

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in
Ingegneria Energetica e Nucleare

TESI DI LAUREA MAGISTRALE

Analisi teorica e sperimentale di un potenziale assorbitore solare ad alte prestazioni



Relatori

Prof. Marco Simonetti
Prof.ssa Monica Ferraris
Ing. Giuseppe Marinelli

Candidata

Eugenia Ferrero
Matricola 265349

Anno Accademico 2020/2021

Sommario

Introduzione.....	1
1. Solare termico	2
1.1 Impianto solare termico	4
1.1.1 Collettore solare	5
1.1.2 Serbatoio di accumulo.....	10
1.2 Applicazioni convenzionali del solare termico	13
1.2.1 Produzione di acqua calda sanitaria (ACS)	13
1.2.2 Riscaldamento degli ambienti	15
1.3 Nuovi scenari e applicazioni	16
1.3.1 Solar cooling.....	16
1.3.2 L'accumulo dell'energia.....	20
1.3.3 Sistemi elio-assistiti	22
1.3.4 Applicazioni large-scale	24
1.4 Problematiche.....	25
2. Sistema di incentivazioni e certificazione Solar Keymark	30
2.1 Conto termico 2.0 - GSE	30
2.2 Solar Keymark	31
2.3 Esempio di collettori certificati e calcolo dell'incentivo	33
3. Collettore solare Ecobel	36
3.1 Strip solare	36
3.1.1 Strip solari standard: saldatura laser e saldatura a ultrasuoni	38
3.2 Simulazioni teoriche del trasferimento di calore tra la superficie captante e il fluido termovettore	40
3.2.1 Studio stazionario con temperatura della superficie superiore della piastra captante imposta.....	41

3.2.2	Studio stazionario con flusso incidente sulla piastra captante imposto.....	46
3.2.3	Considerazioni su assorbitore standard in rame.....	52
3.3	Trattamenti selettivi	54
3.3.1	Scambio termico per irraggiamento	55
3.3.2	Trattamenti selettivi in commercio.....	56
3.3.3	Lavorazione meccanica superficiale	62
4.	Analisi sperimentali sull'assorbitore	69
4.1	Considerazioni economiche.....	79
4.2	Considerazioni finali sulle diverse tipologie di strip	80
5.	Conclusioni	81
	Bibliografia	83
	Elenco delle figure.....	86
	Elenco delle tabelle.....	90
	Ringraziamenti.....	92

Introduzione

Questo lavoro di tesi, svolto presso l'azienda Eco Innovest (Ecoibel) sotto la supervisione dell'ingegnere Giuseppe Marinelli, è incentrato sull'analisi teorica e sperimentale di un potenziale assorbitore solare ad alte prestazioni.

Nel capitolo introduttivo, dopo una breve panoramica dei consumi energetici globali e in particolare di quelli termici, si è passati alla descrizione di un impianto solare termico convenzionale, con riferimento ai suoi componenti e alle sue applicazioni.

Nel secondo capitolo si è fatto riferimento al sistema di incentivazione italiano per l'incremento dell'efficienza energetica e la produzione di energia termica da fonti rinnovabili ponendo l'attenzione sulla certificazione Solar Keymark, indispensabile per la commercializzazione di un collettore solare.

Nel capitolo successivo, cuore di questa tesi, si è analizzato un assorbitore solare caratterizzato da una geometria particolare mirata ad ottimizzare l'assorbimento della radiazione solare e lo scambio di calore con il fluido termovettore. Sono state svolte alcune analisi teoriche con l'utilizzo del software *COMSOL Multiphysics 5.6* al fine di confrontare l'assorbitore oggetto di studio con uno di tipo standard. Per completare l'analisi teorica si sono analizzati i principali trattamenti selettivi presenti in commercio per poter scegliere l'opzione più adatta all'assorbitore d'interesse.

Si è poi realizzato un sistema che permettesse di svolgere una prova sperimentale per andare a verificare le ipotesi fatte nel capitolo precedente tramite un confronto tra le performance di tre diversi assorbitori: uno di tipo standard e due sperimentali con diverso trattamento superficiale.

A conclusione di questa tesi si sono messi in luce i risultati ottenuti delineando i limiti sia dell'analisi teorica, sia di quella sperimentale, con l'obiettivo della realizzazione di un collettore solare caratterizzato dall'assorbitore studiato, in modo tale da svolgere una prova sperimentale più completa che possa portare all'ottenimento della certificazione Solar Keymark e alla successiva commercializzazione del collettore solare.

1. Solare termico

Secondo le stime riportate dall'International Energy Agency (IEA) nel report pubblicato nell'ottobre 2019, il 50% dei consumi energetici globali del 2018 sono da attribuire ad usi termici; di questi, circa la metà è destinata all'utilizzo in processi industriali e l'altra metà è utilizzata a livello residenziale per il riscaldamento degli ambienti e la produzione di acqua calda. Complessivamente, i consumi energetici per l'utilizzo termico contribuiscono per il 40% alle emissioni globali di anidride carbonica: i combustibili fossili continuano a dominare il mercato, mentre le fonti rinnovabili hanno ricoperto solamente il 10% della domanda globale del 2018 [1]. È quindi evidente quanto sia importante, al fine di ridurre le emissioni inquinanti, porre l'attenzione sulla produzione di energia termica.

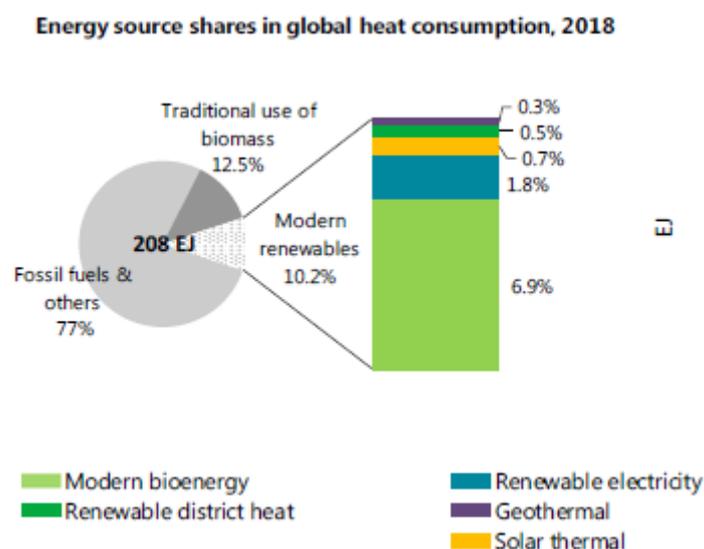


Figura 1: Quote rappresentative delle fonti energetiche utilizzate per soddisfare la domanda di energia termica a livello globale [1].

Il solare termico è una tecnologia matura e consolidata soprattutto in ambito residenziale per la produzione di acqua calda sanitaria. Il principio che si trova alla base del funzionamento di questo tipo di impianti è la possibilità di trasferire calore dalla radiazione solare ad un fluido termovettore e lo sfruttamento di questa tecnologia permette un risparmio sui consumi di gas ed energia elettrica che verrebbero altrimenti utilizzati per lo stesso scopo.

Dal 2000 ad oggi la capacità solare termica globalmente installata è cresciuta notevolmente (*Figura 2*) e, facendo riferimento ai dati del 2019, si può dire che abbia permesso di evitare l'utilizzo di 41,9 milioni di tonnellate di petrolio e l'emissione di 135,1 milioni di tonnellate di anidride carbonica [2].

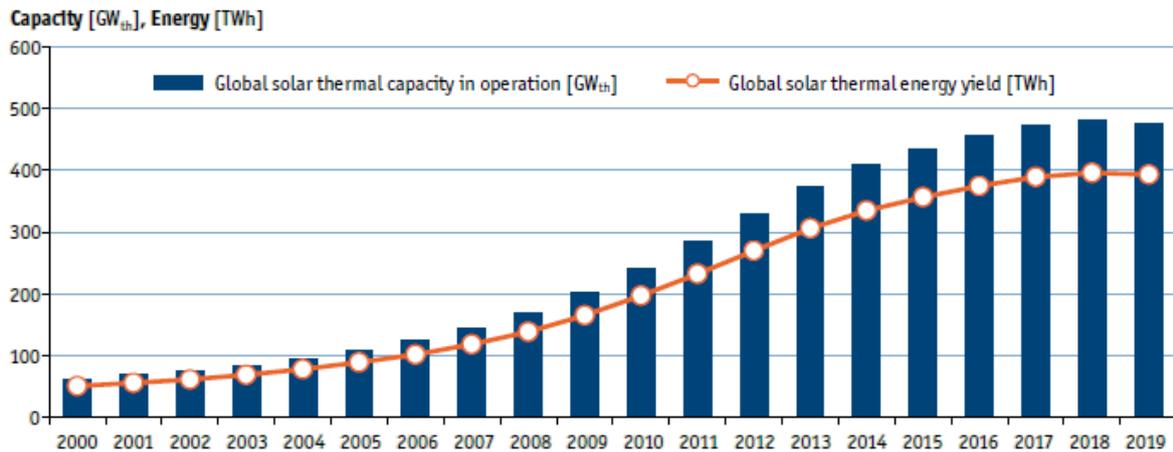


Figura 2: Capacità solare termica globale in funzione e rendimenti energetici annuali 2000-2019 [2].

Il mercato più imponente a livello globale è quello cinese nonostante abbia subito un lieve declino durante il 2019; considerando invece il contesto europeo si posizionano ai primi posti Germania, Francia e Polonia, anch'esse caratterizzate da un lieve calo durante lo scorso anno. Una tendenza opposta, con un notevole aumento, si è invece riscontrato soprattutto in Danimarca dove entro la fine del 2019 si è raggiunta una capacità installata di 1089 MW grazie all'installazione di 15 impianti solari large-scale collegati ad un impianto di teleriscaldamento. L'interesse nei sistemi di teleriscaldamento supportati dall'energia solare sta infatti continuando a crescere, insieme allo sfruttamento dell'energia solare per sistemi di riscaldamento e raffrescamento nel settore commerciale ed industriale [2]. Ad oggi il 60% delle installazioni a livello globale sono rappresentate dalla realizzazione di sistemi di piccola scala per il riscaldamento dell'acqua calda sanitaria e il riscaldamento di ambienti come case unifamiliari, appartamenti, hotel e uffici pubblici.

Considerando i consumi finali di energia del nostro Paese (dati del 2011 [3]), l'energia termica rappresenta il 45% del totale, seguita dai consumi per i trasporti con il 34% e dai consumi elettrici con il 21%. La maggior parte dell'energia termica in Italia è prodotta da gas naturale, seguito da prodotti petroliferi, combustibili fossili e fonti rinnovabili. Risulta

evidente la necessità di aumentare l'apporto di energia proveniente da fonti rinnovabili per andare a ricoprire il fabbisogno totale di energia termica. Il solare termico potrebbe infatti essere sfruttato molto di più, con impianti per il riscaldamento degli ambienti (utilizzo a bassa temperatura tra i 25 e i 65 °C), per applicazioni in processi industriali (a temperatura media e alta 100-250 °C) e per la climatizzazione estiva degli ambienti, attraverso sistemi innovativi come il solar-cooling.

1.1 Impianto solare termico

Un impianto solare termico è un sistema in grado di trasformare l'energia proveniente dalla radiazione solare in energia termica trasportata da un fluido termovettore, che può essere sfruttata negli usi quotidiani domestici ma anche nei processi industriali.

I componenti principali di un impianto solare termico sono i collettori solari, l'accumulo termico, le tubazioni di collegamento, i dispositivi idraulici e di sicurezza e la pompa di circolazione se l'impianto è di tipo "a circolazione forzata".

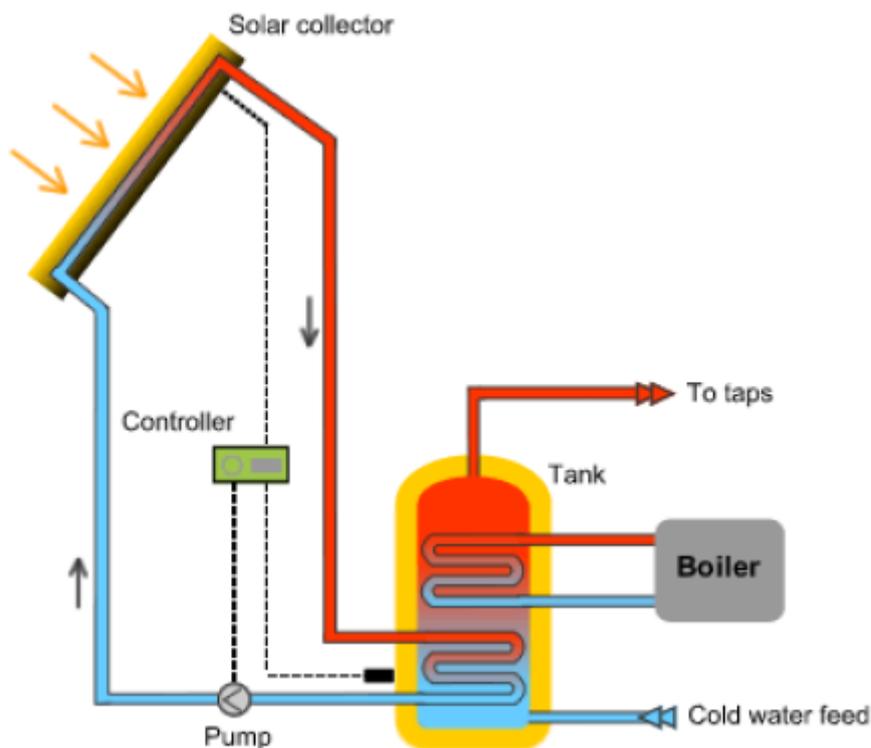


Figura 3: Schema rappresentativo di un impianto solare termico [4].

1.1.1 Collettore solare

Il collettore solare rappresenta il componente di maggiore interesse in quanto è la sede in cui avviene il trasferimento di energia dalla radiazione elettromagnetica proveniente dal sole al fluido termovettore; per questo motivo è un elemento che richiede molta attenzione nella sua progettazione perché deve essere in grado di ottimizzare il trasferimento di energia, riducendo le perdite al minimo e aumentando il più possibile l'assorbimento della radiazione solare. Questo lo porta ad essere la voce di costo principale dell'intero sistema solare termico. In particolare, l'elemento più critico è la piastra captante, o assorbitore, siccome è l'elemento principale per il trasferimento di energia, di cui si discuterà più approfonditamente nei paragrafi successivi. Esistono diverse tipologie di collettori solari e possono essere classificate a seconda della loro forma e caratteristiche. Quelli di maggiore interesse sono i collettori a piastre piane e quelli a tubi evacuati.

- Collettore a piastre piane

Si tratta della tipologia più comune e diffusa sul mercato ed è caratterizzata dai seguenti componenti:

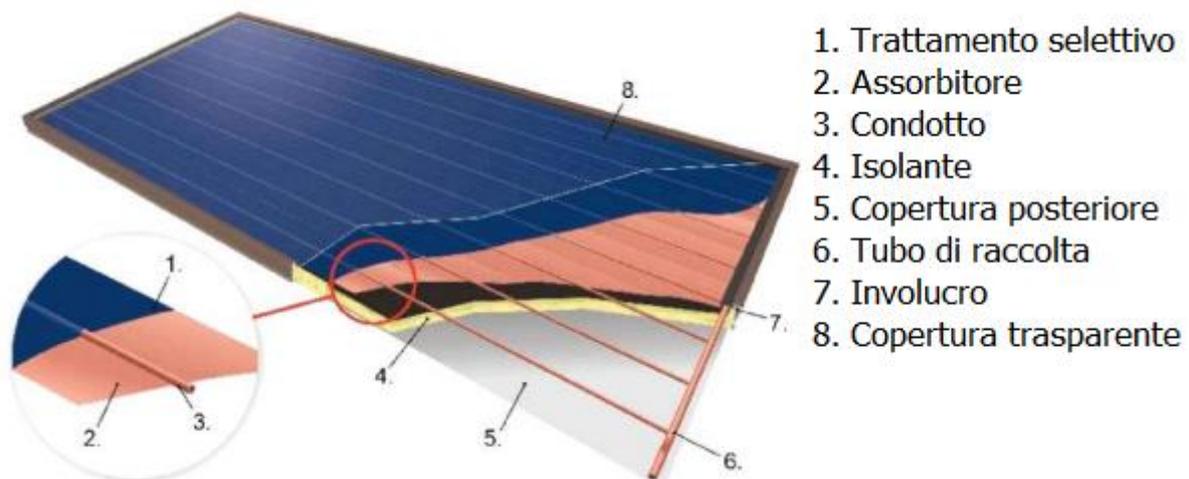


Figura 4: Collettore solare a piastre piane con riferimento ai suoi componenti [5].

- Copertura trasparente: la sua funzione è quella di ridurre al minimo le perdite di calore dell'assorbitore che avvengono sia per irraggiamento, sia per convezione tramite il contatto dell'aria esterna con l'assorbitore stesso. Il materiale utilizzato può

essere vetro oppure plastica, la quale è più economica ma ha lo svantaggio del rapido deterioramento sotto l'azione dei raggi ultravioletti. Dunque, nonostante il costo, il vetro resta il materiale preferibile: può infatti trasmettere fino al 90% della radiazione solare incidente trattenendo quasi completamente il calore. Per avere un'ulteriore riduzione delle perdite è possibile adottare una configurazione a doppio vetro.

- Assorbitore: nel caso di collettore a fluido (il più comune), si compone di una piastra assorbente e di condotti per il fluido termovettore; se invece il collettore è ad aria, esso è costituito solamente dalla piastra assorbente. Solitamente è composto da rame, alluminio o acciaio e viene rivestito con un materiale selettivo che possa aumentarne la capacità di assorbimento della radiazione solare e ridurre l'emissività, ovvero il coefficiente che determina la ri-emissione di calore da parte del corpo stesso. La piastra dell'assorbitore può essere composta da diverse strip (strisce metalliche, ciascuna con il proprio condotto) oppure da un singolo foglio metallico saldato ad un sistema di tubi.

Il vantaggio di un collettore composto da strip è la flessibilità che si può avere in termini di dimensioni dell'assorbitore completo: si possono realizzare strip di lunghezza variabile a seconda delle esigenze e anche il numero di strip che compongono un collettore non è fissato.

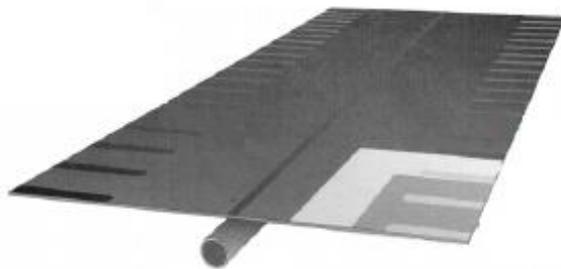


Figura 5: Dettaglio di un esempio di strip dell'assorbitore [5].

Ogni strip è caratterizzata da una piastra assorbente (assorbitore) e da un condotto per il fluido termovettore. Se invece si ha un'unica piastra assorbente composta da un foglio metallico, essa viene saldata ai condotti per il fluido i quali possono avere due configurazioni: a meandro oppure ad arpa.

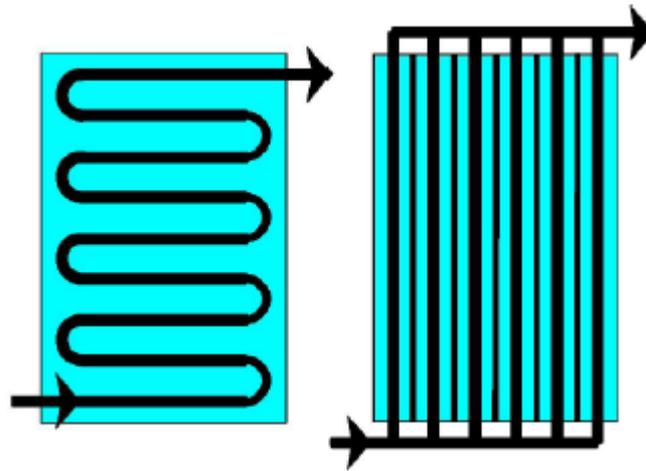


Figura 6: Assorbitore con condotti disposti a meandro (sinistra) e ad arpa (destra) [5].

La radiazione solare (con lunghezza d'onda compresa tra 0,3 e 2,5 μm), dopo aver superato la copertura trasparente perdendo parte della sua energia, raggiunge la piastra dove avviene la conversione dell'irraggiamento in calore. Questo provoca un aumento di temperatura e il fluido termico che circola nei condotti, quando si trova ad una temperatura inferiore rispetto a quella della piastra, è capace di assorbirne parzialmente il calore. È necessario che la piastra assorbente tenda a comportarsi il più possibile come un corpo nero, ovvero che assorba più radiazione possibile. A questo scopo deve avere caratteristiche tali per cui il coefficiente di riflessione abbia un valore molto basso, prossimo allo zero, e quello di assorbimento molto alto, prossimo a 1. Per fare in modo che l'assorbimento della radiazione solare sia massimo e la perdita di calore per emissione sia minima, vengono utilizzati dei rivestimenti selettivi in grado di esaltare queste proprietà.

- Circuito del fluido termovettore: l'assorbitore e il fluido termovettore devono essere direttamente in contatto in modo tale che il trasferimento del calore dalla piastra al fluido sia il più efficiente possibile. I condotti possono essere disposti, tra un collettore e il successivo, in serie o in parallelo.
- Isolamento termico: l'assorbitore si trova ad una temperatura maggiore di quella ambiente e quindi trasferisce spontaneamente calore a ciò che lo circonda. Per ridurre il più possibile questo fenomeno, solitamente viene installato uno strato di isolante termico tra la piastra assorbente e la cassa di contenimento del collettore.
- Involucro di contenimento: è l'elemento che contiene tutti i componenti che costituiscono il collettore. La funzione principale è quella di proteggere i componenti

rendendo il collettore impermeabile ad aria, acqua e altri elementi di contaminazione, oltre a limitare le perdite termiche.

Il collettore a piastre piane è particolarmente indicato per applicazioni che richiedono temperature di circa 100 °C, come la produzione di acqua calda sanitaria, il riscaldamento degli ambienti e il condizionamento [6].

- Collettore a tubi evacuati

In questo tipo di collettore la funzione di assorbitore non è più compiuta da una superficie piana ma da una pellicola depositata sulla superficie interna di un tubo di vetro. Il calore viene asportato dal fluido di processo che scorre nei condotti interni che possono avere una configurazione ad U oppure a tubi concentrici. Inoltre, per incrementare le performance, viene praticato il vuoto nell'intercapedine tra i due tubi; in questo modo, infatti, le perdite termiche per convezione e conduzione vengono limitate notevolmente e i collettori possono operare a temperature più elevate rispetto alle condizioni di lavoro dei collettori a piastre piane, si parla infatti di produrre acqua calda a temperature di oltre 100 °C [7].

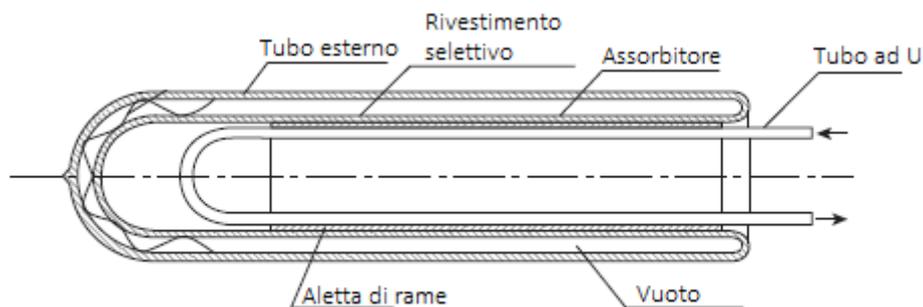


Figura 7: Rappresentazione del tubo evacuato con configurazione ad U [8].

Dal punto di vista termodinamico, questo tipo di collettore sembra essere notevolmente migliore rispetto a quello a piastre piane; ciò che ne limita l'utilizzo è però il costo molto maggiore.

I meccanismi con i quali il calore viene asportato dal fluido termovettore possono essere due, si parla di *heat pipe* oppure *direct flow* e sono rappresentati nella figura seguente:

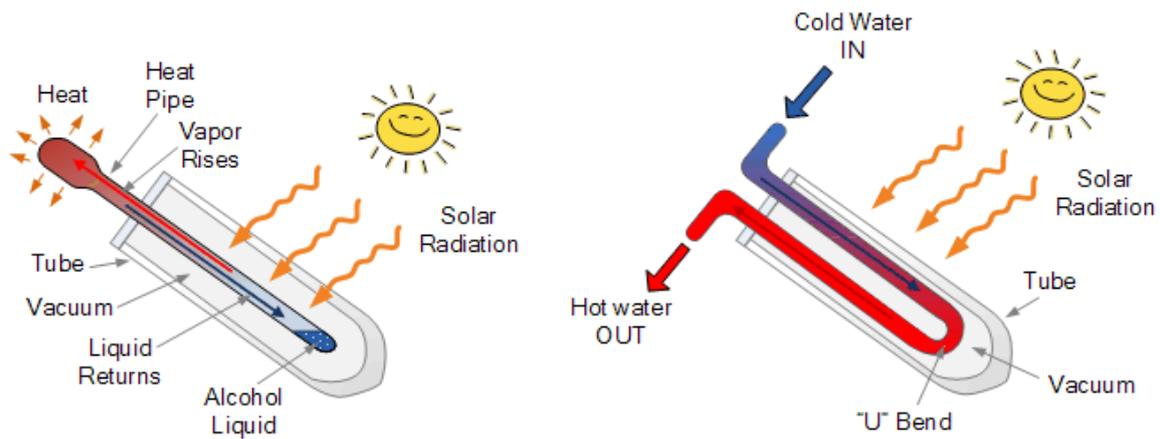


Figura 8: Rappresentazione sistema heat pipe (sinistra) e direct flow (destra) [9].

Nella configurazione *heat pipe* si sfrutta la convezione naturale: il fluido termovettore, assorbendo l'energia solare, va verso l'alto sotto forma di vapore e lì trasferisce il suo calore, condensando, ad un altro fluido termovettore che scorre nel condotto-collettore. Una volta condensato e raffreddato ritorna verso il basso creando così un ciclo. Nella configurazione *direct flow*, il fluido termovettore fa ingresso nel tubo, vi scorre all'interno assorbendo l'energia solare e poi ne esce; evitando quindi il trasferimento di calore da un fluido ad un altro.

Per valutare le prestazioni di un collettore solare si calcola l'efficienza nel modo seguente [10]:

$$\eta_c = \eta_0 - a_1 \cdot \left(\frac{T_m - T_a}{G} \right) - a_2 \cdot \frac{(T_m - T_a)^2}{G}$$

Dove:

- η_c : efficienza del collettore;
- η_0 : efficienza del collettore considerando le perdite ottiche;
- a_1, a_2 : coefficienti di perdita dipendenti dal collettore espressi in $\frac{W}{m^2 K}$ e $\frac{W}{m^2 K^2}$;
- T_m : temperatura media del fluido termovettore;
- T_a : temperatura ambiente;
- G : irradianza totale sulla superficie del collettore $\frac{W}{m^2}$.

La curva di efficienza del collettore, dipendente quindi dalla differenza di temperatura tra il fluido di processo e l'ambiente, viene rappresentata con la linea rossa nella figura

seguinte (Figura 9), dove sono visualizzate le aree relative a perdite ottiche, perdite termiche ed effetto utile:

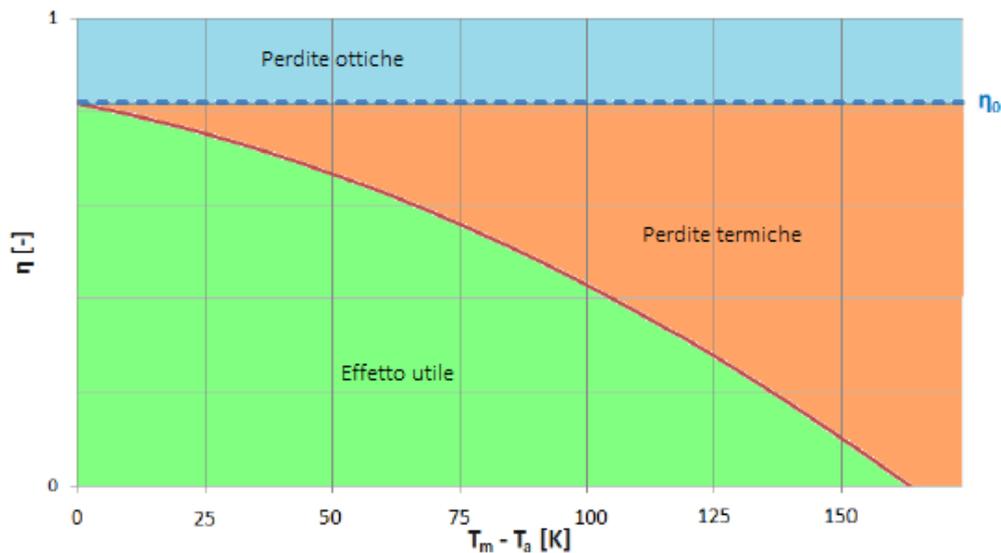


Figura 9: Efficienza e perdite di un collettore solare [11].

Come detto in precedenza, i collettori solari sottovuoto hanno maggiore efficienza soprattutto ad alte temperature, in quanto riducono le perdite termiche grazie alla creazione del vuoto.

1.1.2 Serbatoio di accumulo

Essendo l'energia solare non costantemente disponibile ed essendo spesso fuori fase rispetto alla domanda, per sfruttarla il più possibile è necessario un sistema di accumulo che permetta di compensare lo sfasamento esistente tra il calore prodotto e il carico termico. Per raggiungere questo scopo i sistemi di accumulo immagazzinano calore in un serbatoio attraverso un liquido che solitamente è acqua, grazie alla sua alta capacità calorifica, la non tossicità, non infiammabilità e la sua economicità. I sistemi di accumulo vengono progettati con un obiettivo temporale di sfruttamento breve, solitamente ore o al massimo giorni, e possono essere di diverso tipo [12]:

- Serbatoio ad intercapedine

Presenta in corrispondenza della superficie laterale un'intercapedine in cui circola il fluido termovettore proveniente dai collettori solari. Questo tipo di serbatoio è adatto all'utilizzo per impianti di piccole dimensioni.

- Serbatoio a serpentine

Può essere a semplice o a doppia serpentina. Quelli a doppia serpentina prevedono, oltre a quella dedicata al circuito solare, un'ulteriore serpentina collegata al sistema di riscaldamento ausiliario, permettendo di riscaldare l'acqua fino a temperature maggiori. Lo scambiatore di calore è realizzato creando degli avvolgimenti con un tubo metallico, spesso in rame; i vantaggi di uno scambiatore di questo tipo sono principalmente la facilità di realizzazione e la bassa caduta di pressione rispetto agli scambiatori esterni a piastre.

- Serbatoio combinato

Nel caso in cui il sistema in questione abbia lo scopo sia di produrre acqua calda sanitaria, sia di riscaldare l'ambiente, si può utilizzare questo tipo di accumulo definito anche "tank in tank", che significa "serbatoio nel serbatoio". Vi è infatti un serbatoio esterno di dimensioni maggiori che contiene l'acqua per far funzionare l'impianto di riscaldamento e un altro serbatoio più piccolo dedicato invece all'impianto per l'acqua calda sanitaria.

- Serbatoio senza scambiatori interni

Si tratta di un serbatoio con scambiatori esterni, solitamente a piastre; essi sono costituiti da piatti piani paralleli all'interno dei quali scorrono i fluidi in controcorrente generando un moto turbolento che aumenta lo scambio termico. Rispetto agli scambiatori interni (serpentine), gli scambiatori esterni sono più compatti permettendo un risparmio in termini di peso e volume, hanno minori perdite termiche e quindi prestazioni più elevate, consentono lo scambio termico di potenze più elevate e danno la possibilità di servire più serbatoi con un unico scambiatore. Lo svantaggio principale è invece la necessità di avere una pompa addizionale per il circuito secondario. Per le caratteristiche che presentano, questo tipo di serbatoio è adatto per impianti di medie e grandi dimensioni.

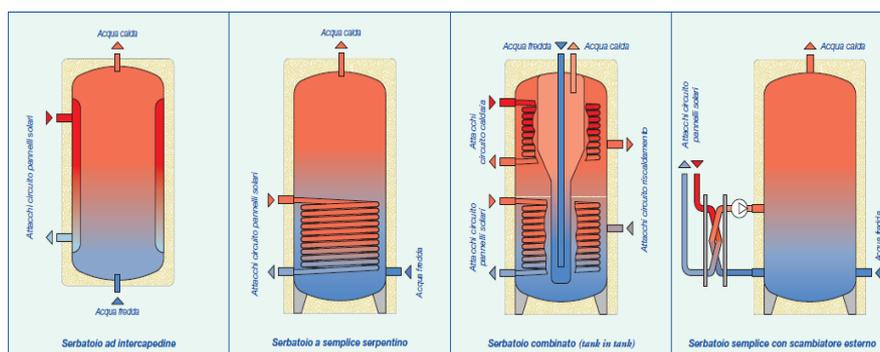


Figura 10: Schemi delle varie tipologie di serbatoio di accumulo [12].

1. Solare termico

Per valutare lo scambio termico nel serbatoio, bisogna considerare diversi fattori: le caratteristiche del materiale utilizzato, la superficie di scambio termico, la differenza di temperatura tra i flussi e il tipo di scambiatore. Il calore scambiato è determinabile con la seguente espressione:

$$\dot{Q} = U \cdot A \cdot \Delta T_{ml}$$

Dove:

- \dot{Q} : flusso termico scambiato in W ;
- U : trasmittanza dello scambiatore in $\frac{W}{m^2K}$;
- A : superficie di scambio termico in m^2 ;
- ΔT_{ml} : differenza di temperatura media logaritmica in K : $\Delta T_{ml} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}}$.

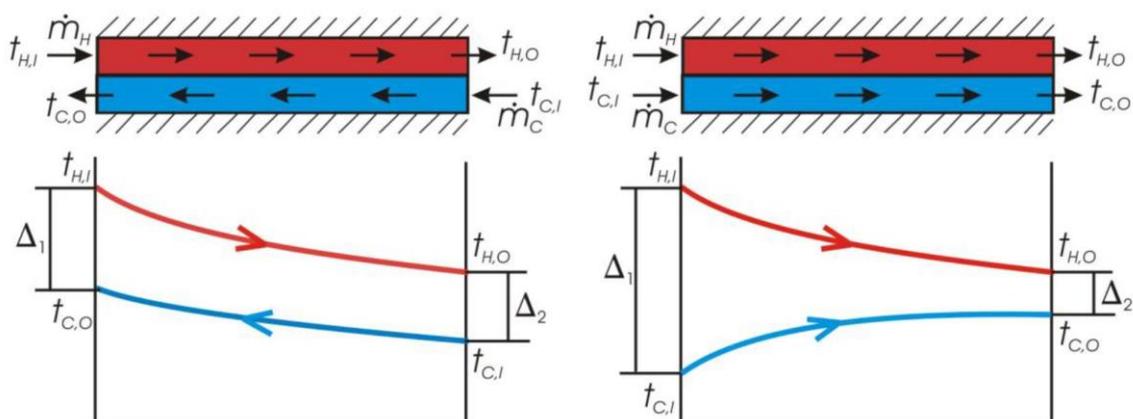


Figura 11: Rappresentazione dell'andamento delle temperature negli scambiatori di calore nel caso equicorrente e controcorrente [13].

Solitamente, per migliorare lo scambio termico, si utilizzano scambiatori di calore in controcorrente. Questi infatti permettono di avere una maggiore differenza di temperatura media logaritmica e quindi, a parità di materiale e superficie, una maggiore potenza scambiata rispetto ad uno scambiatore in equicorrente.

1.2 Applicazioni convenzionali del solare termico

1.2.1 Produzione di acqua calda sanitaria (ACS)

Circa il 40% dell'acqua dedicata all'uso domestico viene utilizzata come acqua calda; questo significa che, per questo scopo, viene utilizzato circa il 25% dell'energia totale tipicamente utilizzata in ambito residenziale [8]. La produzione di acqua calda sanitaria tramite energia solare è l'applicazione più diretta e conveniente dei collettori solari. L'assorbitore trasforma in calore la radiazione proveniente dal Sole e lo trasferisce al fluido termovettore che scorre nei condotti del circuito primario, trasportando questo calore attraverso circolazione naturale (se il sistema è passivo) oppure con circolazione forzata (se il sistema è attivo), soluzione per la quale è necessaria una pompa come componente aggiuntiva al sistema.

I sistemi solari termici possono inoltre essere diretti oppure indiretti:

- Sistema diretto (open loop): viene scaldata direttamente l'acqua potabile e, tramite circolazione naturale, se il sistema è passivo, o forzata con l'ausilio di una pompa se è attivo, essa viene trasportata dal collettore all'accumulo dove poi può essere utilizzata direttamente.

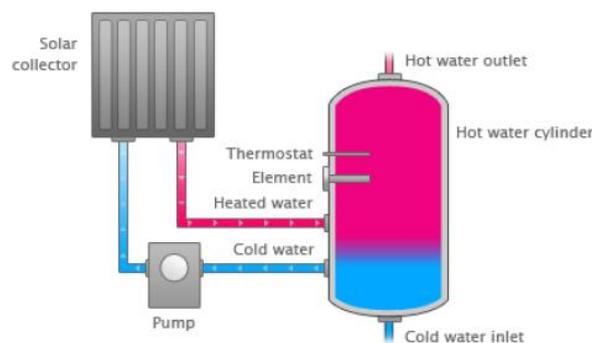


Figura 12: Schema di un impianto diretto - a circuito aperto [14].

Questo tipo di sistema presenta alcuni svantaggi: non offre protezione al surriscaldamento (a meno che non venga inserita una pompa di esportazione del liquido) e al congelamento, infatti non può essere addizionata al fluido alcuna sostanza che ne aumenti il punto di congelamento essendo il fluido direttamente utilizzato in ambito domestico.

- Sistema indiretto (closed loop): si utilizza un fluido termovettore all'interno del circuito primario e uno scambiatore di calore all'interno dell'accumulo.

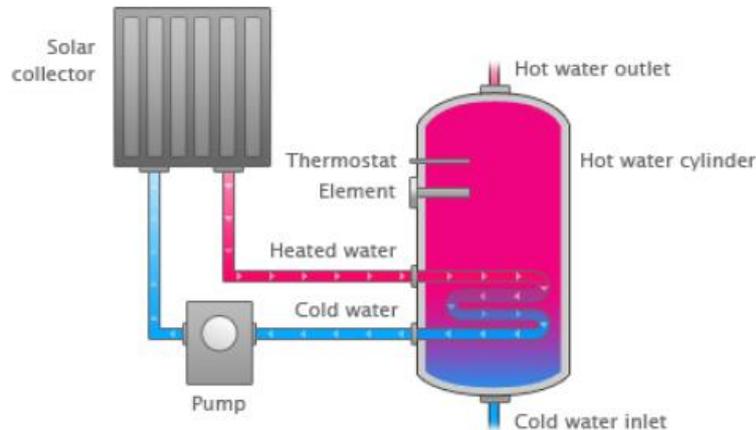


Figura 13: Schema di un impianto indiretto – a circuito chiuso [14].

Il fluido termovettore molto spesso è acqua con l'aggiunta di una miscela che ne eviti il congelamento, tipicamente glicole propilenico. Una volta riscaldato il fluido termovettore all'interno dei collettori solari, esso scorre verso lo scambiatore di calore dove trasferisce il calore all'acqua potabile. Anche questo tipo di sistema può essere *attivo* oppure *passivo*.

I sistemi di tipo passivo sono basati sulla convezione naturale: l'accumulatore si deve trovare ad un'altezza superiore rispetto al collettore; il liquido nel collettore, scaldandosi, si espande diventando meno denso e quindi è spinto a salire verso l'ingresso del sistema di accumulo. Questa circolazione continua fino a quando la radiazione solare incide sul collettore. Nel momento in cui il liquido caldo raggiunge il sistema di accumulo, va a rimpiazzare il liquido ormai freddo che si è depositato sul fondo del tank che defluisce nuovamente verso il collettore.

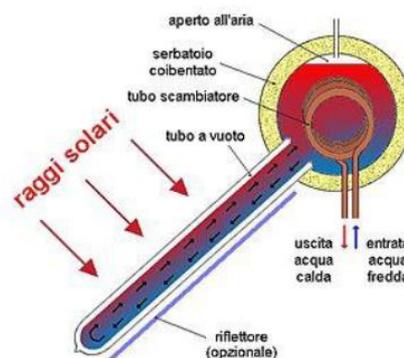


Figura 14: Rappresentazione di un sistema a circolazione naturale [14].

Lo svantaggio principale di questo tipo di sistema è il fattore estetico [7]. Si tratta infatti di un'opera di dimensioni piuttosto rilevanti che va quindi ad avere un impatto visivo non indifferente.

Un sistema di tipo attivo e quindi a circolazione forzata consente invece di posizionare l'accumulatore più in basso rispetto al collettore, infatti è la pompa che fa sì che l'acqua possa circolare dall'accumulo al collettore quando c'è abbastanza radiazione solare disponibile. Questo permette maggiore libertà nel posizionamento del sistema di accumulo, esso può infatti essere posto all'interno dell'edificio, nascondendolo alla vista e quindi riducendo notevolmente il problema dell'impatto visivo. Preferibilmente dovrebbe essere scelto un luogo che non abbia temperature troppo basse in modo tale da ridurre le perdite di calore.

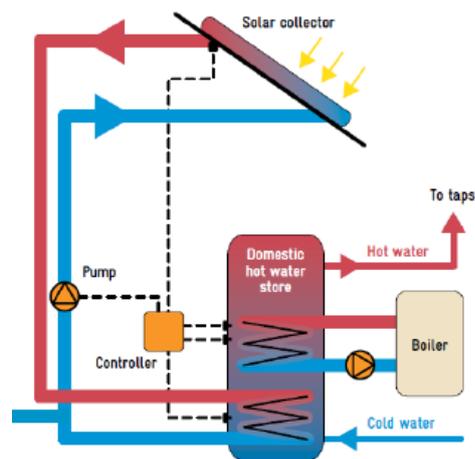


Figura 15: Rappresentazione di un sistema a circolazione forzata [14].

1.2.2 Riscaldamento degli ambienti

La produzione di calore per il comfort degli ambienti può essere fornita da energia solare. Anche in questo caso, così come per la produzione di acqua calda sanitaria, i componenti necessari sono il collettore solare, l'accumulatore e un eventuale sistema ausiliario che contribuisca a soddisfare il carico termico (che in questo caso è l'ambiente che deve essere riscaldato). Negli anni più recenti sono stati sviluppati dei sistemi, chiamati Combi-Systems, in grado di combinare la produzione di acqua calda con il riscaldamento degli ambienti.

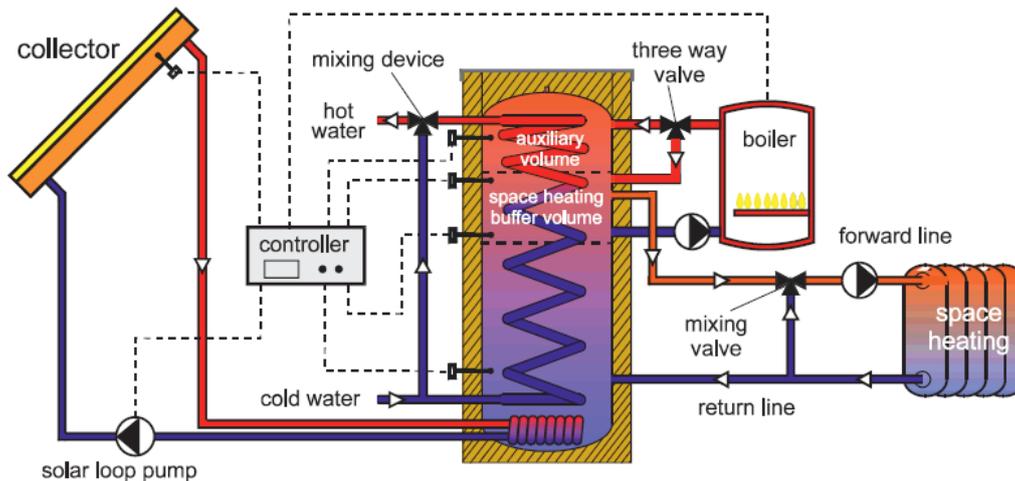


Figura 16: Tipico schema di un combi-system per produzione di acqua calda sanitaria e riscaldamento [15].

Questa applicazione della tecnologia solare termica non è ad oggi molto consolidata ma un'interessante possibilità per incrementare l'utilizzo del solare termico con lo scopo del riscaldamento degli ambienti è quella di collegare il sistema ad una rete di teleriscaldamento. In una rete di questo tipo il calore è prodotto da una centrale di cogenerazione a gas naturale, combustibili fossili, biomasse o termovalorizzazione dei rifiuti urbani. Utilizzando l'energia solare, il calore prodotto tramite i collettori potrebbe essere inserito in questa rete direttamente oppure sfruttando un grosso accumulatore che verrebbe caricato durante la stagione estiva e scaricato durante quella invernale. Un'opzione interessante è quella di poter creare un sistema di accumulo diffuso: le singole unità abitative potrebbero avere il proprio impianto solare termico ed essere collegate alla rete di teleriscaldamento in modo tale che possa avvenire uno scambio di energia: la rete potrebbe fornire energia quando necessario e le singole unità potrebbero immettere nella rete l'energia prodotta dal solare quando in eccesso.

1.3 Nuovi scenari e applicazioni

1.3.1 Solar cooling

Un interessante scenario di utilizzo della tecnologia solare termica, ad oggi ancora poco sfruttato, è quello della produzione di energia per alimentare cicli di raffreddamento. Questo può avere due scopi differenti, in due contesti diversi: fornire refrigerazione per la conservazione di alimenti in ambito industriale e provvedere al raffrescamento degli ambienti in ambito residenziale.

I vantaggi di quest'ultimo tipo di utilizzo sono notevoli: la domanda di energia per raffrescamento è completamente in fase con la radiazione solare, sia su base annuale sia giornaliera; inoltre, per evitare lunghi periodi di stagnazione che si creerebbero durante l'estate o l'inverno utilizzando un sistema adatto all'utilizzo in una singola stagione, è possibile creare un sistema di raffrescamento solare che sia complementare al riscaldamento invernale.

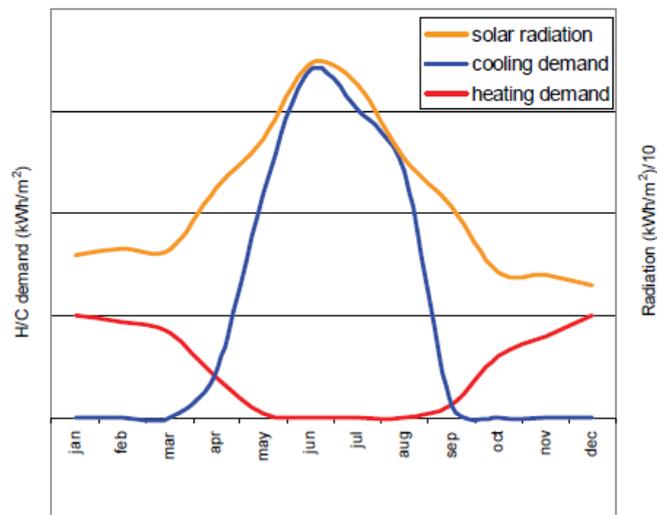


Figura 17: Andamento annuale della domanda di energia per raffrescamento, di quella per riscaldamento e della radiazione solare [16].

Esistono due tipologie di sistema per il solar cooling: i sistemi a ciclo chiuso e quelli a ciclo aperto.

- Sistema a ciclo chiuso: si realizza con macchine frigorifere ad assorbimento o ad adsorbimento, in entrambi i casi viene prodotta acqua fredda in uscita. Nel caso di macchina ad assorbimento, il generatore riceve calore dal collettore solare per rigenerare il materiale assorbente (1), il vapore generato in questo processo condensa nel condensatore C producendo il calore Q_c che viene espulso nell'ambiente esterno (2). Il materiale assorbente rigenerato nella prima fase torna nell'assorbitore (3) dove può assorbire il vapore proveniente dall'evaporatore (E) gettando il calore nell'ambiente esterno. Il refrigerante che era stato liquefatto nel condensatore entra nell'evaporatore (E) dove evapora assorbendo il calore Q_e dell'ambiente da raffrescare (4).

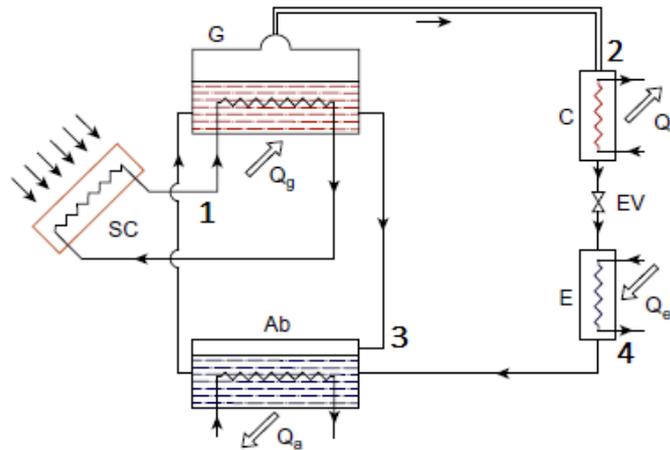


Figura 18: Schema funzionamento sistema a ciclo chiuso [8].

La refrigerazione ad assorbimento è la tipologia più comune e permette di utilizzare qualunque tipo di fonte di calore, come appunto l'energia solare. Solitamente il fluido di lavoro è l'acqua che viene utilizzata come mezzo per rimuovere il carico termico dall'ambiente e viene utilizzato come sostanza assorbente una soluzione di bromuro di litio. Le temperature che possono essere raggiunte in uscita dal sistema sono di 6-20 °C mentre le temperature di lavoro sono piuttosto elevate, tra i 100 e i 200 °C.

Quando invece si parla di adsorbimento, viene utilizzata come refrigerante l'acqua e come materiale adsorbente un solido come silica gel oppure zeolite; in questo caso, essendo il materiale adsorbente un solido, esso non può essere circolato nei condotti quindi si ha un sistema composto di due camere separate entrambe contenenti il materiale adsorbente.

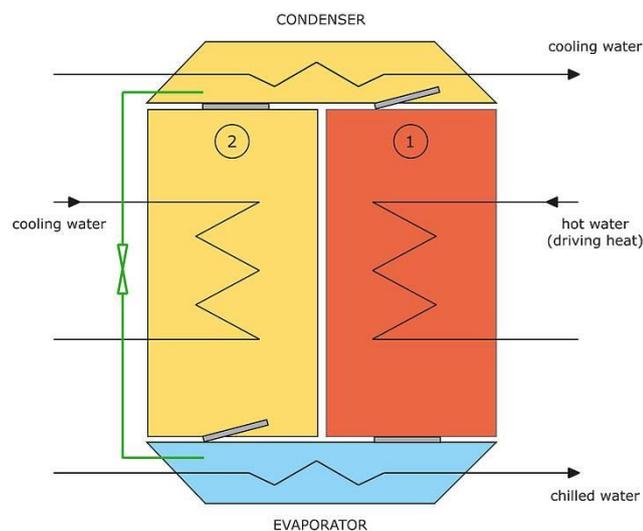


Figura 19: Schema di un chiller ad adsorbimento [17].

In generale il chiller ad adsorbimento si compone di due camere contenenti il materiale adsorbente, un evaporatore e un condensatore. Il materiale adsorbente nella prima camera viene rigenerato utilizzando acqua calda proveniente dalla fonte solare mentre quello nella seconda camera assorbe il vapore d'acqua che arriva dall'evaporatore. La seconda camera deve essere raffreddata in modo tale da poter permettere un continuo funzionamento. A causa delle condizioni di bassa pressione nell'evaporatore, il refrigerante passa alla fase gassosa assorbendo calore dall'acqua che viene raffreddata. Se il materiale adsorbente arriva a saturazione di vapore d'acqua, le due camere si scambiano la propria funzione.

- Sistema a ciclo aperto: utilizza un sistema di essiccazione che permette di far avvenire un raffrescamento evaporativo con un deumidificatore di aria tramite materiale essiccante; l'aria calda e umida in ingresso passa attraverso un evaporatore (A→B) ed entra nello scambiatore di calore dove permette di raffreddare lo scambiatore stesso e ne esce a temperatura maggiore (B→C). Questo flusso d'aria passa poi nel coil del collettore solare (C→D) e si innalza ulteriormente la sua temperatura in modo tale da entrare nella ruota in cui è presente il materiale essiccante e può in questo modo rigenerarla (D→E). L'aria calda e umida può essere poi rigettata nell'ambiente esterno. Dall'altro lato viene prelevata aria fresca dall'esterno, questa entra nella ruota contenente il materiale essiccante (1→2) e diventa aria secca e calda a causa della deumidificazione. Nello scambiatore di calore (2→3) e nell'evaporatore (3→4) viene poi abbassata la sua temperatura prima che sia immessa nell'ambiente da raffrescare.

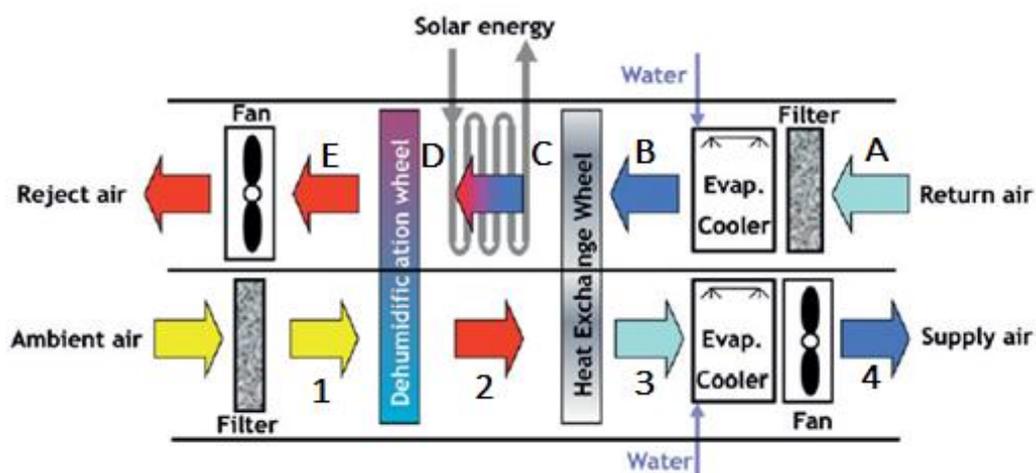


Figura 20: Schema funzionamento sistema a ciclo aperto con essiccazione [18].

A seconda del tipo di ciclo (chiuso o aperto), del fluido di lavoro e della sostanza assorbente, le temperature di lavoro sono differenti:

Tipologia	Fluido di lavoro	Sostanza assorbente	Temperature di lavoro (°C)
Ciclo chiuso	Acqua	Bromuro di litio	70 - 95
		Silica gel	65 - 95
		Cloruro di litio	70 - 100
		Solfuro di sodio	80 - 90
	Ammoniaca	Acqua	100 - 120
Ciclo aperto	Aria	Cloruro di litio	60 - 90
		Silica gel	60 - 100

Tabella 1: Tipologie di sistema di solar cooling con relativo fluido di lavoro, sostanza assorbente e temperature di lavoro [18].

Il solar cooling è una tecnologia giovane che non ha ancora raggiunto la piena maturità commerciale, ci sono infatti pochi impianti effettivamente realizzati ma molti impianti pilota e applicazioni sperimentali. I costi sono ancora piuttosto elevati ma dal 2013, con l'introduzione del *Conto Termico* (di cui si parlerà nel *Capitolo 2*), confermato e semplificato nel 2016, è possibile ottenere un incentivo per questo tipo di impianti.

1.3.2 L'accumulo dell'energia

Anche il sistema di accumulo può rappresentare un nuovo scenario nel quale ci può essere un notevole sviluppo. Si tratta di un elemento fondamentale in un sistema solare termico e oltre al serbatoio convenzionale di cui si è discusso precedentemente, potrebbero esserci soluzioni alternative che permettano di conservare l'energia prodotta in eccesso per poterla utilizzare in altri momenti. Una possibilità è quella di cui si è parlato nel *Paragrafo 1.2.2* ovvero il collegamento tra un impianto di teleriscaldamento e le singole unità abitative in modo tale da far avvenire uno scambio di energia con l'immissione in rete dell'eccesso di energia prodotta dai sistemi solari dislocati.

Un'interessante e alternativa possibilità è quella relativa all'accumulo di calore nel sottosuolo. Se ne possono vedere già diverse realizzazioni ad opera di *Energie-concept Chemnitz*, società tedesca per la gestione dell'energia e per l'energia geotermica, e *Deematrix Energiesysteme*, con il progetto *eTank*. Lo scopo è quello di accumulare l'energia termica in eccesso nel terreno sottostante o nelle vicinanze dell'edificio

considerato andando a sfruttare anche l'energia prodotta quando l'angolo di incidenza della radiazione è piccolo e quindi non sufficiente a produrre istantaneamente dell'energia utile. I sistemi di accumulo di energia sottoterra sono già largamente noti ed utilizzati ma la particolarità di questo accumulatore è quella di non essere un contenitore riempito di liquido o altro materiale, è infatti costituito direttamente dal terreno con diversi strati di terra andando fino ad una profondità di 1,5 – 2 metri, dove vengono posati i tubi all'interno dei quali scorre il fluido riscaldato nel collettore dall'energia solare.

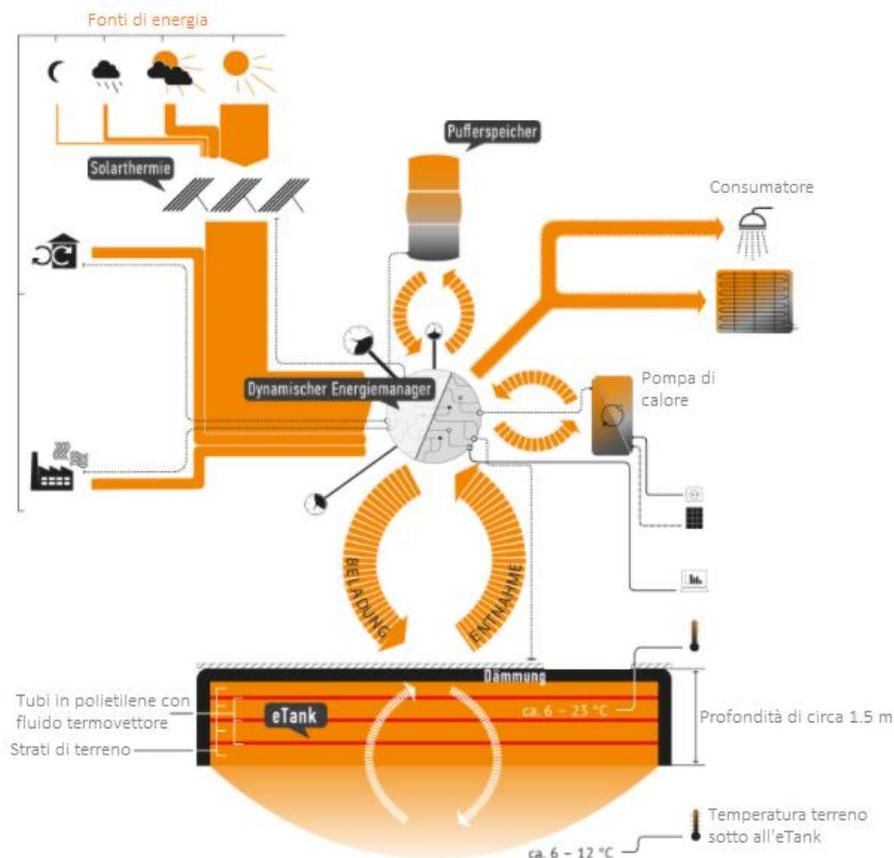


Figura 21: Schema di funzionamento del sistema eTank [19].

Questa soluzione permetterebbe di utilizzare fino all'80% del rendimento solare per m² di superficie del collettore (nelle normali applicazioni invece si parla del 30%) [19]. Solitamente infatti si ha una situazione in cui nella stagione estiva i rendimenti solari sono elevati ma non possono essere utilizzati a causa della bassa richiesta di calore; questo significa che gran parte dell'energia in eccesso generata in estate svanisce. Inoltre, anche i guadagni di energia nell'intervallo di temperatura inferiore a 35 °C di solito non possono essere utilizzati perché negli accumuli stratificati è proprio quella la temperatura minima.

Con questa soluzione si riuscirebbe invece ad accumulare tutta l'energia generata e non utilizzata e, quando c'è domanda, l'energia accumulata nel terreno viene resa utilizzabile da una pompa di calore e riportata nell'impianto di riscaldamento oppure di raffrescamento. Si considera che per un carico di riscaldamento di circa 10 kW sia necessario un volume di accumulo di circa 100 – 120 m³ sotto il solaio a una profondità di 1,2 – 1,5 metri [19].

1.3.3 Sistemi elio-assistiti

Con “sistema elio-assistito” si intende una macchina che integra due diversi sistemi in uno unico: una pompa di calore e i collettori solari. Solitamente infatti questi verrebbero utilizzati separatamente o, eventualmente, in parallelo per produrre acqua calda sanitaria e riscaldamento. Una pompa di calore è una macchina termica che è in grado di estrarre e trasferire energia termica utilizzando energia meccanica. Le più comuni sono quelle aria-aria che estraggono calore dall'aria e lo riversano all'interno o all'esterno, a seconda della stagione, e quelle aria-acqua utilizzate nelle situazioni in cui la distribuzione di calore avviene per via idrica.

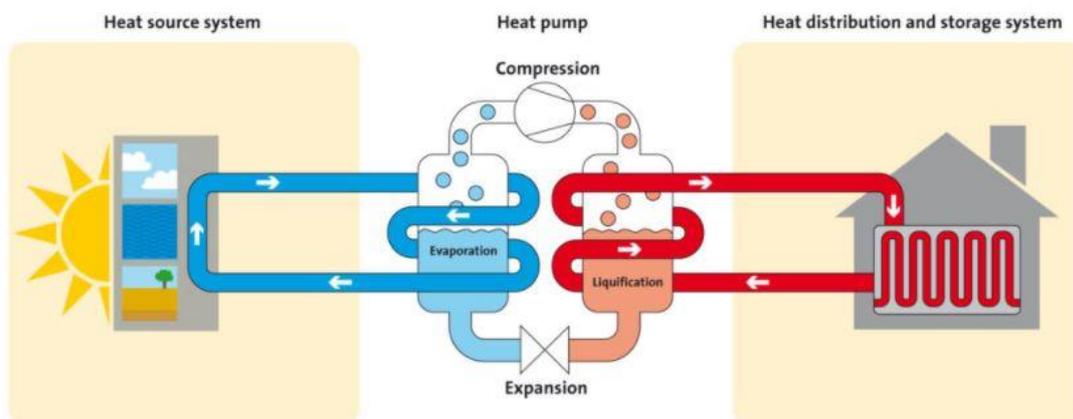


Figura 22: Schema di funzionamento di una pompa di calore [20].

Lo schema di funzionamento, in condizioni di lavoro di riscaldamento è il seguente: l'aria calda dell'ambiente esterno viene convogliata in uno scambiatore di calore dove circola un liquido refrigerante che assorbe il calore contenuto nell'aria innalzando la sua temperatura; questo calore viene trasferito al secondo ciclo: il liquido refrigerante nell'evaporatore assorbe il calore e vaporizza (anche a basse temperature) andando nel

compressore dove la temperatura viene innalzata ulteriormente per poter trasferire il calore al terzo circuito attraverso un condensatore. Il fluido del circuito di riscaldamento va a distribuire calore all'ambiente interno mentre il fluido refrigerante torna allo stato liquido e tramite il passaggio in una valvola la pressione diminuisce e così anche la temperatura in modo tale da poter assorbire nuovamente calore nell'evaporatore. Invertendo il ciclo di funzionamento si ottiene il raffrescamento dell'ambiente interno. Con lo stesso principio ma utilizzando il terreno come fonte di calore o pozzo, vi sono le pompe geotermiche.

I sistemi elio-assistiti si basano sulla stessa tipologia di impianto ma utilizzano come fonte di calore il collettore solare; possono essere di tipo indiretto, prevedendo due circuiti distinti in cui il collettore solare fornisce calore a bassa temperatura per alimentare l'evaporatore della pompa di calore, oppure di tipo diretto in cui il collettore solare costituisce l'evaporatore della macchina.

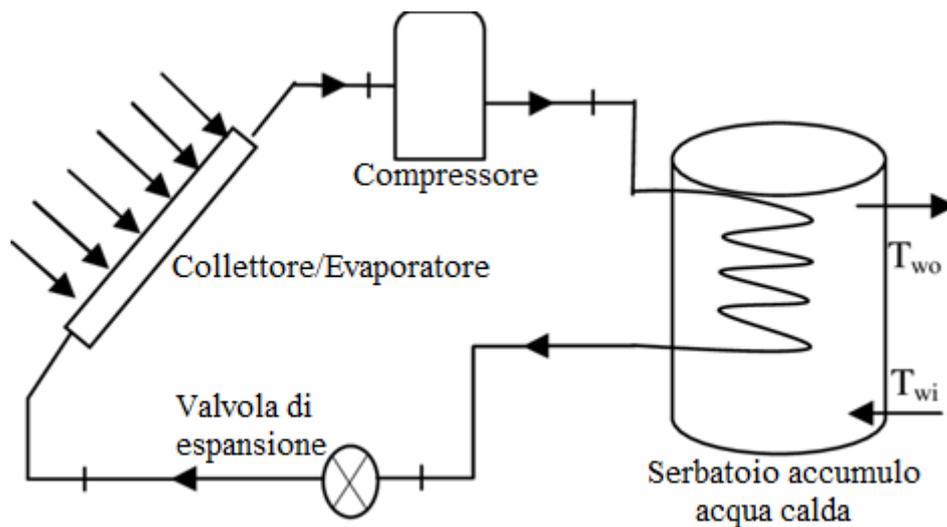


Figura 23: Schema di funzionamento di una pompa di calore elio-assistita [21].

Questo tipo di configurazione, rispetto ad una pompa di calore tradizionale, permette di sfruttare il calore a bassa temperatura prodotto dai collettori solari andando ad innalzare i valori del COP (Coefficient Of Performance, indica la quantità di calore somministrata alla sorgente a temperatura più alta rispetto al lavoro impiegato) perché viene incrementato il livello termico a cui avviene l'evaporazione. In questo modo è possibile sfruttare la presenza dei collettori solari anche in situazioni invernali quando, a causa del poco elevato angolo di incidenza della radiazione e delle condizioni atmosferiche poco

favorevoli, il calore prodotto è a bassa temperatura. Rispetto alle pompe di calore geotermiche il vantaggio principale risiede nel fatto che non è necessario installare tubazioni nel terreno e questo significa un costo di investimento molto minore e una maggiore applicabilità del sistema.

1.3.4 Applicazioni large-scale

Gli impianti solari di larga scala sono impianti di grandi dimensioni sia in termini di potenza installata sia di superficie occupata e hanno il compito di generare notevoli quantità di calore, molto spesso allo scopo di alimentare reti di teleriscaldamento. Solitamente si considerano impianti di larga scala quelli caratterizzati da una superficie di collettori maggiore di 500 m². La diffusione di questo tipo di sistema è stata molto lenta ma tra il 2010 e il 2018 si è avuta una notevole crescita che ha visto come mercati principali la Danimarca (con l'installazione di 970 MW per fornire energia al più grande sistema di teleriscaldamento), la Cina, la Germania e l'Austria [22]. Nel contesto italiano si vedono per ora ancora pochissime applicazioni di impianti solari large-scale. La realizzazione del primo impianto di questo tipo è quella effettuata a Varese con una superficie captante di 990 m² per alimentare una rete di teleriscaldamento che si estende per 16 km distribuendo acqua calda a circa 150 utenze con una temperatura di mandata di 90 °C e 60 °C di ritorno. Sono proprio queste temperature a rappresentare un limite per la diffusione di questo tipo di sistema, perché molto elevate: l'impianto solare termico può essere sfruttato molto di più con una temperatura di ritorno minore, di 40/45 °C come nel caso della rete danese; in questo modo, infatti, grazie al grande salto termico (90 – 40 °C), si può avere un contributo solare non indifferente anche nelle stagioni fredde. Le motivazioni di temperature così elevate nel contesto italiano sono principalmente tecnico-economiche: aumentando la temperatura si avranno minori portate e quindi minori perdite per attrito e riduzione dei consumi legati ai pompaggi; essendo poi maggiore la differenza di temperatura negli scambiatori di calore si avrà anche una riduzione delle superfici di scambio termico e quindi una riduzione dei costi. Inoltre, i sistemi di riscaldamento sono antiquati e per la maggior parte a radiatori e questi necessitano di temperature elevate, intorno ai 70 °C.

Per quanto detto, i sistemi di questo tipo integrati con impianti solari non risultano così convenienti e quindi la loro diffusione è molto lenta. Per cambiare l'andamento sarebbe necessario ridurre le temperature di rete diffondendo nuovi sistemi di riscaldamento (come quello a pavimento) che richiedono temperature minori rispetto ai radiatori.

1.4 Problematiche

La tecnologia solare termica presenta alcune problematiche; la principale risiede nel fatto che si tratti di una tecnologia basata su una fonte intermittente e molto spesso fuori fase rispetto alla domanda.

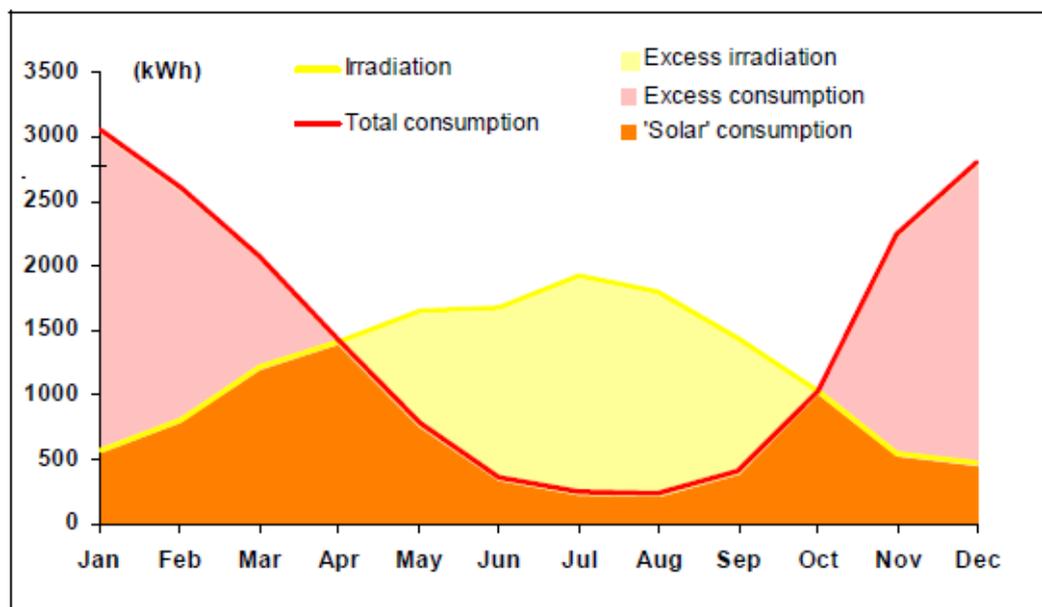


Figura 24: Rappresentazione dell'andamento annuale della produzione di energia solare e della domanda, in Europa [5].

Considerando un impianto generico dedito alla produzione di acqua calda sanitaria e riscaldamento (applicazione più comune), la domanda è costantemente fuori fase rispetto alla produzione, in ogni mese dell'anno: il consumo corrispondente ai mesi invernali è elevato ma sono proprio quelli i mesi in cui la radiazione solare è minore, per contro nei mesi estivi la domanda è molto bassa e la radiazione solare molto maggiore. La differenza nella domanda tra estate e inverno è molto ampia e questo risulta nella necessità di utilizzo di un sistema ausiliario per l'inverno e nel surriscaldamento in estate quando il sistema di accumulo raggiungerà la massima temperatura e il sistema di controllo

spegnerà la pompa di circolazione; a questo punto i collettori raggiungono la temperatura di stagnazione, tipicamente dell'ordine di 150 - 300 °C. A queste temperature, la pressione nel collettore può diventare molto elevata e il fluido raggiunge l'ebollizione andando a danneggiare il sistema. Per evitare che questo accada possono essere progettati dei sistemi *drainback* che permettono lo svuotamento del collettore dal fluido e il ritorno del fluido nel vaso di espansione. Ma una soluzione ancora migliore sarebbe, come accennato in precedenza, quella di utilizzare il sistema solare termico per un duplice scopo e quindi sfruttarlo anche durante il periodo estivo per il solar cooling.

Una grande problematica che limita la diffusione di un impianto solare termico in alcuni contesti è quella dell'impatto visivo: essa comporta necessariamente l'installazione di alcuni componenti sulla copertura o nell'involucro dell'edificio e alcuni di questi risultano "a vista". È necessaria quindi una buona integrazione architettonica dell'impianto nell'edificio in modo tale da minimizzare l'impatto e rendere esteticamente piacevole alla vista la presenza dei collettori solari. Nel caso di installazione su coperture piane, non ci sono vie alternative all'uso di strutture di sostegno che vengono ancorate alla copertura stessa o ad ulteriori elementi di supporto in cemento per garantire una maggiore resistenza al vento. In base all'utilizzo dell'impianto, i moduli vengono inclinati in modo tale da soddisfare l'angolo ottimale.



Figura 25: Esempio di installazione di collettori solari su copertura piana [23].

Nel caso invece in cui si abbia una copertura a coppi, esistono diverse tipologie di installazione che possono andare ad integrarsi con la struttura:

- Struttura ancorata alla copertura: vengono fissate delle guide alle travi del tetto in modo tale da potervi ancorare il modulo.



Figura 26: Esempio installazione collettori solari con ancoraggio alla copertura [24].

- Integrazione completa nella copertura: l'impianto viene completamente inserito all'interno della copertura. Verrà quindi installata una lamiera nella parte posteriore dei collettori per garantire l'impermeabilizzazione del tetto e il drenaggio dell'acqua piovana e poi, in sostituzione ai coppi, vengono inseriti i moduli solari andando a diventare parte integrante della copertura.



Figura 27: Esempio di integrazione completa nella copertura a coppi [24].

- Integrazione con finestre da tetto e solare fotovoltaico per garantire il minimo impatto dell'impianto dal punto di vista sia ottico sia paesaggistico minimizzando la superficie occupata sulla copertura.



Figura 28: Esempio di integrazione con finestre da tetto e solare fotovoltaico [24].

Nei casi appena considerati, l'impianto va ad integrarsi con la copertura, ma ci sono anche delle situazioni in cui l'impianto stesso può svolgere la funzione di copertura o di facciata oltre a contribuire al soddisfacimento del fabbisogno termico dell'edificio, integrandosi perfettamente dal punto di vista architettonico:



Figura 29: Esempio di installazione in cui l'impianto solare funge anche da copertura o facciata [24].

Con questo tipo di soluzione si otterrà senza dubbio un'efficienza minore a causa dell'inclinazione non ottimale rispetto al sole, ma il vantaggio dal punto di vista architettonico e di integrazione è notevole.

Sulla stessa linea di questo tipo di installazioni, c'è la possibilità di realizzare pensiline frangisole o ringhiere per balconi e terrazzi utilizzando collettori a tubi sottovuoto.



Figura 30: Collettori a tubi sottovuoto utilizzati come ringhiera di un terrazzo [25].

Un aspetto da non sottovalutare è quello riguardante la dimensione dei moduli di collettori solari: collettori solari di grandi dimensioni permettono una maggiore rapidità di installazione oltre alla possibilità di evitare numerose connessioni idrauliche aggiuntive tra un modulo e il successivo che portano inevitabilmente a perdite di tipo termico, a complicazioni fluidodinamiche e ad un maggiore impatto visivo.

2. Sistema di incentivazioni e certificazione Solar Keymark

Per avere una visione completa sull'utilizzo della tecnologia del solare termico in Italia, è importante fare riferimento ai sistemi di incentivazione. La gestione e l'attuazione di un piano energetico rappresenta un argomento all'ordine del giorno sia a livello nazionale sia globale ormai da anni: a partire dal 1991, in Italia, si è iniziato ad incentivare l'utilizzo delle fonti rinnovabili di energia; nel 2002 veniva promosso a livello europeo il miglioramento del rendimento energetico degli edifici tenendo in considerazione le condizioni locali e climatiche esterne, proponendo l'adozione di una metodologia di calcolo del rendimento energetico degli edifici e stabilendo dei requisiti minimi da rispettare. Ad oggi si tratta di uno dei temi più trattati e discussi. La tecnologia solare termica è una tecnologia consolidata ed incentivata dallo Stato tramite degli appositi sistemi di incentivazione. Inoltre, dal 2018, è stato reso obbligatorio per gli edifici di nuova costruzione il raggiungimento di almeno il 50% del fabbisogno termico da fonti rinnovabili e il solare termico si presta molto per questo scopo.

2.1 Conto termico 2.0 - GSE

GSE (Gestore dei Servizi Energetici) è la società italiana che si occupa della promozione, attraverso l'erogazione di incentivi economici, dell'energia prodotta da fonti rinnovabili. Il 31 maggio 2016 ha permesso l'entrata in vigore del Conto Termico 2.0, che potenzia e semplifica il meccanismo già introdotto dal decreto del 28/12/2012 incentivando interventi per l'incremento dell'efficienza energetica e la produzione di energia termica da fonti rinnovabili per impianti di piccole dimensioni. È infatti possibile riqualificare i propri edifici per migliorarne le prestazioni energetiche riducendo i costi dei consumi e recuperando in tempi brevi parte della spesa sostenuta [26]. Per quanto riguarda i collettori solari termici, viene presa in considerazione l'installazione di collettori per la produzione di acqua calda sanitaria e/o ad integrazione dell'impianto di climatizzazione invernale, anche abbinati a sistemi di solar cooling. Sono anche incentivate installazioni

per la produzione di energia termica per processi produttivi e campi solari asserviti a reti di teleriscaldamento e raffreddamento.

L'incentivo annuo è definito in funzione della stima di energia termica prodotta annualmente, della superficie lorda installata, di specifici coefficienti di valorizzazione dell'energia (€/kWh_t) distinti per dimensione, tipologia di installazione e in funzione dell'utilizzo del calore prodotto [27].

$$I_{a\ tot} = C_i \cdot Q_u \cdot S_l$$

$I_{a\ tot}$ = incentivo annuo (rata annua) in euro. Costituito dalla sommatoria delle rate annue previste (2 annualità per impianti con superficie lorda installata $\leq 50\ m^2$, 5 annualità per $> 50\ m^2$)

S_l = superficie solare lorda dell'impianto (m^2)

Q_u = energia termica prodotta per unità di superficie lorda (kWh_t/m^2)

C_i = coefficiente di valorizzazione dell'energia termica prodotta, dipende dalla superficie S_l e dalla tipologia dell'intervento (per produzione di a.c.s., riscaldamento, solar cooling, ...)

Per accedere all'incentivo viene richiesto che i collettori solari siano in possesso della certificazione *Solar Keymark*, della quale si parlerà nel prossimo paragrafo, che identifica anche un valore minimo di producibilità specifica: considerando un sistema di collettori piani, una temperatura media di funzionamento di 50°C e la località di Würzburg come riferimento, essa deve essere superiore a 300 kWh/m² in termini di energia solare annua.

2.2 Solar Keymark

La crescente diffusione dei collettori solari ha portato alla definizione di specifici standard di qualità riconosciuti a livello europeo che si pongono come scopo quello di garantire un livello di qualità minimo e di rendere i prodotti tra loro confrontabili. La certificazione *Solar Keymark* viene utilizzata in Europa ed è riconosciuta sempre di più in tutto il mondo. È stata sviluppata nel 2003 dall' ESTIF (*European Solar Thermal Industry Federation*) e dal CEN (*Comitato Europeo di Normazione*) cooperando con alcuni laboratori europei e con il supporto della Commissione Europea.

L'ottenimento di questa certificazione dimostra al consumatore che il prodotto è affidabile ed è stato testato in maniera indipendente dal produttore e ciò risulta utile al fine di proteggere l'utente finale dai prodotti di bassa qualità, scarso rendimento e poca affidabilità. Il *Solar Keymark* può essere emesso solamente da un organismo di certificazione autorizzato, a seguito di un test conseguito da un laboratorio di prova accreditato. È inoltre necessario che il prodotto testato sia un campione prelevato casualmente dalla produzione corrente o dal magazzino da un ispettore.



Figura 31: Logo certificazione Solar Keymark [28].

Vi sono 24 laboratori e 12 organismi di certificazione autorizzati in tutta Europa, tra cui ICIM e Kiwa Italia S.P.A in Italia.

La norma sulla quale si basa la certificazione è la *EN 12975*, che prevede che i collettori debbano essere testati alle seguenti prove:

- Resistenza alla pressione interna;
- Resistenza alle alte temperature: per verificare che il collettore sia in grado di sopportare elevate temperature per un certo periodo di tempo senza subire significative degradazioni;
- Esposizione alla radiazione solare;
- Rapide variazioni termiche interne ed esterne: esterne per simulare condizioni che potrebbero verificarsi in esercizio, quando dopo una calda giornata estiva potrebbe esserci un improvviso rovescio di pioggia che porta ad un piccolo shock termico; interne per simulare il passaggio di fluido freddo al suo interno durante una giornata molto calda;
- Penetrazione della pioggia;
- Resistenza al congelamento;
- Altra prova di resistenza alla pressione interna;
- Carico meccanico: la copertura del collettore deve essere in grado di sopportare una pressione di almeno 100 kg/m²; viene inoltre valutata la resistenza dei fissaggi

tra la copertura e la scatola di contenimento del collettore rispetto all'azione esercitata dal vento;

- Prestazioni termiche (curva di efficienza): indica la produzione di potenza del collettore con la quale è ricavabile il rendimento oltre ad una stima dell'energia termica che il collettore potrebbe produrre se installato in determinate condizioni di riferimento in quattro diverse località europee (Atene, Davos, Stoccolma e Würzburg) e con temperatura media del fluido fissata a 25 °C, 50 °C e 75 °C.
- Resistenza all'impatto: per verificare la capacità della copertura del pannello di resistere ai potenziali impatti provocati dalla grandine; vengono utilizzate sfere di acciaio o di ghiaccio;
- Ispezione finale: una volta conclusa la sequenza delle prove descritte, il collettore viene smontato pezzo per pezzo e ispezionato per valutare e relazionare ogni possibile anomalia riscontrata.

La validità di questa certificazione è di 5 anni; successivamente può essere rinnovata per altri 5 senza bisogno di un nuovo test che invece sarà effettuato dopo 10 anni dal primo.

Scegliere un collettore certificato significa quindi avere una certa garanzia sull'affidabilità del prodotto rendendolo quindi commercialmente più valido.

2.3 Esempio di collettori certificati e calcolo dell'incentivo

Per avere un'idea più chiara sulle caratteristiche dei collettori attualmente in commercio e identificare dei limiti inferiori e superiori di qualità, si sono andati a cercare nel database delle certificazioni Solar Keymark rilasciate da luglio 2014 a novembre 2020 i datasheets dei tre collettori che risultassero migliori e dei tre che risultassero peggiori, e se ne è confrontata la producibilità considerando come riferimento la località di Würzburg (*Tabella 2*).

Collettore	Producibilità (50 – 75 °C) [kWh/m ²]	Area lorda [m ² /modulo]
TVP Solar SA MT_Power v4 (piano)	769 - 683	1,96
SAVO-SOLAR Oyj SF500-15 (piano)	606 - 416	15,96
PAPAEMMANOUEL S.A. MTEC-27V (piano)	547 - 351	2,73
CONSOLAR TUBO II T (sottovuoto)	293 - 204	2,44
HAINING ONS-AC-30 (sottovuoto)	274 - 188	5,02
SOLAR ENERGY BOOSTER SEB 3 (piano)	10 - /	1,63

Tabella 2: Caratteristiche dei tre collettori più performanti e i tre meno performanti, tutti con certificazione Solar Keymark.

Da qui si sono poi andati a calcolare gli incentivi sulla base del Conto Termico 2.0. Per stabilire il valore del coefficiente di valorizzazione (C_i) dell'energia termica prodotta, si è considerata come superficie lorda dell'impianto il range compreso tra 12 e 50 m² e come applicazioni la produzione di acqua calda sanitaria, acqua calda sanitaria in combinazione con riscaldamento e solar cooling.

C_i	$S_l \leq 12$	$12 < S_l \leq 50$	$50 < S_l \leq 200$	$200 < S_l \leq 500$	$S_l > 500$
ACS	0,35	0,32	0,1	0,09	0,08
ACS riscaldamento	0,36	0,33	0,11	0,1	0,09
Solar cooling	0,43	0,39	0,13	0,12	0,11

Tabella 3: Tabella per la scelta del coefficiente di valorizzazione dell'energia termica prodotta [27].

In questo modo è stato possibile calcolare il valore dell'incentivo per diverse superfici di collettori solari, rendendo possibile il confronto tra le diverse applicazioni.

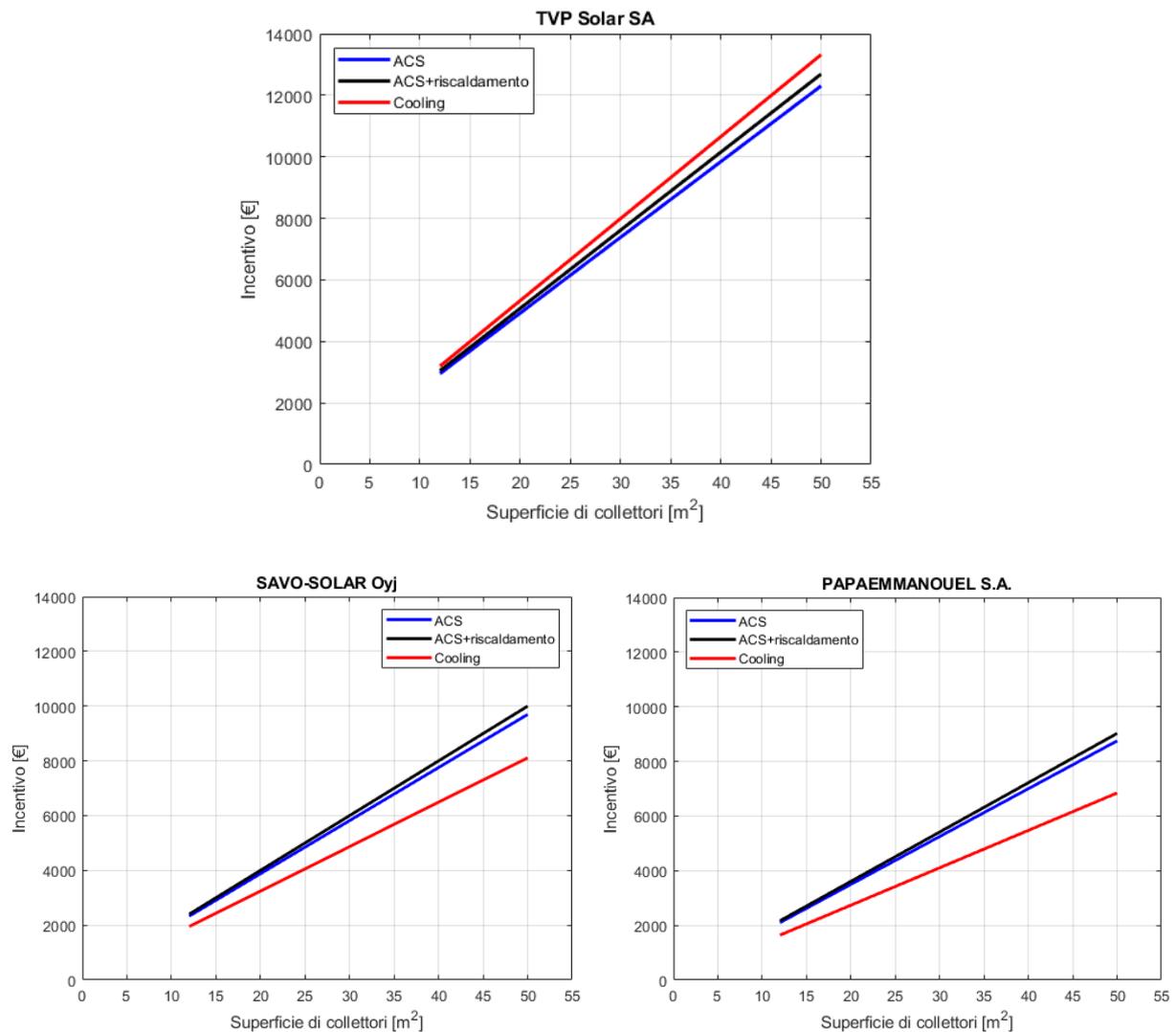


Figura 32: Grafici rappresentativi del calcolo dell'incentivo per diverse superfici di collettori.

L'introduzione degli incentivi statali è stata di fondamentale importanza per aumentare la diffusione di questi sistemi e se ne avrà un'ulteriore conferma tra qualche anno con gli effetti dell'introduzione dell'*Ecobonus 110%* del 2021, per il quale le caratteristiche dei collettori solari restano le medesime e quindi l'ottenimento della certificazione *Solar Keymark* è prerogativa necessaria per una buona commercializzazione del prodotto.

3. Collettore solare Ecobel

Il cuore di questa tesi è lo studio di un particolare componente di un collettore solare: l'*assorbitore*. Nello specifico, esso è composto da strip in alluminio alle quali può essere applicato un trattamento selettivo. L'assorbitore è un elemento di fondamentale importanza in un collettore, si tratta infatti del luogo in cui l'energia proveniente dalla radiazione solare viene assorbita e dove avviene lo scambio di calore tra la piastra captante e il fluido termovettore. L'obiettivo preposto in questo studio è quello dell'analisi dell'assorbitore in modo tale da raggiungere prestazioni elevate. A questo scopo si sono analizzate le sue caratteristiche, prima dal punto di vista dello scambio termico con il fluido termovettore e poi dal punto di vista dei materiali con particolare attenzione al trattamento selettivo da applicare per garantire che l'assorbimento di energia possa essere elevato. Si è quindi svolta un'analisi teorica, seguita poi da un test sperimentale.

3.1 Strip solare

Le linee di produzione dei collettori solari termici piani presenti ad oggi sul mercato prevedono l'utilizzo di assorbitori in materiale metallico, solitamente rame o alluminio. Viene cioè realizzata una lastra metallica (in un unico pezzo oppure con diverse strip) alla quale viene applicato un trattamento selettivo superficiale; questa verrà poi saldata ai tubi per il fluido termovettore che a loro volta sono saldati ad un tubo collettore.

Ci si è proposti di realizzare un assorbitore solare che si allontani dalla linea classica di produzione: si tratta di un assorbitore che non è composto da un'unica lastra ma da strip la cui particolarità risiede nel fatto che ognuna di esse è prodotta in alluminio tramite estrusione con un doppio canale a sezione semi-ellittica per il passaggio del fluido. In questo modo è possibile evitare di dover creare delle giunzioni tra diversi componenti che risultano essere fonte di perdite di efficienza nello scambio termico e spesso soggette a danneggiamenti dovuti alle deformazioni termiche e a stress meccanici.

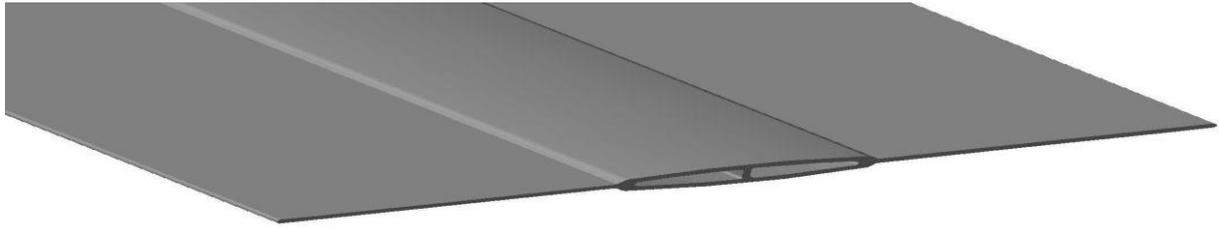


Figura 33: Rappresentazione strip in alluminio.

La strip può essere così descritta:

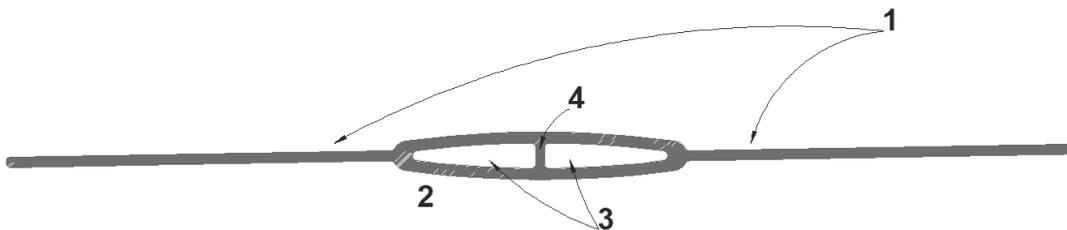


Figura 34: Rappresentazione parti della strip in alluminio.

1. Alette di captazione: offrono maggiore superficie alla radiazione solare e trasportano il calore alla parte centrale.
2. Parte centrale: ha la doppia funzione di trasporto del fluido termovettore e di superficie captante. Questa conformazione implica una maggiore superficie di strip che da un lato riceve la radiazione incidente e dall'altro è lambita direttamente dal fluido.
3. Canali di trasporto del fluido: hanno la funzione di trasporto del fluido termovettore e possono essere utilizzati sia come canale unico sia come due canali distinti per la circolazione del fluido in direzioni opposte.
4. Setto centrale: divide i due canali e impedisce al condotto di deformarsi in caso di pressioni elevate. Se rimosso nella parte finale della strip permette la circolazione ad U del fluido.

Per poter procedere con un'analisi più dettagliata dell'assorbitore oggetto di studio, è utile poter fare un confronto delle prestazioni con un una strip solare standard, delle quali è quindi opportuno fare qualche considerazione aggiuntiva.

3.1.1 Strip solari standard: saldatura laser e saldatura a ultrasuoni

Come accennato nel paragrafo precedente, le strip solari che si possono trovare più facilmente in commercio sono realizzate saldando un foglio di rame o alluminio (economicamente più vantaggioso) ad un condotto. La saldatura rappresenta la parte più delicata della strip: essa deve infatti garantire una buona trasmissione del calore oltre ad una resistenza strutturale alle deformazioni dovute ai cambiamenti di temperatura. Risulta quindi di interesse fare un confronto tra le due tipologie di saldatura più usate in questo ambito:

- Saldatura ad ultrasuoni

La saldatura ad ultrasuoni viene realizzata applicando ai componenti da saldare un carico che solleciti la piastra perpendicolarmente per poi generare delle onde elettriche di forma sinusoidale che creano delle vibrazioni in grado di aumentare la temperatura dei componenti. I materiali iniziano quindi a scaldarsi in maniera circoscritta nell'area di giunzione arrivando a fondersi in maniera localizzata, dando così origine alla saldatura. A fine processo, una volta interrotta la vibrazione ultrasonica, segue un tempo di raffreddamento mantenendo la pressione, che porta alla solidificazione e compattazione dell'area di interesse.

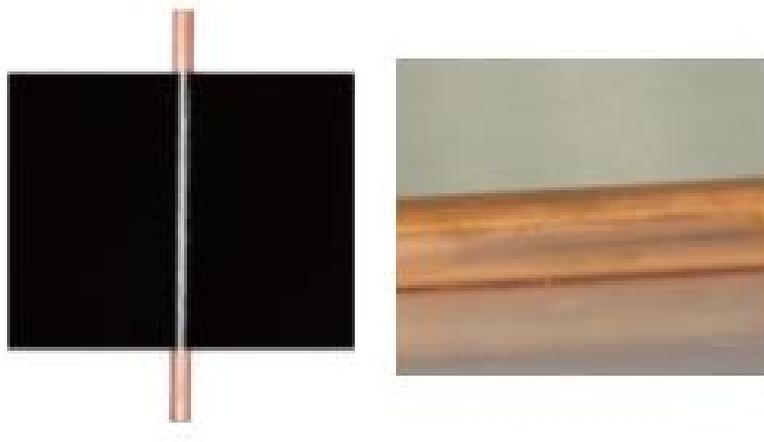


Figura 35: Strip saldata ad ultrasuoni vista dall'alto e lateralmente [29].

La piastra captante saldata al condotto con questa tecnica sarà caratterizzata da una piccola deformazione sulla sua superficie dovuta al carico imposto, ma il vantaggio che si ottiene è la realizzazione di una giunzione molto resistente pari a una linea continua di larghezza 2-3 mm.

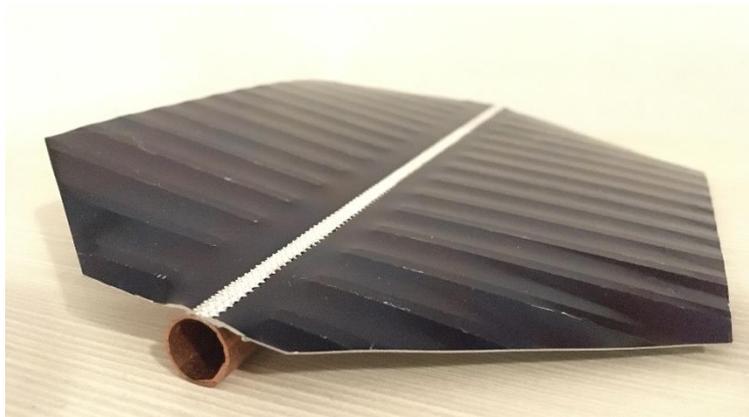


Figura 36: Strip Innovar saldata ad ultrasuoni, dettaglio della linea di saldatura.

La realizzazione di una superficie di contatto continua permette alla saldatura di essere più resistente sia alle variazioni di temperatura sia ad eventuali stress di tipo meccanico che potrebbero essere causati dal trasporto e dall'installazione del collettore solare. Inoltre, la conduttività termica di questo tipo di saldatura risulta essere elevata permettendo una buona trasmissione del calore tra la piastra e il fluido circolante nel condotto.

- Saldatura laser

Questa tecnica prevede l'utilizzo di un raggio laser come sorgente di calore concentrata: il raggio laser ha una densità di potenza molto elevata, di circa 1 MW/cm^2 , e viene focalizzato in aree molto piccole (il raggio del laser può avere una dimensione che varia tra i 0,2 mm e i 13 mm) che raggiungono il punto di fusione e, in questo caso, vanno a saldarsi al metallo del condotto sottostante.

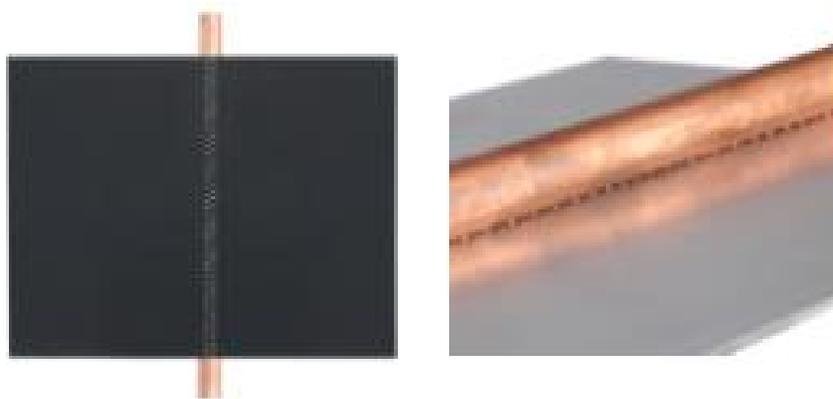


Figura 37: Strip saldata a laser vista dall'alto e laterale [29].

Questo tipo di saldatura non richiede una particolare pressurizzazione del materiale su cui si lavora e quindi non si riscontrano deformazioni significative o danni alla superficie. Tuttavia, un altro aspetto su cui è importante focalizzarsi è la superficie di contatto tra il condotto e la piastra captante: in questo caso la saldatura laser crea solamente dei punti di contatto e non una superficie continua, come è possibile vedere in *Figura 38*.



Figura 38: Dettaglio dei punti di saldatura.

Questo va a penalizzare fortemente due aspetti: la resistenza agli stress termici dovuti alle variazioni di temperatura e a quelli meccanici (per esempio durante il trasporto e l'installazione) risulta molto bassa, inoltre la conduttività termica diminuisce notevolmente perché la superficie di contatto è molto ridotta. È stato infatti stimato che essa risulti del 3% minore rispetto alla saldatura ad ultrasuoni [30].

3.2 Simulazioni teoriche del trasferimento di calore tra la superficie captante e il fluido termovettore

La geometria della strip solare considerata in questo studio dovrebbe risolvere il problema della conduzione di calore tra la superficie captante e il fluido termovettore: è

stata infatti rimossa la saldatura tra la piastra captante e il condotto andando a creare dei canali che sono un corpo unico con le alette di captazione. Inoltre, la loro forma permette di ottimizzare la trasmissione del calore: hanno un notevole sviluppo in larghezza e questo fa sì che il calore raccolto nella parte superiore possa essere trasmesso direttamente al fluido attraverso una superficie ampia e sottile. Per verificare la veridicità di questa ipotesi si sono effettuate alcune simulazioni tramite l'utilizzo del software *COMSOL Multiphysics 5.6*, dove si è rappresentata la geometria dell'assorbitore del caso studio. I risultati sono poi stati confrontati con quelli ottenuti con lo stesso tipo di simulazioni ma su una geometria rappresentativa di una strip saldata ad ultrasuoni; si è fatta questa scelta considerando ciò che è stato riportato nel *Paragrafo 3.1.1* e quindi assumendo una migliore trasmissione del calore per la saldatura ad ultrasuoni rispetto a quella a laser.

3.2.1 Studio stazionario con temperatura della superficie superiore della piastra captante imposta

Per questa prima analisi si è deciso di fissare la superficie superiore della piastra captante (quella che in fase operativa sarebbe raggiunta dalla radiazione solare) ad una temperatura di 60 °C per entrambe le geometrie in modo tale da andare a valutare, una volta raggiunto lo stato stazionario, la temperatura di uscita dell'acqua dal condotto considerando una temperatura di ingresso di 20 °C.

Caso 1: strip Ecobel

Come già descritto nel paragrafo precedente, l'assorbitore studiato è composto da strip in alluminio realizzate tramite estrusione, di larghezza pari a 125 mm e con un condotto di sezione ellittica separato da un setto centrale. L'ellisse interno è costruito con un semiasse maggiore di 15,3 mm e quello minore di 2,3 mm, mentre le alette hanno uno spessore di 2 mm. Per questo studio, al fine di ridurre i costi computazionali, si è considerata una piccola porzione di strip solare (100 mm di lunghezza) e, sfruttando la sua simmetria, è stato possibile studiare solamente metà dominio.

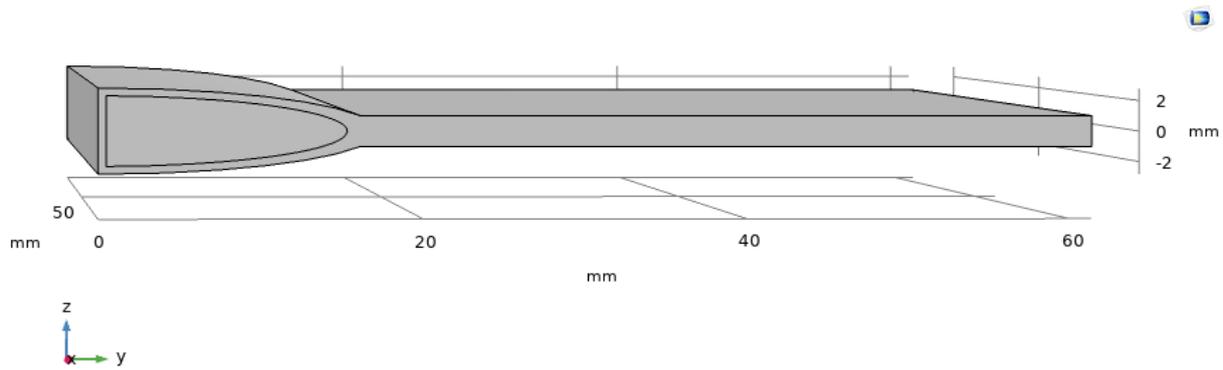


Figura 39: Geometria della strip Ecobel.

Le proprietà fisiche dell'alluminio, fornite dalla libreria dei materiali di *COMSOL*, sono le seguenti:

Calore specifico a pressione costante	$900 \frac{J}{kg K}$
Conduttività termica	$238 \frac{W}{m K}$
Densità	$2700 \frac{kg}{m^3}$

Tabella 4: Proprietà dell'alluminio da libreria *COMSOL*.

Per quanto riguarda il fluido termovettore, si è utilizzata acqua con proprietà dipendenti dalla temperatura definite nella libreria dei materiali di *COMSOL*.

Per andare a definire una velocità di ingresso dell'acqua nel condotto, si è considerato un utilizzo del collettore a bassa portata, quindi un valore di $15 \frac{l}{h m^2}$. La strip ha una larghezza di 125 mm, quindi in 1 metro di larghezza vi sono 8 strip e in ogni strip scorre una portata di 1,875 l/h; questo valore va a dimezzarsi considerando metà dominio e quindi si ottiene una portata di $2,604 \cdot 10^{-7} \frac{m^3}{s}$ (considerando la densità dell'acqua all'ingresso) in metà strip. Considerando la sezione di ingresso semiellittica e calcolandone la superficie tramite *COMSOL* (52,87 mm²) si è ottenuta una velocità media di ingresso dell'acqua di 0,0049 m/s. Questo dato è utile al fine di poter fare una valutazione sul numero di Reynolds per capire se può essere fatta l'assunzione di flusso laminare.

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu}$$

dove:

- ρ è la densità del fluido, pari a $999,97 \frac{kg}{m^3}$ a 20 °C (stima conservativa)

- $v = 0,00493 \text{ m/s}$ la velocità media del fluido nella sezione del condotto
- D è il diametro idraulico (corrispondente al diametro di un condotto circolare equivalente dal punto di vista idrodinamico)

$$\frac{4A}{P} = \frac{4 \cdot 52,868 \text{ mm}^2}{35,166 \text{ mm}} \cdot 10^{-3} = 6,0135 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

- μ è la viscosità dinamica, pari a $8,9 \cdot 10^{-4}$ a 25 °C

Questo porta ad un valore del numero di Reynolds pari a:

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} = \frac{999,97 \cdot 0,00493 \cdot 6,135 \cdot 10^{-3}}{8,9 \cdot 10^{-4}} = 34,0 < 2100 \rightarrow \text{moto laminare}$$

Si tratta dunque di un flusso laminare, al quale bisogna aggiungere la condizione “no slip” nei punti di contatto con il condotto e la condizione di scambio termico tra solido e fluido.

Le equazioni che questo tipo di simulazione va a risolvere sono le classiche equazioni di bilancio di energia sia per la parte solida, sia per il fluido, alle quali vengono applicate le condizioni al contorno e quelle all'interfaccia. Come già detto si tratta di uno studio di tipo stazionario e la generazione interna di calore è assente.

In questo modo si è potuta andare a considerare la temperatura dell'acqua in uscita dalla strip una volta raggiunto lo stato stazionario:

$$T_{H_2O, \text{staz}} = 53,85 \text{ °C}$$

Caso 2: strip standard con saldatura ad ultrasuoni

Per la costruzione di questa geometria si è considerata una piastra di spessore 0,5 mm e larghezza 125 mm. Come nel caso precedente, potendo apprezzare la simmetria del dominio, se ne è studiato solamente metà allo scopo di ridurre i costi computazionali. Il condotto è stato definito da uno spessore di 0,5 mm e da un raggio interno di 3,5 mm. Per rappresentare la saldatura ad ultrasuoni si è dimezzato lo spessore della piastra in corrispondenza della porzione saldata al condotto (considerata di 2 mm di larghezza), infatti la saldatura ad ultrasuoni permette di avere una superficie di contatto tra condotto e piastra captante assimilabile ad una linea continua di spessore inferiore a quello della piastra, questo perché nel processo di saldatura parte del materiale viene rimosso.

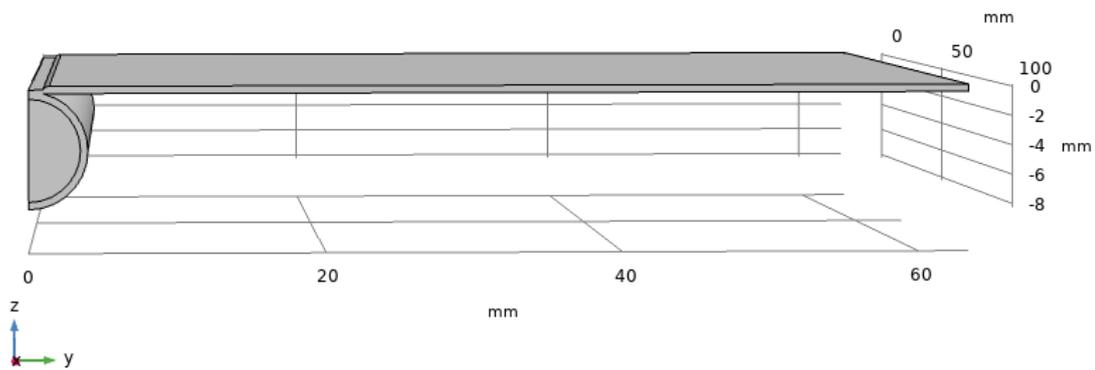


Figura 40: Geometria creata in ambiente COMSOL per assorbitore standard saldato ad ultrasuoni.

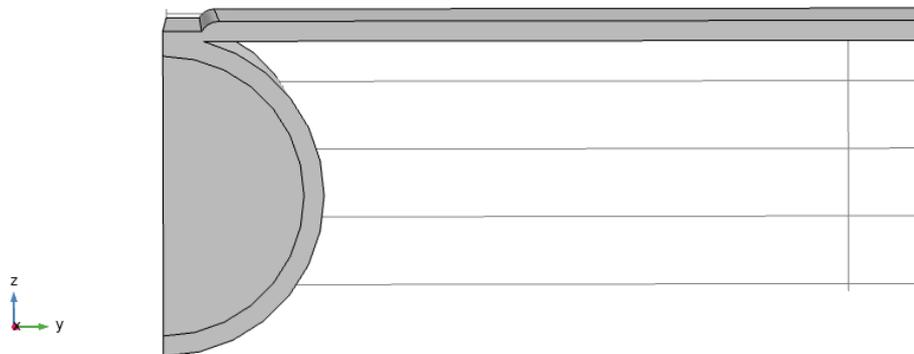


Figura 41: Zoom sulla parte di geometria rappresentativa della saldatura.

I materiali solitamente utilizzati per questo tipo di assorbitori sono rame e alluminio ma visti i costi decisamente maggiori del rame, si è optato per considerare l'assorbitore composto interamente da alluminio con le seguenti caratteristiche riportate precedentemente in *Tabella 4*.

Per quanto riguarda il fluido termovettore si è utilizzata acqua con le medesime proprietà utilizzate per la precedente simulazione.

Con le stesse considerazioni del caso precedente (scambio termico solido-fluido, flusso laminare, condizione "no slip" e condizione di simmetria sul bordo in cui il dominio è stato dimezzato), si è andata a calcolare la velocità media di ingresso del fluido nel condotto, ottenendo una velocità di $0,0136 \text{ m/s}$. Imponendo poi le stesse condizioni iniziali del caso precedente (superficie superiore alla temperatura di $60 \text{ }^\circ\text{C}$ e acqua in ingresso a $20 \text{ }^\circ\text{C}$) si

è andato a studiare il sistema in una situazione stazionaria. L'acqua in uscita dal condotto risulta in questo caso essere:

$$T_{H_2O, staz} = 42,09 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Questo valore risulta essere di molto inferiore rispetto a quello ottenuto nel caso precedente:

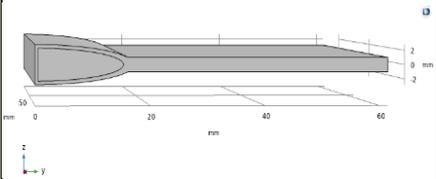
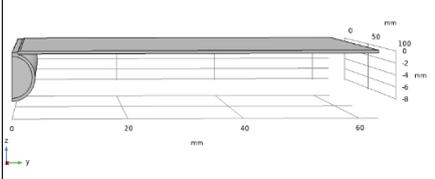
	Strip Ecobel	Strip standard
Geometria		
Materiale	Alluminio	Alluminio
T ingresso acqua	20 °C	20 °C
T superficie captante	60 °C	60 °C
T uscita acqua stazionario	53,85 °C	42,09 °C

Tabella 5: Confronto dei risultati ottenuti con la strip Ecobel e quella standard in alluminio con temperatura della superficie captante imposta.

Sembra quindi che si abbia un vantaggio piuttosto rilevante nello scambio di calore tra piastra captante e fluido termovettore nel caso di condotto semiellittico dell'assorbitore realizzato tramite estrusione.

Occorre fare una precisazione su ciò che riguarda il trasferimento di calore dalla piastra al fluido nel caso della strip caratterizzata dalla saldatura; infatti, oltre alla resistenza convettiva, bisognerebbe considerare anche la resistenza della saldatura. Il flusso utile per unità di lunghezza può infatti essere espresso nel modo seguente [6]:

$$q'_{utile} = \frac{T_{piastra} - T_{fluido}}{\frac{1}{h\pi D} + \frac{1}{C_b}}$$

Dove D è il diametro interno, h è il coefficiente di scambio convettivo tra il fluido e la parete del condotto e C_b è la conduttanza della saldatura che può essere stimata, per unità di lunghezza come

$$C_b = \frac{k_b b}{\gamma}$$

In cui k_b è la conduttività termica della saldatura, b la larghezza della saldatura e γ il suo spessore. Il più delle volte la resistenza determinata dalla presenza della saldatura è trascurabile grazie a un valore elevato della sua conduttività termica, che si discosta di poco da quella del materiale, e uno spessore della saldatura molto limitato. In questo modo la conduttanza della saldatura può arrivare ad avere valori molto elevati rendendo prossimo allo zero il termine di resistenza. Un valore tipico rappresentativo per la conduttanza di una saldatura performante è infatti $10^6 \text{ W/m}^2\text{K}$ [6]. A seguito di queste considerazioni si è optato per trascurare questo termine, che non andrebbe a variare i risultati in maniera significativa.

3.2.2 Studio stazionario con flusso incidente sulla piastra captante imposto

Per confermare i risultati riportati nel paragrafo precedente avvicinandosi ad una situazione più realistica, si è svolta una simulazione simile ma questa volta applicando sulla superficie superiore della piastra il flusso rappresentativo della radiazione solare con un'irradianza fissata a 850 W/m^2 e, come nel caso precedente, si è andato a risolvere uno studio di tipo stazionario.

I due assorbitori sono stati costruiti in modo tale da avere una superficie captante uguale e pari a $6266,7 \text{ mm}^2$. Considerando ogni superficie adiabatica ad eccezione di quella su cui è applicato il flusso, la potenza che la piastra assorbe in entrambi i casi e che deve "smaltire" trasmettendo calore al fluido è la medesima e quindi, una volta raggiunta la condizione stazionaria, la temperatura del fluido in uscita deve essere la stessa. Per effettuarne una valutazione, bisogna considerare il semplice bilancio energetico derivante dalle sopracitate ipotesi:

$$q = \dot{m}c_p(T_{out} - T_{in})$$

Dove i termini alla destra dell'uguaglianza rappresentano la potenza termica che sta attraversando le due sezioni di ingresso ed uscita del fluido. Per poter utilizzare questa equazione, bisogna tuttavia considerare che la temperatura del fluido in uscita non è uniforme sull'intera sezione trasversale del condotto, per cui è necessario ottenere un'adeguata temperatura media sull'area. È possibile fare ciò imponendo che il termine $\dot{m}c_p T_m$ corrisponda alla quantità di potenza termica integrata sulla sezione, che può

essere ottenuta integrando sulla sezione il prodotto tra il flusso di massa (ρu) e l'energia termica (o entalpia) per unità di massa ($c_p T$) [31]:

$$\dot{m} c_p T_m = \int_{A_c} \rho u c_p T dA_c$$

e da qui si può ricavare T_m :

$$T_m = \frac{\int_{A_c} \rho u c_p T dA_c}{\dot{m} c_p}$$

Dove \dot{m} è la portata massica in $\frac{kg}{s}$ che equivale a quella volumetrica $2,604 \cdot 10^{-7} \frac{m^3}{s}$ moltiplicata per la densità dell'acqua in ingresso ($998,20 \frac{kg}{m^3}$ a $20^\circ C$) e c_p è la capacità termica specifica a pressione costante ($4186,9 \frac{J}{kg K}$ a $20^\circ C$).

Una volta risolto lo studio stazionario, è possibile calcolare tramite *COMSOL* il valore del numeratore dell'equazione per il calcolo di T_m :

	Strip Ecobel	Strip standard
$\int_{A_c} \rho u c_p T dA_c$	324,54 W	323,91 W

Tabella 6: Risultati dell'integrale di interesse ottenuti tramite il software *COMSOL Multiphysics 5.6*.

Da qui, con la stessa portata massica in entrambi i casi e c_p calcolato come media sulla superficie di uscita, si calcola la temperatura media di uscita del fluido. Per le valutazioni fatte in precedenza, abbiamo affermato che, fornendo la stessa quantità di calore nei due casi, la temperatura dell'acqua in uscita dovrebbe essere la stessa e calcolabile analiticamente con la formula

$$Q = \dot{m} c_p \cdot (T_{out} - T_{in})$$

$$T_{out} = T_{in} + \frac{Q}{\dot{m} c_p} = 20^\circ C + \frac{850 \frac{W}{m^2} \cdot 6266,7 \cdot 10^{-6} m^2}{1,0883 \frac{kg}{s} \frac{J}{kg K}} = 24,89^\circ C$$

ma dal suo calcolo tramite i valori ottenuti dalla simulazione si trovano dei valori leggermente differenti:

- Strip Ecobel: $T_m = \frac{\int_{A_c} \rho u c_p T dA_c}{\dot{m} c_p} = \frac{324,54}{1,0874} - 273,15 = 25,31^\circ C$

- Strip standard: $T_m = \frac{\int_{A_c} \rho u c_p T dA_c}{m c_p} = \frac{323,91}{1,0871} - 273,15 = 24,81 \text{ } ^\circ\text{C}$

Questo è dovuto ad un errore computazionale che va ad influire sulla terza cifra significativa, se considerata la temperatura in *Kelvin*. Il principale risultato che si può ricavare da questa simulazione è la temperatura raggiunta dalla piastra, che nel caso dell'assorbitore Ecobel risulta molto minore rispetto a quella raggiunta dall'altro tipo di assorbitore.

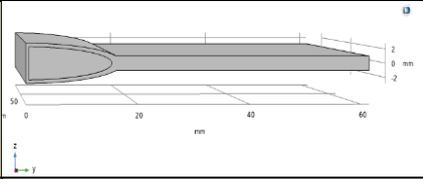
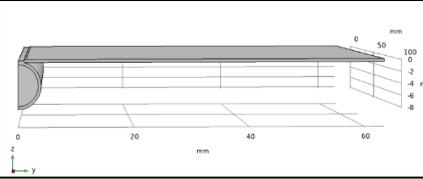
	Strip Ecobel	Strip standard
Geometria		
Materiale	Alluminio	Alluminio
T ingresso acqua	20 °C	20 °C
Flusso imposto sulla superficie superiore	850 W/m ²	850 W/m ²
T uscita acqua	25,31°C	24,81°C
T media superficie superiore	25,55°C	38,97°C
T media volume assorbitore	25,55°C	37,44°C

Tabella 7: Confronto dei risultati ottenuti con l'assorbitore Ecobel e quello standard in alluminio con flusso imposto sulla superficie captante.

La differenza di temperatura della superficie superiore dell'assorbitore nei due casi è di 13,42 °C, valore molto significativo per la valutazione dell'efficienza di scambio termico tra la piastra e il fluido. Considerando l'entità dell'errore computazionale riscontratosi nel calcolo della temperatura del fluido in uscita dall'assorbitore, esso non influisce di molto sulle valutazioni.

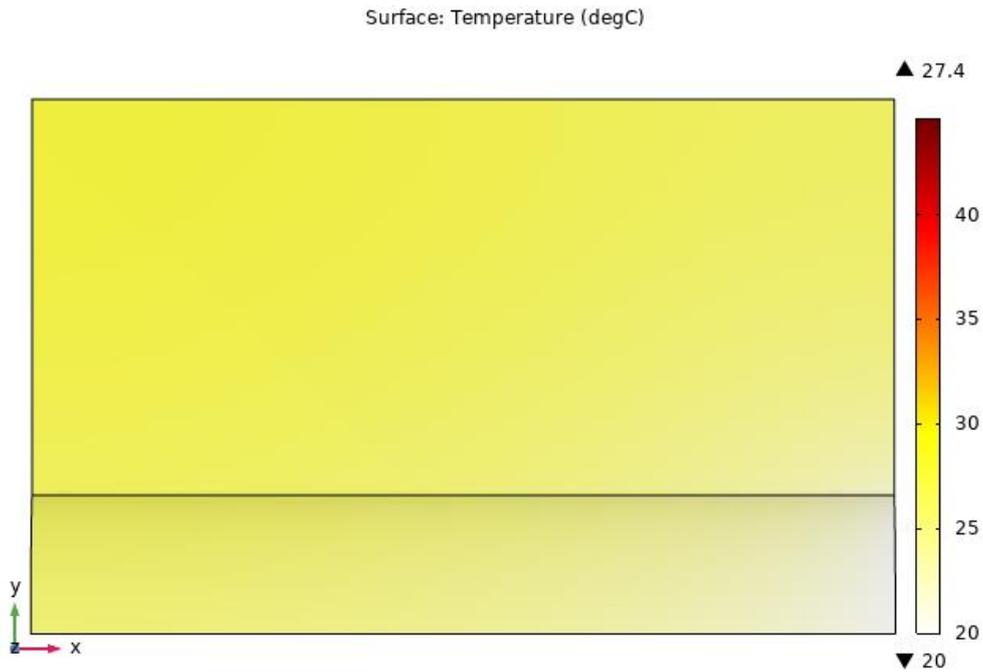


Figura 42: Strip Ecobel - Distribuzione della temperatura sulla superficie ricevente la radiazione solare della strip Ecobel una volta raggiunto lo stato stazionario.

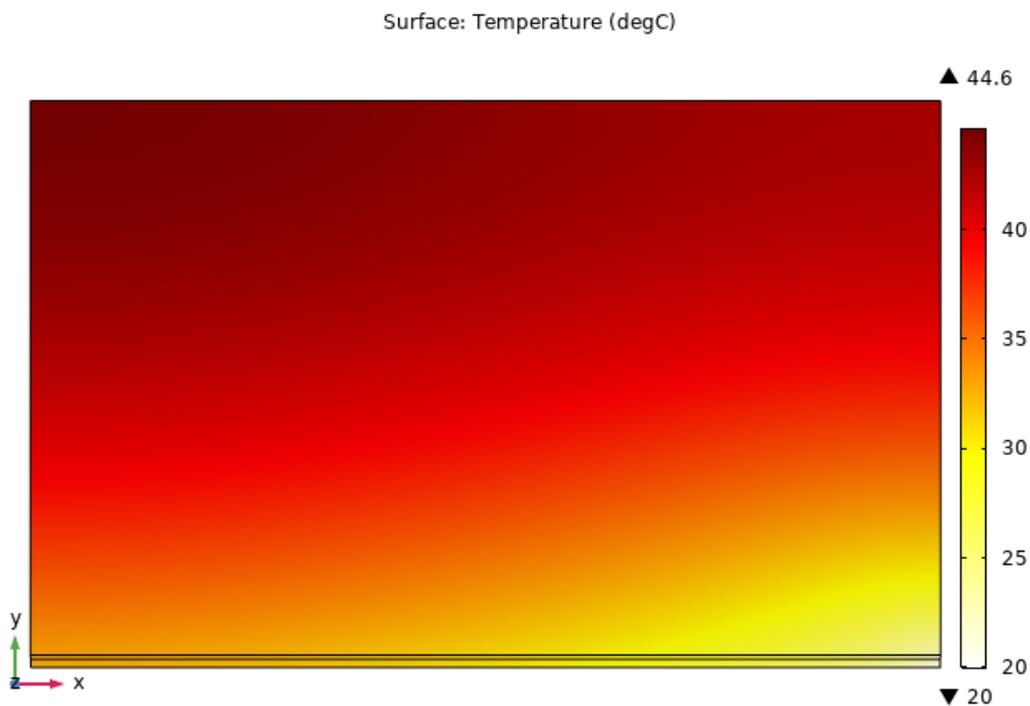


Figura 43: Strip standard in alluminio - Distribuzione della temperatura sulla superficie ricevente la radiazione solare della strip standard una volta raggiunto lo stato stazionario.

Questi risultati dimostrano nuovamente il vantaggio che si ha nello scambio di calore tra la piastra e il fluido nel caso dell'assorbitore Ecobel: viene raggiunta la stessa temperatura di uscita dell'acqua (a causa della medesima potenza entrante nel sistema), ma con un

minore aumento della temperatura della piastra. Infatti, considerando l'equazione della convezione termica [31]:

$$Q_{conv} = h \cdot A \cdot \Delta T$$

Dove Q_{conv} (W) è il flusso scambiato per convezione dalla piastra al fluido, A (m^2) è la superficie di scambio termico, ΔT (K) è la differenza di temperatura tra la piastra e il fluido in condizioni stazionarie e h (W/m^2K) è il coefficiente di scambio termico convettivo. Si può affermare che a parità di Q_{conv} nei due casi (pari alla potenza entrante sulla superficie superiore, siccome tutte le altre sono adiabatiche), il prodotto del coefficiente convettivo h e della superficie di scambio termico A è maggiore nel caso in cui il ΔT è minore. Si può perciò concludere che lo scambio di calore avviene in maniera più efficiente nel caso dell'assorbitore Ecobel dove la temperatura della piastra è minore. In parte, questo è dovuto anche alla maggiore superficie di scambio termico A .

Al fine di stimare queste quantità, si è calcolato per entrambi i casi, in maniera approssimativa, il valore della differenza di temperatura tra la piastra e il fluido. Per la valutazione della temperatura della piastra, si è considerata la sezione finale, quella di uscita: siccome non è stato possibile circoscrivere il calcolo della temperatura tramite *COMSOL* alla sola parte della piastra a diretto contatto con il fluido, si è prestata attenzione alle linee isoterme derivanti dalle simulazioni, andando ad approssimare una temperatura media della piastra in prossimità del fluido in modo tale da ricavare almeno un ordine di grandezza del coefficiente di scambio termico convettivo h .

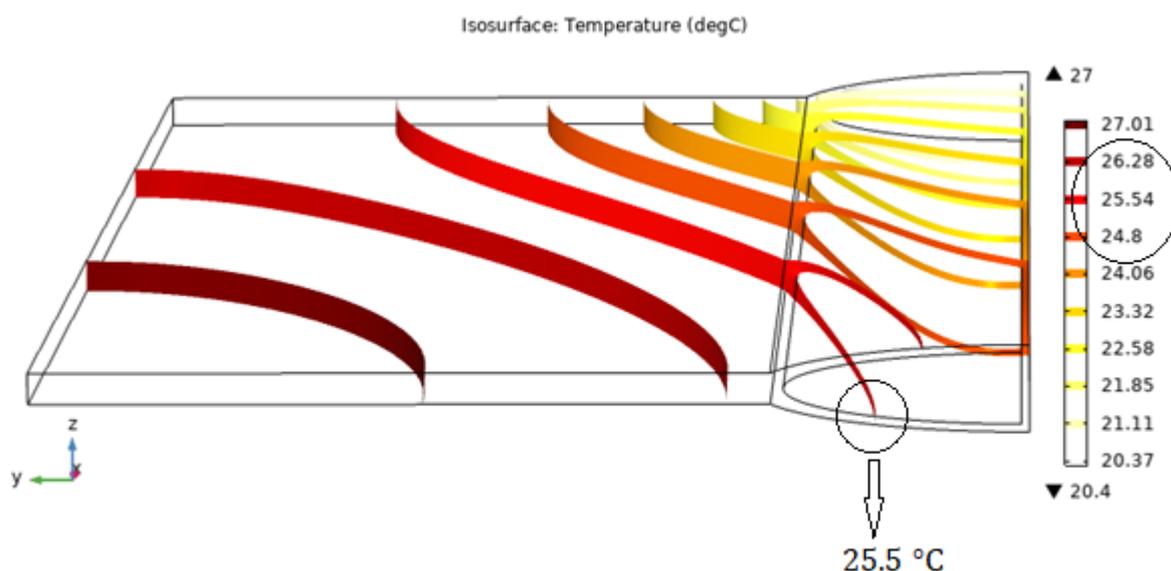


Figura 44: Rappresentazione strip Ecobel con curve isoterme per la determinazione della temperatura della piastra sulla sezione di uscita.

Strip Ecobel	Q_{conv}	Temperatura acqua	Temperatura piastra	Superficie scambio termico	$h = \frac{Q_{conv}}{(T_{piastra} - T_{acqua}) \cdot A}$
	5,327 W	25,31°C	25,5°C	3516,6 mm ²	$\approx 8000 \text{ W/m}^2\text{K}$

Tabella 8: Tabella per il calcolo del coefficiente convettivo relativo alla strip Ecobel al fine di determinare l'efficienza dello scambio termico.

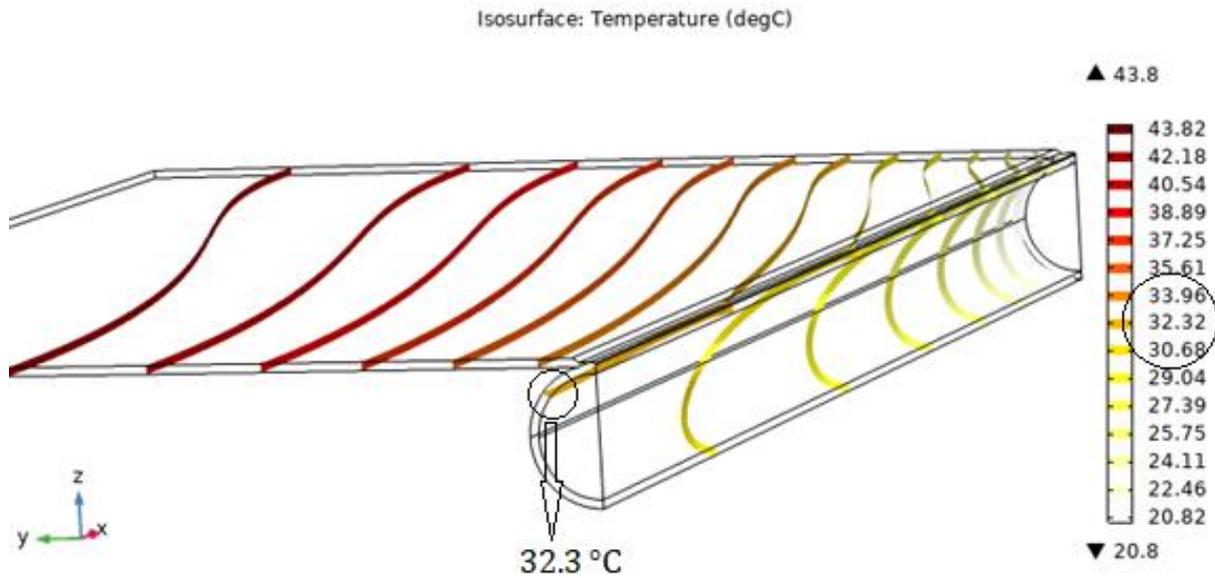


Figura 45: Rappresentazione strip standard con curve isoterme per la determinazione della temperatura della piastra sulla sezione di uscita.

Strip standard	Q_{conv}	Temperatura acqua	Temperatura piastra	Superficie scambio termico	$h = \frac{Q_{conv}}{(T_{piastra} - T_{acqua}) \cdot A}$
	5,327 W	24,81°C	32,3°C	1099,6 mm ²	$\approx 600 \text{ W/m}^2\text{K}$

Tabella 9: Tabella per il calcolo del coefficiente convettivo relativo alla strip standard al fine di determinare l'efficienza dello scambio termico.

Da questi risultati, riportati con una sola cifra significativa a causa della forte approssimazione che sta a monte, si può quindi concludere che il miglioramento della capacità di scambio di calore tra la piastra e il fluido nella strip Ecobel si ha in parte grazie alla maggiore superficie di scambio termico e in parte per un migliore coefficiente di scambio termico convettivo. Con l'assorbitore Ecobel si ha infatti una superficie di

scambio termico che è di circa 3 volte superiore a quella del caso standard, mentre il coefficiente convettivo è più grande di un ordine di grandezza.

3.2.3 Considerazioni su assorbitore standard in rame

Nelle precedenti simulazioni (*Paragrafi 3.2.1 e 3.2.2*) sono stati confrontati due assorbitori, uno standard e uno sperimentale, entrambi interamente composti di alluminio. È necessario qui fare una precisazione per avvicinarsi ad una situazione il più realistica possibile: il rame presenta un valore di conducibilità termica molto maggiore rispetto all'alluminio ($400 \frac{W}{m K}$ del rame contro $238 \frac{W}{m K}$ dell'alluminio, a $25 \text{ }^\circ\text{C}$ [31]), motivo per il quale la maggior parte degli assorbitori solari sono costituiti da questo materiale o, al più, da un foglio di alluminio saldato al tubo in rame. Quest'ultima soluzione presenta però una problematica: l'accoppiamento mediante saldatura di due materiali diversi ha un effetto negativo nei confronti della resistenza termica e meccanica della saldatura stessa essendo caratterizzati da diversi coefficienti di dilatazione termica.

Si è quindi pensato di procedere con un'altra simulazione che andasse a verificare la veridicità della tesi, e quindi un migliore scambio termico con l'utilizzo dell'assorbitore Ecobel, anche nel caso in cui l'assorbitore standard fosse interamente in rame. Utilizzando lo stesso modello della simulazione precedente, si è considerata sempre l'acqua come fluido termovettore e si è scelto come materiale il rame con le caratteristiche standard presenti nella libreria *COMSOL*:

Calore specifico a pressione costante	$385 \frac{J}{kg K}$
Conducibilità termica	$400 \frac{W}{m K}$
Densità	$8960 \frac{kg}{m^3}$

Tabella 10: Proprietà del rame da libreria *COMSOL*.

Procedendo anche in questo caso con uno studio di tipo stazionario si sono andati a confrontare i risultati ottenuti:

	Strip Ecobel	Strip standard - alluminio	Strip standard - rame
Geometria			
Materiale	Alluminio	Alluminio	Rame
T ingresso acqua	20 °C	20 °C	20 °C
Flusso imposto sulla superficie superiore	850 W/m ²	850 W/m ²	850 W/m ²
T uscita acqua	25,31°C	24,81°C	24,45°C
T media superficie superiore	25,55°C	38,97°C	33,99°C
T media volume assorbitore	25,55°C	37,44°C	33,08°C

Tabella 11: Confronto dei risultati ottenuti con l'assorbitore Ecobel e quello standard in alluminio e in rame con flusso imposto sulla superficie captante.

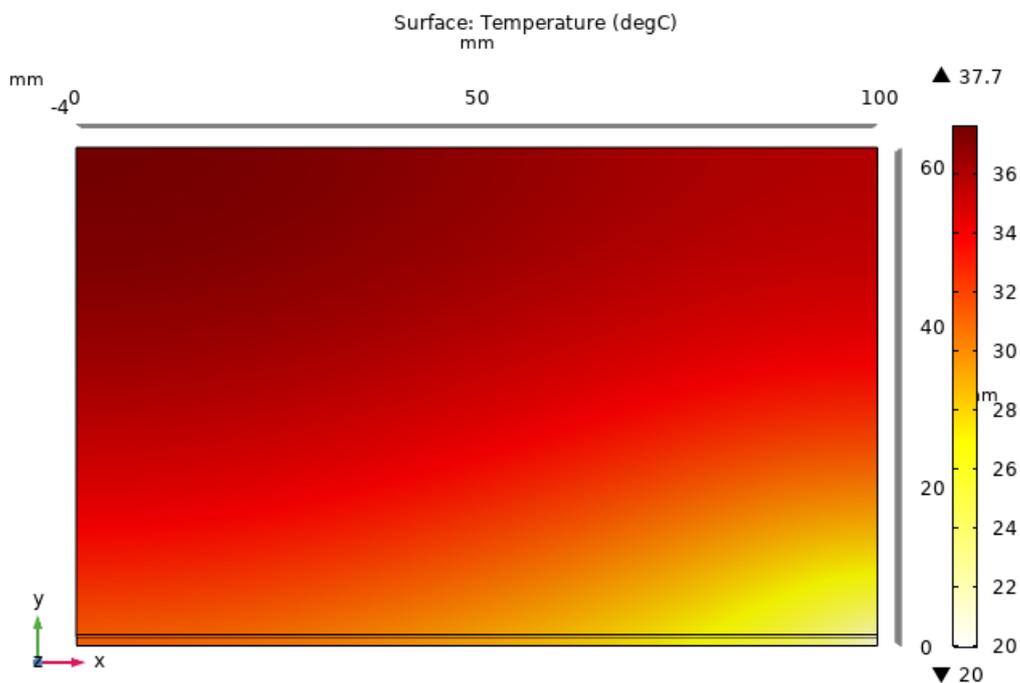


Figura 46: Strip standard in rame- Distribuzione della temperatura sulla superficie ricevente la radiazione solare della strip standard una volta raggiunto lo stato stazionario.

L'assorbitore in rame, al raggiungimento di una situazione stazionaria, si trova ad una temperatura media dell'intero volume di 33,08 °C: valore più basso rispetto allo stesso

assorbitore composto di alluminio ma comunque maggiore rispetto all'assorbitore Ecobel. Prendendo nuovamente in considerazione l'equazione di scambio termico convettivo:

$$Q_{conv} = h \cdot A \cdot \Delta T$$

si può affermare che il prodotto $h \cdot A$ che determina la qualità dello scambio di calore sarà maggiore nel caso dell'assorbitore Ecobel in alluminio, seguito da quello standard in rame e infine da quello standard in alluminio.

Bisogna inoltre precisare che in queste simulazioni tutte le superfici non interessate al ricevimento della radiazione solare sono state considerate adiabatiche, ma nella realtà sono soggette a fenomeni di convezione generati dalla differenza di temperatura tra la piastra e l'aria circostante:

$$Q_{conv} = h \cdot A \cdot (T_{piastra} - T_{esterna})$$

Questo tipo di perdita viene limitata con l'utilizzo di materiale isolante sulla faccia posteriore della strip e la copertura con uno o più vetri sulla faccia anteriore, ma non è comunque del tutto evitabile. Considerando i risultati ottenuti nelle simulazioni precedenti, si è dimostrato che la strip standard, rispetto a quella Ecobel, ha un'efficienza peggiore nello scambio termico tra solido e fluido e quindi ha necessità di raggiungere temperature maggiori della piastra per poter avere lo stesso salto di temperatura dell'acqua tra ingresso e uscita. Questa maggiore temperatura della strip non corrisponde quindi ad un maggiore riscaldamento dell'acqua e anzi significa avere anche un maggiore ΔT rispetto all'aria esterna, che si traduce in maggiori perdite per convezione.

3.3 Trattamenti selettivi

Continuando le considerazioni ed analisi relative all'assorbitore solare Ecobel, cuore del collettore solare termico, si fa riferimento al materiale di cui è composto ricordando le caratteristiche principali che esso deve avere in modo tale da rendere il più efficiente possibile l'assorbimento della radiazione solare e lo scambio termico con il fluido. Ci si riferisce quindi alla conducibilità termica, l'elevata capacità di assorbimento e la bassa emissione. Per quanto riguarda la conducibilità termica ci si basa sull'utilizzo di materiali noti per le buone capacità di trasmettere il calore, quindi rame e alluminio; il rame

presenta infatti una conducibilità termica maggiore, ma vista la convenienza economica del secondo, si è optato per il suo utilizzo. Incrementando la capacità di assorbimento della radiazione solare e riducendo le emissioni termiche, si riuscirebbe ad aumentare la frazione di energia disponibile ad essere trasferita al fluido, il quale potrebbe raggiungere temperature più elevate. A questo scopo bisogna procedere con la scelta di un trattamento selettivo e per trattare questi concetti, si rimanda alla teoria dello scambio termico per irraggiamento.

3.3.1 Scambio termico per irraggiamento

Se si considera un corpo caldo collocato in un ambiente in cui si è creato il vuoto e le cui pareti si trovino ad una temperatura uniforme inferiore a quella del corpo, dopo un certo tempo si potrà notare che il corpo si è raffreddato raggiungendo l'equilibrio termico con le pareti. Essendo l'ambiente privo di materia, lo scambio termico non può essere avvenuto né per conduzione né per convezione, ma per un terzo meccanismo di trasmissione di calore: l'irraggiamento. Si tratta di un trasferimento di energia che avviene attraverso onde elettromagnetiche; la radiazione termica occupa la parte di spettro elettromagnetico che va da circa 0,1 a 100 μm comprendendo quindi l'intera radiazione visibile ed infrarossa e parte della radiazione ultravioletta (la radiazione solare è compresa quasi interamente nella banda di lunghezza tra 0,1 e 3 μm). Quando questa incide su un oggetto possono avvenire tre fenomeni diversi in percentuali differenti [32]:

- 1) la radiazione viene assorbita dalla superficie dell'oggetto causando una variazione della temperatura
- 2) la radiazione viene riflessa dalla superficie dell'oggetto, senza causare una variazione della temperatura
- 3) la radiazione attraversa l'oggetto senza causare una variazione di temperatura.

Per descrivere questi fenomeni si utilizzano tre grandezze (assorbimento α , riflessione ρ e trasmissione τ) di valore compreso tra 0 e 1 che rappresentano la percentuale di radiazione che viene rispettivamente assorbita, riflessa e trasmessa e devono rispettare la seguente relazione:

$$\alpha + \rho + \tau = 1$$

A questi fenomeni si aggiunge quello della capacità del corpo di emettere una radiazione a seconda della temperatura alla quale esso si trova. Questa caratteristica viene descritta dall'emissività ε , definita come il rapporto tra la radiazione emessa dalla superficie del corpo e quella teorica emessa da un corpo nero della stessa forma e dimensione, che si trovi alla stessa temperatura. Si tratta anch'esso di un parametro adimensionale compreso nel range tra 0 e 1. L'energia rilasciata tramite questo fenomeno viene descritta dalla legge di Stefan-Boltzmann corretta con il parametro dell'emissività:

$$E = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

Dove σ è la costante di Stefan-Boltzmann che ha un valore di $5,670 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$, T è la temperatura alla quale si trova il corpo ed ε la sua emissività.

Considerando l'assorbitore di un collettore solare, questo deve avere caratteristiche tali da avvicinarsi il più possibile ad un corpo nero per quanto riguarda la capacità di assorbimento (tendendo a valori di $\alpha = 1$), mentre dovrà avere l'emissività ε più bassa possibile, in modo tale da minimizzare la radiazione ri-emessa dalla superficie verso l'ambiente circostante, in quanto essa si traduce in perdita di energia e quindi meno calore trasferibile al fluido.

3.3.2 Trattamenti selettivi in commercio

L'alluminio di cui è interamente composto l'assorbitore Ecobel presenta valori di assorbimento ed emissione della radiazione solare non ottimali; si parla infatti di un coefficiente di assorbimento $\alpha = 0,4$ e di emissività $\varepsilon = 0,3$ [33],[34]. Per migliorare queste proprietà ed assorbire più radiazione solare possibile, è quindi necessario ricorrere all'utilizzo di trattamenti selettivi in grado di aumentare la capacità di assorbimento della radiazione solare e diminuire l'emissione. Il Sole irradia la maggior parte della sua energia a lunghezze d'onda inferiori a $2,5 \mu\text{m}$, mentre il calore emesso da una superficie ha lunghezze d'onda maggiori di $2,5 \mu\text{m}$; quindi un trattamento selettivo performante permette di avere alti valori di assorbimento delle basse lunghezze d'onda e bassi valori di emissione nelle alte lunghezze d'onda.

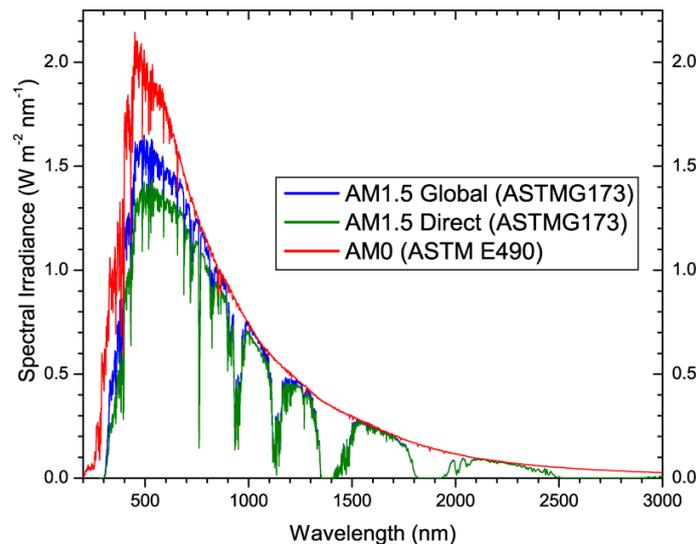


Figura 47: Spettro solare standard [35].

La linea classica di produzione di collettori solari prevede l'utilizzo di assorbitori in rame o alluminio con trattamento selettivo già presente sul foglio metallico dell'assorbitore, applicato nella maggior parte dei casi con tecniche di PVD (*Physical Vapor Deposition*) che permettono la realizzazione di film molto sottili e performanti. Il foglio metallico così trattato viene poi saldato al condotto del fluido termovettore.

Nella maggior parte dei casi il trattamento selettivo viene prodotto da alcune multinazionali specializzate in questo ambito che forniscono quindi direttamente il prodotto finito e avvolto in rulli. Questo presenta dei limiti: sono processi altamente meccanizzati applicabili ai fogli metallici delle strip prima che queste vengano saldate al condotto; ciò significa che anche le dimensioni della strip sono fissate entro un certo range e i macchinari non sono utilizzabili per strip di diverse caratteristiche.



Figura 48: Produzione trattamento selettivo su strip solari – Alanod [36].

Per trovare una soluzione che sia applicabile all'assorbitore solare oggetto di studio in maniera autonoma e che sia valida e competitiva con i trattamenti selettivi in commercio, si sono andati ad analizzare i prodotti maggiormente presenti sul mercato. Le caratteristiche più importanti da tenere in considerazione sono i coefficienti di assorbimento ed emissione.

Nella seguente tabella sono stati rappresentati i principali prodotti in commercio, con i rispettivi valori caratteristici di assorbimento ed emissione:

Prodotto	Assorbimento	Emissione
Black Chrome (Innovar)	0,94 – 0,98	0,08 – 0,12
Crystal Clear (Thermafin)	0,96	0,08
Mirotherm (Alanod)	0,94 – 0,96	0,03 – 0,07
Bluetec (Bluetec)	0,93 – 0,97	0,03 – 0,07
Tinox (Almecco)	0,93 – 0,97	0,02 – 0,06

Tabella 12: Valori di assorbimento ed emissione per i principali trattamenti selettivi in commercio [37].

Il parametro più critico è senza dubbio l'emissione piuttosto che l'assorbimento: è abbastanza semplice avere valori di assorbimento che superano il 90%, mentre scendere sotto il 10% di emissione risulta complicato oltre a comportare un aumento considerevole dei prezzi. Questi trattamenti sono realizzati tramite il procedimento di Physical Vapor Deposition, molto diffuso per la realizzazione di film sottili per diversi scopi. Esso si basa su processi di deposizione atomica nei quali il materiale viene evaporato da una sorgente solida o liquida in forma di atomi o molecole e trasportato in forma di vapore attraverso un ambiente sottovuoto fino al substrato dove condensa. In questo modo si possono creare dei film sottili con uno spessore che può andare da qualche nanometro a qualche micrometro. Questi strati possono anche essere sovrapposti in modo da realizzare un rivestimento multistrato, fino ad arrivare a depositi piuttosto spessi. Vi sono diverse tecniche per realizzare un processo PVD; i principali utilizzati allo scopo di creare uno strato di trattamento selettivo sono la deposizione tramite cannone elettronico e lo sputtering [38]:

- Deposizione tramite cannone elettronico: viene generata un'elevata corrente elettronica, il fascio di elettroni viene accelerato e diretto verso il materiale da

evaporare solitamente contenuto in un crogiolo in grafite (materiale con alta temperatura di fusione); in questo modo gli elettroni incidenti dissipano la loro energia cinetica nel materiale provocandone il suo riscaldamento e quindi l'evaporazione. Questo vapore carico di particelle viene utilizzato per rivestire le superfici.

- **Sputtering:** è un processo in cui il materiale viene vaporizzato a partire da una superficie definita "target" attraverso un procedimento fisico e non termico. Gli atomi superficiali del target vengono fisicamente estratti dalla superficie solida grazie all'energia trasferita loro da un bombardamento di particelle atomiche.

Tra i trattamenti selettivi presi in considerazione, il più performante è quello realizzato da Almeco Group con il rivestimento selettivo "TiNOX". Esso è infatti in grado di reagire diversamente a lunghezze d'onda sopra e sotto i 2,5 μm , come mostrato nel seguente grafico:

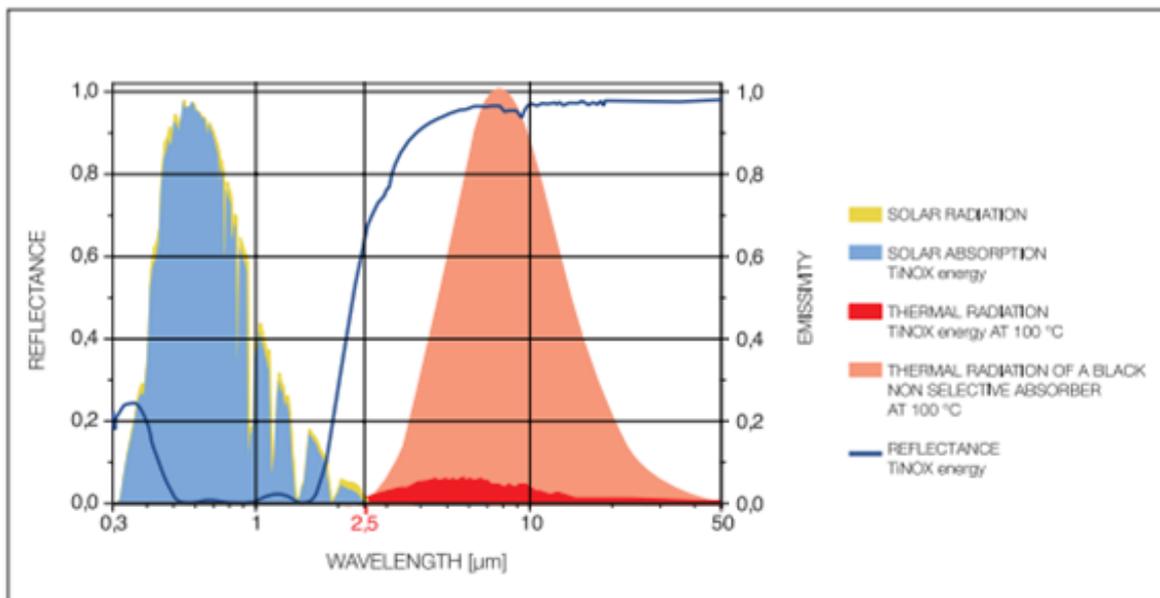


Figura 49: Trattamento selettivo TiNOX – Almeco Group. Rappresentazione grafica delle performance di riflessione (linea blu) e assorbimento (area blu) riferiti all'asse di sinistra e di emissione (aree rosse) riferite all'asse di destra [39].

L'area blu rappresenta la capacità di assorbimento della radiazione solare. L'area rosso chiaro è l'emissione di radiazione termica di un assorbitore senza trattamento selettivo, notevolmente maggiore rispetto a quella in rosso scuro, tipica invece del rivestimento TiNOX. Viene rappresentata un'ulteriore caratteristica: la curva blu indica le proprietà riflesse del rivestimento selettivo; considerando l'equazione $\alpha + \rho + \tau = 1$ in cui

trattandosi di un corpo opaco la trasmittività τ è nulla, si ha la seguente relazione tra il coefficiente di riflessione e di assorbimento:

$$\alpha = 1 - \rho$$

E quindi un valore di assorbimento elevato laddove la riflessione è bassa. È possibile fare un'ulteriore considerazione che mette in relazione il coefficiente di assorbimento con quello di emissione tramite la *legge di Kirchhoff*, per la quale i due coefficienti si possono assumere equivalenti, perciò vale anche $\varepsilon = 1 - \rho$ [32]. La riflessione è molto bassa nel range di lunghezze d'onda della radiazione solare in modo tale da assorbire la maggiore radiazione solare possibile ed è invece elevata nel range di lunghezza d'onda dell'infrarosso cosicché si possa avere bassa emissione di radiazione termica. I coefficienti caratteristici di questo tipo di trattamento sono: $\alpha = 95\% \pm 2\%$ ed $\varepsilon = 4\% \pm 2\%$ [39].

La scelta del trattamento selettivo da applicare all'assorbitore Ecobel, è stata dettata sia dalla volontà di autonomia nella realizzazione dell'assorbitore, sia dalle limitazioni poste dai produttori degli altri trattamenti selettivi in commercio; dal catalogo pubblicato da Almeco si può infatti comprendere che la tecnologia da loro sviluppata è applicabile a degli assorbitori in alluminio che abbiano uno spessore compreso tra 0,20 e 0,75 mm, molto minore rispetto al caso da noi considerato che presenta 2 mm di spessore. Sulla medesima linea produttiva si trovano anche gli altri produttori. Si sono quindi considerate due possibili alternative: l'applicazione di una vernice selettiva e l'applicazione di pellicole adesive selettive.

Solar Energy Corporation (SOLEC), in America, ha formulato una vernice adatta all'uso specifico di collettori solari termici: *SOLKOTE HI/SORB-II*. Essa permette la realizzazione di un rivestimento applicabile con molta facilità, economico e con buone caratteristiche ottiche dipendenti dallo spessore: l'emissività può variare da un valore del 20% al 49% e l'assorbimento da 88% a 94% [40]. Questo materiale andrebbe dunque ad aumentare notevolmente la capacità di assorbimento dell'alluminio e a ridurre leggermente o lasciare invariata quella di emissione ottenendo quindi complessivamente un miglioramento in termini di caratteristiche ottiche e termiche. Nel grafico di *Figura 50* viene riportata la capacità di riflessione alle basse lunghezze d'onda ($< 2,5 \mu\text{m}$) e quindi basandosi sulle stesse considerazioni teoriche fatte in precedenza si ricavano i valori di assorbimento della radiazione solare: un elevato assorbimento laddove la riflessione è bassa.

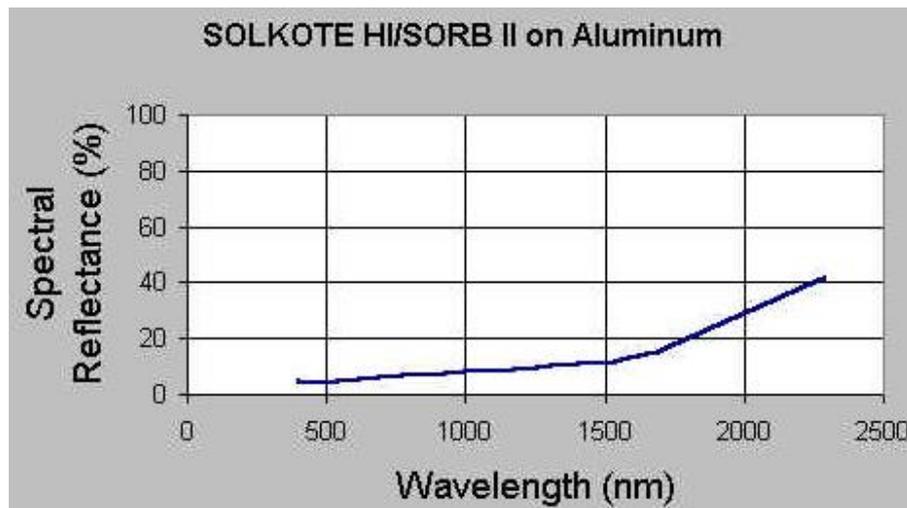


Figura 50: Rappresentazione grafica della capacità di riflessione di una superficie di alluminio con strato di vernice Solkote, a lunghezza d'onda $< 2,5 \mu\text{m}$. Minore è la riflessione, maggiore sarà l'assorbimento [40].

Questo tipo di vernice può essere applicato su diversi substrati come alluminio, rame, acciaio e plastiche, precedentemente preparati in modo tale che siano ben puliti. La vernice può essere applicata in maniera molto semplice tramite spray.

Un'altra possibilità è quella di applicare sulla superficie dell'assorbitore solare delle pellicole adesive. In particolare, si fa riferimento alle pellicole Nano Black prodotte da Acktar - Advanced Coatings. L'andamento della capacità di riflessione di questo tipo di trattamento è la medesima del caso precedente ma con valori più elevati per quanto riguarda le ampie lunghezze d'onda, che si traduce in valori più bassi nel coefficiente di emissione. Si definisce quindi un coefficiente di assorbimento del 90-95% e un coefficiente di emissione del 5-10%.

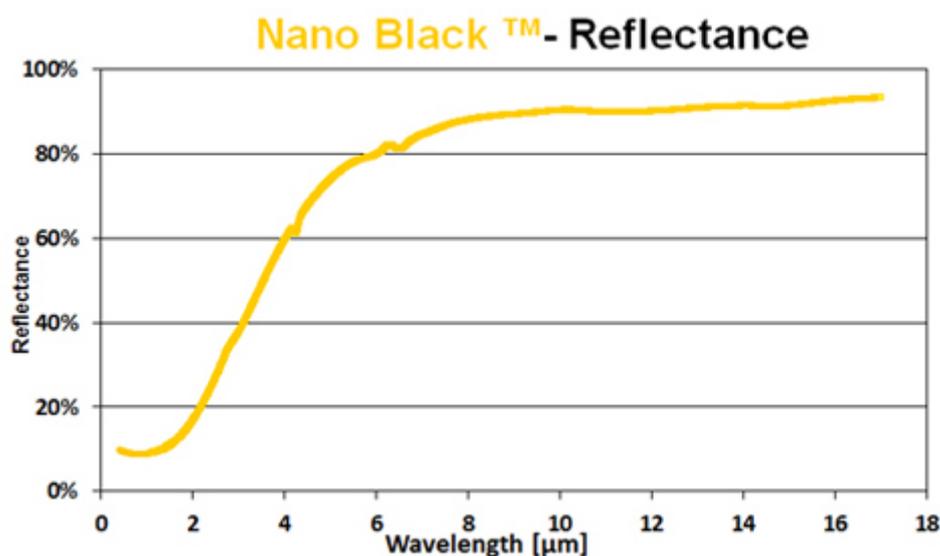


Figura 51: Rappresentazione grafica della capacità di riflessione di una superficie con l'applicazione della pellicola Nano Black (Acktar Advanced Coatings) [41].

Le performance di questa soluzione sono migliori ma il costo di questo tipo di trattamento è notevolmente maggiore. Un buon compromesso potrebbe quindi essere quella di partire dalla soluzione con verniciatura, provando a migliorarne le performance.

3.3.3 Lavorazione meccanica superficiale

Per migliorare le performance dell'assorbitore trattato con vernice Solkote, si è pensato di effettuare una lavorazione meccanica precedente alla verniciatura: l'idea è quella di produrre una superficie macroscopicamente ruvida, che presenti una geometria tale per cui sia in grado di assorbire più energia solare grazie alle riflessioni multiple dovute agli effetti geometrici.

Una superficie corrugata ideale presenta alto assorbimento delle basse lunghezze d'onda e bassa emissività alle alte lunghezze d'onda. Dalla letteratura si può evincere che una situazione il più simile a quella ideale si riesce ad ottenere realizzando dei dendriti o microstrutture porose con una dimensione caratteristica comparabile alla lunghezza d'onda della radiazione solare incidente. In questo modo i fotoni caratterizzati da bassa lunghezza d'onda vengono facilmente intrappolati all'interno della superficie, mentre i fotoni di lunghezza d'onda maggiore della dimensione dei dendriti, vedono la superficie come piatta [42].

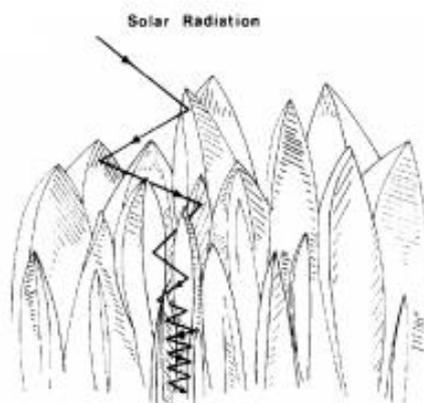


Figura 52: Rappresentazione schematica di una superficie caratterizzata dalla presenza di dendriti. La radiazione solare incidente può essere riflessa internamente fino a 50 volte [42].

Una superficie di questo tipo ha bisogno però di avere anche altre caratteristiche come la resistenza alle alte temperature e deve essere protetta dal contatto e dalle abrasioni che potrebbero provocare un danneggiamento della superficie. Al fine di proteggere la superficie possono essere utilizzati dei rivestimenti polimerici. Oltre alla configurazione

a dendriti, in letteratura si trovano anche altre tipologie di lavorazioni superficiali come una zigrinatura a sezione triangolare con profondità di 1 mm [43]:

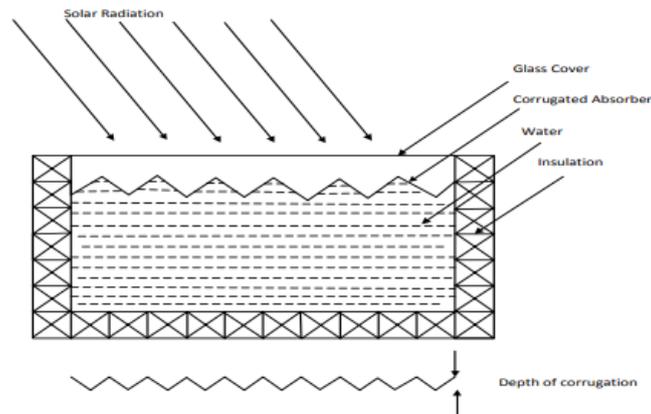


Figura 53: Sezione di un collettore solare caratterizzato da un assorbitore di superficie corrugata a sezione triangolare con profondità della zigrinatura di 1 mm [43].

A seguito di queste considerazioni si è cercata una soluzione che fosse facilmente adattabile all'assorbitore oggetto di questo studio; ricordando che esso viene realizzato tramite estrusione, non è possibile ottenere una superficie che presenti dei dendriti irregolari, simile quindi alla superficie di *Figura 50*, ma ci si può avvicinare molto a quella più regolare di *Figura 51*. Infatti, in fase di estrusione, la faccia superiore della strip può essere lavorata in modo tale da ottenere una superficie striata corrugata regolare, con una profondità della zigrinatura di 1 mm.

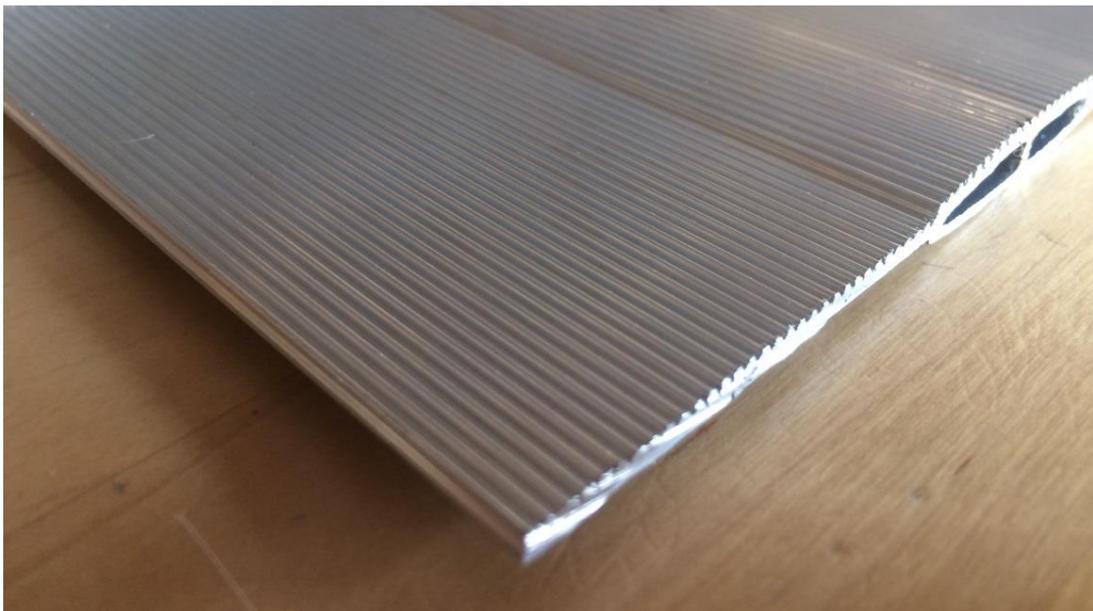


Figura 54: Assorbitore con trattamento meccanico superficiale.

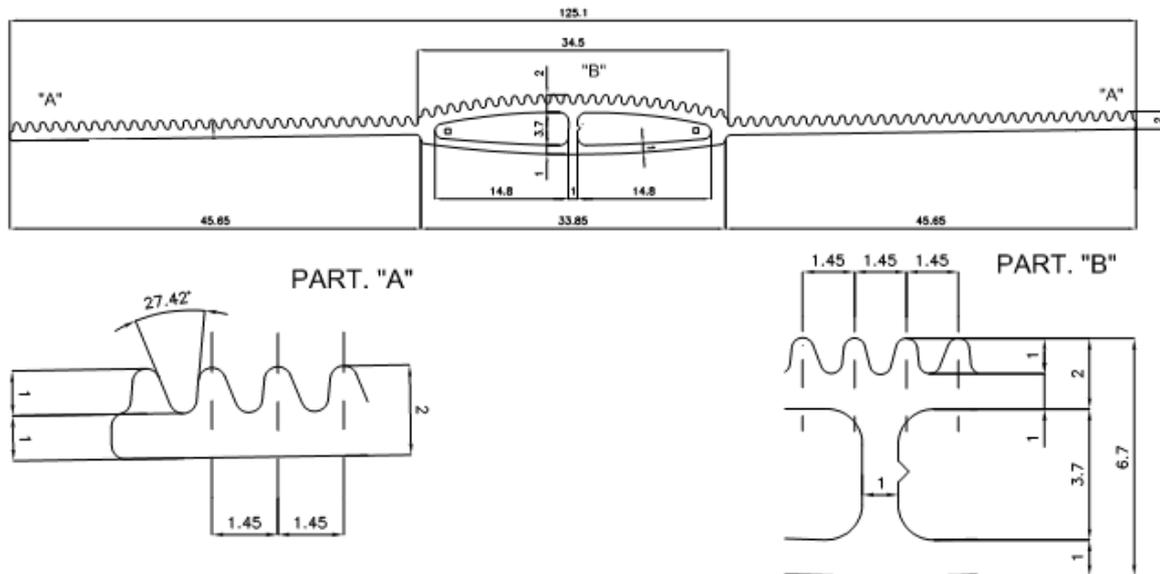


Figura 55: Disegno della lavorazione superficiale della strip.

Per poter capire se questa scelta permette di avvicinarsi a valori di efficienza comunque elevati, si è deciso di isolare un elemento di assorbitore in cui è presente la lavorazione superficiale e uno liscio e si sono andati a studiare nuovamente in ambiente *COMSOL* effettuandone delle simulazioni. La decisione di isolare un solo elemento e non tutta la strip è stata dettata dall'impossibilità di importare il file CAD (.dwg) nel model builder di *COMSOL* a causa di una limitazione nella licenza e la difficoltà di realizzazione della totalità della geometria corrugata tramite gli strumenti forniti da *COMSOL*.

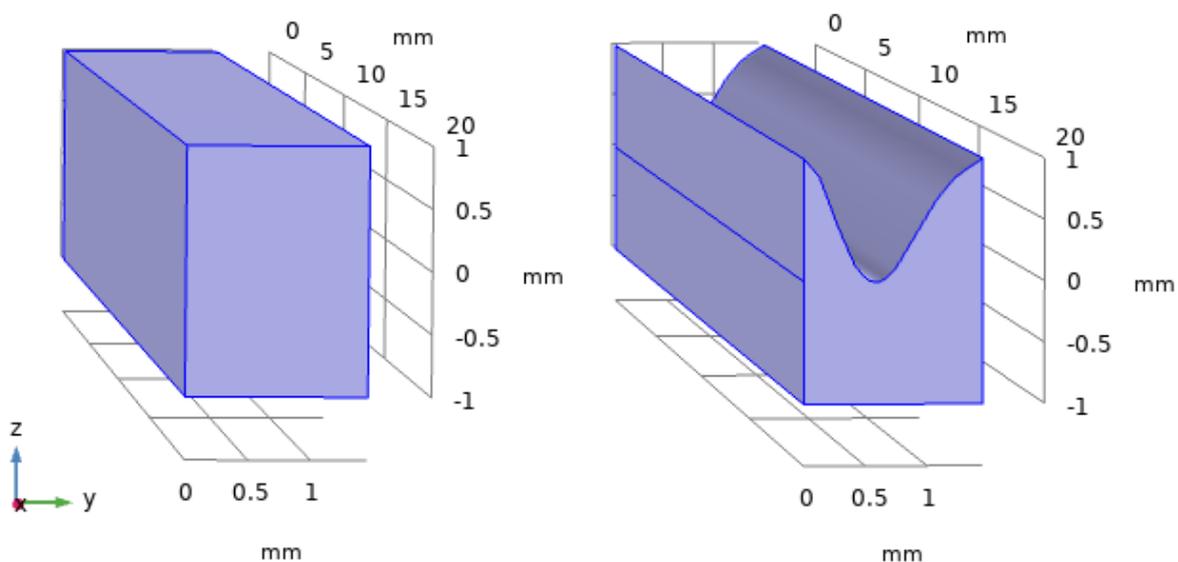


Figura 56: Rappresentazione sezione liscia e sezione corrugata in ambiente *COMSOL*.

Si è scelta una lunghezza di 20 mm per diminuire i costi computazionali e si è rispettato lo spessore previsto dal progetto iniziale di 2 mm; nel caso corrugato, la lavorazione superficiale va ad influire su uno spessore di 1 mm, quello più esterno. Il materiale è alluminio per entrambi i casi, con le stesse proprietà delle simulazioni svolte nel *Paragrafo 3.2.1, Tabella 4*.

Per questa prima simulazione si sono supposte adiabatiche tutte le superfici tranne quella superiore, soggetta alla condizione “Surface-to-Surface Radiation” che permette di modellare il trasferimento di calore emesso da una radiazione. In particolare, è possibile l’inserimento di una sorgente di radiazione esterna alla quale si può dare come posizione quella solare determinata da una certa località tramite latitudine e longitudine (si sono scelte quelle relative alla posizione in cui si trova l’azienda Eco Innovest – Ecobel, a Rivoli), da una data ed un orario; è stato scelto il 21 giugno del 2020, solstizio estivo, e l’orario delle 13:30 essendo il momento di culminazione, in cui cioè il Sole raggiunge la sua massima altezza. L’irradianza deve invece essere aggiunta manualmente e si è scelto di fissarla a 850 W/m^2 come viene solitamente fatto durante i test sui collettori solari.

Località		Data		Ora
Latitudine (+N)	45.068391	Giorno	21	13:30
Longitudine (+E)	7.548464	Mese	06	Irradianza solare
Time zone (+UTC)	+2	Anno	2020	850 W/m^2

Tabella 13: Dati per l'impostazione della sorgente di radiazione esterna.

Si è poi definita, per quanto riguarda la superficie soggetta a radiazione, una dipendenza dalla lunghezza d’onda delle proprietà radiative in modo tale da poter definire dei valori significativi per i coefficienti di assorbimento (a basse lunghezze d’onda) e di emissione (per alte lunghezze d’onda). Considerando l’elemento in alluminio, senza l’applicazione di un trattamento superficiale, si è attribuito il valore di 0,4 per l’assorbimento e 0,3 per l’emissione [33][34].

Per il caso della superficie corrugata si è scelta una mesh di tipo “extra fine” che fosse in grado di seguire meglio la geometria. Mentre nell’altro caso, di geometria molto più semplice, si è optato per una mesh di dimensione più grossolana:

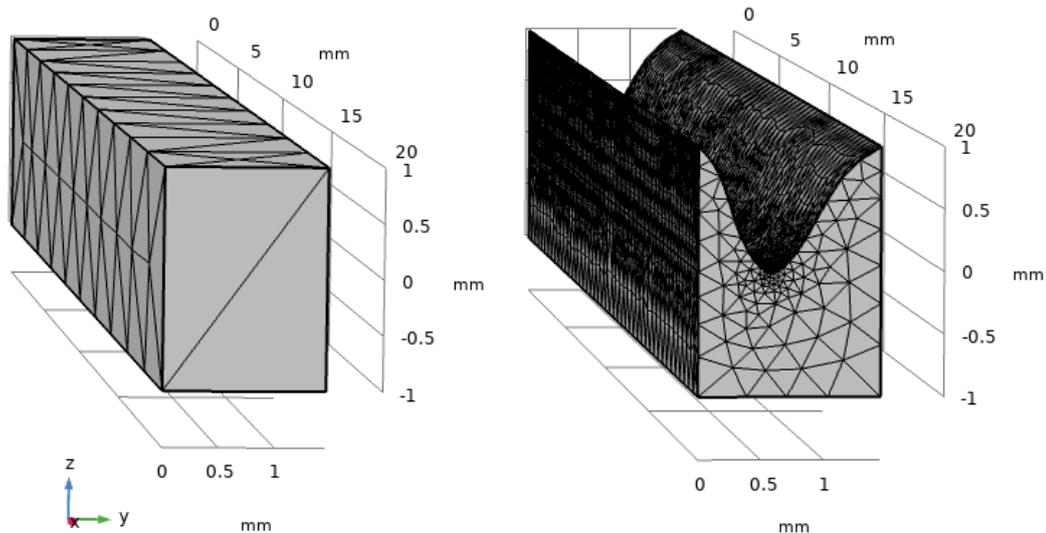


Figura 57: Rappresentazione mesh.

Andando ad effettuare uno studio di tipo stazionario si è calcolata la temperatura media raggiunta dal volume preso in considerazione nei due casi raggiungendo i seguenti valori:

Superficie liscia	Superficie corrugata
126,03 °C	122,58 °C

Tabella 14: Temperatura media del volume considerato con uno studio stazionario.

Da questa prima analisi sembrerebbe che la superficie liscia riesca a raggiungere temperature più elevate e quindi ad essere più vantaggiosa rispetto ad effettuare un trattamento meccanico superficiale. Bisogna però considerare che le pareti sono state considerate tutte adiabatiche tranne quella sulla quale incide la radiazione solare, quindi gli unici scambi termici che avvengono sono l'assorbimento della radiazione solare e l'emissione di calore per irraggiamento da parte della superficie, ma lo scopo dell'assorbitore solare è quello di trasferire al fluido il calore assorbito dalla radiazione.

Partendo da questa considerazione si è proceduto analizzando una situazione in cui, al di sotto del volume di alluminio, ci fosse proprio il fluido: si è quindi isolata una piccola porzione della sezione centrale dell'assorbitore, quella appunto dove si ha il canale dedicato al fluido termovettore, e si è considerata una lunghezza di 100 mm.

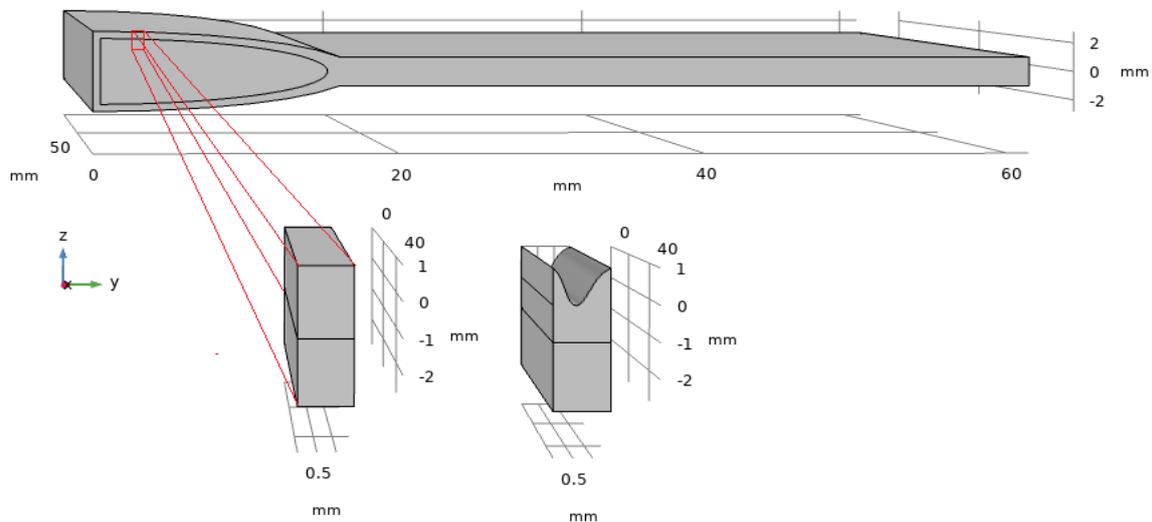


Figura 58: Dettaglio sezione soggetta alla radiazione solare e al contatto con il fluido.

Anche in questo caso si è utilizzata come sorgente di calore la radiazione solare con le caratteristiche riportate in *Tabella 13* e i valori di assorbimento ed emissione dell'alluminio già discussi per la simulazione precedente. Ciò che invece cambia è la parte inferiore del sistema, infatti non si ha più una superficie adiabatica, ma la superficie in alluminio è in contatto con il fluido (acqua) che scorre con ipotesi di flusso laminare ad una velocità media di 0,00493 m/s. Tra la parte solida e quella fluida è stata imposta una condizione di trasferimento di calore partendo da un valore iniziale, sia dell'alluminio sia dell'acqua, di 20 °C. Effettuando nuovamente uno studio di tipo stazionario si è andata a valutare la temperatura media dell'acqua in uscita dalla sezione di assorbitore e la temperatura media dell'intero volume di alluminio. Di seguito sono riportati i risultati ottenuti una volta raggiunto lo stato stazionario:

	Temperatura dell'acqua in entrata	Temperatura media dell'acqua in uscita	Temperatura media dell'assorbitore
	20,0 °C	20,6 °C	20,6 °C
	20.0 °C	20.9 °C	20.8 °C

Tabella 15: Risultati ottenuti con studio stazionario.

I risultati ottenuti in questo studio differiscono notevolmente dai precedenti (*Tabella 14*), infatti ora è l'assorbitore con superficie corrugata a raggiungere una temperatura più elevata e se si va a considerare la temperatura media dell'acqua in uscita, essa risulta maggiore rispetto al caso in cui la superficie è liscia.

Per descrivere ciò che avviene nella strip si può scrivere per il primo caso (sezione di strip senza fluido ma con superficie adiabatica) il seguente bilancio di energia:

$$Q_{rad} = Q_{irr}$$

Gli unici scambi di calore che possono avvenire sono infatti quello radiativo tra la sorgente di calore (il Sole) e la strip e quello per irraggiamento, cioè dalla superficie della strip all'ambiente circostante. In questo bilancio, nel caso di strip corrugata e quindi con una maggiore superficie ma un minore volume, l'irraggiamento risulta maggiore e la piastra non riesce a raggiungere una temperatura maggiore rispetto al caso di superficie liscia.

Nel secondo studio, avendo modellato anche lo scorrimento del fluido, si inserisce invece una terza componente di scambio termico e cioè una condizione di scambio termico di tipo convettivo tra solido e fluido:

$$Q_{rad} = Q_{irr} + Q_{conv}$$

La componente di scambio termico convettivo con l'acqua (Q_{conv}) risulta molto più determinante rispetto alla componente di irraggiamento e quindi la piastra corrugata riesce, grazie alla sua maggiore superficie di captazione e alla riflessione dei raggi nella superficie corrugata, a raggiungere temperature maggiori che consentono un migliore e più rapido scambio termico tra solido e fluido. In questo modo l'acqua riesce a raggiungere temperature più elevate.

4. Analisi sperimentali sull'assorbitore

In affiancamento alle valutazioni teoriche sviluppate nei capitoli precedenti, è stata realizzata una valutazione sperimentale allo scopo di ottenere un confronto realistico tra le performance di diverse tipologie di strip. Lo studio è stato incentrato sulle strip che compongono l'assorbitore, essendo questo l'elemento che più si discosta dai classici collettori solari che si trovano in commercio. Si è quindi realizzato un sistema di tre assorbitori con caratteristiche differenti, ciascuno composto da 3 strip. Le strip considerate sono:

- Strip ad elevata diffusione commerciale con saldatura ad ultrasuoni

Si sono scelte tre strip interamente in rame prodotte da Innovar caratterizzate da una saldatura ad ultrasuoni tra la superficie assorbente e il condotto del fluido termovettore. Il trattamento selettivo è realizzato con la tecnica PVD (*Physical Vapor Deposition*) ed è un trattamento al cromo nero altamente performante di cui si riportano i valori caratteristici di seguito:

Prodotto	Assorbimento	Emissione
Black Chrome (Innovar)	0,94 – 0,98	0,08 – 0,12

Tabella 16: Valori caratteristici del trattamento selettivo al cromo nero per le strip Innovar.

Le tre strip sono state posizionate in parallelo e saldate ad un tubo collettore in rame sia per il lato di ingresso sia per quello di uscita.

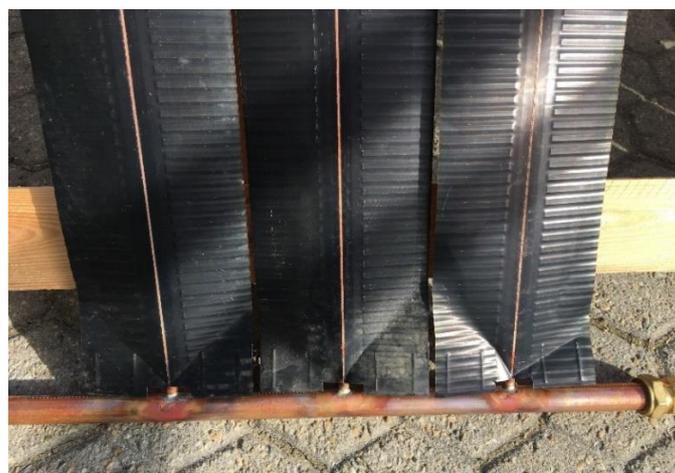


Figura 59: Assorbitore composto da strip ad elevata diffusione commerciale con saldatura ad ultrasuoni e trattamento selettivo Black Chrome.

- Strip Ecobel

Per l'assorbitore Ecobel si sono scelte due diverse configurazioni in modo tale da avere un confronto tra i due trattamenti selettivi possibili precedentemente discussi:

→ La prima presenta una superficie liscia alla quale sono state applicate manualmente le pellicole selettive Nano Black prodotte da Acktar. Esse vengono fornite in fogli adesivi con i quali si è andata a ricoprire l'interezza della superficie esposta alla radiazione solare. Anche in questo caso si sono messe in parallelo tre strip della lunghezza di 2 metri e sono state saldate a due tubi collettori in alluminio. Si riportano di seguito i valori caratteristici del trattamento selettivo:

Prodotto	Assorbimento	Emissione
Nano Black - Acktar	0,90 - 0,95	0,05 - 0,10

Tabella 17: Valori caratteristici del trattamento selettivo Nano Black prodotto da Acktar.

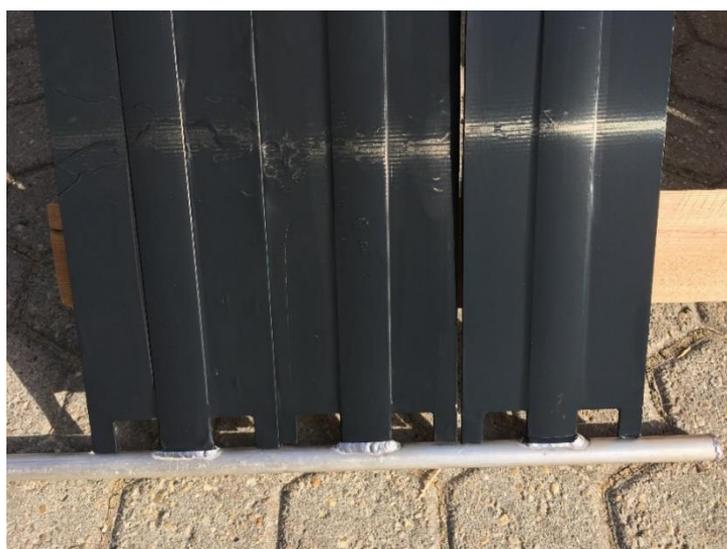


Figura 60: Assorbitore composto da strip Ecobel con pellicole selettive Nano Black prodotte da Acktar.

→ La seconda configurazione presenta sempre tre strip in parallelo della lunghezza di 2 metri, ma in questo caso la superficie esposta alla radiazione solare presenta la zigrinatura discussa nel *Paragrafo 3.3.3* e la vernice Solkote come trattamento selettivo. Si sono poi anch'esse saldate a due tubi collettori in alluminio.

Prodotto	Assorbimento	Emissione
Solkote - SolEC	0,88 - 0,94	0,20 - 0,49

Tabella 18: Valori caratteristici del trattamento selettivo Solkote prodotto da Solar Energy Corporation.



Figura 61: Assorbitore composto da strip Ecobel con trattamento meccanico superficiale e verniciatura spray Solkote.

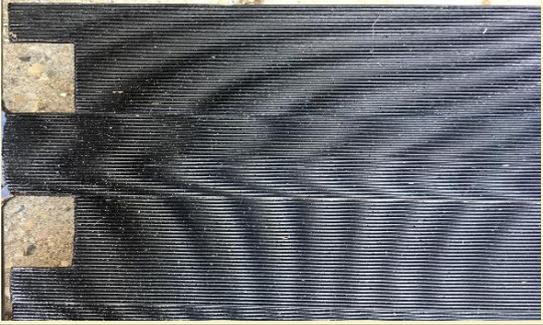
Tipologia di strip	Trattamento selettivo	Fotografia campione
Strip ad elevata diffusione commerciale con saldatura ad ultrasuoni	PVD realizzato da Innovar	
Strip Ecobel con superficie liscia	Pellicole adesive Nano Black fornite da Acktar	
Strip Ecobel con superficie corrugata	Vernice Solkote	

Tabella 19: Tipologie di strip prese in considerazione per la prova sperimentale e trattamento selettivo a loro applicato.

Si è andato poi a creare un circuito chiuso alimentato da una pompa collegata ai tubi di alimentazione e di scarico dei tre sistemi di strip; in questo modo è stato reso possibile il passaggio della miscela di acqua e glicole propilenico all'interno dei tre sistemi di strip regolando la portata sull'uscita tramite l'utilizzo di tre flussometri. In serie ai flussometri sono stati inseriti dei pozzetti in ottone per il rilevamento della temperatura:



Figura 62: A sinistra flussometri Caleffi in ottone con valvola di bilanciamento e lettura diretta della portata; a destra flussometri con pozzetti per il rilevamento della temperatura.

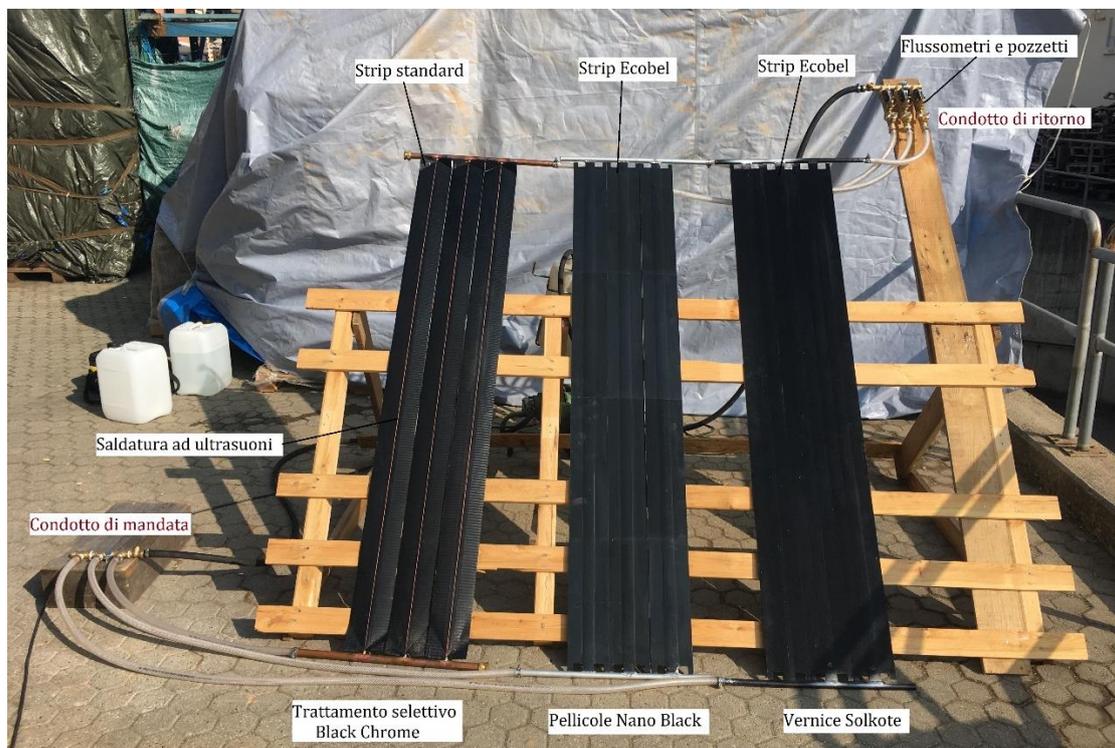


Figura 63: Sistema completo per la realizzazione del test con due diverse tipologie di strip e tre diversi trattamenti superficiali.

Il test è stato realizzato nella giornata del 5 marzo 2021, nello spazio adiacente l'azienda Ecobel, a Rivoli. La struttura di sostegno per le strip è stata orientata in modo tale da essere rivolta verso sud:



Figura 64: Coordinate e orientamento della struttura per la prova sperimentale.

Dopo una prima prova di tenuta delle saldature e dei collegamenti idraulici a diverse portate, si è proceduto a far circolare il fluido nelle diverse strip in modo tale da raggiungere temperature più elevate e quindi più rappresentative. Le temperature sono state monitorate costantemente utilizzando tre termometri bimetallici Caleffi ad immersione, inseriti nei pozzetti.



Figura 65: Flussometri e pozzetti con termometri bimetallici Caleffi ad immersione.

La precisione dei termometri di Figura 65 viene fornita dal produttore ed è pari a $\pm 2^{\circ}\text{C}$ quindi non sono abbastanza sensibili per permettere di apprezzare delle differenze di

temperatura tra l'acqua in uscita da un sistema di strip e un altro. Per questo motivo per effettuare le misurazioni si è utilizzata una sonda di rilevazione della temperatura ad immersione di marca Testo che assicura una precisione di $0,2^{\circ}\text{C}$.



Figura 66: Sonda di rilevazione della temperatura ad immersione di marca Testo e rispettivo strumento di lettura.

Per effettuare le misurazioni si è atteso l'orario di massimo irraggiamento, tra le 12:40 e le 13:10. A quell'ora la temperatura esterna rilevata era di $15,5^{\circ}\text{C}$ con un'umidità del 46%. Si è regolata la portata in modo tale che fosse la stessa per tutti e tre i sistemi di strip e si è proceduto al rilevamento della temperatura dell'acqua in uscita utilizzando la sonda di *Figura 66* inserita nei pozzetti in corrispondenza dei flussometri.



Figura 67: Fase di rilevamento della temperatura in uno dei pozzetti dei tre sistemi di strip.

La procedura si è ripetuta allo stesso modo per i tre sistemi di strip e quindi i 3 pozzetti, spaziando un range di 3 valori di portata differenti: si è partiti da un valore intermedio per poi andare a diminuirla e successivamente ad aumentarla. Il tempo di misurazione necessario per ogni pozzetto è stato in media di 1 o 2 minuti.

Per un'analisi più completa sarebbe stato utile effettuare delle misure ripetute; questo poteva essere fatto utilizzando più sonde di rilevamento della temperatura, una per pozzetto, e una ripetizione della prova in giornate differenti. Infatti, effettuando le misurazioni in una sola giornata e con una sola sonda di rilevazione, il tempo a disposizione per poter svolgere l'esperimento facendo in modo che l'irraggiamento non cambi significativamente tra una misurazione e l'altra è molto limitato.

Di seguito, in *Tabella 20*, sono riportati i risultati ottenuti dalla misurazione della temperatura in uscita da ogni sistema di strip:

		Ecobel Solkote		Ecobel Nano Black		Standard Black Chrome	
		$\alpha = 0,91$ $\varepsilon = 0,35$		$\alpha = 0,93$ $\varepsilon = 0,10$		$\alpha = 0,96$ $\varepsilon = 0,10$	
Portata 3,5 l/min	$T_{in} = 37,3 \text{ } ^\circ\text{C}$	12:46	39,8 $^\circ\text{C}$	12:48	40,7 $^\circ\text{C}$	12:49	39,5 $^\circ\text{C}$
	$T_{in} = 37,9 \text{ } ^\circ\text{C}$	12:53	40,4 $^\circ\text{C}$	12:55	41,2 $^\circ\text{C}$	12:56	40,2 $^\circ\text{C}$
Portata 2 l/min		13:01	41,0 $^\circ\text{C}$	13:04	42,1 $^\circ\text{C}$	13:06	40,8 $^\circ\text{C}$
Portata 5 l/min		13:09	40,4 $^\circ\text{C}$	13:10	40,6 $^\circ\text{C}$	13:12	39,9 $^\circ\text{C}$

Tabella 20: Risultati ottenuti dalla rilevazione della temperatura dell'acqua in uscita dai sistemi di strip.

Bisogna ricordare che l'acqua di ritorno proveniente dai tre sistemi di strip, viene miscelata ad ogni ciclo e quindi la temperatura dell'acqua in ingresso ad ogni sistema di strip è la medesima. Si sono fatte due misurazioni per stimare la differenza di temperatura tra entrata ed uscita del sistema e questa si può considerare pari a 2,5 $^\circ\text{C}$ nel caso della strip Ecobel con trattamento Solkote. Si è ottenuto infatti un valore di 37,3 $^\circ\text{C}$ alle 12:46 e 37,9 $^\circ\text{C}$ alle 12:53. In 7 minuti essa è incrementata di 0,6 $^\circ\text{C}$, risultato verificato dal

confronto tra le temperature dell'acqua in uscita dalla stessa strip, anch'essa aumentata di 0,6 °C: l'irraggiamento e le perdite sono rimaste pressoché le stesse, la temperatura di uscita è quindi leggermente maggiore proprio a causa dell'incremento della temperatura dell'acqua in ingresso. Da queste considerazioni si è deciso di assumere un incremento lineare della temperatura dell'acqua in ingresso alle strip considerandolo pari a 0,1 °C ogni minuto. In questo modo è possibile stimare la variazione di temperatura dell'acqua tra ingresso e uscita del sistema di strip per ogni tipologia per poter quantificare il miglioramento dato dalla scelta della soluzione.

		Ecobel Solkote	Ecobel Nano Black	Standard Black Chrome		
		$\alpha = 0,91$ $\varepsilon = 0,35$	$\alpha = 0,93$ $\varepsilon = 0,10$	$\alpha = 0,96$ $\varepsilon = 0,10$		
Portata 3,5 l/min	12:46	$T_{in} = 37,3 \text{ °C}$ $T_{out} = 39,8 \text{ °C}$ $\Delta T = 2,5 \text{ °C}$	12:48	$T_{in} = 37,5 \text{ °C}$ $T_{out} = 40,7 \text{ °C}$ $\Delta T = 3,2 \text{ °C}$	12:49	$T_{in} = 37,6 \text{ °C}$ $T_{out} = 39,5 \text{ °C}$ $\Delta T = 1,9 \text{ °C}$
	12:53	$T_{in} = 37,9 \text{ °C}$ $T_{out} = 40,4 \text{ °C}$ $\Delta T = 2,5 \text{ °C}$	12:55	$T_{in} = 38,1 \text{ °C}$ $T_{out} = 41,2 \text{ °C}$ $\Delta T = 3,1 \text{ °C}$	12:56	$T_{in} = 38,2 \text{ °C}$ $T_{out} = 40,2 \text{ °C}$ $\Delta T = 2 \text{ °C}$

Tabella 21: Calcolo della differenza di temperatura tra uscita ed ingresso di ogni sistema di strip.

Dalle valutazioni riportate in *Tabella 21* riferite ad una portata di 3,5 l/min, considerando la proporzionalità diretta tra la potenza ricavabile e il salto di temperatura:

$$Q = mc_p \Delta T$$

si può stimare una percentuale che permetta un confronto delle performance delle tre possibili soluzioni.

Le strip standard prodotte da Innovar con trattamento selettivo Black Chrome che rappresentano la soluzione più comune sul mercato, permettono di ottenere un ΔT pari a circa 2 °C. Se si considerano le strip Ecobel con verniciatura spray Solkote si ottiene invece un valore pari a 2,5 °C, questo significa un incremento della potenza ricavabile del 25%. Considerando poi le strip Ecobel con superficie rivestita dalle pellicole Nano Black, queste permettono di ottenere un ΔT pari a 3,2 °C che si traduce, se confrontato con le strip standard, in un incremento del 60%; esse sono quindi certamente la soluzione più vantaggiosa ma, come verrà discusso in seguito, anche la più costosa.

Queste conclusioni sono confermate anche dai risultati dei test ottenuti a diverse portate che rispecchiano quelli analizzati: laddove la portata aumenta, la temperatura in uscita diminuisce, e le differenze percentuali tra i risultati seguono i valori calcolati nel caso di portata pari a 3,5 l/min.

Questi risultati hanno permesso di fare un confronto generale tra le tre tipologie di strip per verificare se la geometria pensata per la strip Ecobel permettesse realmente di raggiungere performance migliori; inoltre è stato possibile un confronto tra i trattamenti selettivi. Considerando il caso peggiore, quindi la strip standard con il trattamento Black Chrome e il caso migliore, la strip Ecobel con trattamento Nano Black, il miglioramento che si ha con la seconda configurazione è interamente dovuto alla geometria: il trattamento selettivo presenta il medesimo valore per l'emissività e un valore leggermente minore per l'assorbimento. Confrontando invece le due tipologie di strip Ecobel, si nota una differenza parecchio significativa: la strip trattata con verniciatura spray e zigrinatura non riesce a raggiungere performance simili a quelle della strip con trattamento selettivo più performante, ma comunque permette un miglioramento rispetto alla strip standard.

Nell'abbinamento della zigrinatura con la vernice si è notata una problematica: la zigrinatura ha reso più complicata l'applicazione della vernice, non permettendo di ricoprire l'interezza della superficie disponibile. A completamento di questa analisi sarebbe quindi interessante fare un ulteriore confronto con un sistema di strip Ecobel con verniciatura Solkote ma senza trattamento meccanico superficiale per poter comprendere se la superficie corrugata dia un contributo positivo oppure no.

Un'altra considerazione da fare riguarda la saldatura delle strip ai tubi collettori: nel caso della strip standard ciò che necessita di essere saldato è il condotto a sezione circolare della strip con il tubo collettore, entrambi in rame. Si tratta di una saldatura semplice sia per la geometria sia per il materiale. Per quanto riguarda invece le strip Ecobel, esse presentano un condotto a sezione ellittica; per questo motivo e per le caratteristiche del materiale, la saldatura risulta essere un'operazione molto più delicata e se non effettuata adeguatamente, il rischio è che i condotti siano bloccati dall'ingresso del materiale fuso durante la saldatura. Per questo motivo, una volta concluse le misurazioni sperimentali, si è proceduto al taglio delle strip nelle vicinanze del tubo collettore per poter verificare

che i condotti fossero realmente liberi e quindi percorsi dal fluido termovettore in modo tale da capire se la realizzazione di questo tipo di saldatura fosse possibile.



Figura 68: Taglio delle strip per verificare che la saldatura non ostruisce il passaggio di fluido.

4.1 Considerazioni economiche

A conclusione di questa analisi si è voluta fare qualche considerazione anche sull'aspetto economico della realizzazione di queste strip. Si è quindi andato a stimare il costo che ogni tipologia di strip può avere, considerando una strip di lunghezza pari a 1 metro e larghezza di 125 mm.

- Strip standard Innovar con trattamento selettivo Black Chrome

Per stimare il prezzo di questa soluzione si fa riferimento ai dati di cui l'azienda Ecobel è a conoscenza relativi al maggio 2010. Una strip standard di questo tipo veniva venduta a 6,314 CHF al metro che, con il tasso di cambio riferito a quel periodo [44], equivale a 4,464 €. Volendo attualizzare questo valore al 2020, è necessario considerare l'inflazione in modo tale da ottenere un prezzo realistico.

Anno	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Inflazione [%]	-	+2,7	+3,0	+1,1	+0,2	-0,1	-0,1	+1,1	+1,1	+0,5	-0,2
Prezzo [€]	4,464	4,585	4,722	4,774	4,784	4,779	4,774	4,827	4,880	4,904	4,894

Tabella 22: Costo delle strip Innovar attualizzato al 2020 con tassi di inflazione medi annuali [45].

Per poter definire un costo al metro quadrato di strip, si devono considerare 8 strip, perché ciascuna di larghezza 125mm. Il costo totale di questa soluzione è quindi pari a 39,15 €/m².

- Strip Ecobel con verniciatura Solkote

Per questo caso si fa riferimento al costo della vernice Solkote nel 2011 e si riporta al 2020 partendo da un prezzo di 56,11\$ per 5 galloni, cioè 39,39€ per 18,93 litri che corrispondono a $1,893 \cdot 10^{-2}$ m³.

Anno	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Inflazione [%]	-	+3,0	+1,1	+0,2	-0,1	-0,1	+1,1	+1,1	+0,5	-0,2
Prezzo [€]	39,39	40,57	41,02	41,10	41,06	41,02	41,47	41,93	42,14	42,06

Tabella 23: Calcolo del costo della vernice Solkote attualizzato al 2020 con tassi di inflazione medi annuali [45].

Per stimare la quantità di vernice necessaria a ricoprire la superficie della strip si è considerato uno spessore della verniciatura di 0,023 mm come indicato dal produttore e una superficie della strip corrugata pari a 0,22 m². Il volume di

vernice necessario equivale dunque circa a $5,088 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$ e quindi si ha un costo finale per la verniciatura di 0,01 € per ogni strip. A questo si va ad aggiungere il costo dell'alluminio [46] per la sua realizzazione che è pari all'incirca a 2 €/kg; ogni strip pesa 523 g e quindi si ha un costo per il metallo di 1,05 € per strip. Si considerano nuovamente 8 strip in un metro quadrato, quindi il prezzo finale è stimabile come 8,48 €/m². A questo si andrebbe ad aggiungere un costo per la realizzazione dell'estruso e la saldatura ma, siccome sono pressoché trascurabili per quanto riguarda il paragone con la soluzione precedente.

- Strip Ecobel con pellicole Nano Black

Anche in questo caso il prezzo delle pellicole selettive è riferito all'anno 2011 e quindi si procede allo stesso modo della *Tabella 23* per riportare il prezzo al 2020:

Anno	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Inflazione [%]	-	+3,0	+1,1	+0,2	-0,1	-0,1	+1,1	+1,1	+0,5	-0,2
Prezzo [€]	130	133,90	135,37	135,64	135,50	135,36	136,85	138,36	139,05	138,77

Tabella 24: Calcolo del costo delle pellicole Nano Black prodotte da Acktar attualizzato al 2020 con tassi di inflazione medi annuali [45].

Questo prezzo viene fornito già al metro quadrato, quindi è necessario solamente aggiungere il costo dell'alluminio già calcolato in precedenza e quindi pari circa a 1 € per ogni strip, 8 € per un metro quadrato. Il costo finale di questa soluzione è quindi notevolmente più alto con 146,77 €/m².

4.2 Considerazioni finali sulle diverse tipologie di strip

Le tre tipologie di strip presentano un costo molto diverso l'una dall'altra. La soluzione migliore risulta essere la strip Ecobel in alluminio con verniciatura spray Solkote: costa 3/4 volte in meno rispetto alle strip tipicamente in commercio con trattamento PVD e, nonostante ciò, permette di ottenere performance leggermente migliori. La soluzione con trattamento selettivo Nano Black risulta invece estremamente costosa: il vantaggio in termini di performance è significativo, ma ad un prezzo difficilmente sostenibile.

5. Conclusioni

A seguito di alcune considerazioni sui consumi energetici globali trattate nel report dell'IEA del 2019, si evince come il 40% delle emissioni globali di anidride carbonica siano da attribuire ad usi termici [1]: risulta quindi di evidente importanza porre l'attenzione sulla produzione di energia termica. A questo scopo si è passati alla descrizione di un impianto solare termico convenzionale facendo riferimento ai componenti e alle applicazioni in modo tale da fornire una panoramica generale utile a comprendere lo studio riportato in seguito. L'elemento di principale interesse per lo studio svolto è l'assorbitore solare, che è anche l'elemento più critico del collettore solare: ha infatti la funzione di assorbire l'energia proveniente dalla radiazione solare e trasferirla al fluido termovettore.

Con l'azienda Eco Innovest (Ecobel), presso la quale è stato svolto questo lavoro di tesi, si è analizzata una geometria della strip e del condotto che potesse migliorare l'assorbimento della radiazione solare e il trasferimento dell'energia al fluido. Per svolgere un'analisi teorica del trasferimento di calore tra la superficie captante e il fluido, si è utilizzato il software *COMSOL Multiphysics 5.6*. Svolgendo alcuni studi di tipo stazionario, si sono potute confrontare due diverse tipologie di strip: una standard ed una non convenzionale (l'oggetto del caso studio). Ciò ha portato ad affermare che il secondo permette un migliore scambio termico: questo è dovuto in parte alla maggiore superficie di contatto tra fluido e solido e in parte per un migliore coefficiente di scambio termico convettivo, che risulta essere di un ordine di grandezza maggiore rispetto al caso dell'assorbitore standard.

A seguito di queste prime considerazioni si sono analizzati i principali trattamenti selettivi in commercio per trovare una soluzione che fosse adatta a questo tipo di assorbitore solare. Sono state prese in considerazione due possibilità, una altamente performante ma molto costosa e l'altra economicamente più sostenibile ma meno performante. Nel caso di utilizzo di questa seconda soluzione, si è abbinata una lavorazione meccanica superficiale precedente alla verniciatura, creando una superficie corrugata che potrebbe aumentare l'assorbimento e ridurre le emissioni per

irraggiamento; questo è sembrato essere confermato da un'analisi teorica svolta nuovamente in ambiente *COMSOL*.

A conclusione di questo studio si è effettuato un test sperimentale che permettesse di ottenere un confronto realistico tra le performance di diverse tipologie di strip. Si è creato un sistema di tre assorbitori con caratteristiche differenti: uno con strip ad elevata diffusione commerciale, con saldatura ad ultrasuoni e trattamento selettivo con tecnica PVD, uno con strip Ecobel e pellicole selettive Nano Black molto performanti e uno con strip Ecobel con verniciatura spray e superficie corrugata. Da questo test, effettuato a parità di portata nei tre assorbitori, si è potuta stimare la differenza di temperatura tra ingresso ed uscita di ogni sistema, quantità proporzionalmente correlata alla produzione di potenza. Si è ottenuto un risultato migliore, rispetto alla soluzione standard, di circa il 25% nel caso di utilizzo di strip Ecobel con superficie corrugata abbinata a verniciatura e di circa il 60% nel caso di strip Ecobel con pellicole Nano Black. Quest'ultima soluzione risulta però economicamente non sostenibile a causa del costoso trattamento selettivo applicato. Infatti, da una breve analisi economica della realizzazione di 1 m² di strip, per ogni tipologia si hanno prezzi notevolmente differenti e la soluzione di strip Ecobel con verniciatura spray risulta essere la più economica, anche rispetto alla soluzione standard. Si può perciò affermare che la strip Ecobel con verniciatura Solkote sia la più vantaggiosa tra le tre: è infatti la meno costosa ed è significativamente più performante dal punto di vista energetico rispetto alle strip standard.

Questo studio si pone come base di ulteriori analisi da parte dell'azienda Eco Innovest (Ecobel): la realizzazione di una prova sperimentale più completa permetterebbe la registrazione di maggiori dati in modo tale da validare il modello teorico *COMSOL* qui utilizzato. Inoltre, a seguito di questa analisi sul singolo assorbitore, si può procedere con l'assemblaggio di un intero collettore solare, avendo come scopo ultimo la realizzazione di un sistema performante che presenti tutte le caratteristiche necessarie all'ottenimento della certificazione Solar Keymark, elemento necessario per una buona commercializzazione del prodotto.

Bibliografia

- [1] IEA, “Renewables 2019 – Analysis - IEA,” *Int. Energy Agency*, p. 204, 2019.
- [2] W. Weiss and M. Spörk-Dür, “Solar heat worldwide 2020” 2019.
- [3] ENEA, “Le parole dell’energia - Solare termico” www.enea.it.
- [4] M. Simonetti, G. V. Fracastoro, and M. Perino, “SOLAR COLLECTORS Part I” *Slides del corso “Technologies for Renewable energy sources”*.
- [5] J. Sohns and E. Hahne, “Thermal Use of Solar Energy” *Electr. Power Res. Inst. EPRI EL*, vol. 1, pp. 119–136, 1980.
- [6] J. A. Duffie, W. A. Beckman, and J. McGowan, *Solar Engineering of Thermal Processes*, vol. 53, no. 4. 1985.
- [7] S. A. Kalogirou, *Solar thermal collectors and applications*, vol. 30, no. 3. 2004.
- [8] I. Sarbu and C. Sebarchievici, *Solar Heating and Cooling Systems*, vol. 53, no. 9. 2018.
- [9] “<https://www.alternative-energy-tutorials.com>”.
- [10] M. Simonetti, G. V. Fracastoro, and M. Perino, “SOLAR COLLECTORS Part II” *Slides del corso “Technologies for Renewable energy sources”*.
- [11] P. A. Sørensen, J. E. Nielsen, R. Battisti, T. Schmidt, and D. Trier, “Solar district heating guidelines: Collection of fact sheets” *Sol. Distric Heat.*, no. August, 2012.
- [12] M. Caleffi, “Idraulica” 2005.
- [13] “<https://www.unilab.eu/it>”.
- [14] G. V Fracastoro, “L’ impianto solare termico Parte I – Il collettore solare”.
- [15] IRENA, “Solar Heating and Cooling for Residential Applications” *Iea; Etsap; Irena*, no. January, pp. 1–40, 2015.
- [16] S. Heat- *et al.*, “Solar Heating and Cooling of Buildings Guidelines” pp. 1–10, 2007.
- [17] “<http://www.solair-project.eu>”.

- [18] P. Kohlenbach and U. Jakob, *Solar cooling - The earthscan expert guide to solar cooling systems*, vol. 53, no. 9. 2017.
- [19] "<http://www.etank.de/>".
- [20] "<https://www.rhc-platform.org/>".
- [21] S. Fathollahi, "Simulation study on the thermal performance of a direct-expansion solar- assisted heat pump for water heating in Kermanshah climate" no. February 2016, 2017.
- [22] D. Tschopp, Z. Tian, M. Berberich, J. Fan, B. Perers, and S. Furbo, "Large-scale solar thermal systems in leading countries: A review and comparative study of Denmark, China, Germany and Austria" *Appl. Energy*, vol. 270, no. April, p. 114997, 2020.
- [23] "<https://www.sunergsolar.com/>".
- [24] M. S. e F. S. Giulio Cerino, Luca Degiorgis, "Guida all'integrazione delle installazioni solari negli edifici (solare termico e fotovoltaico)" .
- [25] "<https://www.regione.vda.it/>".
- [26] "<https://www.gse.it/>".
- [27] Gse, "Incentivazione della produzione di energia elettrica da impianti a fonti rinnovabili diversi dai fotovoltaici", vol. 2016, pp. 1-97, 2016.
- [28] "<http://www.estif.org/solarkeymarknew/>".
- [29] "<http://www.suntesimal.com/>".
- [30] "<https://www.altrasonicautomation.com/>".
- [31] F. P. Incropera, D. P. Dewitt, T. L. Bergman, and A. S. Lavine, *Introduction to heat transfer*, Sixth edit. 2011.
- [32] Mike Gedeon, "Thermal Emissivity and Radiative Heat Transfer" *Technicaltidbits*, vol. 1, no. 114, pp. 0-1, 2018.
- [33] "<http://www.solarmirror.com/>".
- [34] "https://www.engineeringtoolbox.com/emissivity-coefficients-d_447.html".
- [35] "<https://www.pveducation.org/>".

- [36] "<https://alanod.com/>".
- [37] "Sun & Wind Energy" vol. 7, 2010.
- [38] D. M. Mattox, *Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing*, William Andrew Publishing, 2010.
- [39] "<https://www.almecogroup.com/it>".
- [40] "<https://www.solec.org/>".
- [41] "<https://www.acktar.com/product/nano-black/>".
- [42] P. Bermel, J. Lee, J. D. Joannopoulos, I. Celanovic, and M. Soljacic, "Selective Solar Absorbers" *Annu. Rev. Heat Transf.*, vol. 15, no. 15, pp. 231–254, 2012.
- [43] R. Kumar and M. A. Rosen, "Thermal performance of integrated collector storage solar water heater with corrugated absorber surface" *Appl. Therm. Eng.*, vol. 30, no. 13, pp. 1764–1768, 2010.
- [44] "<https://cambio-euro.it/>".
- [45] "<http://www.re.camcom.gov.it/>".
- [46] "<https://tradingeconomics.com/commodity/aluminum>".

Elenco delle figure

Figura 1: Quote rappresentative delle fonti energetiche utilizzate per soddisfare la domanda di energia termica a livello globale [1].	2
Figura 2: Capacità solare termica globale in funzione e rendimenti energetici annuali 2000-2019 [2].	3
Figura 3: Schema rappresentativo di un impianto solare termico [4].	4
Figura 4: Collettore solare a piastre piane con riferimento ai suoi componenti [5].	5
Figura 5: Dettaglio di un esempio di strip dell'assorbitore [5].	6
Figura 6: Assorbitore con condotti disposti a meandro (sinistra) e ad arpa (destra) [5].	7
Figura 7: Rappresentazione del tubo evacuato con configurazione ad U [8].	8
Figura 8: Rappresentazione sistema heat pipe (sinistra) e direct flow (destra) [9].	9
Figura 9: Efficienza e perdite di un collettore solare [11].	10
Figura 10: Schemi delle varie tipologie di serbatoio di accumulo [12].	11
Figura 11: Rappresentazione dell'andamento delle temperature negli scambiatori di calore nel caso equicorrente e controcorrente [13].	12
Figura 12: Schema di un impianto diretto - a circuito aperto [14].	13
Figura 13: Schema di un impianto indiretto - a circuito chiuso [14].	14
Figura 14: Rappresentazione di un sistema a circolazione naturale [14].	14
Figura 15: Rappresentazione di un sistema a circolazione forzata [14].	15
Figura 16: Tipico schema di un combi-system per produzione di acqua calda sanitaria e riscaldamento [15].	16
Figura 17: Andamento annuale della domanda di energia per raffrescamento, di quella per riscaldamento e della radiazione solare [16].	17
Figura 18: Schema funzionamento sistema a ciclo chiuso [8].	18
Figura 19: Schema di un chiller ad adsorbimento [17].	18
Figura 20: Schema funzionamento sistema a ciclo aperto con essiccazione [18].	19
Figura 21: Schema di funzionamento del sistema eTank [19].	21
Figura 22: Schema di funzionamento di una pompa di calore [20].	22
Figura 23: Schema di funzionamento di una pompa di calore elio-assistita [21].	23
Figura 24: Rappresentazione dell'andamento annuale della produzione di energia solare e della domanda, in Europa [5].	25
Figura 25: Esempio di installazione di collettori solari su copertura piana [23].	26

Figura 26: Esempio installazione collettori solari con ancoraggio alla copertura [24]...	27
Figura 27: Esempio di integrazione completa nella copertura a coppi [24].	27
Figura 28: Esempio di integrazione con finestre da tetto e solare fotovoltaico [24].	28
Figura 29: Esempio di installazione in cui l'impianto solare funge anche da copertura o facciata [24].	28
Figura 30: Collettori a tubi sottovuoto utilizzati come ringhiera di un terrazzo [25].	29
Figura 31: Logo certificazione Solar Keymark [28].	32
Figura 32: Grafici rappresentativi del calcolo dell'incentivo per diverse superfici di collettori.	35
Figura 33: Rappresentazione strip in alluminio.	37
Figura 34: Rappresentazione parti della strip in alluminio.	37
Figura 35: Strip saldata ad ultrasuoni vista dall'alto e lateralmente [29].	38
Figura 36: Strip Innovar saldata ad ultrasuoni, dettaglio della linea di saldatura.	39
Figura 37: Strip saldata a laser vista dall'alto e laterale [29].	39
Figura 38: Dettaglio dei punti di saldatura.	40
Figura 39: Geometria della strip Ecobel.	42
Figura 40: Geometria creata in ambiente COMSOL per assorbitore standard saldato ad ultrasuoni.	44
Figura 41: Zoom sulla parte di geometria rappresentativa della saldatura.	44
Figura 42: Strip Ecobel - Distribuzione della temperatura sulla superficie ricevente la radiazione solare della strip Ecobel una volta raggiunto lo stato stazionario.	49
Figura 43: Strip standard in alluminio - Distribuzione della temperatura sulla superficie ricevente la radiazione solare della strip standard una volta raggiunto lo stato stazionario.	49
Figura 44: Rappresentazione strip Ecobel con curve isoterme per la determinazione della temperatura della piastra sulla sezione di uscita.	50
Figura 45: Rappresentazione strip standard con curve isoterme per la determinazione della temperatura della piastra sulla sezione di uscita.	51
Figura 46: Strip standard in rame- Distribuzione della temperatura sulla superficie ricevente la radiazione solare della strip standard una volta raggiunto lo stato stazionario.	53
Figura 47: Spettro solare standard [35].	57

Figura 48: Produzione trattamento selettivo su strip solari – Alanod [36].....	57
Figura 49: Trattamento selettivo TiNOX – Almecco Group. Rappresentazione grafica delle performance di riflessione (linea blu) e assorbimento (area blu) riferiti all’asse di sinistra e di emissione (aree rosse) riferite all’asse di destra [39].	59
Figura 50: Rappresentazione grafica della capacità di riflessione di una superficie di alluminio con strato di vernice Solkote, a lunghezza d’onda < 2,5 μm . Minore è la riflessione, maggiore sarà l’assorbimento [40].....	61
Figura 51: Rappresentazione grafica della capacità di riflessione di una superficie con l’applicazione della pellicola Nano Black (Acktar Advanced Coatings) [41]. .	61
Figura 52: Rappresentazione schematica di una superficie caratterizzata dalla presenza di dendriti. La radiazione solare incidente può essere riflessa internamente fino a 50 volte [42].	62
Figura 53: Sezione di un collettore solare caratterizzato da un assorbitore di superficie corrugata a sezione triangolare con profondità della zigrinatura di 1 mm [43].	63
Figura 54: Assorbitore con trattamento meccanico superficiale.....	63
Figura 55: Disegno della lavorazione superficiale della strip.	64
Figura 56: Rappresentazione sezione liscia e sezione corrugata in ambiente COMSOL. .	64
Figura 57: Rappresentazione mesh.....	66
Figura 58: Dettaglio sezione soggetta alla radiazione solare e al contatto con il fluido. ..	67
Figura 59: Assorbitore composto da strip ad elevata diffusione commerciale con saldatura ad ultrasuoni e trattamento selettivo Black Chrome.	69
Figura 60: Assorbitore composto da strip Ecobel con pellicole selettive Nano Black prodotte da Acktar.....	70
Figura 61: Assorbitore composto da strip Ecobel con trattamento meccanico superficiale e verniciatura spray Solkote.....	71
Figura 62: A sinistra flussometri Caleffi in ottone con valvola di bilanciamento e lettura diretta della portata; a destra flussometri con pozzetti per il rilevamento della temperatura.	72
Figura 63: Sistema completo per la realizzazione del test con due diverse tipologie di strip e tre diversi trattamenti superficiali.	72
Figura 64: Coordinate e orientamento della struttura per la prova sperimentale.	73
Figura 65: Flussometri e pozzetti con termometri bimetallici Caleffi ad immersione.....	73

Figura 66: Sonda di rilevazione della temperatura ad immersione di marca Testo e rispettivo strumento di lettura.	74
Figura 67: Fase di rilevamento della temperatura in uno dei pozzetti dei tre sistemi di strip.	74
Figura 68: Taglio delle strip per verificare che la saldatura non ostruisce il passaggio di fluido.	78

Elenco delle tabelle

Tabella 1: Tipologie di sistema di solar cooling con relativo fluido di lavoro, sostanza assorbente e temperature di lavoro [18].....	20
Tabella 2: Caratteristiche dei tre collettori più performanti e i tre meno performanti, tutti con certificazione Solar Keymark.	34
Tabella 3: Tabella per la scelta del coefficiente di valorizzazione dell'energia termica prodotta [27].	34
Tabella 4: Proprietà dell'alluminio da libreria COMSOL.	42
Tabella 5: Confronto dei risultati ottenuti con la strip Ecobel e quella standard in alluminio con temperatura della superficie captante imposta.....	45
Tabella 6: Risultati dell'integrale di interesse ottenuti tramite il software COMSOL Multiphysics 5.6.....	47
Tabella 7: Confronto dei risultati ottenuti con l'assorbitore Ecobel e quello standard in alluminio con flusso imposto sulla superficie captante.....	48
Tabella 8: Tabella per il calcolo del coefficiente convettivo relativo alla strip Ecobel al fine di determinare l'efficienza dello scambio termico.	51
Tabella 9: Tabella per il calcolo del coefficiente convettivo relativo alla strip standard al fine di determinare l'efficienza dello scambio termico.....	51
Tabella 10: Proprietà del rame da libreria COMSOL.....	52
Tabella 11: Confronto dei risultati ottenuti con l'assorbitore Ecobel e quello standard in alluminio e in rame con flusso imposto sulla superficie captante.	53
Tabella 12: Valori di assorbimento ed emissione per i principali trattamenti selettivi in commercio [37].....	58
Tabella 13: Dati per l'impostazione della sorgente di radiazione esterna.....	65
Tabella 14: Temperatura media del volume considerato con uno studio stazionario.....	66
Tabella 15: Risultati ottenuti con studio stazionario.	67
Tabella 16: Valori caratteristici del trattamento selettivo al cromo nero per le strip Innovar.	69
Tabella 17: Valori caratteristici del trattamento selettivo Nano Black prodotto da Acktar.	70
Tabella 18: Valori caratteristici del trattamento selettivo Solkote prodotto da Solar Energy Corporation.	70

Tabella 19: Tipologie di strip prese in considerazione per la prova sperimentale e trattamento selettivo a loro applicato.	71
Tabella 20: Risultati ottenuti dalla rilevazione della temperatura dell'acqua in uscita dai sistemi di strip.....	75
Tabella 21: Calcolo della differenza di temperatura tra uscita ed ingresso di ogni sistema di strip.	76
Tabella 22: Costo delle strip Innovar attualizzato al 2020 con tassi di inflazione medi annuali [45].	79
Tabella 23: Calcolo del costo della vernice Solkote attualizzato al 2020 con tassi di inflazione medi annuali [45].	79
Tabella 24: Calcolo del costo delle pellicole Nano Black prodotte da Acktar attualizzato al 2020 con tassi di inflazione medi annuali [45].	80

Ringraziamenti

Con la conclusione di questa tesi si conclude anche il mio percorso al Politecnico di Torino. Desidero ringraziare in particolar modo l'ingegnere *Giuseppe Marinelli* dell'azienda Eco Innovest non solo per l'opportunità che mi ha dato, ma anche per il costante supporto e confronto durante l'intero periodo dedicato allo svolgimento di questa tesi. Ringrazio anche *Matteo Pozza* e *Adil* per l'aiuto nella realizzazione dei test sperimentali; *Cristina, Sandra* e *tutti gli altri ragazzi di Ecobel e Sollegno* per la compagnia durante le giornate trascorse a Rivoli.

Ringrazio la professoressa *Monica Ferraris* per il supporto, anche morale, che mi ha dato durante questo percorso e il professore *Marco Simonetti* per gli utili suggerimenti.