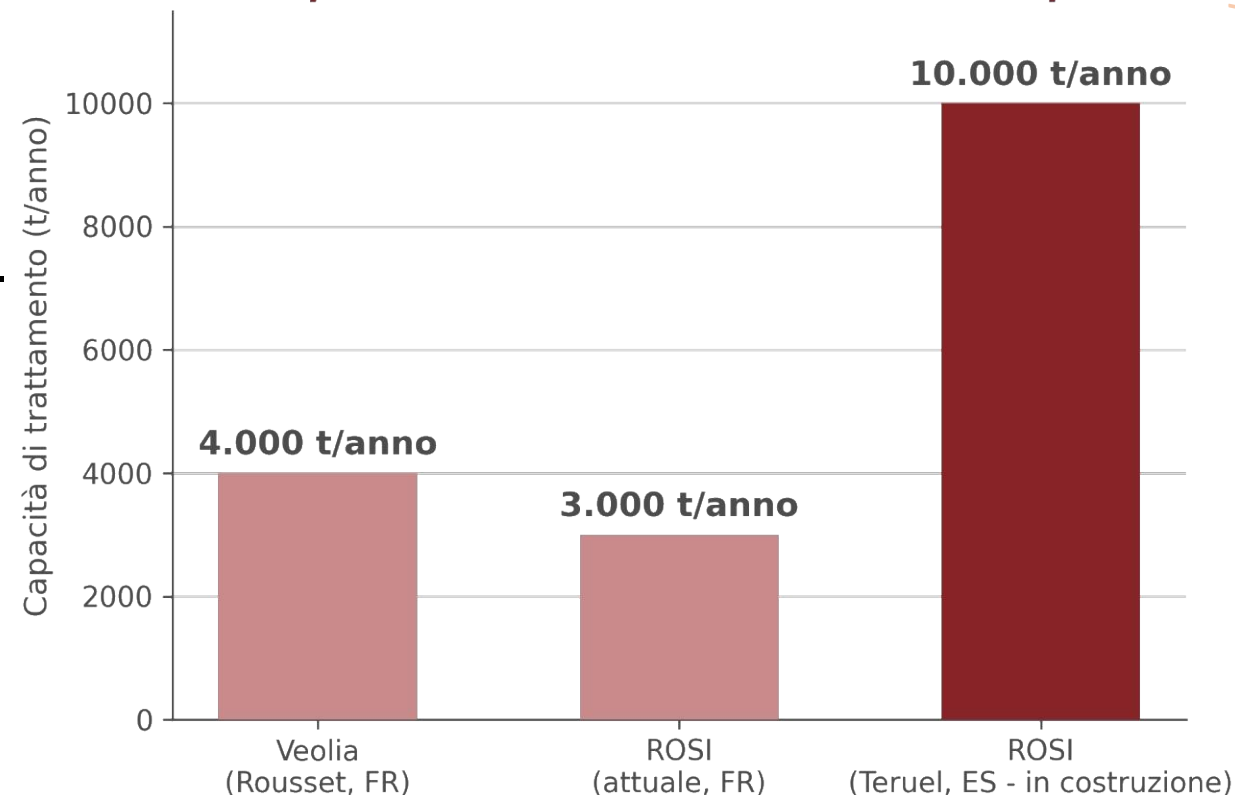
Chimico: separazione a livello molecolare del silicio dai metalli

- **Attacco acido (leaching):** scioglie i metalli preziosi, separandoli dal wafer.
- **Dissoluzione dei polimeri:** solventi sciolgono l'EVA, recuperando vetro intatto.
- **Idrometallurgia:** estrazione in soluzione acquosa, per metalli di elevatissima purezza.

- **Fragmentazione elettroidraulica:** impulsi elettrici in acqua, senza decomposizione termica dei polimeri.
- **Cavitazione ultrasonica:** 82% di efficienza, separa vetro ed EVA senza solventi.
- **Hot-knife delamination:** lama a $\sim 300^{\circ}\text{C}$, separazione del vetro in circa 60 secondi.
- **Water-jet delamination:** getto d'acqua ad alta pressione, vetro recuperato intatto.
- **Trade-off comune:** velocità, purezza e impatto ambientale — nessuna soluzione è ancora universale.

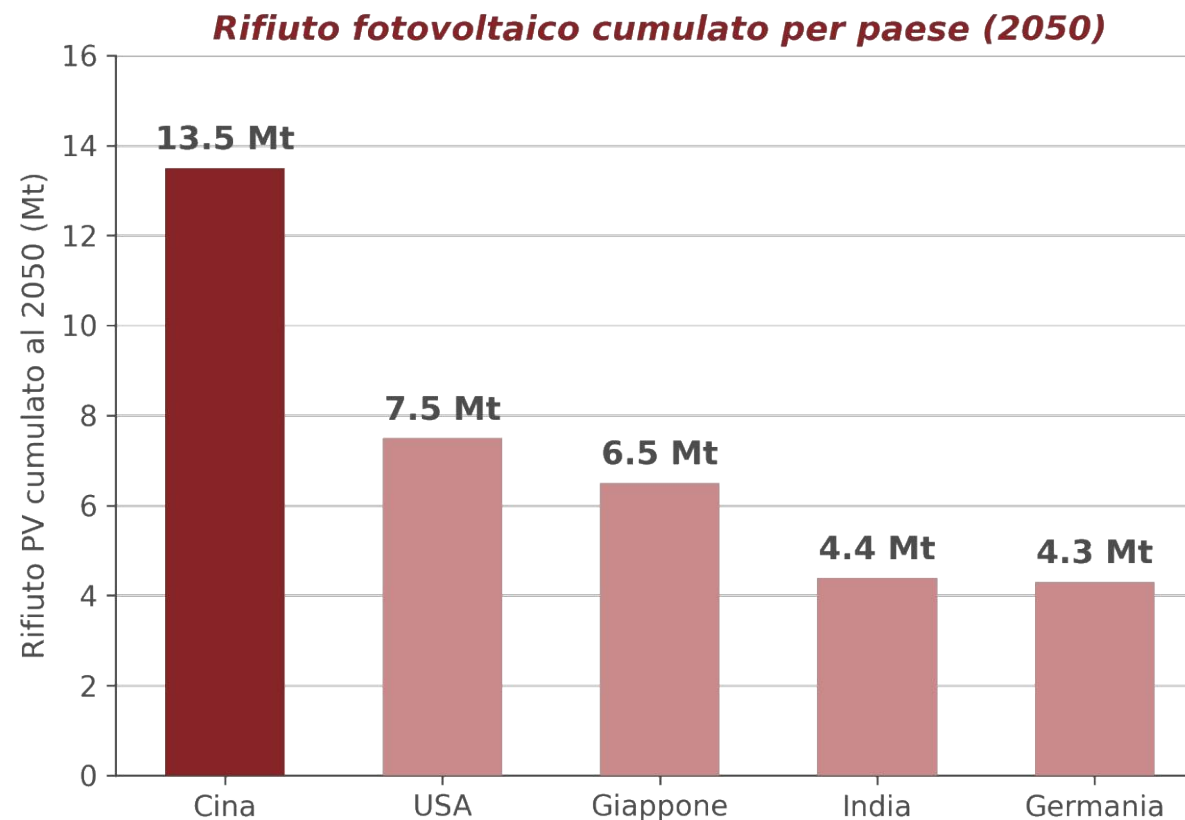
- **Veolia + PV Cycle (Francia):** primo impianto europeo dedicato, tasso di recupero del 95%.
- **ROSI (Francia):** processo di pirolisi; nuovo impianto da 10.000 t/anno in Spagna.
- **First Solar:** programma di take-back proprietario per i moduli CdTe a fine vita.
- **Un settore ancora giovane:** capacità in crescita, ma piccola rispetto ai volumi futuri.

Capacità industriale di riciclo PV in Europa



- **NO, dal punto di vista economico:** la purificazione a grado solare è costosa ed energivora; i processi dedicati non sono ancora maturi.
- **Sì, per ragioni normative:** la Direttiva WEEE impone target di riciclo dei materiali, non solo di raccolta.
- **Sì, per ragioni geopolitiche:** la produzione mondiale è concentrata in un solo paese; riciclare in Europa è autonomia strategica.
- **La sintesi:** economia, normativa e geopolitica danno risposte diverse alla stessa domanda.

- **La Cina in testa:** accumulerà 13,5-20 Mt di rifiuto FV al 2050, oltre il doppio di ogni altro paese.
- **Concentrazione della filiera:** la Cina domina anche polisilicio, wafer e celle — dipendenza per l'UE.
- **Il riciclo come leva strategica:** recuperare materiali critici è questione di autonomia industriale.
- **Impatto sociale:** nuove industrie e occupazione, anche nelle economie emergenti.



- **Il percorso:** dal funzionamento fisico, alla composizione dei materiali, alle tecniche di riciclo, fino al contesto economico e sociale.
- **Il caso del silicio:** marginale economicamente, ma obbligatorio normativamente e strategico geopoliticamente.
- **Una sfida aperta:** il divario tra maturità tecnologica e capacità industriale resta il nodo del prossimo decennio.
- **Il ruolo della normativa:** la Direttiva WEEE resta oggi l'unico meccanismo che rende il riciclo economicamente sostenibile.