

ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITA' DI BOLOGNA

SCUOLA DI INGEGNERIA
Sede di Forlì

Corso di Laurea in
INGEGNERIA MECCANICA
Classe L-9

ELABORATO FINALE DI LAUREA
In Fisica Tecnica

OTTIMIZZAZIONE DI UN SISTEMA DI
RAFFREDDAMENTO DI PANNELLI SOLARI CON
CONVERSIONE TERMOELETTRICA DI ENERGIA.

CANDIDATO
Luca Zanotti

RELATORE
Giampietro Fabbri

CORRELATORE
Matteo Greppi

Anno Accademico 2020/2021

INDICE

1. Introduzione sui sistemi solari termici e fotovoltaici.....	4
1.1. Il problema di richiesta energetica.....	4
1.2. I sistemi solari termici.....	5
1.3. I sistemi fotovoltaici in commercio.....	11
2. I sistemi solari termo-fotovoltaici.....	15
2.1. Integrazione delle tecnologie solari termiche e fotovoltaiche.....	15
2.2. Caratteristiche dei sistemi termo-fotovoltaici.....	16
2.3. Il pannello termo-fotovoltaico ibrido in bi-resina.....	21
2.4. Vantaggi e svantaggi.....	22
3. I sistemi termoelettrici.....	25
3.1. Introduzione.....	25
3.2. Principio di funzionamento dei sistemi termoelettrici.....	26
3.3. I materiali termoelettrici: ricerca e commercializzazione.....	28
3.4. Vantaggi, svantaggi ed applicazioni.....	31
4. Il sistema di raffreddamento con generazione termoelettrica.....	33
4.1. Descrizione del brevetto.....	33
4.2. Analisi numerica.....	34
5. Conclusioni.....	37
6. Riferimenti bibliografici.....	39
Ringraziamenti.....	46

1 - INTRODUZIONE SUI SISTEMI SOLARI TERMICI E FOTOVOLTAICI

1.1 - Il problema di richiesta energetica

Al giorno d'oggi, uno dei problemi maggiori da dover fronteggiare in maniera molto decisa riguarda l'energia. I suoi campi di applicazione comprendono quasi tutti i settori come quello industriale, agricolo, medico, dei trasporti, domestico e così via. Anche a causa del suo massiccio impiego, si prevede che entro il 2035 il consumo di energia a livello mondiale aumenterà circa del 30% (Sathe & Dhoble, 2017). Nel 2019, secondo l'Agenzia Internazionale per l'Energia (IEA), la domanda mondiale di energia è cresciuta del 2,3% (IRENA, 2019).

La disponibilità e l'accessibilità dell'energia sono molto importanti per lo sviluppo e la crescita di tutti i paesi del mondo, ma anche per i singoli individui che ne fanno parte. Bisogna però far fronte all'imminente scarsità di combustibili fossili quali carbone, gas naturale e petrolio; dunque, diventa necessario lavorare allo sviluppo e alle applicazioni di risorse energetiche rinnovabili. Inoltre, anche grazie al progredire della scienza e delle tecnologie in questo campo, negli ultimi anni si sta verificando un continuo aumento di domanda simultanea di calore ed elettricità a livello globale (Sathe & Dhoble, 2017). Infatti, l'aumento della domanda di energia con il contemporaneo aggravamento dei problemi ambientali e l'esaurimento delle fonti energetiche convenzionali contribuiscono alla ricerca di fonti di energia alternative che siano pulite e sostenibili (Herez et al., 2020).

Una delle scelte più convenienti a livello di efficienza risulta essere lo sfruttamento dell'energia solare, in quanto essa è sostenibile, è direttamente disponibile ed è presente in quantità abbondante in natura. L'energia solare può essere facilmente sfruttata per ricavare altre forme di energia utilizzabili come l'energia termica, l'energia elettrica e l'energia chimica (Sathe & Dhoble, 2017).

L'energia solare può essere sfruttata in diversi modi per produrre principalmente energia elettrica, termica o meccanica. Ad esempio, i pannelli solari fotovoltaici funzionano semplicemente assorbendo energia dalla luce solare e convertendola in energia elettrica, che può quindi alimentare dispositivi elettrici o essere immagazzinata in una batteria per essere utilizzata in una fase successiva (Eldin et al., 2016).

Sono stati intrapresi numerosi studi per sviluppare e produrre metodi efficienti per sfruttare l'energia solare. Come discusso in precedenza, i pannelli solari funzionano assorbendo l'energia dalla luce solare e convertendola in energia elettrica (Eldin et al., 2016). Un sistema di pannelli solari è costituito da più di una coppia di pannelli sviluppati da diversi moduli solari, i quali sono costituiti da singole celle solari connesse tra loro (Ahmad et al., 2020).

Una cella fotovoltaica è costituita da molti strati di materiali, ciascuno con uno scopo specifico, ma lo strato considerato più importante in una cella fotovoltaica è lo strato semiconduttore, costituito a sua volta da due strati distinti: uno di tipo p ed un altro di tipo n (Donev et al., 2021). Il processo noto come effetto fotovoltaico, ovvero la generazione di tensione o corrente elettrica in una cella fotovoltaica quando essa è esposta alla luce solare, si verifica proprio grazie allo strato semiconduttore (Donev et al., 2015).

I collettori solari si dividono sostanzialmente in tre categorie: esistono i collettori solari termici, i collettori solari fotovoltaici e i collettori solari termo-fotovoltaici, i quali sono ottenuti dall'unione delle tecnologie solari termiche con quelle fotovoltaiche (Ahmed et al., 2021).

1.2 - I sistemi solari termici

Il solare termico è una delle tecnologie solari più sviluppate ed è disponibile in commercio a costi molto convenienti. La tecnologia solare termica viene utilizzata in modo molto efficace in varie applicazioni domestiche, agricole e industriali (Sathe & Dhoble, 2017).

Negli ultimi decenni, i sistemi solari termici hanno guadagnato molta attenzione dal mondo scientifico grazie alla loro elevata efficienza e capacità di fornire riscaldamento domestico e industriale a basso costo (Evangelisti et al., 2019).

È importante suddividere gli impianti solari termici in due macro-categorie, in base alla dimensione: sistemi su larga scala e su piccola scala. La prima categoria può essere utilizzata nei distretti residenziali o nelle attività industriali per la produzione di acqua calda sanitaria, supporto al riscaldamento e produzione di calore di processo. I sistemi su larga scala sono caratterizzati da tecnologie più complesse rispetto ai sistemi su piccola scala, i quali sono generalmente forniti come pacchetti standardizzati. Il livello tecnologico più elevato rende più costosi gli impianti su larga scala, ma questo inconveniente è compensato da maggiori efficienze e risparmi di CO₂ rispetto a quelli su piccola scala (Evangelisti et al., 2019).

Il funzionamento dei pannelli solari termici consiste nel riscaldare un liquido, come l'acqua, assorbendo calore fornito direttamente dal sole in maniera sostenibile, convertendo quindi la radiazione solare in energia termica. I vantaggi offerti da questo sistema comprendono la fornitura di calore tutto l'anno, la riduzione delle emissioni di anidride carbonica e la riduzione delle bollette energetiche (Ahmad et al., 2020).

Negli impianti solari termici, l'energia viene trasportata in un dispositivo di accumulo, il quale è separato dal pannello, per poi poter essere impiegata successivamente. Il sistema può essere caratterizzato da circolazione naturale o forzata. I sistemi solari termici sono generalmente

utilizzati per produrre acqua calda o riscaldamento a zone, ma possono essere utilizzati anche per scopi diversi (Evangelisti et al., 2019).

I pannelli solari termici sembrano essere più economici dei sistemi solari fotovoltaici, considerando un periodo di ammortamento tipico di circa 7-11 anni (Elmes, 2014). In questo contesto, l'impiego di questa tecnologia può aiutare a sfruttare una fonte di energia pulita e rinnovabile per fornire riscaldamento, ricevendo al contempo un ritorno sugli investimenti effettuati. Come accennato in precedenza, il sistema è in grado di fornire acqua calda tutto l'anno, sfruttando la luce solare, che è una fonte di energia sostenibile (Ahmad et al., 2020). Questa tecnologia può essere combinata con un cilindro di acqua calda e gruppi di riscaldamento ausiliari per operare anche nelle ore notturne e durante i freddi mesi invernali (Herrando et al., 2014). È stato inoltre dimostrato che i collettori non occupano tanto spazio, così come i pannelli fotovoltaici, e possono essere installati sul tetto o integrati come parte di esso o del rivestimento dell'edificio (Maurer et al., 2017). Esistono principalmente due tipi di collettori solari termici: collettori a tubi sottovuoto e collettori piani (Sabiha et al., 2015).

Un collettore a tubi sottovuoto (**Fig.1**) è costituito da tubi di vetro paralleli. Ciascuno di essi è costituito da due tubi concentrici: uno interno, rivestito con verniciatura selettiva, e uno trasparente esterno; essi sono caratterizzati da uno strato di vuoto tra la superficie assorbente e la superficie vetrata. Essi si dividono in tre categorie: collettori “water-in glass”, collettori con tubo a “U” e collettori a tubo di calore.

La prima categoria di collettori a tubi sottovuoto presenta tubi di vetro concentrici (**Fig.2a**), con i tubi interni pieni d'acqua, e collegati ad un serbatoio orizzontale attraverso un'estremità, mentre l'altra estremità del tubo risulta chiusa. Nello spazio anulare compreso tra il tubo interno e quello esterno è presente uno strato di vuoto, mentre la superficie esterna del tubo interno è rivestita con materiale selettivo. Il flusso naturale dell'acqua attraverso l'apertura ad un'estremità nel serbatoio orizzontale determina il meccanismo di trasferimento del calore: l'irraggiamento solare riscalda l'acqua e la fa salire in maniera progressiva lungo la parte superiore del tubo; in questo modo l'acqua più calda risale verso il serbatoio, mentre l'acqua più fredda proveniente dal serbatoio scende lungo i tubi (Evangelisti et al., 2019). Grazie alla presenza del vuoto tra i due tubi, si ha una riduzione della dissipazione del calore per convezione (Sabiha et al., 2015).

Nei collettori a tubi sottovuoto con tubo a “U” (**Fig.2b**) il fluido termico fluisce direttamente nell'assorbitore, ovvero cilindri metallici verniciati selettivamente di nero, posti all'interno dei tubi sottovuoto. Ciascun tubo viene poi inserito all'interno di un altro tubo esterno in vetro. Le

condizioni di vuoto vengono create durante il montaggio del collettore, aspirando l'aria tra i due tubi vetrati.

I collettori a tubi sottovuoto a tubo di calore (Fig.2c) sono costituiti da tubi di vetro, dove al loro interno è presente un ulteriore tubo in rame riempito con una soluzione alcolica in grado di evaporare a basse temperature. Essa, riscaldandosi, risale lungo il tubo di calore e in seguito, condensando, cede calore al fluido termovettore che scorre nel collettore (Evangelisti et al., 2019)

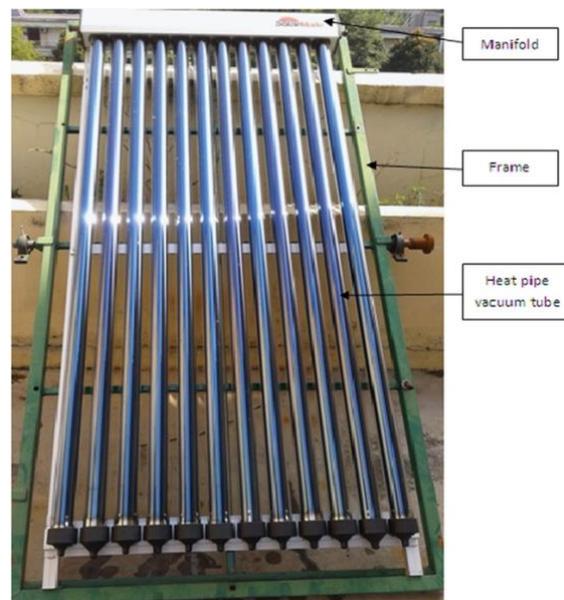


Figura 1. Collettore solare a tubi sottovuoto (Sabiha et al., 2015).

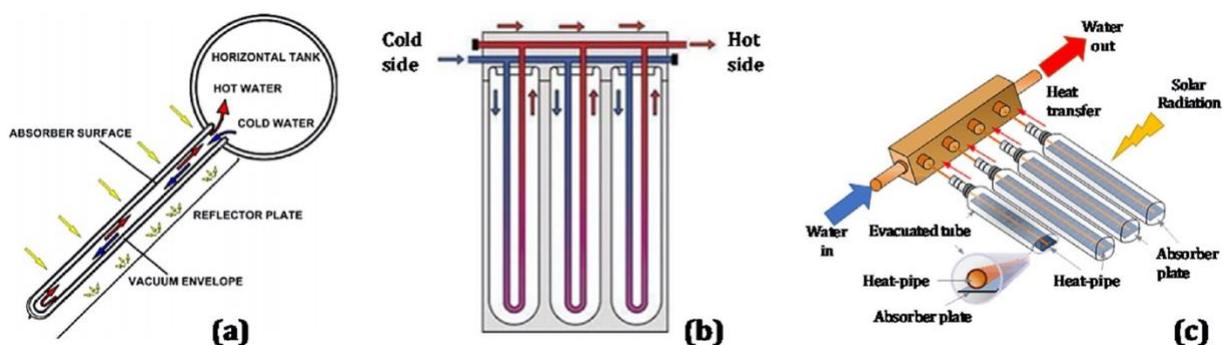


Figura 2. Collettore "water-in glass" (a), collettore con tubo a "U" (b) e collettore a tubo di calore (c) (Evangelisti et al., 2019).

I collettori solari piani (Fig.3) sono la tipologia di collettori solari termici più comune e permettono la conversione dell'energia solare in energia termica attraverso l'impiego di una

superficie solida chiamata piastra assorbente. Di solito, la superficie della piastra assorbente viene verniciata con materiale nero o rivestita selettivamente in modo spettrale per ottenere un elevato assorbimento dello spettro solare con bassa emissività. La radiazione solare viene assorbita dalla piastra assorbente del collettore come energia termica e trasferita al fluido termovettore che scorre attraverso i tubi del collettore. La maggior parte della radiazione solare incidente che passa attraverso la copertura trasparente del collettore solare piano viene assorbita dalla piastra assorbente, il cui fondo e i lati sono completamente isolati per ridurre al minimo le perdite di calore per conduzione e per convezione naturale. Grazie alla presenza della copertura in vetro del collettore vengono ridotte le dispersioni di calore per convezione, tramite il contenimento di uno strato d'aria, e per irraggiamento, in quanto è trasparente alla radiazione solare a onde corte del sole ma non trasparente alla radiazione termica a onde lunghe emessa dalla piastra assorbente. I tubi attraverso i quali il fluido di lavoro scorre lungo il collettore, cioè i tubi montanti, possono essere una parte implicita della piastra assorbente o saldati ad essa. Ad entrambe le estremità del collettore, i tubi montanti sono collegati ai tubi collettori, i quali hanno un diametro maggiore.

Alcune ragioni per le quali si preferiscono i collettori solari piani rispetto ad altri collettori solari termici sono i costi di produzione relativamente bassi, la capacità di raccogliere sia il raggio che la radiazione diffusa e il fatto che non richiedono l'installazione di sistemi di inseguimento solare. Uno svantaggio dei collettori solari piani, oltre alla bassa efficienza termica, è il basso coefficiente di trasferimento del calore convettivo tra l'assorbitore e il fluido termovettore. Migliorando le proprietà ottiche dei materiali assorbenti, così da aumentare l'assorbimento della radiazione solare, ed aumentando il numero di coperture in vetro, per diminuire le perdite di calore, si può arrivare ad un incremento dell'efficienza del collettore solare piano (Alawi et al., 2020).

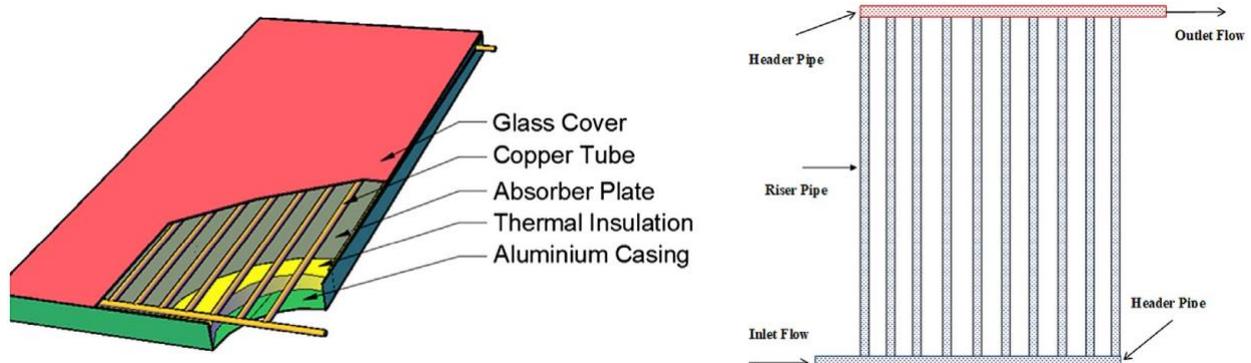


Figura 3. Schema di un collettore solare piano (Ashour et al., 2022).

Esistono inoltre altre tipologie di collettori solari termici, denominati “a concentrazione”. Fanno parte di tale categoria i Collettori Parabolici a Trogolo (PTC), i Collettori Parabolici Composti (CPC), i Sistemi di Ricezione Centrale (CRS) ed infine i Collettori Lineari Fresnel (LFR) (Ahmed et al., 2021).

In generale, un sistema con Collettori Parabolici a Trogolo (**Fig.4**) è composto principalmente da un sistema di inseguimento solare, specchi parabolici che concentrano il fascio di radiazione sul collettore, tubi collettori sottovuoto in vetro, scambiatori di calore ed un blocco di alimentazione. Centinaia di tubi sottovuoto sono collegati in serie, andando a formare un circuito collettore attraversato da un fluido termovettore (Padilla et al., 2011). L’efficienza termica di picco di questo sistema, in un range di temperatura compreso tra 100°C e 550°C, varia tra il 60% e il 75%; ciò significa che più del 25% di energia solare concentrata viene dissipata dai tubi sottovuoto o non impiegata dal campo dello specchio (Zhao et al., 2022).

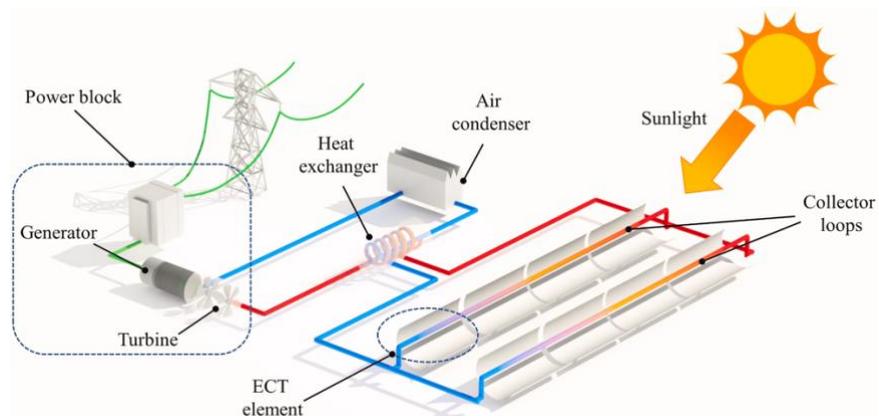


Figura 4. Schema semplificato di un sistema PTC (Zhao et al., 2022).

Un Collettore Parabolico Composto (CPC), schematizzato in **Fig.5**, è un collettore termico a concentrazione, costituito da due segmenti curvi parabolici identici ed è stato inventato nel 1974 (Ahmed et al., 2021). Sono sistemi che non necessitano di un sistema di tracciamento solare, ma, nel caso in cui l’angolo di irraggiamento incidente dovesse spostarsi al di fuori dell’angolo di accettazione del collettore, diventerebbe necessario inclinarli periodicamente. Solitamente, il CPC non viene utilizzato a tutta altezza, perciò viene troncato dall’alto per poter adattarsi a ripidi angoli di incidenza. Questi collettori sono inoltre molto efficienti, in quanto l’irradiazione totale viene concentrata sul ricevitore da riflessioni singole o multiple (Bhalla et al., 2021).

Nei Sistemi di Ricezione Centrale (CRS), le radiazioni solari vengono concentrate in un unico punto sulla sommità della torre solare attraverso l’impiego di un eliostato, ovvero un collettore specchiato di tracciamento a due assi. La torre solare (**Fig.6**) è caratterizzata principalmente, oltre che da un eliostato, da un ricevitore centrale e da fluidi termovettori. All’aumentare della

temperatura, l'energia termica viene trasferita ai fluidi termovettori mediante convezione. Rispetto ad altri impianti solari, i sistemi di ricezione centrale presentano limiti come ad esempio il maggior spazio richiesto per l'installazione degli eliostati, la necessità di accuratezza nel posizionamento degli specchi ed i costi di manutenzione elevati per garantire la pulizia degli stessi specchi (Ahmed et al., 2021).

I Collettori Lineari Fresnel (**Fig.7**) sono collettori solari caratterizzati da un sistema di tracciamento solare, costituito da una serie di specchi lineari, un tubo ricevitore fissato sulla sommità di una torre e da un fluido termovettore (Herez et al., 2020). Questi collettori presentano costi strutturali inferiori rispetto ai collettori parabolici, grazie alla loro bassa complessità di fabbricazione; tuttavia, poiché diversi specchi paralleli dovrebbero puntare al ricevitore, essi presentano maggiori perdite ottiche rispetto ai collettori parabolici (quindi una minore efficienza), come ad esempio ombre, blocchi, perdite dovute all'incidenza angolare della luce ed imperfezioni sugli specchi (Ordóñez et al., 2021).

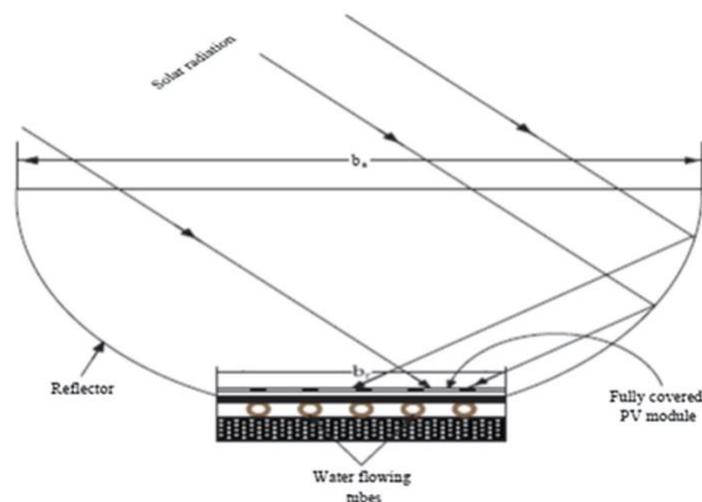


Figura 5. Schema di un Collettore Parabolico Composto (Herez et al., 2020).



Figura 6. Sistema di Ricezione Centrale con torre solare (Evangelisti et al., 2019).

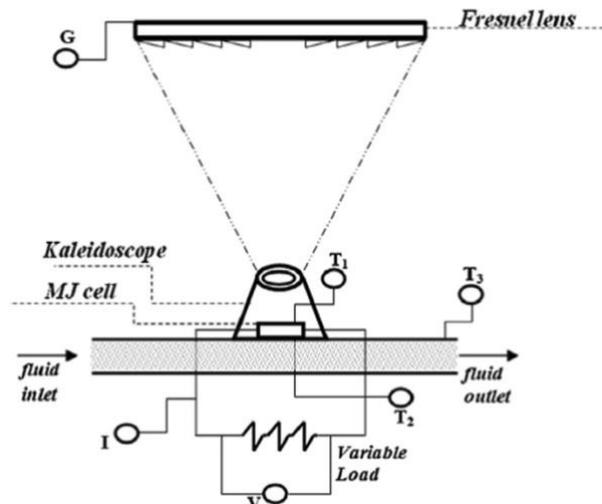


Figura 7. Schema di un sistema PVT con lenti Fresnel (Herez et al., 2020).

1.3 – I sistemi fotovoltaici in commercio

Gli impianti fotovoltaici (PV) sono i sistemi solari più utilizzati non solo perché sono relativamente economici, ma anche per la loro semplicità di installazione e di utilizzo. Tenendo questo a mente, la tecnologia fotovoltaica ha avuto modo di svilupparsi negli ultimi 30 anni in termini di caratteristiche tecnologiche e applicazioni. Quest'ultimo, infatti, è un vantaggio chiave che differenzia la tecnologia fotovoltaica dalle altre tecnologie rinnovabili in generale e dalle altre tecnologie solari in particolare (Alami et al., 2022). Un altro vantaggio dell'utilizzo delle tecnologie fotovoltaiche nelle applicazioni energetiche, rispetto ad altre tecnologie in questo campo, è lo spazio relativamente contenuto del quale necessitano. Ciò rende il fotovoltaico adatto anche per applicazioni con spazi limitati come l'illuminazione stradale. Inoltre, vi è la possibilità di impiegare il sistema fotovoltaico anche in condizioni di utilizzo interno, cosa non attuabile attraverso l'impiego di altre sorgenti di energia (Alami et al., 2022). Le tecnologie solari fotovoltaiche sono in fase di sviluppo dalla fine degli anni Settanta, in risposta alla crisi petrolifera che minacciava il continuo accesso alle risorse di petrolio e gas. Esse sono interessanti in quanto convertono direttamente la radiazione solare in elettricità, senza alcun movimento rotatorio dei generatori o conversioni ad alta temperatura dell'acqua in vapore o gas di scarico attraverso turbine a gas.

Il solare fotovoltaico ha beneficiato dei progressi nella produzione di materiali per microprocessori e degli avanzamenti nelle tecnologie di lavorazione (Alami et al., 2022).

Le celle solari sono composte da due diversi tipi di semiconduttori, di tipo p e di tipo n, uniti per formare una giunzione p-n. Le proprietà dei semiconduttori dipendono fortemente dalla presenza di impurità o da elementi chimici droganti. I semiconduttori di tipo n trasportano la

corrente principalmente sotto forma di elettroni, i quali possiedono carica negativa, mentre i semiconduttori di tipo p sono caratterizzati da portatori di carica denominate lacune, caricate positivamente. Le lacune indicano la mancanza di elettroni nel reticolo cristallino del semiconduttore (Donev et al., 2020). In seguito alla sovrapposizione dei due semiconduttori viene a crearsi un campo elettrico nella regione della giunzione, che porta ad un movimento di diffusione degli elettroni sul lato p (positivo) e delle lacune sul lato n (negativo). Quando i fotoni appartenenti alla regione di luce di una lunghezza d'onda adatta vengono ad incidere sulla superficie di una cella fotovoltaica, si verifica un trasferimento di energia dal fotone agli elettroni di valenza del materiale semiconduttore nella giunzione p-n. Questo fa sì che gli elettroni passino ad uno stato energetico più elevato (banda di conduzione) e questo passaggio porta alla presenza di una lacuna nella banda di valenza da cui l'elettrone è saltato. Tale movimento dell'elettrone porta alla formazione di una coppia elettrone-lacuna. A causa del campo elettrico generato dalla giunzione p-n, gli elettroni, se si trovano nello stato eccitato, tendono a muoversi liberamente attraverso il materiale, nella direzione opposta rispetto alle lacune. L'elettrone liberato, anziché spostarsi sul lato p, viene attratto dal lato n e questo suo spostamento porta alla generazione di una corrente elettrica nella cella. La lacuna lasciata dall'elettrone in movimento tende a spostarsi nella direzione opposta al lato p, creando appunto una corrente elettrica. Questo processo è schematizzato in **Fig. 5** (Donev et al., 2015).

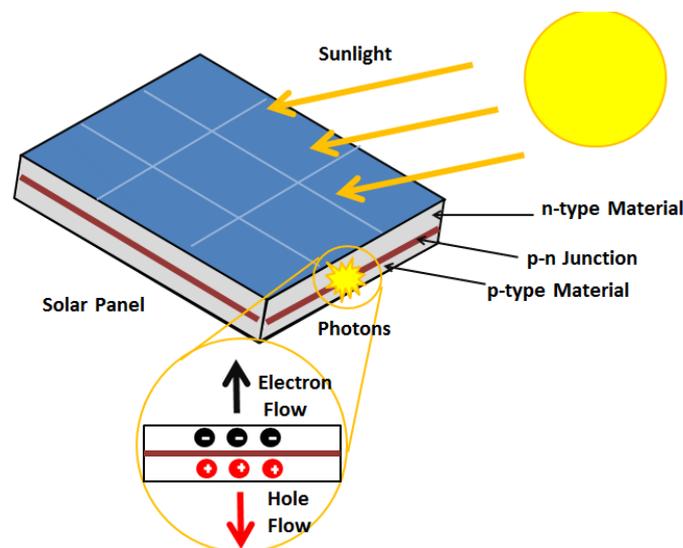


Figura 5. Schema raffigurante l'effetto fotovoltaico (Donev et al., 2015).

Il collettore fotovoltaico utilizza materiali semiconduttori come CdTe, CdSe, ZnO, ZnS, GaAs, BP, CuS, Si, SiO₂, ecc., per convertire l'energia solare in elettricità. L'energia elettrica prodotta dai collettori fotovoltaici può essere utilizzata per varie applicazioni (Ahmed et al., 2021).

Per quanto riguarda la composizione, tutte le celle fotovoltaiche sono costituite da più strati di silicio. Il silicio è un materiale che può essere considerato semiconduttore se drogato opportunamente e si presenta nelle seguenti forme: silicio monocristallino, silicio policristallino (o multicristallino) e silicio amorfo (Ahmad et al., 2020).

L'utilizzo di questi materiali è destinato alla realizzazione di diversi tipi di pannelli, ciascuno con caratteristiche e risultati differenti (Nogueira et al., 2015). Ad esempio, le celle solari di prima generazione sono realizzate principalmente in silicio policristallino o monocristallino. Le celle solari in silicio di seconda generazione sono invece costituite da materiale amorfo. Inoltre, sono stati impiegati anche altri materiali per la produzione di pannelli fotovoltaici: Rame-Indio-Selenio (CIS), Rame-Indio-Gallio-Selenio (CIGS) e Tellururo di Cadmio (CdTe) (Askari et al., 2015).

I pannelli in silicio monocristallino sono ottenuti da un singolo cristallo di silicio che può essere tagliato in modo tale da formare le celle. Le celle solari realizzate con questo tipo di materiale sono considerate la tecnologia fotovoltaica più efficiente; infatti, l'efficienza della conversione dell'energia solare attraverso i pannelli solari costituiti da silicio monocristallino può essere compresa tra il 15% e il 25% (Tripathy et al., 2016; Kang et al., 2019).

Il silicio policristallino (detto anche multicristallino) è ottenuto dal taglio di un lingotto di silicio fuso e ricristallizzato. Il processo di produzione dei pannelli solari policristallini comprende il taglio dei lingotti di silicio in strati molto fini e la loro sovrapposizione nelle celle solari. Il processo di produzione risulta quindi più semplice, portando a costi di produzione inferiori rispetto alle celle in silicio monocristallino. Detto questo, i pannelli solari costruiti con questo materiale sono considerati meno efficienti, con un'efficienza tipicamente compresa tra il 12% e il 15%. Esiste anche un altro tipo di pannello policristallino, denominato "thick-film", realizzato in silicio multicristallino. Depositando silicio, attraverso un processo continuo, su un materiale di base, vengono prodotte le celle per questa tipologia di pannello, sviluppando un materiale a grana fine dall'aspetto lucido. I pannelli solari fabbricati con questo silicio sono incapsulati in un polimero trasparente e una copertura in vetro, e sono poi trattenuti da un telaio metallico. Con i progressi della produzione odierni nell'ingegnerizzazione dei pannelli solari, l'efficienza offerta dalle celle di silicio multicristallino risulta essere piuttosto elevata e intorno al 20%. Detto questo, grazie ai processi coinvolti nella realizzazione di questi pannelli, la tecnologia risulta essere meno costosa rispetto alle loro controparti monocristalline.

Le celle fotovoltaiche in silicio amorfo sono costituite da materiali amorfi che vengono costruiti distribuendo su una superficie un sottile strato omogeneo di silicio amorfo, andando a creare una struttura sottile. Poiché il processo di produzione consente la creazione di strati molto sottili

e fini di silicio, le celle fotovoltaiche costruite in questo modo sono anche conosciute come "thin film". Da notare il fatto che sono state prese in considerazione solamente le tipologie di celle fotovoltaiche disponibili in commercio in Europa, escludendo dalla classificazione i pannelli solari costituiti da materiali tossici non ammessi dall'Unione Europea (Ahmad et al., 2020).

2 - I SISTEMI SOLARI TERMO-FOTOVOLTAICI

2.1 - Integrazione delle tecnologie termiche e fotovoltaiche

L'introduzione di un sistema termo-fotovoltaico (PVT) si è rivelata una possibile soluzione nell'area di ricerca delle tecnologie solari: infatti, integrando un impianto fotovoltaico con un impianto termico, si ottiene una singola unità in grado di incrementare l'efficienza delle celle fotovoltaiche e produrre calore di bassa qualità (Sathe & Dhoble, 2017).

Il concetto di sistema termo-fotovoltaico è stato documentato durante la metà degli anni Settanta ed è considerata una soluzione interessante nell'ambito delle tecnologie solari. Tuttavia, anche se l'idea di una soluzione di questo tipo è stata concettualizzata quasi cinquant'anni fa, la commercializzazione di questa tecnologia non è ancora molto diffusa. In questi sistemi, il calore proveniente dai moduli fotovoltaici viene estratto utilizzando diverse tecniche e viene impiegato separatamente negli impianti termici (Joshi & Doble, 2018).

Un collettore termo-fotovoltaico (schema in **Fig.6**) è un sistema ibrido che si ottiene unendo le tecnologie solari fotovoltaiche con le tecnologie solari termiche per fornire elettricità e calore contemporaneamente. Il collettore solare fotovoltaico converte parte dell'energia solare assorbita in elettricità, mentre il collettore solare termico ne converte un'altra parte in calore. Tale sistema, massimizzando lo sfruttamento di energia solare a parità di superficie captante, è quindi più efficiente, ovvero può produrre una maggiore quantità di energia per unità di superficie rispetto ai soli sistemi solari fotovoltaici o solari termici (Herez et al., 2020).

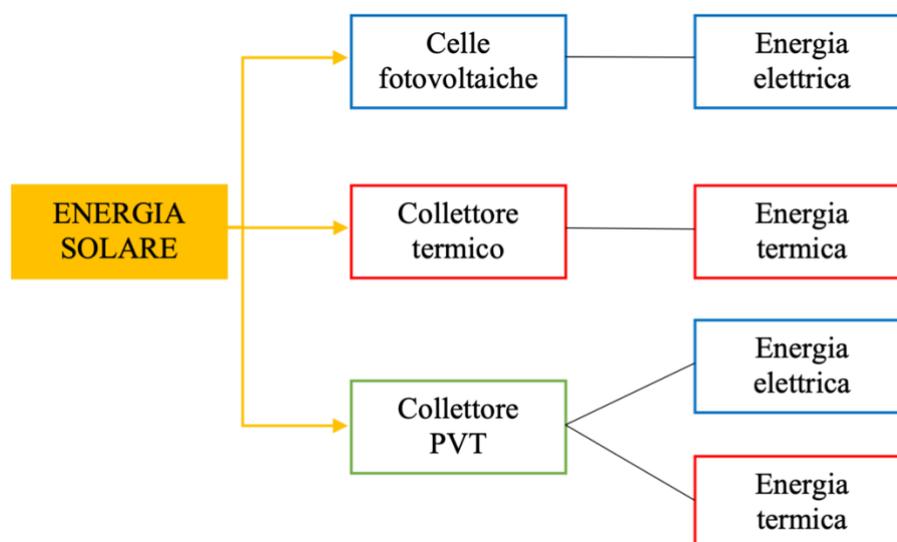


Figura 6. Schema concettuale di un collettore PVT a confronto con i sistemi separati (elaborazione di una figura presente in Herez et al., 2020).

Inoltre, il modulo di questo sistema funziona in base al principio di estrazione del calore di scarto che viene generato dalla superficie del fotovoltaico, migliorando così l'efficienza elettrica delle celle solari (Ahmad et al., 2020).

2.2 – Caratteristiche dei sistemi termo-fotovoltaici

I collettori solari termo-fotovoltaici (**Fig.8**) sono dispositivi costituiti da uno strato fotovoltaico che funge da assorbitore di un collettore termico. Essi permettono ai pannelli solari di sfruttare l'effetto fotovoltaico, ovvero consentono la trasformazione diretta della radiazione solare incidente in energia elettrica e termica, consentendo inoltre di mantenere la temperatura ad un valore basso all'interno delle celle (Zondag et al., 2003).



Figura 8. Un sistema termo-fotovoltaico ibrido (Michael et al., 2015).

Per proteggere i pannelli da eventuali agenti esterni e per massimizzare l'energia termica prodotta diventa fondamentale l'adozione di una copertura in vetro. Essa, infatti, funge da protezione e riduce notevolmente le dispersioni di calore verso l'esterno. Inoltre, se il fluido di raffreddamento si trova nella parte superiore del modulo fotovoltaico, la copertura in vetro può essere impiegata come canale per il fluido (Herez et al., 2020).

Uno studio, condotto confrontando le prestazioni di un sistema termo-fotovoltaico vetrato con quelle di uno non vetrato, ha evidenziato che l'efficienza termica del sistema vetrato è del 70,89% ed un'efficienza elettrica del 13,15%, mentre per il sistema non vetrato è stata

riscontrata un'efficienza termica del 63,37% ed un'efficienza elettrica del 14,35%. Questi risultati hanno portato ad affermare che, nel caso in cui lo scopo sia ottenere un miglior rendimento complessivo, è preferibile adottare una copertura in vetro; invece, se l'obiettivo è quello di massimizzare la produzione di energia elettrica, allora il sistema non vetrato risulta la scelta più adatta (Kazemian et al., 2018).

Per favorire la massima trasmissibilità della radiazione solare, per lo strato superiore del modulo fotovoltaico è impiegato vetro temperato e testurizzato ad alta trasmittanza solare e basso contenuto di ferro. Le celle fotovoltaiche e i circuiti elettrici del modulo vengono incapsulati in lamine di resina trasparente termosensibile di un copolimero di etilene-vinil-acetato, che garantisce elevate proprietà ottiche e termiche, formando una tenuta ermetica adesiva; tuttavia, è un materiale che va incontro ad imbrunimento e quindi ad un calo della trasmissibilità ottica dopo lunghi tempi di esposizione ai raggi UV. Sulle celle solari viene applicato un rivestimento antiriflesso, come il nitruro di silicio, in modo tale da ridurre le perdite per riflessione. Per evitare danni a lungo termine alle celle in silicio, mantenendo la loro temperatura al di sotto dei 60°C, è necessario migliorare il sistema di raffreddamento ottimizzando il trasferimento di calore tra la superficie posteriore del modulo fotovoltaico e il flusso d'aria nel condotto. Inoltre, viene impiegato il Tedlar (poli-vinil-fluoruro) grazie alle ottime proprietà chimiche ed isolanti, in quanto aderisce in maniera eccellente agli incapsulanti in etilene-vinil-acetato, garantendo protezione alle celle da calore e agenti esterni. Per incrementare il trasferimento di calore al fluido termovettore, la superficie posteriore del modulo fotovoltaico viene accoppiata meccanicamente ad un assorbitore termico mediante l'utilizzo di uno strato adesivo termoconduttivo; questo porta ad un aumento dell'efficienza termica ed elettrica, inoltre garantisce il mantenimento ad un valore basso della temperatura delle celle fotovoltaiche (Michael et al., 2015). L'efficienza di conversione delle singole celle può essere migliorata applicando un sistema di raffreddamento sul retro dei moduli fotovoltaici, in quanto le celle solari sono mantenute a temperature più basse (Greppi & Fabbri, 2020).

Impiegando un fluido nel sistema di raffreddamento delle celle fotovoltaiche è possibile ridurre la temperatura del modulo fotovoltaico, creando un equilibrio tra la potenza elettrica e la potenza termica. Affinché il collettore termo-fotovoltaico sia finanziariamente competitivo con i singoli sistemi, il fattore di assorbimento di un modulo fotovoltaico standard dovrebbe essere superiore all'80% (Michael et al., 2015).

Per aumentare l'efficienza di conversione dei pannelli solari è necessario mantenere il valore della temperatura superficiale ad un valore basso. A tal proposito sono stati messi a punto diversi sistemi di raffreddamento: alcuni consentono la dispersione di calore dalle celle

all'ambiente esterno circostante, mentre altri impiegano un fluido termovettore (solitamente acqua) per consentire il riutilizzo del calore (Fabbri & Greppi, 2021).

Le prestazioni e le applicazioni del sistema termo-fotovoltaico (PVT) dipendono dal fluido termovettore; esistono diverse tipologie di PVT che possono essere classificate in base a questa caratteristica. Per quanto riguarda i sistemi termo-fotovoltaici convenzionali, essi si distinguono in:

- PVT ad aria;
- PVT ad acqua;
- PVT a base di bi-fluido (aria e acqua).

Invece, tra i sistemi termo-fotovoltaici innovativi, si citano le seguenti tipologie:

- PVT impieganti nanofluidi;
- PVT con tubo di calore;
- PVT impieganti materiali soggetti a cambiamento di fase.

Nei sistemi termo-fotovoltaici ad aria, essa può passare attraverso la superficie fotovoltaica in modalità attiva o passiva, utilizzando un passaggio singolo o doppio e attraverso diverse configurazioni di assorbitore (Sathe & Doble, 2017).

L'aria è stata inizialmente utilizzata come fluido di lavoro negli impianti termo-fotovoltaici a circolazione naturale; in seguito, è stata adottata la convezione forzata dell'aria. La struttura del collettore ad aria termo-fotovoltaico è simile a quella del collettore solare ad aria, con la differenza che la lamiera dell'assorbitore termico è sostituita dal modulo fotovoltaico. In tale collettore, l'aria passa dietro lo strato fotovoltaico, in modo da rimuovere il calore dalle celle per renderlo disponibile per applicazioni come il riscaldamento degli ambienti o l'essiccazione. Questo sistema non presenta problemi di dispersione o di congelamento, oltre ad avere un basso costo. Tuttavia, l'aria non si presenta come scelta ottimale di fluido di lavoro per quanto riguarda il trasferimento di calore, dato che possiede bassa densità, bassa conduttività termica e basso calore specifico (Herez et al., 2020).

Sono stati condotti esperimenti per quanto riguarda il collettore ad aria, in particolare per studiare i parametri che influiscono sulle prestazioni termiche del sistema, con lo scopo di ottenere informazioni per determinare il design ideale in base al clima. I risultati hanno evidenziato che, a mezzogiorno, l'efficienza termica assume valori nell'intervallo del 28-55%,

mentre per quanto riguarda l'efficienza elettrica i valori si trovano nel range del 10,6-12,2% (Bambrook & Sproul, 2012).

Grazie alle proprietà termiche dell'acqua, i collettori termo-fotovoltaici che impiegano tale fluido offrono una migliore efficienza termica ed elettrica rispetto ai collettori termo-fotovoltaici impieganti aria. Un collettore di questo tipo è composto da tubi dell'acqua fissati alla piastra di base e da un modulo fotovoltaico rivolto sul lato opposto. Le principali sfide da affrontare per quanto riguarda i collettori termo-fotovoltaici ad acqua sono i problemi di congelamento durante i periodi invernali e il fatto che un eventuale aumento di temperatura dell'acqua riduce l'efficacia di rimozione del calore nel tempo. Inoltre, i sistemi PVT ad acqua mostrano un'efficienza termica del 55.6% ed un'efficienza elettrica massima del 9.92% (Ahmed et al., 2021).

Alcuni ricercatori, per ovviare alle problematiche riguardanti i singoli sistemi termo-fotovoltaici ad aria e ad acqua, hanno lavorato ad un sistema termo-fotovoltaico a bi-fluido, ovvero impiegando sia l'aria sia l'acqua come fluidi di lavoro in modo tale da produrre simultaneamente aria calda, acqua calda ed elettricità (Sathe & Dhoble, 2017). Infatti, combinando i sistemi termo-fotovoltaici ad aria con quelli ad acqua si ottiene una notevole riduzione della temperatura delle celle fotovoltaiche ed un incremento dell'efficienza delle celle rispetto ai singoli collettori ad aria o ad acqua. Nonostante questo sistema combinato offra la possibilità di ovviare ai problemi dovuti all'adozione di aria o acqua come fluido di lavoro per i collettori termo-fotovoltaici, vi sono ancora complicazioni per quanto riguarda il design, i costi elevati e i problemi di manutenzione (Diwania et al., 2020).

Sono stati eseguiti test sperimentali per valutare e confrontare le prestazioni di un pannello termo-fotovoltaico ad aria ed acqua per applicazioni per la produzione di idrogeno, impiegando un modulo fotovoltaico come riferimento per il confronto dei due sistemi. Per una portata massica di 0,011 kg/s, all'orario di mezzogiorno, sono stati ottenuti, per il collettore ad aria, valori di efficienza termica ed elettrica rispettivamente del 31,1% e dell'8%; per quanto riguarda invece il collettore ad acqua il valore dell'efficienza termica risulta pari al 33,8%, mentre il valore dell'efficienza elettrica si aggira intorno all'8,5% (Senthilraja et al., 2019).

Negli ultimi anni hanno avuto modo di evolversi anche altre nuove tecnologie termiche con risultati soddisfacenti, come ad esempio l'integrazione di nanofluidi. I nanofluidi contengono generalmente nanoparticelle più piccole di 100 nm nei fluidi convenzionali di base come acqua, glicole ed olio (Sathe & Dhoble, 2017). I nanofluidi risultano essere una miscela di nanoparticelle e fluidi di base, caratterizzati da una forte stabilità: infatti le particelle, grazie alle loro dimensioni nanometriche, riescono a rimanere a galla nel fluido di base vincendo la

forza di gravità senza depositarsi sul fondo. Tuttavia, i nanofluidi sono soggetti a numerose forze che possono portare all'agglomerazione delle particelle e quindi al fenomeno della sedimentazione. Un altro vantaggio dei nanofluidi risiede nelle loro interessanti proprietà termiche, tra cui un'elevata conducibilità termica, grazie alle quali possono essere impiegati nel trasferimento di calore per convezione, per ebollizione, oltre che nell'evaporazione e nella condensazione (Tembhare et al., 2021). Attraverso studi condotti per valutare l'impatto del nanofluido MWCNT-Acqua sulle prestazioni di un sistema termo-fotovoltaico è stato riscontrato che, mediante l'impiego di una frazione in peso dell'1% di MWCNT, si ottengono miglioramenti sperimentali dello 0,14% per quanto riguarda l'efficienza elettrica e del 3,67% per quanto concerne l'efficienza termica, rispetto all'impiego di acqua come fluido di lavoro (Nasrin et al., 2018).

Considerando ora i sistemi termo-fotovoltaici con tubi di calore, essi sono sistemi in cui vengono sfruttati i tubi di calore per estrarre il calore dalla superficie posteriore del pannello fotovoltaico. In generale, il tubo di calore è utilizzato per il trasporto del calore attraverso i fenomeni di evaporazione e di condensazione (**Fig.7**).

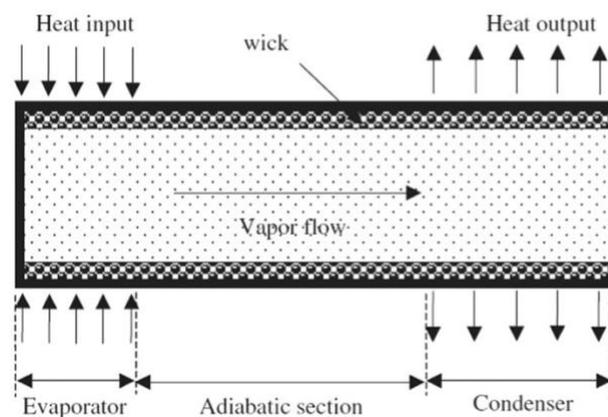


Figura 7. Schema di un tubo di calore (Sathe & Dhoble, 2017).

Il fluido di lavoro nella regione dell'evaporatore prende il calore dal sistema circostante e lo converte in vapore, il quale passa quindi verso la sezione del condensatore a causa della differenza di pressione nella sezione adiabatica. Nella sezione del condensatore, il vapore rilascia calore, condensa e ritorna nuovamente alla sezione dell'evaporatore attraverso lo stoppino in maniera capillare (Sathe & Dhoble, 2017).

Uno studio volto al progetto ed allo sviluppo di un sistema PVT ad acqua con tubi di calore in rame, attraverso simulazioni e sviluppi con il metodo delle differenze finite, ha rilevato un'efficienza termica del sistema del 41,9% ed un'efficienza elettrica del 9,4%, con un rendimento totale, per la seconda legge della termodinamica, del 6,8% (Gang et al., 2011).

I sistemi termo-fotovoltaici con materiali soggetti a cambiamento di fase derivano dalla combinazione delle strategie di accumulo e di recupero di energia. Un materiale a cambiamento di fase è in grado di assorbire (modalità di carica) e rilasciare energia termica (modalità di scarica) nella transizione di fase fisica vapore-liquido-solido, riuscendo a mantenere una bassa variazione di temperatura nel processo. I materiali soggetti a cambiamento di fase più impiegati nei sistemi solari ibridi sono i composti organici paraffinici, i quali garantiscono una vasta gamma di applicazioni a bassa temperatura. Essi sono caratterizzati da una bassa attività chimica, basso potenziale corrosivo, bassa espansione volumetrica al cambio di fase e basso peso. Il design più basilare consiste in una piastra assorbente situata nella parte posteriore del modulo fotovoltaico, seguita dai canali del fluido di lavoro e dai contenitori dei materiali a cambiamento di fase coperti da uno strato di isolamento termico (Carmona et al., 2021).

È stato condotto uno studio atto a confrontare le prestazioni di un sistema fotovoltaico avente pannelli solari tradizionali con quelle di un sistema termo-fotovoltaico con raffreddamento ad acqua ed impiegante materiali soggetti a cambiamento di fase. Il modulo termo-fotovoltaico in questione è caratterizzato da contenitori non flessibili di materiali a cambiamento di fase, integrati con una bobina in rame a diretto contatto con l'involucro in alluminio ed immersa in paraffina. Il sistema PVT in oggetto ha evidenziato un aumento dell'efficienza elettrica del 17,33% rispetto alla tecnologia fotovoltaica convenzionale; in particolare l'efficienza elettrica del sistema risulta pari a 26,87%, mentre l'efficienza elettrica del sistema è di 13,72% (Maatallah et al., 2019).

2.3 - Il pannello termo-fotovoltaico ibrido in bi-resina

Nel 2016 presso l'Università di Bologna, grazie a numerosi studi sulle soluzioni ibride, si è riusciti ad arrivare alla prototipazione di un innovativo pannello solare ibrido, utilizzabile come elemento di pavimentazione, adatto a diverse tipologie di superfici sottoposte alla radiazione solare, grazie alla sua resistenza e compattezza (Greppi & Fabbri, 2020).

Le caratteristiche principali della piastrella sono: calpestabilità, semplice procedura di installazione e facile manutenzione. Il pannello ibrido in questione è ricoperto da due resine differenti, che fungono da protezione dagli agenti atmosferici esterni, oltre a garantire un buon isolamento termico. La resina aggiunge proprietà ottiche comparabili e migliora le caratteristiche meccaniche rendendola calpestabile e facilitando pulizia e manutenzione (Fabbri & Greppi, 2021).

Il prototipo è costituito da uno strato di celle fotovoltaiche poste a contatto, per mezzo di un termoconduttore, con un dissipatore in alluminio che trasferisce il calore dalle celle all'acqua.

La piastrina (**Fig.8**) è composta da uno strato di celle fotovoltaiche monocristalline, ad alta efficienza, poste su un dissipatore di calore in alluminio. Queste celle sono saldate insieme e collegate tramite una colla conduttiva, che consente un sufficiente contatto termico ed elimina trasferimenti dall'interfaccia per massimizzare la dissipazione di calore.



Figura 8. Piastrina ibrida (Greppi & Fabbri, 2020).

Il dissipatore è costituito da un blocco in lega di alluminio con canali interni paralleli disposti in file sfalsate e al suo interno sono state realizzate sezioni trapezoidali di ingresso e uscita. I canali vengono attraversati dal fluido termovettore che assorbe il calore ceduto dalle celle fotovoltaiche. Questi pannelli vengono rivestiti da due diverse tipologie di resine:

- Resina trasparente per la copertura superiore, che garantisce un'ottima trasmissione della radiazione solare.
- Resina opaca isolante utilizzata per la copertura inferiore, che limita fortemente la dispersione termica verso l'ambiente esterno.

Le celle fotovoltaiche e il dissipatore di calore si trovano all'interno di un contenitore, in resina epossidica o poliuretana, ottenuto tramite polimerizzazione a freddo.

Entrambe le resine garantiscono una buona resistenza meccanica e tenuta all'aria all'interno dell'intera struttura del pannello (Greppi & Fabbri, 2020).

2.3 - Vantaggi e svantaggi

L'impiego di un sistema termo-fotovoltaico consente l'utilizzo dello spettro completo della radiazione solare. Si considerino ad esempio le celle fotovoltaiche più utilizzate nei sistemi termo-fotovoltaici, ovvero quelle realizzate in silicio; quando la radiazione solare incide sulla superficie della cella, si ha che solamente i fotoni con energia maggiore del gap di banda

possono generare coppie elettrone-lacuna. La tecnologia termo-fotovoltaica è in grado di convertire la parte di energia con lunghezza d'onda tale da non poter generare coppie elettrone-lacuna in energia termica disponibile, in modo tale da poter sfruttare l'intero spettro della radiazione solare: in questo modo si ha un miglioramento dell'efficienza di utilizzo globale dell'energia solare. L'efficienza di conversione di una cella fotovoltaica diminuisce con l'aumentare della temperatura della cella stessa. Attraverso l'impiego di un mezzo di raffreddamento nel sistema si evita che la temperatura di esercizio delle celle fotovoltaiche raggiunga valori troppo elevati, così da poter estendere il loro ciclo di vita, ottimizzando inoltre i costi di manutenzione e di utilizzo dell'energia (Zhou et al., 2021).

I collettori termo-fotovoltaici divengono particolarmente utili nel caso in cui vi siano limitazioni per quanto riguarda la superficie di installazione, come può avvenire sui tetti degli edifici; infatti, una superficie coperta da collettori termo-fotovoltaici è in grado di produrre una maggiore quantità di energia rispetto ad una superficie coperta parzialmente da sistemi fotovoltaici e sistemi solari termici convenzionali (Zondag et al., 2003).

Un ulteriore vantaggio risiede nel risparmio sui costi di costruzione e sull'area di installazione. Infatti, realizzando l'integrazione di moduli fotovoltaici con collettori solari termici si ottiene un design strutturale unificato, con conseguente risparmio di materiale e diminuzione dei costi di produzione e di installazione (Zhou et al., 2021). A parità di rendimento, preferendo l'installazione di un sistema termo-fotovoltaico, il risparmio sulla superficie di installazione sarebbe del 60%, se confrontata con l'adozione simultanea di un collettore solare termico e di un modulo fotovoltaico, grazie proprio alla sua compattezza (Michael et al., 2015).

Il sistema termo-fotovoltaico può essere potenzialmente impiegato per fornire varie forme di energia da utilizzare quotidianamente, come elettricità, riscaldamento ed acqua calda (Zhou et al., 2021).

Per contro, i tempi di sviluppo dei sistemi termo-fotovoltaici sono relativamente brevi se comparati a quelli dei dispositivi separati per la generazione di energia fotovoltaica e di raccolta di calore. Tuttavia, visti i recenti risultati limitati nella ricerca recente, sono ancora necessarie ulteriori esplorazioni tecniche sull'argomento. Nonostante l'efficienza globale del sistema termo-fotovoltaico con tecnologie avanzate come i nanofluidi od i materiali a cambiamento di fase sia relativamente alta, i costi non sono ancora soddisfacenti, di conseguenza è ancora presto per rendere popolare questa tecnologia. Pur richiedendo un minor spazio di installazione rispetto ai dispositivi separati, il peso del sistema termo-fotovoltaico sarà relativamente maggiore rispetto a quello dei singoli dispositivi. A causa di ciò, in fase di installazione andrà prestata particolare attenzione alla capacità portante del sistema. Inoltre, è necessario bilanciare

la distribuzione dell'efficienza del riscaldamento elettrico in funzione delle effettive esigenze; la conseguenza di ciò è che i contributi del fotovoltaico e del solare termico non raggiungono contemporaneamente le prestazioni ottimali: pertanto, non essendovi ancora una modalità standard di riferimento, diventa necessario trovare il giusto compromesso. Infine, dato che lo sviluppo della tecnologia termo-fotovoltaica è ancora incompleto, al momento non vi sono norme tecniche o manuali a cui fare riferimento (Zhou et al., 2021).

3 - I SISTEMI TERMOELETTRICI

3.1 - Introduzione

Data la crescente necessità di utilizzare fonti rinnovabili a bassa intensità come l'energia solare e l'avvento di tecnologie innovative richiedenti l'ausilio di elettricità, la ricerca si sta muovendo, anche se con qualche difficoltà, nella direzione di sviluppare sistemi energetici integrati con dispositivi che siano compatibili, affidabili e resistenti (Tohidi et al., 2021).

I sistemi tradizionali a turbina, a gas o a vapore, producono energia elettrica sfruttando l'energia termica prodotta dalla combustione di un combustibile, la quale viene poi convertita in energia meccanica grazie al passaggio in turbina ed in seguito proprio in energia elettrica in un generatore; durante il passaggio in turbina, però, si ha che la maggior parte dell'energia prodotta dalla combustione viene dissipata sotto forma di calore di scarto (Jouhara et al., 2021).

In questo ambito, i generatori termoelettrici sono dispositivi in grado di sfruttare l'energia termica per la produzione di energia elettrica, senza la necessità di ricorrere a parti mobili come le turbine, eliminando i costi relativi alla manutenzione di tali componenti (Sugiartha & Negara, 2017). I generatori termoelettrici hanno attirato l'attenzione di molti ricercatori grazie ai potenziali vantaggi che possono offrire, tra cui la possibilità di sfruttare il calore di scarto, che altrimenti verrebbe dissipato, per produrre energia elettrica ed inoltre il loro vasto campo di applicazioni, come ad esempio l'ambito di ricerca dell'energia solare (Jouhara et al., 2021).

Infatti, la tecnologia di generazione di energia termoelettrica è considerata uno dei principali processi che genera corrente elettrica direttamente dal mantenimento di una differenza di temperatura, attraverso lo sfruttamento dell'effetto termoelettrico, senza impiegare alcun fluido di lavoro (Pourkiaei et al., 2019).

Negli ultimi decenni sono state studiate diverse soluzioni per cercare di migliorare l'efficienza delle celle fotovoltaiche nei pannelli solari; in particolare, nel caso in cui venga richiesta solamente energia elettrica, l'energia termica sottratta alle celle fotovoltaiche non è direttamente sfruttabile e quindi risulta più conveniente dissiparla all'esterno. In tal caso, per aumentare l'efficienza di conversione delle celle fotovoltaiche, si possono adottare sistemi di raffreddamento sfruttando gli effetti termoelettrici, in particolare l'effetto Seebeck e l'effetto Peltier (Fabbri & Greppi, 2021).

Nonostante i sistemi termoelettrici non riescano a garantire valori di efficienza elevati, essi possono essere potenzialmente impiegati in applicazioni in cui questo problema può essere trascurato, come ad esempio nelle missioni spaziali (Tohidi et al., 2021).

Tuttavia, nonostante i valori di efficienza dei sistemi termoelettrici siano intorno al 5%, con i recenti avanzamenti nel campo delle nanotecnologie hanno consentito il raggiungimento di efficienze per la generazione di energia elettrica pari o superiori al 15% (Jouhara et al., 2018).

3.2 - Principio di funzionamento dei sistemi termoelettrici

L'effetto termoelettrico è il fenomeno alla base del funzionamento dei sistemi termoelettrici. Questo fenomeno, conosciuto come effetto Seebeck, fu scoperto intorno al 1821 dal fisico tedesco Thomas Johann Seebeck, il quale osservò che una differenza di temperatura tra le estremità di una coppia di materiali dissimili produce una forza elettromotrice; in generale questo fenomeno si verifica in qualunque conduttore qualora alle sue estremità sia presente una differenza di temperatura (Tohidi et al., 2021).

La tecnologia termoelettrica è generalmente classificata in TEG (generatori termoelettrici), per la produzione di energia elettrica in presenza di una differenza di temperatura tra i materiali, e TEC (raffreddatori termoelettrici), per scopi di raffreddamento nel caso in cui una tensione di polarizzazione esterna venga applicata ai materiali (Pourkiaei et al., 2019).

I sistemi di generatori termoelettrici sono principalmente costituiti da tre elementi chiave:

- uno scambiatore di calore che assorbe il calore e lo trasferisce nei moduli termoelettrici;
- moduli termoelettrici, i quali generano elettricità quando è presente una differenza di temperatura tra le loro estremità: un modulo termoelettrico contiene molte coppie di coppie termoelettriche e ciascuna coppia normalmente combina una coppia di semiconduttori di tipo p e di tipo n;
- un dissipatore di calore per dissipare il calore aggiuntivo dai moduli termoelettrici (Jouhara et al., 2021).

Un modulo termoelettrico è un convertitore di energia a stato solido costituito da un gruppo di termocoppie cablate elettricamente in serie e termicamente in parallelo. Una termocoppia è composta da due diversi termoelementi semiconduttori, che generano un effetto di raffreddamento termoelettrico (effetto Peltier-Seebeck) quando una tensione nella direzione appropriata viene applicata attraverso la giunzione collegata. Il modulo termoelettrico funziona generalmente con due dissipatori di calore collegati ai lati caldo e freddo per migliorare il trasferimento di calore e le prestazioni del sistema (Zhao & Tan, 2014).

Se un lato di una coppia di materiali viene posto a contatto con una fonte di calore ad alta temperatura e contemporaneamente l'altro lato si trova a temperatura più bassa (**Fig.9**), gli elettroni che circondano gli atomi di materiale sul lato caldo presenteranno energia cinetica

caldo. Nel momento in cui gli elettroni ritornano nel materiale di tipo p ad un livello energetico più basso, il calore viene scaricato nel dissipatore (Enescu & Virjoghe, 2014).

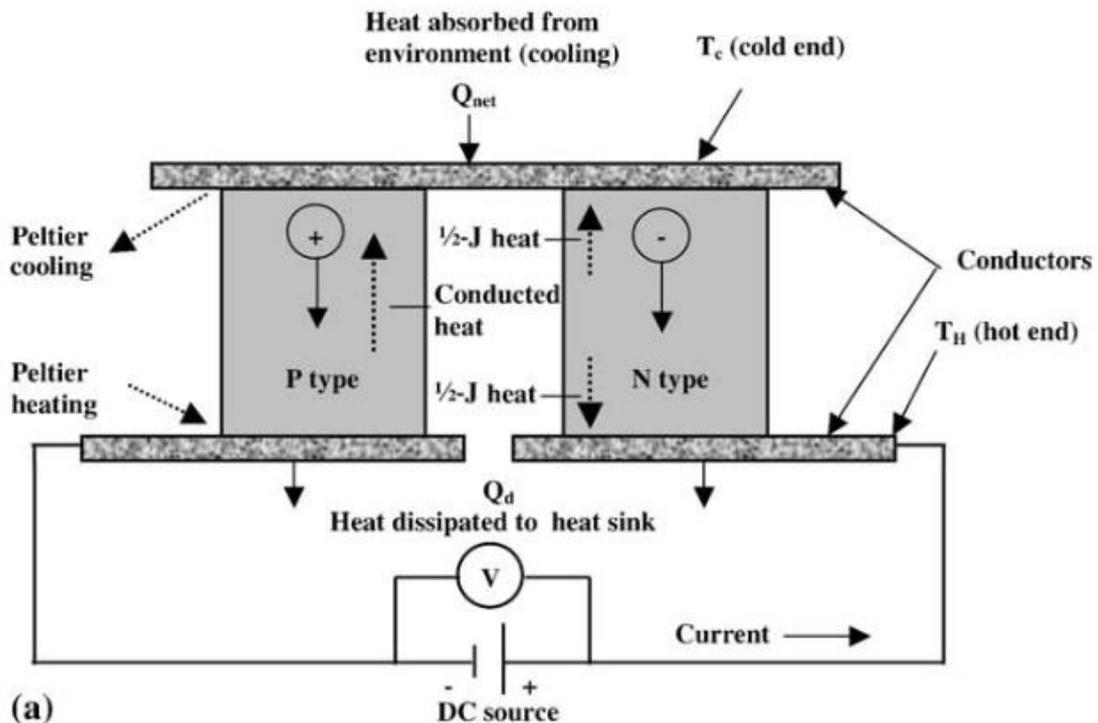


Figura 10. Modulo termoelettrico in modalità di raffreddamento (Riffat & Ma, 2003).

In generale, le configurazioni termoelettriche sono molto stabili se impiegate come refrigeratori in condizioni di temperatura inferiori a 298 K (25°C); d'altro canto, per temperature superiori i sistemi termoelettrici utilizzati come generatori potrebbero subire un calo delle prestazioni (Pourkiaei et al., 2019).

3.4 - I materiali termoelettrici: ricerca e commercializzazione

I generatori termoelettrici si presentano come una soluzione attuabile per le applicazioni di conversione di energia; infatti, i dispositivi termoelettrici che impiegano materiali avanzati possono essere impiegati ad esempio nei sistemi leggeri di recupero del calore. In particolare, sono state compiute ricerche per costruire ed introdurre materiali termoelettrici che potessero garantire un alto valore della cifra termoelettrica di merito (zT), in modo da incrementare l'efficienza globale del sistema.

La cifra termoelettrica di merito rappresenta una costante del materiale proporzionale all'efficienza di una coppia termoelettrica fatta con il materiale stesso ed è espressa dalla relazione:

$$zT = (\sigma S^2 T) / K_{\text{totale}},$$

dove σ indica la conducibilità elettrica, S è il coefficiente di Seebeck, T è la temperatura assoluta e K_{totale} indica la conducibilità termica totale, data dalla somma della conducibilità termica dovuta al reticolo e di quella dovuta agli elettroni (Jouhara et al., 2021).

Per ottenere un alto valore di zT , un materiale termoelettrico efficace dovrebbe possedere un'alta conducibilità elettrica, in modo da minimizzare le perdite per effetto Joule, un buon coefficiente di Seebeck, per poter massimizzare la conversione di energia termica in energia elettrica o di energia elettrica in prestazioni di raffreddamento, ed infine una bassa conducibilità termica così da evitare la conduzione di calore attraverso il materiale. In particolare, quest'ultima proprietà è di cruciale importanza per ottimizzare le prestazioni di un materiale termoelettrico (Zhao & Tan, 2014).

In generale, i materiali termoelettrici possono essere classificati in due categorie: convenzionali ed innovativi.

I materiali termoelettrici convenzionali, che sono leghe di semiconduttori o calcogenuri, possono essere a loro volta suddivisi in tre gruppi a seconda dell'intervallo di temperatura in cui la loro efficienza è ottimale (Jouhara et al., 2021):

- per applicazioni a temperature minori di 150°;
- per applicazioni ad intervalli di temperatura compresi tra 150°C e 500°C;
- per applicazioni a temperature superiori di 500°C.

In generale, nelle termocoppie vengono impiegati materiali semiconduttori per la loro affidabilità, in quanto garantiscono coefficienti di Seebeck elevati e la possibilità di diminuire la conducibilità termica senza influenzare il coefficiente di Seebeck, così da poter incrementare zT (Pourkiaei et al., 2019).

Il Tellururo di Bismuto (Bi_2Te_3) è un materiale termoelettrico inorganico convenzionale ben noto e può raggiungere valori di zT vicini a 1 a temperatura ambiente. Tuttavia, poiché questo materiale è facilmente soggetto a ossidazione e a vaporizzazione, non è possibile impiegarlo in applicazioni ad alta temperatura nell'aria (Jouhara et al., 2021).

Circa il 70% dei moduli termoelettrici in commercio utilizza Bismuto e Tellururo come materiali di lavoro (Rad et al., 2019). Infatti, questi materiali erano gli unici in commercio disponibili a prezzi ragionevoli per le industrie, fatta eccezione per il settore spaziale; la loro

scarsa disponibilità in natura, però, ha portato i ricercatori ed i produttori ad affrontare nuove sfide (Jouhara et al., 2021).

Analizzando i nuovi studi sullo sviluppo della nanostruttura Bi_2Te_3 con diversi metodi ed approcci, è stato dedotto che la sua figura termoelettrica di merito crescerebbe da 0,58 a 1,16 se i materiali si trovassero in una forma di nanostruttura (Mamur et al., 2018).

Il materiale di tipo p $\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{Sb}_2\text{Te}_3$ presenta il valore più alto di zT (2,4) alla temperatura di 300 K (circa 27°C), aumentando la trasmissione di elettroni a blocco fononico attraverso il processo di deposito di vapore di sostanze chimiche organiche metalliche a bassa temperatura (Venkatasubramanian et al., 2010, citato in Pourkiaei et al., 2019). Il Tellururo di Piombo (PbTe) è un materiale termoelettrico inorganico adatto per applicazioni a temperature fino a 900 K; questo materiale presenta un punto di fusione elevato (1190 K), una discreta consistenza chimica, una bassa pressione di vapore e una soddisfacente resistenza chimica. Inoltre, la sua alta figura termoelettrica di merito, che ha raggiunto 0,8, gli ha permesso di essere utilizzato con successo in molte missioni spaziali della NASA (Jouhara et al., 2021). Le leghe di silicio e germanio ($\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$) si presentano alcuni tra i materiali termoelettrici più semplici e non tossici, oltre ad essere tra i materiali termoelettrici più resistenti alle temperature superiori a 500°C (Romanjek et al., 2015).

Per quanto riguarda i nuovi materiali termoelettrici, le leghe semi-Heusler sono risultate interessanti per via delle loro desiderabili capacità di trasporto elettrico, i loro coefficienti di Seebeck relativamente alti ed altre caratteristiche rilevanti quali resistenza meccanica, buona stabilità termica ad alte temperature e proprietà fisiche multiformi (Jouhara et al., 2021).

I materiali con vetro fononico e cristallo di elettroni (PGEC) risultano anch'essi interessanti in quanto presentano una complessa struttura a gabbia intermetallica che conferisce al materiale buone proprietà elettriche, oltre ad una bassa conducibilità termica (Anno et al., 2012). Tra i materiali PGEC relativamente recenti si evidenziano i clatrati e gli skutteruditi (Jouhara et al., 2021).

La ceramica è nota per essere un materiale termoelettrico efficiente per la conversione dell'energia e può essere impiegata in applicazioni di recupero di energia termica come nei motori a combustione o negli inceneritori. Tuttavia, prima dell'affermazione del $\text{Na}_x\text{Co}_2\text{O}_4$, gli ossidi non metallici non erano considerati come una possibile soluzione per i materiali termoelettrici a causa della bassa mobilità dei portatori di carica (Pourkiaei et al., 2019).

In alcune unità termoelettriche sono stati impiegati anche ossido di Cobalto come materiale di tipo p e ossido di Cadmio come materiale di tipo n , con proprietà termoelettriche soddisfacenti;

il CdO non stechiometrico mostra in generale una buona conduttività elettrica e per abbassarne la resistività viene drogato con elementi ad alta valenza (Wang et al., 2013).

Altri ossidi come $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_9$ sono materiali termoelettrici fortemente performanti (presentano $zT \sim 1$), sono relativamente resistenti alle alte temperature e sono sostenibili dal punto di vista ambientale (Jouhara et al., 2021).

Alcuni degli svantaggi dei materiali termoelettrici inorganici sono la loro tossicità, la scarsa presenza in natura degli elementi dei quali sono costituiti ed inoltre la complessità ed il costo elevato delle loro procedure di produzione (Pourkiaei et al., 2019). A tal proposito, è stato riscontrato un grande interesse nei materiali organici grazie alla scoperta dei polimeri conduttivi, i quali presentano i vantaggi di essere compatti, leggeri e ideali per applicazioni a temperatura ambiente, oltre al fatto di richiedere processi di produzione relativamente più semplici in confronto ai materiali inorganici. I polimeri sono conduttori termici inefficaci per loro natura; questa caratteristica li rende adatti per le applicazioni termoelettriche, anche se il loro impiego è limitato dal basso coefficiente di Seebeck, dalla bassa conduttività elettrica e dalla bassa stabilità. Tuttavia, alcuni polimeri possono essere soggetti a modifiche per quanto riguarda la loro struttura molecolare e quindi è possibile migliorare le loro proprietà fisiche e chimiche (Jouhara et al., 2021).

3.3 - Vantaggi, svantaggi ed applicazioni

I dispositivi termoelettrici sono a solidi, compatti e non necessitano di manutenzione. Tali caratteristiche rendono questi dispositivi una tecnologia promettente per il recupero del calore di scarto in spazi limitati. Inoltre, rispetto ad altre tecnologie, i generatori termoelettrici sono più compatibili con diversi scambiatori di calore e meccanismi di trasferimento del calore. L'unico inconveniente dell'utilizzo dei TEG è la loro bassa efficienza di conversione; tuttavia, l'utilizzo di una fonte gratuita come il calore in eccesso copre questo aspetto negativo dei dispositivi termoelettrici (Tohidi et al., 2021). È stata condotta una prova presso il forno di carburazione di una fabbrica per testare il funzionamento del sistema di generazione termoelettrica. Nel sito è stato bruciato gas di carburazione residuo (contenente CO , H_2 e N_2), portando ad una capacità di combustione di 20 kW: il gas di scarico ha fornito calore continuamente al lato caldo del generatore termoelettrico, il quale era composto da 16 moduli in Bi_2Te_3 e uno scambiatore di calore ricevente circa il 20% del calore (4 kW). La potenza elettrica massima è stata di circa 214 W, che riflette un'efficienza del 5% (Kaibe et al., 2012, citato in Jouhara et al., 2021).

I generatori termoelettrici hanno suscitato interesse nel settore automobilistico, in quanto essi possono essere impiegati come tecnologia per convertire l'energia termica prodotta dai gas di scarico in energia elettrica; questo inoltre potrebbe essere utile per migliorare l'efficienza del motore stesso, oltre a ridurre le emissioni in ambiente e diminuire i costi energetici (Jouhara et al., 2021).

Nel campo delle applicazioni delle energie rinnovabili, in particolare nell'ambito dell'energia solare, i dispositivi termoelettrici hanno suscitato molto interesse per via della loro potenzialità di integrazione in sistemi fotovoltaici; l'obiettivo dei sistemi ibridi è quello di massimizzare l'efficienza di conversione delle celle solari, attraverso l'impiego di generatori termoelettrici (Tohidi et al., 2021).

In questo ambito è stato condotto uno studio che ha proposto un innovativo sistema di raffreddamento, che permette dall'aspetto tecnico e produttivo una significativa semplificazione della tecnologia di raffreddamento delle celle solari e conversione termoelettrica utilizzando l'effetto Seebeck, integrando lo scambiatore di calore con il convertitore termoelettrico. Per questa analisi sono stati considerati materiali termoelettrici inorganici commerciali di semiconduttori di tipo p e n come Bi_2Te_3 (Tellururo di Bismuto) e PbTe (Tellururo di Piombo). Il sistema di raffreddamento proposto ha evidenziato la possibilità di incrementare di quasi il 15% la potenza elettrica convertita dalle celle (Fabbri & Greppi, 2021).

4 - IL SISTEMA DI RAFFREDDAMENTO CON GENERAZIONE TERMOELETTRICA

4.1 - Descrizione del brevetto

Fabbri e Greppi (2021) hanno condotto uno studio proponendo un innovativo apparato di supporto e raffreddamento integrato per le celle solari di un pannello fotovoltaico. I principali aspetti della tecnologia brevettata riguardano l'integrazione tra scambiatore di calore, che funge anche da supporto per le celle, e convertitore termoelettrico, l'indipendenza tra efficienza di scambio termico ed efficienza di generazione termoelettrica, in quanto solo una parte del calore sottratto passa attraverso le termocoppie, e l'impiego di un sistema di giunti per realizzare i contatti elettrici, portando ad una semplificazione nella costruzione e nell'installazione. Un altro aspetto importante risiede nella possibilità di realizzare l'apparecchio in modo tale da poter essere adattato con facilità a pannelli fotovoltaici di diverse dimensioni; inoltre, il dispositivo, una volta installato sul tetto, possiede il vantaggio di fungere da isolante termico per il tetto stesso, oltre a consentire il raffreddamento del pannello solare e l'aumento della sua efficienza. Il cuore del modulo TEC/dissipatore di calore consiste da giunzioni termoelettriche drogate p e n, unite tra loro mediante giunti a pressione, in modo tale da ottenere termocoppie più compatte, facili da costruire e da assemblare. Il sistema di raffreddamento TEC integrato si adatta a diverse esigenze grazie alla sua modularità e funge da supporto per il pannello solare.

Il modulo integrato (**Fig.11**) è costituito da due lamiere, le quali racchiudono il nucleo composto dal sistema di raffreddamento termoelettrico.

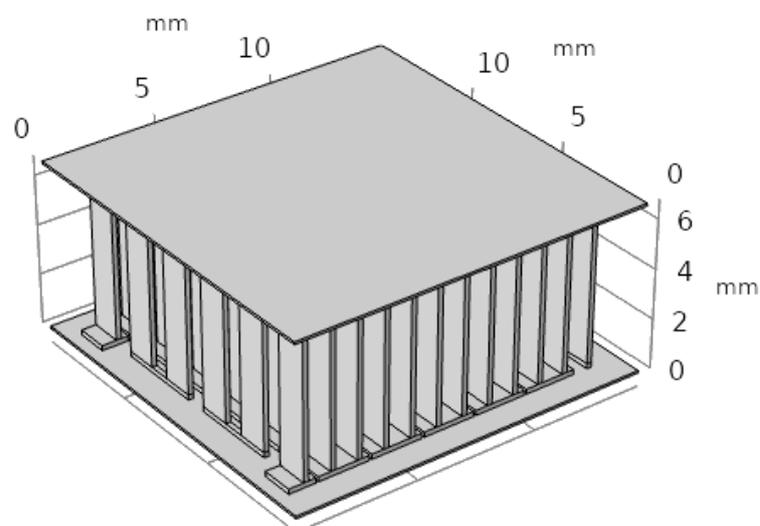


Figura 11. Geometria del modulo termoelettrico.

La piastra superiore in alluminio che accoglie lo strato fotovoltaico è rivestita, sulla superficie inferiore, con uno strato di materiale elastico termoconduttivo ed elettroisolante, così come la superficie superiore della piastra sul lato opposto. M file di coppie di giunzioni in lunghezza e N_t colonne di coppie di giunzioni in larghezza costituiscono il nucleo del modulo TEC. In questo caso sono stati considerati materiali termoelettrici inorganici commerciali: Tellururo di Bismuto (Bi_2Te_3) come materiale di tipo p e Tellururo di Piombo (PbTe) come materiale di tipo n.

4.2 - Analisi numerica

È stato sviluppato un modello finito stazionario per simulare numericamente le prestazioni del modulo integrato PVTE, delimitato dalle facce di ingresso, di uscita e da quelle termicamente isolate (**Fig.12**).

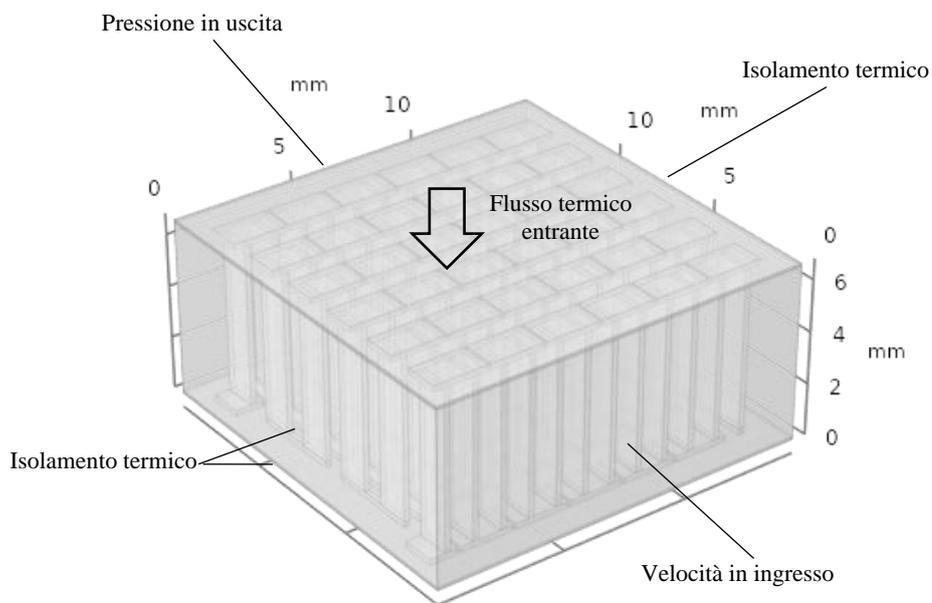


Figura 12. Condizioni al contorno.

Sia L_t la distanza tra i piani di ingresso e di uscita nella direzione y , W_t la distanza tra i piani laterali nella direzione x e H_t l'altezza del modulo simulato. In **Fig.13** è rappresentata la sezione del dominio studiata nei piani normali agli assi x e y .

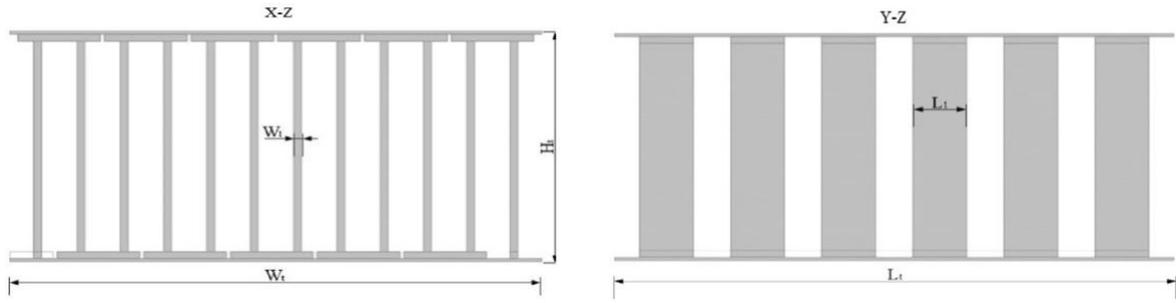


Figura 13. Viste X-Z e Y-Z della sezione del modulo integrato.

Le condizioni al contorno iniziali sono le velocità di ingresso e uscita della pressione, l'isolamento delle pareti laterali e della superficie di fondo, il flusso di calore uguale a 800 W sulla superficie superiore. Le equazioni che governano ed analizzano il comportamento del dispositivo integrato termoelettrico e fluidodinamico sono le equazioni di continuità (1), quantità di moto (2), flusso di calore (3) e continuità della carica elettrica (4):

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial p}{\partial x} \right) \quad (2)$$

$$\rho C \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) + \vec{\nabla} \cdot \vec{q} = Q_t \quad (3)$$

$$C \left(\varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) + \vec{\nabla} \cdot \vec{J} = Q_e \quad (4)$$

dove ρ è la densità del fluido, μ è la viscosità dinamica, u è la velocità del fluido, p è la pressione generalizzata, T è la temperatura, E è il campo elettrico, q è il flusso di calore, J è la densità di corrente elettrica, Q_t è il calore interno generato, Q_e è la carica elettrica, C è la capacità termica e ε è la permittività elettrica. La densità di corrente J (6) è generata dall'accoppiamento dell'effetto Seebeck reversibile e dell'effetto Joule irreversibile:

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} - \sigma S \vec{\nabla} T \quad (5)$$

Il flusso di calore q è generato dall'accoppiamento dell'effetto Peltier reversibile e dell'effetto Fourier irreversibile:

$$\vec{q} = \pi \vec{J} - k \vec{\nabla} T \quad (6)$$

dove π è il coefficiente di Peltier, k è la conducibilità termica, σ è la conducibilità elettrica e $S=V/\Delta T$ è il coefficiente di Seebeck (V è il potenziale elettrico). Il campo elettrico può essere ricavato dal potenziale elettrico scalare φ come:

$$\vec{E} = -\vec{\nabla}\varphi \tag{7}$$

5 - CONCLUSIONI

In questo elaborato è inizialmente proposta un'introduzione ai sistemi termici e fotovoltaici, partendo da una spiegazione della situazione legata alla crescente richiesta energetica globale ed all'aggravarsi della situazione riguardante l'inquinamento ambientale, per poi concentrarsi sulla convenienza dello sfruttamento di energia solare per poterla convertire in altre forme di energia grazie all'impiego di sistemi solari termici e fotovoltaici. I collettori solari termici permettono la conversione dell'energia solare in energia termica; essi sono generalmente disponibili sul mercato a prezzi relativamente contenuti e, grazie alla loro elevata efficienza, garantiscono una buona affidabilità per la produzione di riscaldamento domestico ed industriale. I sistemi fotovoltaici sono in grado di convertire l'energia solare in energia elettrica attraverso le celle solari, grazie allo sfruttamento dell'effetto fotovoltaico. Il materiale generalmente più utilizzato per la realizzazione delle celle fotovoltaiche è il silicio; in particolare, le celle realizzate in silicio monocristallino garantiscono un'efficienza di conversione elevata, compresa tra il 15% e il 25%. In seguito, è analizzata la possibilità di poter usufruire dei vantaggi di entrambi i sistemi in un unico apparato, ovvero i sistemi termofotovoltaici; essi, infatti, garantiscono un aumento dell'efficienza di conversione delle celle solari ed una maggiore produzione di energia per unità di superficie captante rispetto ai sistemi separati, ma la loro commercializzazione è ancora alle fasi iniziali. I sistemi termo-fotovoltaici possono essere classificati in base a varie caratteristiche; in questo elaborato viene considerata la classificazione di questi sistemi a seconda del fluido termovettore impiegato. Successivamente è proposta una trattazione sui sistemi termoelettrici, i quali, attraverso l'effetto termoelettrico, permettono la conversione di energia termica in energia elettrica, rendendosi interessanti per molte applicazioni, tra le quali il raffreddamento delle celle solari, pur presentando valori di efficienza bassi che nel corso degli anni stanno migliorando grazie alla ricerca di materiali termoelettrici innovativi. Lo studio riportato, condotto da Fabbri e Greppi (2021), mira ad ottimizzare l'efficienza di conversione delle celle dei pannelli fotovoltaici grazie ad un innovativo sistema di raffreddamento con conversione termoelettrica di energia. I primi risultati numerici ottenuti analizzando materiali termoelettrici inorganici commerciali, Tellururo di Bismuto (Bi_2Te_3) come materiale di tipo p e Tellururo di Piombo (PbTe) come materiale di tipo n, hanno permesso di evidenziare l'aumento della potenza elettrica erogata sfruttando l'effetto Seebeck. Per un pannello fotovoltaico standard di 100cm x 125cm (ovvero 7 x 9 moduli) il sistema di raffreddamento proposto consente un aumento di quasi il 15% della potenza elettrica convertita dalle celle. La potenza elettrica massima raggiungibile dal sistema,

per i materiali termoelettrici commerciali inorganici, considerando tutti i guadagni e le perdite di potenza elettrica, è prossima a 300-310 W/m². Le termocoppie realizzate con materiali organici nano-drogati (nonostante alcune limitazioni tecniche di produzione da migliorare), grazie ad una cifra termoelettrica di merito più elevata, potrebbero non solo fornire incrementi della potenza elettrica convertita dalle celle fotovoltaiche ma aumentare anche la generazione termoelettrica per un pannello fotovoltaico standard da 250 W.

6 - RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI:

Ahmad L., Khordehgh N., Malinauskaite J., Jouhara H. (2020). Recent advances and applications of solar photovoltaics and thermal technologies. *Energy*; Volume 207, 15 settembre 2020, 11825. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118254>

Ahmed S. F., Khalid M., Vaka M., Walvekar R., Numan A., Rasheed A. K., Mubarak N. M. (2021). Recent progress in solar water heaters and solar collectors: A comprehensive review. *Thermal Science and Engineering Progress*; Volume 25, 1 ottobre 2021, 100981. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2021.100981>

Alami A. H., Ramadan M., Abdelkareem M. A., Alghawi J. J., Alhattawi N. T., Mohamad A. H., Olabi A-G. (2022). Novel and practical photovoltaic applications. *Thermal Science and Engineering Progress*; Volume 29, 1 marzo 2022, 101208. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2022.101208>

Alawi O. A., Kamar H. M., Mallah A. R., Mohammed H. A., Kazi S. N., Sidik N. A. C., Najafi G. (2020). Nanofluids for flat plate solar collectors: Fundamentals and applications. *Journal of Cleaner Production*; Volume 291, 1 aprile 2021, 125725. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125725>

Anno H., Yamada H., Nakabayashi T., Hokazono M., Shirataki R. (2012). Gallium composition dependence of crystallographic and thermoelectric properties in polycrystalline type-I $\text{Ba}_8\text{Ga}_x\text{Si}_{46-x}$ (nominal $x=14-18$) clathrates prepared by combining arc melting and spark plasma sintering methods. *Journal of Solid State Chemistry*; Volume 193, settembre 2012, pagine 94-104. <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2012.03.069>

Ashour A. F., El-Awady A. T., Tawfik M. A. (2021). Numerical investigation on the thermal performance of a flat plate solar collector using ZnO & CuO water nanofluids under Egyptian weathering conditions. *Energy*; Volume 240, 1 febbraio 2022, 122743. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122743>

Askari M. B., Mirzaei M. A. V., Mirhabibi M. (2015). Types of solar cells and application. *American Journal of Optics and Photonics*; Volume 3, Numero 5, ottobre 2015, pagine 94-113. <https://doi.org/10.11648/j.ajop.20150305.17>

Bambrook S. M., Sproul A. B. (2012). Maximising the energy output of a PVT air system. *Solar Energy* (2012); Volume 86, Numero 6, giugno 2012, pagine 1857-1871. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.02.038>

Bhalla V., Khullar V., Parupudi R. V. (2021). Design and thermal analysis of nanofluid-based compound parabolic concentrator. *Renewable Energy* (2022); Volume 185, febbraio 2022, pagine 348-362. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.12.064>

Carmona M., Bastos A. P., García J. D. (2021). Experimental evaluation of a hybrid photovoltaic and thermal solar energy collector with integrated phase change material (PVT-PCM) in comparison with a traditional photovoltaic (PV) module. *Renewable Energy*; Volume 172, luglio 2021, pagine 680-696. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.03.022>

Choi J., Lee H., Jung B., Woo J-H., Kim J-Y., Lee K-S., et al. (2018). Co-diffusion of boron and phosphorus for ultra-thin crystalline silicon solar cells. *Journal of Physics D: Applied Physics*; Volume 51, Numero 27, 2018. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/aabf6d>

Diwania S., Agrawal S., Siddiqui A. S., Singh S. (2020). Photovoltaic–thermal (PV/T) technology: a comprehensive review on applications and its advancement. *International Journal of Energy and Environmental Engineering* (2020); Volume 11, marzo 2020, pagine 33–54. <https://doi.org/10.1007/s40095-019-00327-y>

Donev J. M. K. C. et al. (2015). *Energy Education* - Photovoltaic effect [Online]. Available: https://energyeducation.ca/encyclopedia/Photovoltaic_effect.

Donev J. M. K. C. et al. (2020). *Energy Education* - Semiconductor [Online]. Available: <https://energyeducation.ca/encyclopedia/Semiconductor>.

Donev J. M. K. C. et al. (2021). *Energy Education* - Photovoltaic cell [Online]. Available: https://energyeducation.ca/encyclopedia/Photovoltaic_cell.

Eldin S. A. S., Abd-Elhady M. S., Kandil H. A. (2016). Feasibility of solar tracking systems for PV panels in hot and cold regions. *Renewable Energy*; Volume 85, gennaio 2016, pagine 228-233. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2015.06.051>.

Elmes S. (2014). Financial returns for solar heating. *Solar Power Portal* (2014). https://www.solarpowerportal.co.uk/blogs/financial_returns_for_solar_heating

Enescu D., Virjoghe E. O. (2014). A review on thermoelectric cooling parameters and performance. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*; Volume 38, ottobre 2014, pagine 903-916. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.045>

Evangelisti L., De Lieto Vollaro R., Asdrubali F. (2019). Latest advances on solar thermal collectors: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*; Volume 114, ottobre 2019, 109318. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109318>

Fabbri G., Greppi M. (2021). Numerical modeling of a new integrated PV-TE cooling system and support. *Results in Engineering*; Volume 11, settembre 2021, 100240. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2021.100240>

Gang P., Huide F., Tao Z., Jie J. (2011). A numerical and experimental study on a heat pipe PV/T system. *Solar Energy*; Volume 85, Numero 5, maggio 2011, Pagine 911-921. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2011.02.006>.

Greppi M., Fabbri G. (2020). Experimental dataset of seasonal behaviour of a hybrid solar tile. *Data in Brief*; Volume 34, febbraio 2021, 106649. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2020.106649>

Greppi M., Fabbri G. (2020). Innovative Thermophotovoltaic Hybrid Resin Tile. *International Journal of Engineering Science Invention*; ISSN (Online): 2319-6734, ISSN (Print): 2319-6726; www.ijesi.org, Volume 9, Numero 11, Serie 1, novembre 2020, pagine 59-64.

Herez A., El Hage H., Lemenand T., Ramadan M., Khaled M. (2020). Review on photovoltaic/thermal hybrid solar collectors: Classifications, applications and new systems. *Solar Energy*; Volume 207, 1 settembre 2020, pagine 1321-1347. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.07.062>

Herrando M., Markides C. N., Hellgardt K. (2014). A UK-based assessment of hybrid PV and solar-thermal systems for domestic heating and power: system performance. *Applied Energy*; Volume 122, 1 giugno 2014, pagine 288-309. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.01.061>.

IRENA, 2019. Renewable Power Capacity and Generation.

Joshi S. S., Dhoble A. S. (2018). Photovoltaic-Thermal systems (PVT): Technology reviews and future trends. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*; Volume 92, settembre 2018, pagine 848-882. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.067>

Jouhara H., Khordehgah N., Almahmoud S., Delpech B., Chauhan A., Tassou S. A. (2018). Waste heat recovery technologies and applications. *Thermal Science and Engineering Progress*; Volume 6, giugno 2018, pagine 268-289. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2018.04.017>

Jouhara H., Zabnienska-Góra A., Khordehgah N., Doraghi Q., Ahmad L., Norman L., Axcell B., Wrobel L., Dai S. (2021). Thermoelectric generator (TEG) technologies and applications. *International Journal of Thermofluids*; Volume 9, febbraio 2021, 100063. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2021.100063>

Kang H., Hong T., Lee M. (2019). Technical performance analysis of the smart solar photovoltaic blinds based on the solar tracking methods considering the climate factors. *Energy and Buildings*; Volume 190, 1 maggio 2019, pagine 34-48. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.02.013>

Kazemian, A., Hosseinzadeh, M., Sardarabadi, M., Passandideh-Fard M. (2018). Effect of glass cover and working fluid on the performance of photovoltaic thermal (PVT) system: an experimental study. *Solar Energy*; Volume 173, ottobre 2018, pagine 1002-1010. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.07.051>.

Maatallah T., Zachariah R., Al-Amri F. G. (2019). Exergo-economic analysis of a serpentine flow type water based photovoltaic thermal system with phase change material (PVT-PCM/water). *Solar Energy*; Volume 193, 15 novembre 2019, pagine 195-204. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.09.063>

Mamur H., Bhuiyan M., Korkmaz F., Nil M. (2018). A review on bismuth telluride (Bi₂Te₃) nanostructure for thermoelectric applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*; Volume 82, Parte 3, febbraio 2018, pagine 4159-4169. doi: <http://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.112>

Maurer C., Cappel C., Kuhn T. E. (2017). Progress in building-integrated solar thermal systems. *Solar Energy*; Volume 154, 15 settembre 2017, pagine 158-186. <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2017.05.065>

Michael J. J., Iniyan S., Goic R. (2015). Flat plate solar photovoltaic–thermal (PV/T) systems: A reference guide. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*; Volume 51, novembre 2015, pagine 62-88. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.06.022>

Nasrin R., Rahim N. A., Fayaz H., Hasanuzzaman M. (2018). Water/MWCNT nanofluid based cooling system of PVT: Experimental and numerical research. *Renewable Energy*; Volume 121, giugno 2018, pagine 286-300. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.01.014>

Nogueira C. E. C., Bedin J., Niedzialkoski R. K., de Souza S. N. M., das Neves J. C. M. (2015). Performance of monocrystalline and polycrystalline solar panels in a water pumping system in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*; Volume 51, novembre 2015, pagine 1610-1616. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2015.07.082>.

Ordóñez F., Flores E., Soria R. (2021). Comprehensive analysis of the variables influencing the techno-economic optimization of medium temperature linear Fresnel collectors. *Energy Reports*; Volume 7, novembre 2021, pagine 5747-5761. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.08.194>

Padilla R. V., Demirkaya G., Goswami D. Y., Stefanakos E., Rahman M. M. (2011). Heat transfer analysis of parabolic trough solar receiver. *Applied Energy*; Volume 88, Numero 12, dicembre 2011, pagine 5097-5110.

Pourkiaei S. M., Ahmadi M. H., Sadeghzadeh M., Moosavi S., Pourfayaz F., Chen L., Yazdi M. A. P., Kumar R. (2019). Thermoelectric cooler and thermoelectric generator devices: A

review of present and potential applications, modeling and materials. *Energy*; Volume 186, 1 novembre 2019, 115849. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.07.179>

Rad M. K., Rezaia A., Omid M., Rajabipour A., Rosendahl L. (2019). Study on material properties effect for maximization of thermoelectric power generation. *Renewable Energy*; Volume 138, agosto 2019, pagine 236-242. doi: <http://doi.org/10.1016/j.renene.2019.01.104>

Riffat S. B., Ma X. (2003). Thermoelectrics: a review of present and potential applications. *Applied Thermal Engineering*; Volume 23, Numero 8, giugno 2003, pagine 913-935. doi: [http://doi.org/10.1016/S1359-4311\(03\)00012-7](http://doi.org/10.1016/S1359-4311(03)00012-7)

Romanjek K., Vesin S., Aixala L., Baffie T., Bernard-Granger G., Dufourcq J. (2015). High-Performance Silicon–Germanium-Based Thermoelectric Modules for Gas Exhaust Energy Scavenging. *Journal of Electronics Materials*; Volume 44, aprile 2015, pagine 2192–2202. doi: <http://doi.org/10.1007/s11664-015-3761-1>

Sabiha M. A., Saidur R., Mekhilef S., Mahian O. (2015). Progress and latest developments of evacuated tube solar collectors (2015). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*; Volume 51, novembre 2015, pagine 1038-1054. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.016>.

Sathe T. M., Dhoble A.S. (2017). A review on recent advancements in photovoltaic thermal techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*; Volume 76, settembre 2017, pagine 645-672. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.075>

Senthilraja S., Gangadevi R., Marimuthu R., Baskaran M. (2019). Performance evaluation of water and air PVT solar collector for hydrogen production application. *International Journal of Hydrogen Energy*; Volume 45, Numero 13, 6 marzo 2020, pagine 7498-7507. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.02.223>

Sugiarta N., Negara S. (2018). Technical Feasibility Evaluation on The Use of A Peltier Thermoelectric Module to Recover Automobile Exhaust Heat. *Journal of Physics: Conference Series*; Volume 953, The 2nd International Joint Conference on Science and Technology (IJCST) 2017, 27–28 settembre 2017, Bali, Indonesia. doi: <http://doi.org/10.1088/1742-6596/953/1/012090>

Tembhare S. P., Barai D. P., Bhanvase B. A. (2021). Performance evaluation of nanofluids in solar thermal and solar photovoltaic systems: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*; Volume 153, gennaio 2022, 111738. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111738>

Tohidi F., Holagh S. G., Chitsaz A. (2021). Thermoelectric Generators: A comprehensive review of characteristics and applications. *Applied Thermal Engineering*; Volume 201, Parte A, 25 gennaio 2022, 117793. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117793>

Tripathy M., Sadhu P. K., Panda S. K. (2016). A critical review on building integrated photovoltaic products and their applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*; Volume 61, agosto 2016, pagine 451-465. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.04.008>

Wang S., Lü Q., Li L., Fu G., Liu F., Dai S., Yu W., Wang J. (2013). High-temperature thermoelectric properties of $Cd_{1-x}Pr_xO$ ceramics. *Scripta Materialia*; Volume 69, Numero 7, ottobre 2013, pagine 533-536. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2013.06.018>

Zhao K., Jin H., Gai Z., Hong H. (2022). A thermal efficiency-enhancing strategy of parabolic trough collector systems by cascadingly applying multiple solar selective-absorbing coatings. *Applied Energy*; Volume 309, 1 marzo 2022, 118508. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.118508>

Zhou B., Pei J., Nasir D. M., Zhang J. (2021). A review on solar pavement and photovoltaic/thermal (PV/T) system. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*; Volume 93, aprile 2021, 102753. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.102753>

Zondag H. A., de Vries D. W., van Helden W. G. J., van Zolingen R. J. C., van Steenhoven A. A. (2003). The yield of different combined PV-thermal collector designs. *Solar Energy*; Volume 74, Numero 3, marzo 2003, pagine 253-269. doi: [http://doi.org/10.1016/S0038-092X\(03\)00121-X](http://doi.org/10.1016/S0038-092X(03)00121-X)

RINGRAZIAMENTI

Vorrei innanzitutto ringraziare il prof. Giampietro Fabbri e l'ing. Matteo Greppi per la disponibilità e la pazienza dimostrata durante tutte le fasi della redazione del mio elaborato finale, oltre che per le correzioni ed i suggerimenti costruttivi.

Desidero inoltre ringraziare la mia fidanzata, la mia famiglia ed i miei amici per essere stati sempre al mio fianco e per avermi sempre sostenuto durante il mio percorso universitario.