



UNIVERSITÀ
POLITECNICA
DELLE MARCHE

**UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTA' DI INGEGNERIA**

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Edile

DIISM – Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche

**ANALISI PRELIMINARE DI UN FORNO SOLARE
PORTATILE CON MATERIALE A CAMBIAMENTO DI FASE
A BASE DI XILITOLO**

**PRELIMINARY ANALYSIS OF A PORTABLE SOLAR BOX
COOKER WITH PHASE CHANGE MATERIAL BASED ON
XYLITOL**

Relatore:

Prof. Giovanni Di Nicola

Correlatore:

Ing. Gianluca Coccia

Tesi di Laurea di:

Giuseppe Pio Frasca

Anno accademico 2018/2019

INDICE

| | |
|---|----|
| INTRODUZIONE | 1 |
| 1. STATO DELL'ARTE | 2 |
| 1.1 Fonti di energia..... | 2 |
| 1.1.1 Fonti di energia non rinnovabile | 2 |
| 1.1.2 Fonti di energia rinnovabile | 4 |
| 1.2 Energia solare | 5 |
| 1.3 Solare termico | 6 |
| 1.4 Cottura solare | 9 |
| 1.5 Forno solare..... | 10 |
| 1.5.1 Forni solari a pannelli..... | 10 |
| 1.5.2 Forni solari a scatola | 11 |
| 1.5.3 Forni solari parabolici | 12 |
| 1.6 Forni solari con accumulo termico..... | 13 |
| 2. FORNO SOLARE IN ESAME | 15 |
| 2.1 Fasi di lavorazione | 16 |
| 2.1.1 Realizzazione della camera di cottura e verniciatura..... | 16 |
| 2.1.2 Realizzazione della scatola esterna | 19 |
| 2.1.3 Isolamento con lana di vetro | 21 |
| 2.1.4 Sistema di concentrazione dei raggi solari..... | 23 |
| 2.2 Principali modifiche..... | 24 |
| 2.2.1 Vernice | 25 |
| 2.2.2 Vetro e ISO 9050_2003 | 26 |
| 2.2.3 Alluminio | 28 |
| 2.3 Analisi funzionale | 29 |
| 3. MATERIALI A CAMBIAMENTO DI FASE | 31 |
| 3.1 Caratteristiche dei PCM | 32 |
| 3.2 Classificazione dei PCM..... | 33 |
| 3.2.1 Classificazione in base al tipo di materiale | 33 |
| 3.2.2 Classificazione in base alla temperatura di fusione | 38 |
| 3.3 Incremento delle prestazioni nei PCM..... | 39 |
| 3.4 PCM utilizzato: xilitolo..... | 43 |
| 3.5 Pentola con doppio fondo..... | 44 |
| 3.6 Realizzazione della pentola..... | 44 |

| | |
|---|-----------|
| 3.7 Olio siliconico | 48 |
| 4. PROCEDURE SPERIMENTALI | 50 |
| 4.1 Procedure di calcolo standard | 50 |
| 4.1.1 Procedura proposta da Khalifa et al. | 50 |
| 4.1.2 Procedura proposta da Mullick | 51 |
| 4.2 Banco di prova | 52 |
| 4.2.1 Termocoppie di tipo T e K..... | 52 |
| 4.2.2 Pireliometro..... | 53 |
| 4.2.3 Computer e acquisitore | 53 |
| 5. RISULTATI DEI TEST SPERIMENTALI | 56 |
| 5.1 Prove a carico con olio siliconico | 56 |
| 5.2 Prove con accumulo termico a base di xilitolo | 63 |
| 5.3 Confronto dei dati | 74 |
| 5.3.1 Fase di riscaldamento..... | 74 |
| 5.3.2 Fase di raffreddamento..... | 75 |
| 6. CONCLUSIONI | 76 |
| BIBLIOGRAFIA..... | 77 |

INDICE DELLE FIGURE

| | |
|--|----|
| Fig. 1 - Quota stimata di energia rinnovabile sulla produzione globale di elettricità a fine 2018 [1] | 5 |
| Fig. 2 - Esempio di impianto fotovoltaico per la produzione di energia elettrica... 6 | 6 |
| Fig. 3 - Esempio di pannello solare termico per la produzione di acqua calda..... 6 | 6 |
| Fig. 4 - Tipi di forni solari: (a) forno solare a pannelli; (b) forno solare parabolico; (c) forno solare a scatola [10]..... | 10 |
| Fig. 5 - Forno solare a pannelli [11]..... | 11 |
| Fig. 6 - Forno solare a scatola [12] | 12 |
| Fig. 7 - Forno solare parabolico [11] | 13 |
| Fig. 8 - Forno solare parabolico integrato con pannelli fotovoltaici [13] | 14 |
| Fig. 9 - Pentola con PCM nell'intercapedine [14]..... | 14 |
| Fig. 10 - Forno solare a scatola realizzato presso DIISM | 15 |
| Fig. 11 - Dimensioni forno a media efficienza | 16 |
| Fig. 12 - Pezzo "N" | 17 |
| Fig. 13 - Pezzo "M" | 17 |
| Fig. 14 - Camera di cottura | 18 |
| Fig. 15 - Pezzo "P" piegato e zavorrato | 18 |
| Fig. 16 - Verniciatura camera di cottura e piano inclinabile..... | 19 |
| Fig. 17 - Pezzi che formano il corpo esterno | 19 |
| Fig. 18 - Posizione dei listelli di rinforzo..... | 20 |
| Fig. 19 - Scatola esterna con basamento | 20 |
| Fig. 20 - Inserimento camera di cottura nell'involucro esterno | 21 |
| Fig. 21 - Distanziatori e isolamento camera interna | 22 |
| Fig. 22 - Riempimento fessure con materiale isolante | 22 |
| Fig. 23 - Scatola forno verniciata | 23 |
| Fig. 24 - Disegni pannelli riflettenti (specchi) | 23 |
| Fig. 25 - Specchi assemblati | 24 |
| Fig. 26 - Forno solare ultimato..... | 24 |
| Fig. 27 - Diagramma assorbimento | 25 |
| Fig. 28 - Diagramma emissività | 26 |
| Fig. 29 - Struttura fogli di alluminio | 29 |
| Fig. 30 - Riflettanza totale dell'alluminio | 29 |
| Fig. 31 - Differenze di energia accumulata tra calore sensibile e calore latente [18] | 32 |
| Fig. 32 - Classificazione dei PCMs in base al tipo di materiale [19]..... | 33 |
| Fig. 33 - (a) Unità di accumulo a calore latente con alette longitudinali interne, (b) unità di accumulo a calore latente con alette longitudinali esterne, (c) unità di accumulo a tubi coassiali con alette anulari [24] | 40 |

| | |
|--|----|
| Fig. 34 - Esempio di sistema con unità multiple di PCM con variazione di temperatura assiale [24] | 41 |
| Fig. 35 - Esempio di sistema con unità multiple di PCM senza variazione di temperatura assiale [24] | 41 |
| Fig. 36 - Esempii di PCM incapsulato [24] | 42 |
| Fig. 37 - Schiuma metallica a celle aperte [24]..... | 42 |
| Fig. 38 - Struttura dello xilitolo | 43 |
| Fig. 39 - Xilitolo utilizzato per i test di questo lavoro | 43 |
| Fig. 40 - Fase di assemblaggio delle pentole utilizzate..... | 44 |
| Fig. 41 - Sistema di fissaggio delle pentole con tubicino in acciaio INOX per il passaggio delle termocoppie. | 45 |
| Fig. 42 - Tubicini in acciaio INOX saldati ai bulloni | 45 |
| Fig. 43 - Pentola verniciata | 46 |
| Fig. 44 - Pentola terminata | 47 |
| Fig. 45 - Sezione della pentola [28] | 47 |
| Fig. 46 - Prospetto dall'alto della pentola [28] | 48 |
| Fig. 47- Variazione del calore specifico in funzione della temperatura [29]..... | 49 |
| Fig. 48 - – Variazione della conducibilità termica in funzione della temperatura [29] | 49 |
| Fig. 49 - Termocoppie di tipo T e K | 52 |
| Fig. 50 – Pireliometro | 53 |
| Fig. 51 - Data-Logger TC-08 | 54 |
| Fig. 52 - Esempio della schermata di PicoLog durante l'acquisizione dei dati..... | 55 |
| Fig. 53 - Grafico delle rilevazioni (test del 11/06/2019)..... | 58 |
| Fig. 54 - Grafico delle rilevazioni (test del 12/06/2019)..... | 60 |
| Fig. 55 - Grafico delle rilevazioni (test del 17/06/2019)..... | 62 |
| Fig. 56 - Grafico delle rilevazioni (test del 03/06/2019)..... | 65 |
| Fig. 57 - Grafico delle rilevazioni (test del 04/06/2019)..... | 67 |
| Fig. 58 - Grafico delle rilevazioni (test del 05/06/2019)..... | 69 |
| Fig. 59 - Grafico delle rilevazioni (test del 06/06/2019)..... | 71 |
| Fig. 60 - Grafico delle rilevazioni (test del 07/06/2019)..... | 73 |

INDICE DELLE TABELLE

| | |
|---|----|
| Tab. 1 - Caratteristiche energetiche del vetro | 26 |
| Tab. 2 - Distribuzione spettrale della radiazione solare globale | 28 |
| Tab. 3 - Analisi funzionale del forno | 30 |
| Tab. 4 - Temperatura e calore latente di fusione di paraffine in base al numero di atomi di carbonio presenti nella catena [21] | 35 |
| Tab. 5 - Elenco PCM non paraffini con relativa temperatura di fusione e calore latente di fusione [21]..... | 36 |
| Tab. 6 - Elenco idrati con relativa temperatura di fusione e calore latente di fusione [21] | 37 |
| Tab. 7 - Elenco di alcuni metalli utilizzati come PCM con relativa temperatura di fusione e calore latente di fusione [21] | 38 |
| Tab. 8 - Intervalli di temperatura e relative applicazioni dei PCM [18] | 39 |
| Tab. 9 - Misure principali delle pentole | 44 |
| Tab. 10 - Dati rilevati nella fase iniziale (test del 11/06/2019)..... | 57 |
| Tab. 11 - Risultati della prova (test del 11/06/2019) | 58 |
| Tab. 12 - Dati rilevati nella fase iniziale (test del 12/06/2019)..... | 59 |
| Tab. 13 - Risultati della prova (test del 12/06/2019) | 60 |
| Tab. 14 - Dati rilevati nella fase iniziale (test del 17/06/2019)..... | 61 |
| Tab. 15 - Risultati della prova (test del 17/06/2019) | 62 |
| Tab. 16 - Dati rilevati nella fase iniziale (test del 03/06/2019)..... | 64 |
| Tab. 17 - Risultati della prova (test del 03/06/2019) | 65 |
| Tab. 18 - Dati rilevati nella fase iniziale (test del 04/06/2019)..... | 66 |
| Tab. 19 - Risultati della prova (test del 04/06/2019) | 67 |
| Tab. 20 - Dati rilevati nella fase iniziale (test del 05/06/2019)..... | 68 |
| Tab. 21 - Risultati della prova (test del 05/06/2019) | 69 |
| Tab. 22 - Dati rilevati nella fase iniziale (test del 06/06/2019)..... | 70 |
| Tab. 23 - Risultati della prova (test del 06/06/2019) | 71 |
| Tab. 24 - Dati rilevati nella fase iniziale (test del 07/06/2019)..... | 72 |
| Tab. 25 - Risultati della prova (test del 07/06/2019) | 73 |
| Tab. 26 - Riassunto delle fasi di riscaldamento | 74 |
| Tab. 27 - Riassunto delle fasi di raffreddamento | 75 |

NOMENCLATURA

Lettere latine:

Aa – Area apertura del forno (m^2)
am – Frazione di materiale fuso (%)
cf – Calore specifico del fluido (J/kg K)
Cp – Capacità termica (J/K)
Cpl – Calore specifico della sostanza liquida (J/kg K)
Cps – Calore specifico della sostanza solida (J/kg K)
DNI – Radiazione solare (W/m^2)
DNI,av – Radiazione solare media (W/m^2)
DNI, ref – Radiazione solare di riferimento (W/m^2)
F₁ – Figura di merito
F₂ – Figura di merito
g – Fattore Solare (%)
m – Massa della sostanza (kg)
mf – Massa specifica del fluido (g/cm^3)
SC – Coefficiente di shading
T – Temperatura ($^{\circ}C$)
T₀ – Temperatura iniziale ($^{\circ}C$)
T₁ – Temperatura iniziale del fluido ($^{\circ}C$)
T₂ – Temperatura finale del fluido ($^{\circ}C$)
T_a – Temperatura dell'assorbitore ($^{\circ}C$)
T_{amb} – Temperatura ambiente ($^{\circ}C$)
T_{amb,av} – Temperatura ambiente media ($^{\circ}C$)
tch – Tempo di ebollizione caratteristico (s)
Tf – Temperatura fluido ($^{\circ}C$)
T_{fin} – Temperatura finale della sostanza ($^{\circ}C$)
T_g – Temperatura del vetro ($^{\circ}C$)
T_{inix} – Temperatura iniziale della sostanza ($^{\circ}C$)
T_m – Temperatura di fusione del materiale ($^{\circ}C$)
ts – tempo di ebollizione specifico (s)
UV – Trasmissione dei raggi ultravioletti (%)

Lettere greche:

α_e - Assorbimento energetico (%)
 Δh_m - Calore latente di fusione del materiale per unità di massa (J/kg)
 Δt_h - Intervallo di tempo (s)
 $\Delta \lambda$ - Procedimento di integrazione

η_{av} - Efficienza termica complessiva
 λ - Conducibilità termica (kcal/h·m·°C)
 λ_o - Conducibilità termica iniziale (kcal/h·m·°C)
 λ_l - Calore latente di fusione (W/m·K)
 λ_s - Calore latente di solidificazione (W/m·K)
 $s\lambda$ - Distribuzione spettrale della radiazione solare (W/m²)
 V - Viscosità (m²/s)
 $\rho_0(\lambda)$ - Riflettanza spettrale esterna del vetro
 ρ_e - Riflessione energetica (%)
 ρ_l - Densità dello stato liquido (g/cm)
 ρ_s - Densità dello stato solido (g/cm)
 τ_e - Trasmissione energetica diretta (%)
 $\tau(\lambda)$ - Trasmittanza spettrale del vetro

Acronimi:

DIISM - Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche
ECES - Energy Conservation through Energy Storage
HTF - Heat Transfer Fluid
IEA - Agenzia Internazionale per l'Energia
ISO - International Organization for Standardization LHS - Latent Heat Storage
MDF - Medium Density Fibreboard
OMS - Organizzazione Mondiale della Sanità
PCM - Phase Change Materials
TES - Thermal Energy Storage
WCED - World Commission on Environment and Development
WMO - World Meteorological Organization

INTRODUZIONE

Il presente lavoro consiste nell'analisi dei dati sperimentali ricavati tramite prove svolte su un forno solare a scatola, con l'utilizzo dello xilitolo come materiale a cambiamento di fase per l'accumulo di energia solare termica. L'obiettivo delle prove è valutare l'efficienza del forno e i benefici che un sistema di accumulo a base di xilitolo può apportare.

Nel primo capitolo sono descritti i concetti fondamentali che riguardano il risparmio energetico e i principali tipi di fonti rinnovabili, al giorno d'oggi sempre più centrali negli obiettivi della ricerca scientifica al fine di diminuire l'impatto ambientale e l'inquinamento. Particolare attenzione è stata data all'energia solare, soprattutto per quanto riguarda le applicazioni termiche, tema centrale di questo lavoro. Vengono, infine, descritte le varie tipologie di forno solare oggi utilizzate.

Nel secondo capitolo viene descritta la costruzione del forno solare realizzato nel dipartimento "DIISM" dell'Università Politecnica delle Marche utilizzato per effettuare le sperimentazioni. In particolare, sono descritti i materiali con cui è realizzato, le caratteristiche geometriche, il principio di funzionamento e tutte le sue proprietà.

Il terzo capitolo riguarda i PCM (Phase Change Material), e al suo interno vengono analizzate le caratteristiche generali di questi materiali, come riescono ad accumulare energia termica e la loro classificazione. Viene poi approfondito, in particolare, lo xilitolo, utilizzato per le sperimentazioni. Infine, sono descritti la realizzazione della pentola e l'olio siliconico utilizzati nelle prove.

Nel quarto capitolo viene illustrata l'installazione del banco di prova, con la descrizione di tutti gli strumenti impiegati. Inoltre, vengono spiegate le tipologie di procedure che saranno utilizzate nelle prove.

Nel quinto capitolo vengono descritte le prove sperimentali svolte. Le prove sono di due tipologie: prove a carico con solo olio siliconico, e prove con accumulo termico. Successivamente, viene effettuato un confronto tra i dati ricavati da queste due tipologie di prove.

Infine, vi sono le conclusioni sul lavoro svolto, le osservazioni sul possibile miglioramento delle prove, e degli spunti per gli sviluppi futuri dei forni solari.

CAPITOLO 1

STATO DELL'ARTE

L'energia è la grandezza fisica che misura la capacità di un corpo o di un sistema fisico di compiere lavoro, a prescindere dal fatto che tale lavoro sia o possa essere effettivamente svolto [1].

Al giorno d'oggi l'uomo è estremamente dipendente dall'energia in tutte le sue forme, in particolare da quella meccanica, elettrica, chimica e termica. L'energia, infatti, permette attraverso il suo sfruttamento a livello industriale la trasformazione di materie prime o direttamente la fornitura di servizi utili all'uomo. Con l'aumentare dei consumi energetici, però, sono aumentati anche l'interesse e la preoccupazione dell'uomo riguardo all'esaurimento delle fonti fossili (fino ad ora principale fonte di energia), e in merito all'inquinamento dell'ambiente, che, con il progresso scientifico, si è scoperto essere una delle principali cause del riscaldamento globale e dell'aumento di malattie nell'uomo [2][3].

1.1 Fonti di energia

Le fonti di energia si distinguono in fonti rinnovabili e fonti non rinnovabili. Per fonte di energia non rinnovabile si intende quel tipo di fonte che con il tempo tende ad esaurirsi, e cioè a “non rinnovarsi” o rinnovarsi molto lentamente: pertanto l'impatto ambientale che deriva dal loro sfruttamento risulta essere più elevato rispetto alle fonti di energia rinnovabili, le quali in periodi di tempo relativamente brevi risultano reintegrate.

1.1.1 Fonti di energia non rinnovabile

Le fonti di energia non rinnovabile sono quelle più sfruttate dall'uomo in quanto riescono a fornire una grande quantità di energia a basso costo attraverso l'utilizzo di impianti semplici da costruire e con tecnologie ormai collaudate.

Le fonti di energia non rinnovabile sono costituite da:

- Carbone
- Petrolio
- Gas naturali
- Elementi per la produzione di energia nucleare quali uranio e plutonio

Carbone, petrolio e gas naturale rappresentano i combustibili fossili.

A partire dalla rivoluzione industriale l'uomo ha iniziato a sfruttare in modo massiccio tali combustibili. Inizialmente veniva utilizzato il carbone per la produzione di energia termica ed elettrica. Il carbone deriva dalla fossilizzazione delle piante ed è estratto da miniere sotterranee o a cielo aperto, è composto principalmente da carbonio e contiene tracce di idrocarburi, oltre a vari tipi di minerali. Ancora oggi attraverso il carbone viene prodotta un quarto dell'energia elettrica mondiale, e in Italia in particolare serve a produrne circa il 10% [4].

Verso gli inizi degli anni '50 il petrolio ha iniziato a soppiantare il carbone, in quanto più facile da estrarre e trasportare. Il petrolio è una miscela liquida di vari idrocarburi che si trova in giacimenti sotterranei negli strati superiori della crosta terrestre, si presenta come un liquido viscoso e infiammabile di colore variabile dal marrone scuro al nero, per la sua estrazione vengono utilizzati dei pozzi o delle pompe o, nel caso in cui il giacimento si trovi in corrispondenza delle aree marine, vengono create delle piattaforme petrolifere. Subito dopo l'estrazione, il petrolio viene sottoposto a dei trattamenti preliminari in loco, e successivamente viene trasportato attraverso oleodotti o petroliere fino al sito di raffinazione, dove viene trasformato nei vari derivati.

Negli ultimi anni è in forte crescita il consumo di gas naturale che viene prodotto dalla decomposizione anaerobica di materiale organico. In natura si trova comunemente allo stato fossile insieme al petrolio, al carbone o da solo in giacimenti di gas naturale. Il suo utilizzo è aumentato in seguito alla richiesta di fonti alternative al petrolio (il cui costo è in costante aumento), e in quanto risulta meno inquinante rispetto agli altri combustibili fossili.

Ad oggi i combustibili fossili vengono utilizzati per soddisfare più dell'85% del fabbisogno energetico mondiale: nello specifico il 40% è soddisfatto attraverso il petrolio, il 26% con il carbone e il 23% con il gas naturale. Come anticipato, il consumo di quest'ultimo è in forte crescita [5] a causa di alcune importanti caratteristiche che contraddistinguono questo tipo di combustibile: infatti si riscontra un alto rapporto energia/volume, è facilmente trasportabile e immagazzinabile, inoltre costa relativamente poco e può essere utilizzato con tecnologie ormai ben sviluppate e collaudate. Tutto questo ha portato a rendere i combustibili fossili ancora più interessanti economicamente, rallentando lo sviluppo di nuove tecnologie per lo sfruttamento di fonti energetiche alternative. Infatti, lo sfruttamento dei combustibili fossili è causa di numerosi svantaggi per l'ambiente: essi sono inquinanti e liberano nell'atmosfera sostanze quali anidride solforosa (SO_2) (responsabile delle piogge acide), e anidride carbonica (CO_2), che non è direttamente inquinante, ma oggi è considerata la maggiore causa del surriscaldamento globale. Inoltre, non essendo risorse rinnovabili dal momento che il processo di fossilizzazione dura milioni di anni, vi è un progressivo esaurimento dei giacimenti, e quindi un aumento dei prezzi che avviene insieme ad una richiesta energetica sempre più alta. Ne derivano politiche di diversificazione delle fonti energetiche nei diversi paesi, e una continua ricerca di fonti di energia alternative a quelle fossili.

Per quanto riguarda gli elementi che servono a produrre energia nucleare, come uranio e plutonio, essi sono considerati fonti di energia non rinnovabile a causa della loro bassa disponibilità in natura. Nonostante i processi che portano questi elementi a produrre energia nucleare non producano in modo diretto anidride carbonica (CO_2) o altri inquinanti come i combustibili fossili, bisogna considerare che i prodotti delle reazioni nucleari sono altamente radioattivi, e questo porta ad una elevata pericolosità delle centrali nucleari e dei rifiuti stessi, che quindi vanno isolati.

1.1.2 Fonti di energia rinnovabile

Le fonti di energia rinnovabile sono delle fonti energetiche che vengono ricavate da risorse rinnovabili, ovvero quelle risorse che vengono naturalmente ristabilite in una scala temporale umana. Alcuni esempi di fonti rinnovabili sono la luce solare, il vento, la pioggia, il moto ondoso e il calore geotermico.

Una fonte rinnovabile si dice anche sostenibile quando il tasso di rigenerazione della fonte stessa è pari o superiore a quello del consumo: questo concetto comporta la necessità di un utilizzo intelligente soprattutto di quelle fonti, come le foreste, che sono considerate rinnovabili, ma che in realtà se non sfruttate nel modo giusto divengono esauribili. Le risorse rinnovabili presentano quindi numerosi vantaggi, tra cui i principali sono l'assenza di sostanze inquinanti prodotte durante il loro utilizzo, e la loro inesauribilità che dunque non ne compromette la disponibilità per il futuro. I tipi di fonti di energia rinnovabile sono:

- Idroelettrica
- Geotermica
- Solare
- Eolica
- Biomasse (o agroenergie)
- Marina

L'energia idroelettrica e quella geotermica rappresentano le cosiddette fonti di energia rinnovabile classiche, perché vengono sfruttate sin dall'inizio dell'età industriale. Di queste, quella più utilizzata è l'energia idroelettrica, che nel 2018 rappresenta il 15,8% dell'energia totale prodotta.

Le altre fonti rappresentano le nuove fonti di energia rinnovabile, quelle cioè che si sono sviluppate nel corso degli ultimi anni grazie al progresso scientifico e tecnologico, e grazie alla sempre maggiore richiesta di energia. Alcune di esse sono ancora in fase di test o hanno una commercializzazione limitata. Secondo il rapporto REN21 la percentuale globale di energia elettrica prodotta attraverso fonti rinnovabili rappresenta il 26,2% dell'energia totale (Fig. 1) [6].

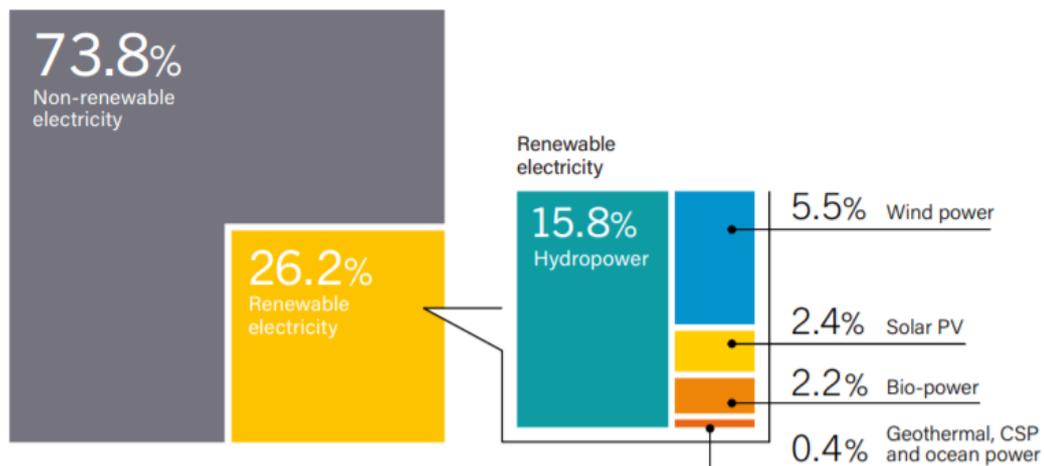


Fig. 1 - Quota stimata di energia rinnovabile sulla produzione globale di elettricità a fine 2018 [1]

1.2 Energia solare

L'energia solare deriva dalla radiazione solare e rappresenta la fonte di energia primaria sulla terra, poiché da questa derivano in modo più o meno diretto la maggior parte delle altre fonti energetiche. Dalla radiazione solare dipendono infatti i combustibili fossili, l'energia eolica, il moto ondoso, l'energia idroelettrica e l'energia da biomassa.

Il sole irradia al di sopra dell'atmosfera terrestre 1367 W/m^2 , quella che si definisce costante solare: questo è un valore medio, in quanto l'energia effettivamente disponibile sul suolo della Terra o al livello del mare, è minore di circa il 30% a causa dell'assorbimento e riflessione che la radiazione subisce attraversando l'atmosfera. Tenendo conto che la terra è assimilabile ad una sfera di raggio medio di 6371 km, e che quindi intercetta una sezione di oltre 127,5 milioni di km^2 della emissione solare, a seconda della stagione, per l'eccentricità dell'orbita terrestre, la potenza intercettata varia tra 168500 TW e 180000 TW. A questi valori bisogna sottrarre circa il 30%, come detto in precedenza. L'energia utilizzabile sul suolo terrestre, escludendo però quella che va negli oceani, resta comunque enorme, circa diecimila volte superiore al fabbisogno di energia dell'intera umanità.

Il problema principale di tutta questa energia che arriva sulla terra è che è poco concentrata, cioè è una energia distribuita su tutta la superficie terrestre, e che quindi, per essere riconvertita in energia sfruttabile dall'uomo, ha bisogno di essere raccolta con impianti che occupano aree molto vaste. Ciò, unito al fatto che al giorno d'oggi gli impianti a nostra disposizione hanno ancora basse efficienze e costi elevati, rende l'energia solare troppo costosa e quindi poco conveniente rispetto ad altri metodi di produzione di energia.

Un altro problema dell'energia solare è che, essendo una fonte che dipende dalle condizioni atmosferiche e dall'alternanza giorno-notte, ha bisogno di sistemi di accumulo per far sì che il fabbisogno di energia venga soddisfatto durante tutto l'arco della giornata: questo richiede grandi investimenti nella ricerca di nuovi materiali e tecnologie. L'energia solare può essere utilizzata per generare

elettricità attraverso impianti fotovoltaici (Fig. 2), oppure per generare calore attraverso impianti solari termici (Fig. 3).



Fig. 2 - Esempio di impianto fotovoltaico per la produzione di energia elettrica [34]



Fig. 3 - Esempio di pannello solare termico per la produzione di acqua calda [35]

1.3 Solare termico

Le applicazioni termiche dell'energia solare sono molteplici al fine di soddisfare le diverse esigenze energetiche dell'uomo. Si possono distinguere delle applicazioni termiche che sfruttano l'energia solare in modo diretto oppure in modo indiretto: in queste ultime vengono utilizzati dei cicli termodinamici appositamente studiati per convertire l'energia termica in energia elettrica o potenza frigorifera attraverso altre apparecchiature quali turbine e alternatori. Tali applicazioni rientrano nella definizione di solare termodinamico.

Le applicazioni dirette sono più convenienti dal punto di vista economico, al contrario di quelle indirette che presentano una bassa resa in relazione ai costi di realizzazione e gestione e alla discontinuità nella fornitura di energia.

Le applicazioni termiche dell'energia solare più diffuse includono:

- Riscaldamento dell'acqua
- Riscaldamento degli ambienti
- Raffrescamento e refrigerazione
- Fornitura di calore per processi industriali
- Generazione di potenza

- Distillazione dell'acqua
- Essiccazione
- Cottura

Riscaldamento dell'acqua:

Il riscaldamento dell'acqua è una delle applicazioni più diffuse dell'energia solare, perché sfrutta degli impianti relativamente semplici e poco costosi.

Un impianto solare per il riscaldamento dell'acqua si compone di un pannello che riceve l'energia solare, e di uno scambiatore di calore all'interno del quale circola un fluido (liquido vettore) che ha il compito di trasferirla dal pannello al serbatoio coibentato per accumularla e mantenerla calda. L'impianto può essere integrato anche con una resistenza per riscaldare l'acqua nei momenti in cui la radiazione solare è bassa o assente. Il sistema può funzionare per circolazione naturale o forzata. In quello a circolazione naturale viene sfruttata la convezione, cioè il liquido vettore viene riscaldato dal pannello, e dilatandosi galleggia rispetto allo stesso liquido vettore presente nel serbatoio che è più freddo, quindi spostandosi nello scambiatore che è posto più in alto rispetto al pannello solare cede il calore all'acqua [7]: questa tipologia di impianto è molto semplice perché ha bisogno di meno componenti, allo stesso tempo però la sua realizzazione risulta più difficile perché lo scambiatore (e quindi il serbatoio) deve essere posto più in alto rispetto al pannello.

Il sistema a circolazione forzata sfrutta delle pompe per la circolazione del liquido vettore, e dei sensori (termocoppie) per confrontare la temperatura del liquido all'interno del pannello con quella all'interno dello scambiatore: in questi tipi di impianti ci sono meno vincoli sul posizionamento dei serbatoi, e sono preferibili laddove ci sia bisogno di grandi accumuli di acqua.

Riscaldamento degli ambienti:

Il principio di funzionamento di un impianto solare per il riscaldamento degli ambienti è lo stesso di quello per il riscaldamento dell'acqua calda sanitaria. A differenza del caso precedente, però, il calore accumulato servirà a riscaldare gli ambienti: per farlo verranno utilizzate delle pompe o dei termoconvettori che hanno il compito di distribuire uniformemente il calore all'interno degli ambienti stessi.

Raffrescamento e refrigerazione:

Il raffrescamento solare o solar cooling è una tecnologia innovativa e ancora poco diffusa, che consente di produrre freddo partendo dall'energia termica accumulata da una sorgente calda (come un impianto solare termico). La possibilità di utilizzare la radiazione solare come condizionamento rende questo tipo di impianti particolarmente conveniente: infatti la sua produzione è massima proprio nei periodi estivi, quando la richiesta di raffrescamento raggiunge i picchi più alti.

Per il raffrescamento solare vengono utilizzate delle pompe di calore ad assorbimento che sfruttano la naturale igroscopicità di alcuni sali come bromuro

di litio, ottenuto dal sale marino, oppure ammoniaca e acqua, per generare un ciclo frigorifero continuamente rigenerato dal calore solare.

Al giorno d'oggi questo tipo di tecnologia risulta ancora poco diffusa, perché, essendo composta dall'integrazione di molti componenti, la sua progettazione e realizzazione risulta complessa e i costi di conseguenza sono elevati [8].

Fornitura di calore per processi industriali:

Anche in ambito industriale è possibile utilizzare le applicazioni innovative dell'energia solare per contribuire alla riduzione dell'utilizzo di combustibili fossili. Per la produzione di calore industriale vengono utilizzati soprattutto degli impianti solari a concentrazione: la concentrazione dell'energia solare consente di ottenere calore a temperature crescenti con l'aumentare del rapporto di concentrazione. Ovviamente, l'aumento della temperatura comporta una maggiore complessità degli impianti e costi più elevati: tuttavia molte lavorazioni industriali richiedono delle temperature non molto alte per le quali i sistemi a concentrazione rappresentano un'opzione economicamente conveniente.

Il calore di processo rappresenta più dei 2/3 del consumo energetico dell'industria, e metà di questo calore è richiesto a temperature inferiori ai 400 °C. Attualmente il 40% circa dell'energia consumata dall'industria deriva dal gas naturale, e un altro 40% dal petrolio. Le stime indicano che l'energia solare potrebbe raggiungere il 33% entro il 2030 [9].

Generazione di potenza:

La produzione di energia elettrica può avvenire, oltre che con gli impianti fotovoltaici, anche attraverso degli impianti solari termodinamici. Questi tipi di impianti sono detti termodinamici in quanto aggiungono alla normale fase di captazione di energia degli impianti solari termici un ciclo termodinamico che consente di trasformare l'energia termica raccolta in energia elettrica attraverso turbine a vapore e alternatori, come avviene nelle centrali termoelettriche alimentate a combustibili fossili.

Il funzionamento di questi impianti prevede, come visto precedentemente per la produzione di calore ad uso industriale, delle alte temperature (fino a 600 °C), e il loro funzionamento è del tutto simile al caso precedente: viene cioè sfruttata la concentrazione solare. La grande differenza rispetto al fotovoltaico è la possibilità di rendere più omogenea la produzione di energia elettrica durante l'arco della giornata attraverso l'accumulo di calore in appositi serbatoi. Ciò però non risolve del tutto i problemi di discontinuità di produzione energetica attraverso l'energia solare: per questo può essere necessario integrare l'apporto di energia attraverso l'utilizzo di altre fonti come ad esempio il gas naturale, ottenendo quindi degli impianti ibridi.

Distillazione dell'acqua:

La distillazione solare è un processo molto semplice che sfrutta l'energia solare per dissalare l'acqua. Sebbene gli impianti di questo tipo vengano comunemente

chiamati “distillatori”, l’operazione che svolge un distillatore solare è una dissalazione. Questo tipo di applicazione sfrutta l’innalzamento di temperatura ottenuto attraverso l’energia solare, in modo da far evaporare l’acqua e quindi separarla dal sale che rimane nella soluzione liquida; una volta raccolta l’acqua evaporata, essa avrà una concentrazione minore di sali disciolti al suo interno. I distillatori solari vengono utilizzati dove non ci sono acquedotti o dove l’acqua potabile non è facilmente reperibile; la loro efficienza però è molto bassa, ancora di più se l’acqua è marina o salmastra.

Essiccazione:

L’essiccazione degli alimenti è il metodo più antico che l’uomo ha utilizzato per la conservazione degli alimenti. La disidratazione consente infatti di eliminare l’ambiente in cui si sviluppano i batteri responsabili della putrefazione e di malattie potenzialmente pericolose.

L’essiccazione solare consente, attraverso dispositivi scatolari molto semplici, di essiccare in modo veloce gli alimenti sfruttando l’energia solare.

Cottura:

La cottura solare rappresenta un’alternativa economicamente vantaggiosa alla cottura tradizionale, e negli ultimi anni il suo uso sta aumentando soprattutto nei paesi in via di sviluppo.

Le caratteristiche principali di questo tipo di cottura sono: i bassissimi costi, la facilità di costruzione e l’assenza totale di costi di utilizzo.

Nel paragrafo successivo andremo ad analizzare nel dettaglio proprio quest’ultima applicazione termica dell’energia solare.

1.4 Cottura solare

La cottura solare rappresenta l’alternativa a più basso costo e a minor impatto ambientale rispetto alla cottura tradizionale. Oggi per cucinare vengono utilizzati principalmente i combustibili fossili, come ad esempio il gas naturale, invece nei paesi in via di sviluppo (dove i combustibili fossili sono presenti in minor quantità e hanno un costo elevato) vengono utilizzati soprattutto legna da ardere e residui agricoli. L’utilizzo di questi combustibili porta a diversi problemi come la deforestazione e l’inquinamento atmosferico. La scarsità della legna nei paesi in via di sviluppo, come l’Africa, fa sì che la cottura del cibo sia molto costosa e faticosa a causa delle distanze da percorrere per procurarsi la legna. In questi paesi, però, l’energia solare è abbondante con una radiazione solare giornaliera di 5-7 kWh/m² e più di 275 giorni di sole all’anno [10]. Quindi la diffusione della cottura solare, con costi di utilizzo nulli, potrebbe rendere disponibile per tutti non solo la possibilità di cucinare, ma anche quella di sterilizzare l’acqua attraverso la bollitura che al giorno d’oggi è ancora un lusso per molti.

Un grande svantaggio dei forni solari è dato dalla dipendenza dalla radiazione solare: questi dispositivi, infatti, non possono essere utilizzati in tarda sera o nelle ore notturne. Per risolvere questo problema si ricorre a dei materiali utilizzati per

l'accumulo di energia termica che sono definiti PCM (Phase Change Materials), cioè materiali che attraverso il cambiamento di fase cedono calore latente, rendendo così possibile la cottura anche nei periodi di assenza di radiazione solare.

1.5 Forno solare

Come già anticipato nei paragrafi precedenti, per forno solare intendiamo un dispositivo in grado di captare energia solare e concentrarla in spazi piccoli al fine di cuocere i cibi. Per ottenere il massimo rendimento da un forno solare, questo dovrà essere orientato sia all'azimut che allo zenit direttamente verso il sole, quindi ha bisogno di essere continuamente ri-orientato per compensare il moto di rotazione terrestre al fine di raggiungere delle temperature sufficienti alla cottura in poco tempo.

Il funzionamento di un forno solare si basa su delle parti che riflettono i raggi solari e li convogliano in un unico punto detto focale, tali raggi verranno assorbiti quindi dalla superficie della pentola e provocheranno l'innalzamento della temperatura al suo interno e la conseguente cottura dei cibi. I diversi tipi di forni solari possono differire per tipologia di materiali utilizzati, per dimensioni, forma, peso e temperatura massima. Possiamo distinguere tre macrocategorie:

- Forni solari a pannelli
- Forni solari a scatola
- Forni solari parabolici

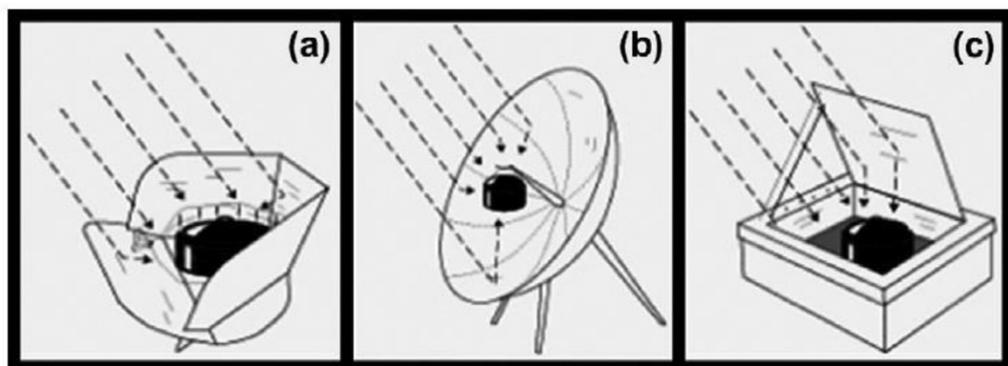


Fig. 4 - Tipi di forni solari: (a) forno solare a pannelli; (b) forno solare parabolico; (c) forno solare a scatola [10]

1.5.1 Forni solari a pannelli

Tra le tipologie di forni solari, quelli a pannelli sono i più diffusi perché sono fatti di materiali economici e sono molto semplici da costruire. Allo stesso tempo, però, questa tipologia di forni è la meno performante perché la modalità di cottura prevede che la luce solare venga concentrata dall'alto: questo è un grande

svantaggio perché limita la potenza di cottura che è altamente influenzata dalla radiazione riflessa, quindi in caso il cielo sia nuvoloso essa diminuisce notevolmente.

I forni solari a pannelli hanno però numerosi vantaggi rispetto alle altre tipologie: essi sono infatti molto leggeri e di piccole dimensioni, e quindi facilmente trasportabili; inoltre il loro basso costo ha fatto sì che molte organizzazioni umanitarie li distribuissero alle popolazioni povere o in via di sviluppo.



Fig. 5 - Forno solare a pannelli [11]

1.5.2 Forni solari a scatola

I forni solari a scatola sono stati una delle prime tipologie di forni solari ad essere realizzata. Essi sono formati da una scatola chiusa che rappresenta la camera di cottura, e da una serie di superfici riflettenti che concentrano l'energia solare in essa. La camera di cottura è chiusa superiormente da una lastra di vetro removibile, al suo interno invece per migliorare le prestazioni del forno, viene applicato molto spesso uno strato di vernice nera atossica anche alle alte temperature, il cui scopo è migliorare l'assorbimento della radiazione solare.

I principali vantaggi di questo forno sono la capacità di acquisire radiazione solare diffusa (utile quando ad esempio il cielo è nuvoloso), e, grazie alla camera di cottura chiusa, il forno a scatola riesce a minimizzare le perdite di calore dovute a condizioni quali il vento, nuvolosità intermittente e bassa temperatura ambientale.



Fig. 6 - Forno solare a scatola [12]

1.5.3 Forni solari parabolici

Il primo forno solare parabolico venne costruito nel 1950 presso il National Physical Laboratory in India da Ghai [11]. Successivamente vennero studiate numerose realizzazioni in modo da rendere migliori la geometria e la conformazione di questo tipo di forno e incrementarne l'efficienza.

La caratteristica principale dei forni solari parabolici è la capacità di raggiungere temperature molto elevate in tempi brevi. La modalità di funzionamento di questo forno si basa sulla concentrazione della radiazione solare che viene proiettata al di sotto della pentola, posta nel punto focale del forno. In questo modo non c'è bisogno di una camera di cottura per raggiungere temperature elevate, ma solo di un sistema di supporto per la pentola; allo stesso tempo, però, con un forno solare parabolico è molto semplice bruciare il cibo durante la cottura a causa della radiazione solare molto concentrata.



Fig. 7 - Forno solare parabolico [11]

1.6 Forni solari con accumulo termico

Tutte le tipologie di forno solare viste in precedenza hanno in comune la dipendenza diretta dalla radiazione solare. Questi, infatti, non possono essere utilizzati in assenza di sole, oppure raggiungono scarse temperature quando il cielo è nuvoloso. Per superare questo grande limite dei forni solari è necessario accumulare energia termica quando c'è molta radiazione solare, per poi utilizzarla quando essa non è sufficiente.

L'accumulo di energia termica nei forni solari può essere esterno oppure interno al forno stesso. L'accumulo esterno (Fig. 8) è un'integrazione di energia termica che avviene attraverso dei collettori oppure delle resistenze inserite nella parte assorbente nel forno; in questo modo oltre a poter utilizzare il forno quando la radiazione è bassa, si possono raggiungere temperature più alte di quelle che si avrebbero solamente con la radiazione solare stessa. La seconda tipologia, quella interna al forno solare, prevede l'utilizzo di pentole con un'intercapedine, all'interno della quale vi è un PCM (Phase Change Material), cioè un materiale a cambiamento di fase (Fig. 9). Il PCM, trovandosi nell'intercapedine della pentola, acquista calore e quindi passa dallo stato solido a quello liquido, a temperature che variano a seconda del PCM utilizzato. Il calore accumulato dal PCM durante il passaggio di stato viene successivamente ceduto alla pentola sotto forma di calore latente, nel momento in cui la radiazione solare viene a mancare o è più debole.



Fig. 8 - Forno solare parabolico integrato con pannelli fotovoltaici [13]

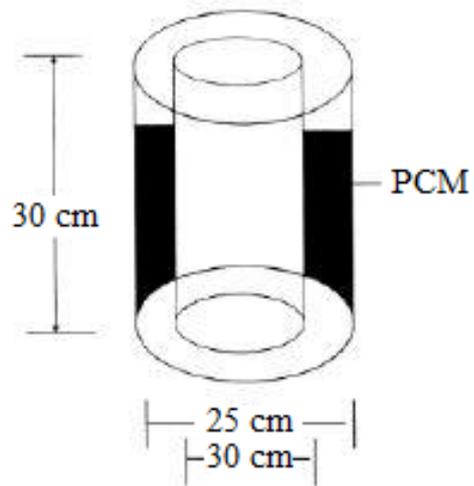


Fig. 9 - Pentola con PCM nell'intercapedine [14]

CAPITOLO 2

FORNO SOLARE IN ESAME

Il forno solare in esame è un prototipo di forno a scatola a media efficienza realizzato all'interno del Dipartimento "DIISM" della facoltà di ingegneria dell'Università Politecnica delle Marche.



Fig. 10 - Forno solare a scatola realizzato presso DIISM

Per la realizzazione dello stesso sono stati seguiti i disegni e i dettagli costruttivi del prototipo ideato dall'Ing. Gianni Crovatto (fig.11). La costruzione vera e propria è stata poi effettuata dai colleghi Andrea Pio Concettini [30] e Alessandro del Re [31] nell'anno accademico 2016/2017.

Il forno ha un'altezza massima di 753 mm ed una massa di circa 20 kg. Per migliorare le prestazioni e, quindi, ottimizzare l'utilizzo del forno, sono state apportate delle modifiche post realizzazione studiando dei materiali più idonei allo scopo.

Le modifiche apportate erano incentrate sulla tipologia di vernice utilizzata per la camera di cottura, sul materiale utilizzato per la realizzazione degli specchi, ovvero l'alluminio, e sul vetro che funge da coperchio trasparente per la camera di cottura, che, quindi, permette il passaggio della radiazione solare.

Ora verrà definito l'oggetto in sé e tutti i requisiti che dovrà rispettare, e successivamente si analizzeranno le fasi principali di progettazione.

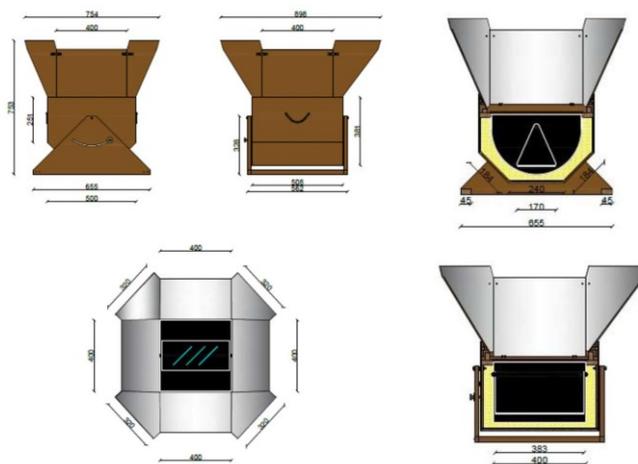


Fig. 11 - Dimensioni forno a media efficienza

2.1. Fasi di lavorazione

Le fasi di lavorazione per la realizzazione del prototipo sono principalmente quattro:

- Realizzazione della camera di cottura e verniciatura
- Realizzazione della scatola esterna
- Isolamento con lana di vetro
- Sistema di concentrazione dei raggi solari

2.1.1 Realizzazione della camera di cottura e verniciatura

Il primo passaggio è stato, quindi, quello di realizzare la camera di cottura, ovvero la parte centrale e più interna del forno all'interno della quale è possibile cuocere il cibo.

Per prima cosa, con l'utilizzo di una lamiera in acciaio inox, si sono ricavati i pezzi da assemblare.

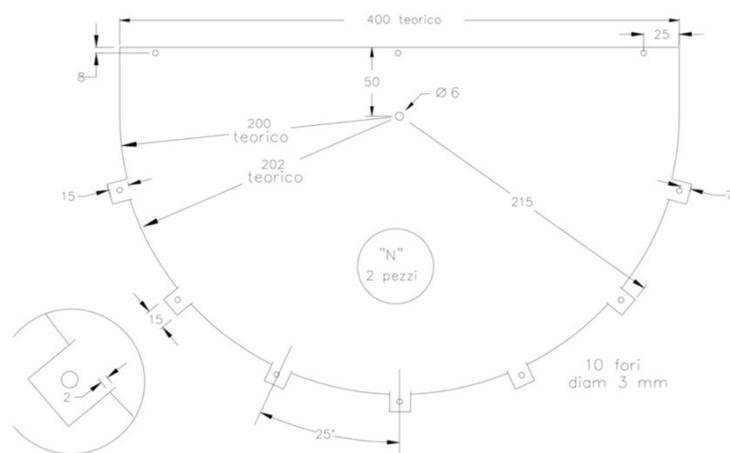


Fig. 12 - Pezzo "N"

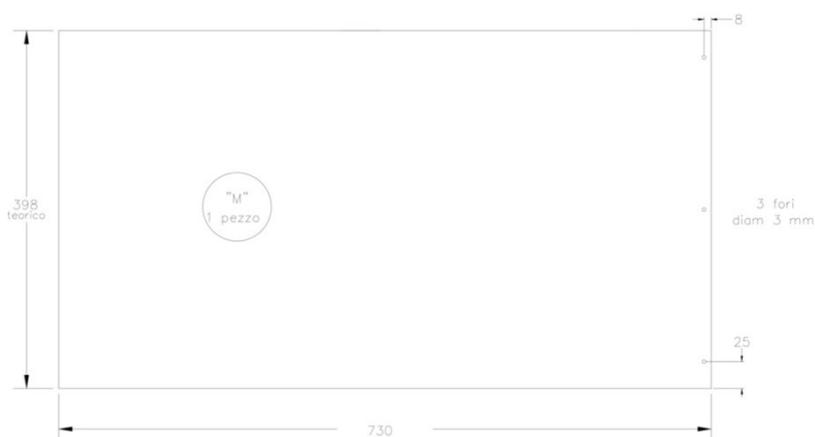


Fig. 13 - Pezzo "M"

Tutti i pezzi sono stati forati e piegati seguendo quanto descritto nelle immagini (Fig.12-13). Dopo che le operazioni di foratura e piegatura sono state effettuate, si è passati all'assemblaggio dei pezzi per realizzare la scatola interna. Per l'assemblaggio dei vari elementi sono stati utilizzati viti e rivetti e opportune giunture tramite un sigillante ad alta temperatura ed atossico. (fig.14)



Fig. 14 - Camera di cottura

All'interno della camera di cottura è posto un piano inclinabile che fungerà da supporto per le teglie, e che avrà la possibilità di ruotare in modo che, nonostante l'inclinazione del forno, le teglie resteranno comunque in posizione parallela al terreno.

Il pezzo dovrà essere piegato con un'inclinazione di 90° lungo i lati più lunghi, e dovrà essere dotato di due fori e due perni che ne consentiranno l'oscillazione una volta installato nella camera di cottura. (fig.15)

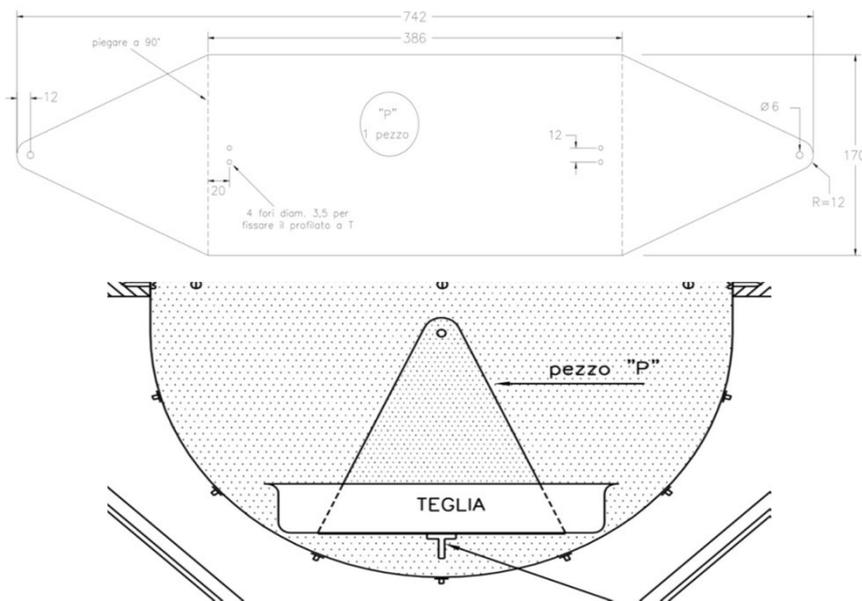


Fig. 15 - Pezzo "P" piegato e zavorrato

Dopodiché si è passati alla verniciatura di tutti i pezzi realizzati (fig.16).

La vernice utilizzata è nera opaca ed è una vernice selettiva, che quindi ha una duplice funzione: la prima è, ovviamente, quella di assorbire i raggi solari, mentre

la seconda è quella di proteggere gli elementi in alluminio da un'eventuale ossidazione.

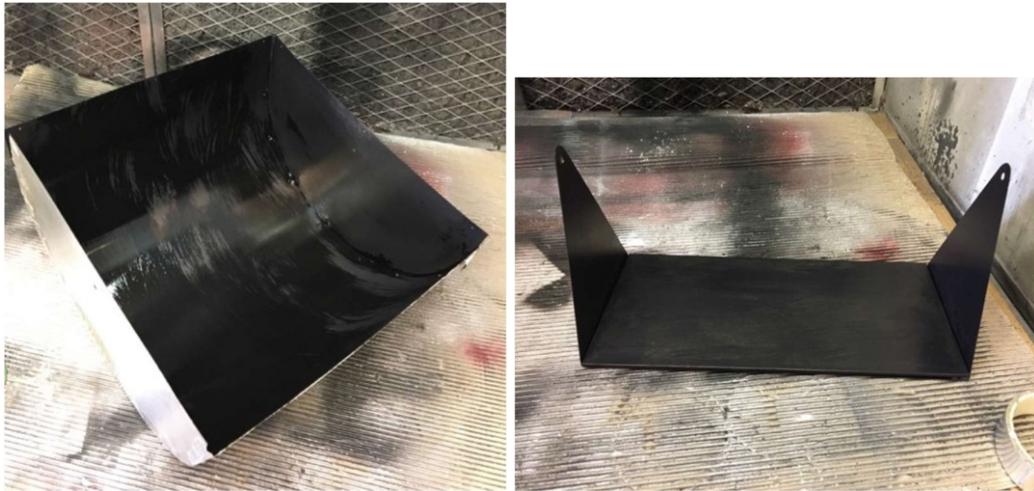


Fig. 16 - Verniciatura camera di cottura e piano inclinabile

2.1.2. Realizzazione della scatola esterna

Per la costruzione della scatola esterna sono stati utilizzati fogli di legno "MDF", dai quali sono state ricavate due fiancate "A", due fiancate "B", due pannelli inferiori "C" e un pannello inferiore "D", tutti successivamente forati seguendo le indicazioni e rispettando i vari diametri. (fig. 17)

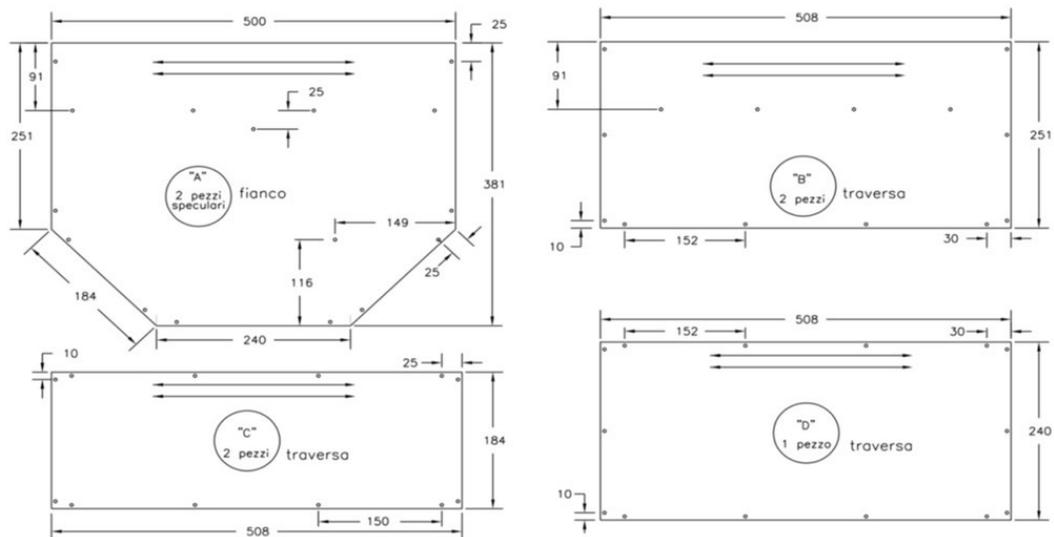


Fig. 17 - Pezzi che formano il corpo esterno

Per rinforzare i vari pezzi in compensato, il progetto prevede la realizzazione di uno scheletro in listelli di abete, che, una volta unito alle fiancate e alle traverse, renderà la struttura del forno più stabile e resistente. (fig.18)

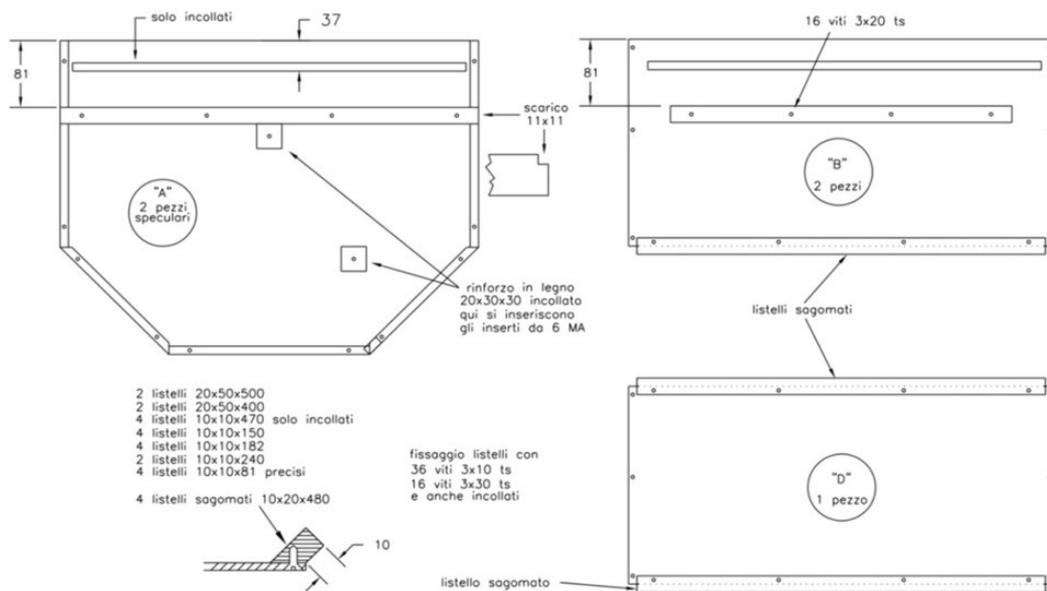


Fig. 18 - Posizione dei listelli di rinforzo

Dopo aver assemblato tutti i vari pezzi ricavati dai pannelli in legno "MDF", la struttura è stata rinforzata con uno scheletro costruito da listelli in legno di abete. A questo punto, per rendere più agevole il trasporto, sono state create delle impugnature. Sono state poi realizzate, per mezzo di pannelli in legno più robusti, le parti che formano la base del forno e un sistema di bloccaggio della rotazione del forno.



Fig. 19 - Scatola esterna con basamento

Nella fase successiva, è stata inserita la camera di cottura all'interno della scatola esterna, posizionata all'incirca al centro mediante l'utilizzo di distanziali realizzati, anche in questo caso, con listelli. (fig. 20)



Fig. 20 - Inserimento camera di cottura nell'involucro esterno

2.1.3. Isolamento con lana di vetro

Una volta inserita e posizionata la camera di cottura in lamiera zincata all'interno della scatola esterna attraverso distanziatori in legno avvitati e incollati (sia alla parete esterna che a quella interna), è stato effettuato l'isolamento termico della camera interna.

I pannelli isolanti sono stati tagliati con un cutter in forme piuttosto semplici (rettangolari o quadrate) e di grandezze coerenti con quelle delle pareti della camera interna.

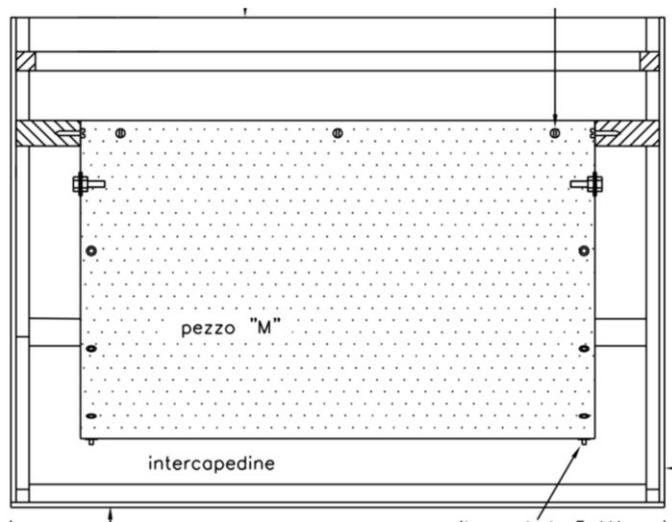


Fig. 21 - Distanziatori e isolamento camera interna

L'isolamento termico è stato completato inserendo nello spazio, creatosi tra la camera di cottura e la scatola esterna, fiocchi e strati di lana di vetro. Poi, la scatola esterna è stata chiusa in modo tale da completare la struttura del forno.



Fig. 22 - Riempimento fessure con materiale isolante

Infine, per evitare che l'umidità deformi il legno, sono state verniciate le pareti della scatola esterna (previa scartavetratura di tutti gli spigoli, giunture, gobbe ed eventuali tracce di colla), in modo da rendere le pareti del forno lisce ed omogenee.



Fig. 23 - Scatola forno verniciata

2.1.4 Sistema di concentrazione dei raggi solari

Il sistema di concentrazione dei raggi solari è stato realizzato tramite supporti in legno, ai quali sono stati incollati fogli di alluminio che fungono, quindi, da materiale riflettente.

Si tratta di 4 pannelli quadrati attaccati al box con delle cerniere, in modo da permetterne la chiusura, ed altri 4 pannelli di completamento (a forma di cuneo), che vengono inseriti in modo alternato tra quelli di forma quadrata (formando una parabola), e collegati tra loro con dei ganci. (fig.24-25)

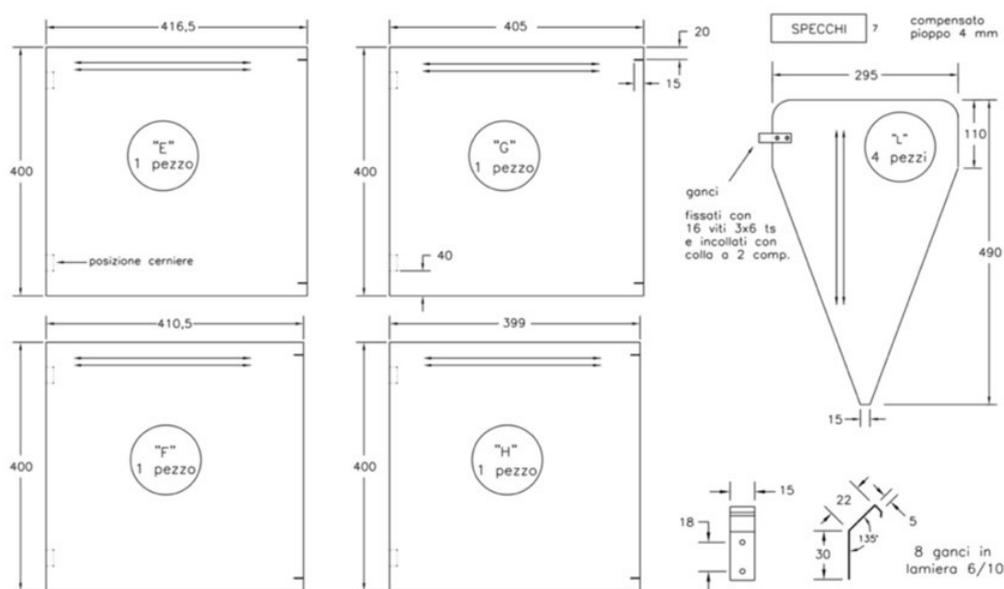


Fig. 24 - Disegni pannelli riflettenti (specchi)



Fig. 25 - Specchi assemblati

È importante che gli specchi siano inclinati adeguatamente, in modo da captare il sole nel migliore dei modi.



Fig. 26 - Forno solare ultimato

2.2. Principali modifiche

Il forno, ormai costruito, è stato successivamente sottoposto ad alcune modifiche con l'intento di migliorarne prestazioni, potenza ed efficienza, utilizzando materiali più specifici per il caso concreto.

Al fine di differenziarlo dal prototipo progettato dall' Ing. Crovatto, è stata utilizzata una particolare vernice per dipingere la camera di cottura. Inoltre, anche specchi e vetro sono stati migliorati.

2.2.1 Vernice

La vernice utilizzata è chiamata SOLKOTE HI / SORB-II TM [32], che è un rivestimento ottico specifico per tale applicazione, con caratteristiche differenti dalla normale vernice in commercio.

È un materiale perfetto per il nostro caso, in quanto è contraddistinto da una tolleranza a temperature molto alte, da una resistenza all'umidità elevata e alla degradazione UV.

Le caratteristiche della vernice sono:

- L'emissività è compresa tra 0,20 e 0,49 a seconda dello spessore di vernice applicato, della superficie su cui è applicato, e delle modalità con cui la superficie è stata preparata alla tinteggiatura. Nella Fig. individuiamo un andamento medio dell'emissività.
- L'assorbimento è compreso, invece, tra 0,88 e 0,94. Nella fig. vediamo un andamento medio dell'assorbimento.
- L'intervallo di tolleranza di temperatura è compreso tra -100°F e 1000°F (-73°C a 538°C).

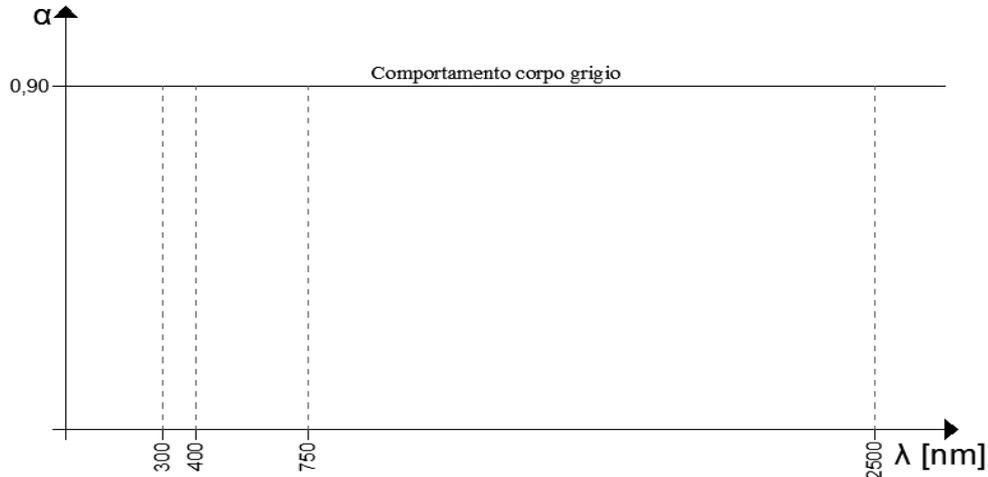


Fig. 27 - Diagramma assorbimento

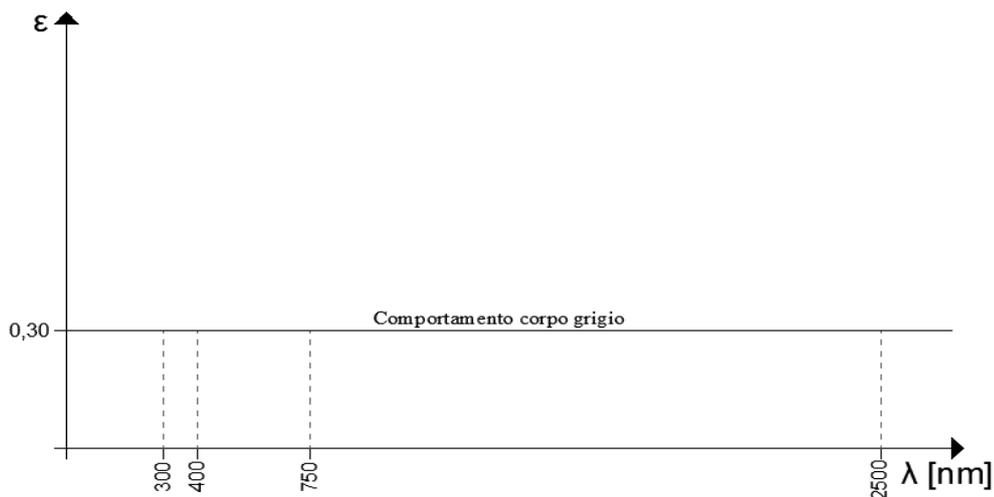


Fig. 28 - Diagramma emissività

2.2.2 Vetro e ISO 9050_2003

Per quanto riguarda il vetro, sono stati utilizzati due doppi vetri temperati con uno spessore di 4mm, ai quali è accreditata una trasmissione energetica del 90%, e quindi di gran lunga superiore ad un vetro normale.

Nella seguente tabella individuiamo in maniera dettagliata le caratteristiche energetiche.

Tab. 1 - Caratteristiche energetiche del vetro

| CARATTERISTICHE | EN 410 | ISO 9050 |
|--|--------|----------|
| Fattore solare – g(%) | 91 | 91 |
| Riflessione energetica - ρ_e (%) | 8 | 8 |
| Trasmissione energetica diretta - τ_e (%) | 91 | 90 |
| Assorbimento energetico - α_e (%) | 1 | 2 |
| Coefficiente di shading – SC | 1,05 | 1,05 |
| Trasmissione dei raggi ultravioletti – UV (%) | 85 | / |
| Selettività | 1,01 | 1,01 |

Secondo la norma ISO 9050_2003, consideriamo gli aspetti energetici principali del vetro, ossia la trasmissione energetica, la riflessione e l'assorbimento, individuando le modalità di calcolo e spiegandone il significato.

Trasmissione diretta solare

$$\tau_e = \frac{\sum_{\lambda=300}^{2500 \text{ nm}} \tau(\lambda) s\lambda \Delta\lambda}{\sum_{\lambda=300}^{2500 \text{ nm}} s\lambda \Delta\lambda} \quad (1)$$

La trasmissione diretta solare τ_e viene calcolata utilizzando la seguente formula:

Dove:

- $s\lambda$ è la distribuzione spettrale relativa della radiazione solare
- $\tau(\lambda)$ è la trasmittanza spettrale del vetro
- $\Delta\lambda$ è il procedimento di integrazione, e i punti di dati devono essere scelti tra le lunghezze d'onda riportate in tab.2

Riflettanza solare diretta

La riflessione solare diretta ρ_e della vetratura viene calcolata utilizzando la seguente formula:

$$\rho_e = \frac{\sum_{\lambda=300}^{2500 \text{ nm}} \rho_0(\lambda) s\lambda \Delta\lambda}{\sum_{\lambda=300}^{2500 \text{ nm}} s\lambda \Delta\lambda} \quad (2)$$

Dove:

- $s\lambda$ è la distribuzione spettrale relativa della radiazione solare
- $\rho_0(\lambda)$ è la riflettanza spettrale esterna del vetro
- $\Delta\lambda$ è il procedimento di integrazione, e i punti di dati devono essere scelti tra le lunghezze d'onda riportate in tab.2

Assorbimento solare diretto

L'assorbanza diretta solare α_e viene calcolata per differenza dalla seguente formula:

$$\tau_e + \rho_e + \alpha_e = 1 \quad (3)$$

Tab. 2 - Distribuzione spettrale della radiazione solare globale

| λ nm | $S_{\lambda}\Delta\lambda$ | λ nm | $S_{\lambda}\Delta\lambda$ |
|-----------------|----------------------------|-----------------|----------------------------|
| 300 | 0 | 680 | 0,012 838 |
| 305 | 0,000 057 | 690 | 0,011 788 |
| 310 | 0,000 236 | 700 | 0,012 453 |
| 315 | 0,000 554 | 710 | 0,012 798 |
| 320 | 0,000 916 | 720 | 0,010 589 |
| 325 | 0,001 309 | 730 | 0,011 233 |
| 330 | 0,001 914 | 740 | 0,012 175 |
| 335 | 0,002 018 | 750 | 0,012 181 |
| 340 | 0,002 189 | 760 | 0,009 515 |
| 345 | 0,002 260 | 770 | 0,010 479 |
| 350 | 0,002 445 | 780 | 0,011 381 |
| 355 | 0,002 555 | 790 | 0,011 262 |
| 360 | 0,002 683 | 800 | 0,028 718 |
| 365 | 0,003 020 | 850 | 0,048 240 |
| 370 | 0,003 359 | 900 | 0,040 297 |
| 375 | 0,003 509 | 950 | 0,021 384 |
| 380 | 0,003 600 | 1 000 | 0,036 097 |
| 385 | 0,003 529 | 1 050 | 0,034 110 |
| 390 | 0,003 551 | 1 100 | 0,018 861 |
| 395 | 0,004 294 | 1 150 | 0,013 228 |
| 400 | 0,007 812 | 1 200 | 0,022 551 |
| 410 | 0,011 638 | 1 250 | 0,023 376 |
| 420 | 0,011 877 | 1 300 | 0,017 756 |
| 430 | 0,011 347 | 1 350 | 0,003 743 |
| 440 | 0,013 246 | 1 400 | 0,000 741 |
| 450 | 0,015 343 | 1 450 | 0,003 792 |
| 460 | 0,016 166 | 1 500 | 0,009 693 |
| 470 | 0,016 178 | 1 550 | 0,013 693 |
| 480 | 0,016 402 | 1 600 | 0,012 203 |
| 490 | 0,015 794 | 1 650 | 0,010 615 |
| 500 | 0,015 801 | 1 700 | 0,007 256 |
| 510 | 0,015 973 | 1 750 | 0,007 183 |
| 520 | 0,015 357 | 1 800 | 0,002 157 |
| 530 | 0,015 867 | 1 850 | 0,000 398 |
| 540 | 0,015 827 | 1 900 | 0,000 082 |
| 550 | 0,015 844 | 1 950 | 0,001 087 |
| 560 | 0,015 590 | 2 000 | 0,003 024 |
| 570 | 0,015 256 | 2 050 | 0,003 988 |
| 580 | 0,014 745 | 2 100 | 0,004 229 |
| 590 | 0,014 330 | 2 150 | 0,004 142 |
| 600 | 0,014 663 | 2 200 | 0,003 690 |
| 610 | 0,015 030 | 2 250 | 0,003 592 |
| 620 | 0,014 859 | 2 300 | 0,003 436 |
| 630 | 0,014 622 | 2 350 | 0,003 163 |
| 640 | 0,014526 | 2 400 | 0,002 233 |
| 650 | 0,014 445 | 2 450 | 0,001 202 |
| 660 | 0,014 313 | 2 500 | 0,000 475 |
| 670 | 0,014 023 | | |

Normalized relative spectral distribution of global solar radiation (direct + diffuse) S_{λ} for air mass = 1.5, calculated from the values given in Table 1, column 5, of ISO 9845-1:1992, multiplied by the wavelength interval $\Delta\lambda$. The values in this table are calculated according to the trapezoidal rule.

2.2.3. Alluminio

Al posto di un alluminio tradizionale, è stato utilizzato un particolare alluminio composto da diversi strati (fig.29), i quali garantiscono il 9% della riflessione dei raggi solari.

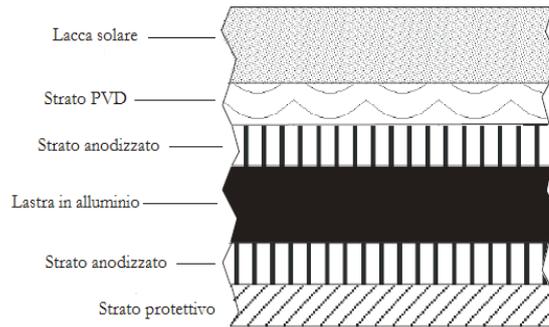


Fig. 29 - Struttura fogli di alluminio

Qui di seguito si riporta il grafico, preso dalla scheda tecnica del materiale, che mette in relazione la riflettanza totale della lega con la lunghezza d'onda in nanometri.

Notiamo che non tutta la radiazione solare incidente sull'alluminio viene assorbita: infatti, questa rappresenta il 95% della radiazione solare, mentre, il restante 5% è assorbito dallo specchio che, quindi, si surriscalda.

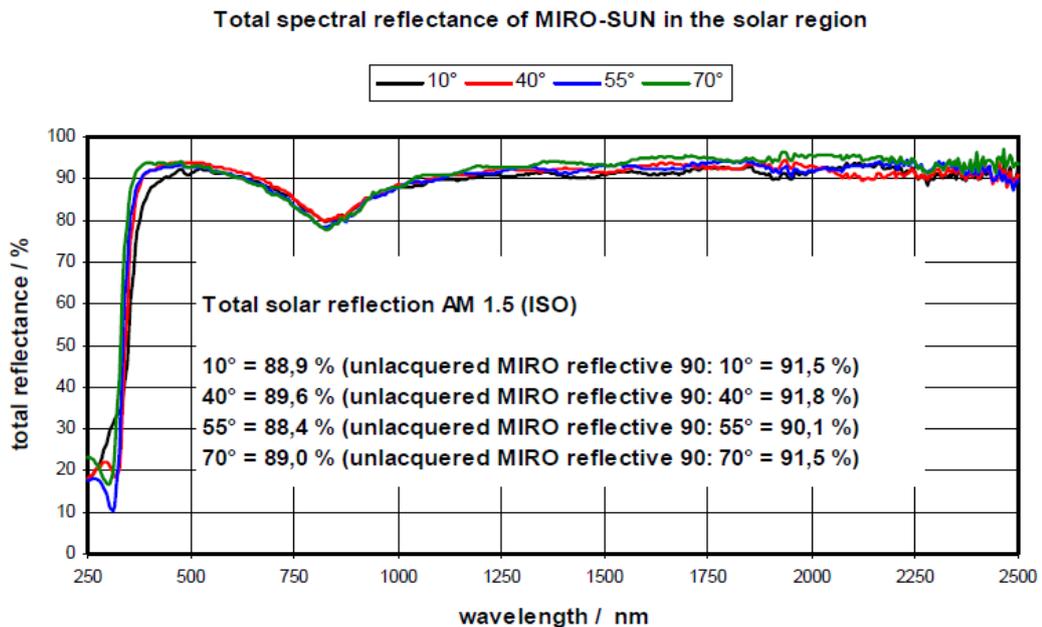


Fig. 30 - Riflettanza totale dell'alluminio

2.3. Analisi funzionale

Per far sì che il forno sia il più possibile funzionale, è fondamentale il dimensionamento in modo che:

- Il trasporto e l'orientamento risultino agevoli;
- Riesca a contenere la quantità di cibo normalmente cucinata;

- Riesca ad accogliere la maggior parte dei tegami.

Nello specifico, troviamo le caratteristiche nella seguente tabella.

Tab. 3 - Analisi funzionale del forno

| | |
|--|---------------------------------|
| Peso | 20,1 kg |
| Ingombro a terra con pannelli chiusi | 0,37 m ² |
| Ingombro a terra con pannelli aperti | 0,68 m ² |
| Diametro max apertura pannelli riflettenti | 0,898 m ² |
| Potenza max raggiungibile | 700 W |
| Temperatura max raggiungibile | 200 °C |
| Capienza max | 2 kg di pane cotti in un ora |
| Vano forno | Lamiera in acciaio inox |
| Scatola esterna | Pannelli in legno "MDF" |
| Isolamento termico | Fibra di roccia e lana di vetro |
| Pannelli riflettenti | Alluminio su legno "MDF" |

CAPITOLO 3

MATERIALI A CAMBIAMENTO DI FASE

I materiali a cambiamento di fase (Phase Change Materials, PCM) sono materiali che accumulano calore latente sfruttando la transizione di fase. In questo modo, riescono ad immagazzinare una grande quantità di energia mantenendo costante la propria temperatura.

Quando la temperatura dei PCM supera una certa soglia (che varia a seconda del materiale utilizzato), essi si liquefanno e accumulano calore latente di liquefazione. Nel caso delle applicazioni solari, questo calore è fornito dall'energia solare. Allo stesso modo, quando la temperatura si abbassa, il materiale inizia a solidificarsi e a cedere il calore accumulato: in tal caso si parla di calore latente di solidificazione.

In generale, il calore scambiato durante una trasformazione termodinamica può essere scomposto in calore sensibile e calore latente. Il calore sensibile può essere calcolato come prodotto della variazione di temperatura prodotta durante uno scambio termico e da un coefficiente di proporzionalità detto calore specifico. Il calore latente, invece, è la quantità di energia (sotto forma di calore) scambiata durante un passaggio di stato, la cui unità di misura nel SI è J/kg o J/mol [15]. A differenza del calore sensibile, lo scambio di energia sotto forma di calore latente avviene a temperatura costante. Infatti, secondo la teoria cinetica dei gas, durante la transizione di un sistema bifasico l'energia fornita (o assorbita) al sistema non incrementa (o decrementa) la temperatura del sistema stesso, ma agisce sulla forza dei legami intermolecolari [16]. L'accumulo di energia termica tramite PCM, sfruttando il calore latente, permette quindi di caricare e scaricare una grande quantità di energia da una piccola massa a calore costante [17]. Inoltre, questo tipo di sistemi, operando con piccole differenze di temperatura tra carico e scarico, presentano una maggiore efficienza energetica [18].

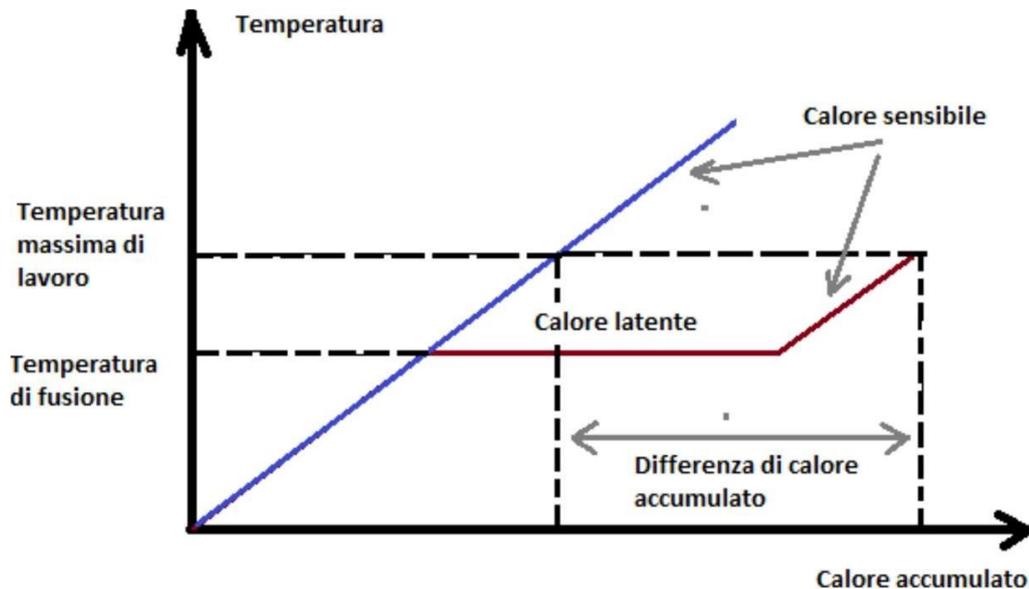


Fig. 31 - Differenze di energia accumulata tra calore sensibile e calore latente [18]

3.1 Caratteristiche dei PCM

Negli ultimi anni la ricerca su nuovi materiali a cambiamento di fase è aumentata notevolmente. Essi, infatti, vengono utilizzati non solo per i sistemi di accumulo come nel nostro caso di studio, bensì anche in altri ambiti, come ad esempio l'edilizia, sotto forma di pannelli, intonaci o isolanti.

In linea generale, la scelta di un materiale a cambiamento di fase dipende dall'ambito di utilizzo e dalle caratteristiche del sistema in cui viene inserito.

I PCM che vengono utilizzati nei sistemi di accumulo devono presentare alcune caratteristiche che li rendono prestanti ed efficienti:

- Temperatura di fusione compresa nel range operativo del sistema stesso, altrimenti non si riesce ad accumulare o cedere calore latente durante il passaggio di stato
- Distribuzione uniforme delle temperature, e quindi uniformità di fusione
- Essere chimicamente stabili
- Non essere tossici e corrosivi
- Costi contenuti

Però, questi materiali (i quali, come anticipato nel paragrafo precedente, sono caratterizzati da un'ottima capacità termica) soffrono di una bassa conducibilità termica allo stato solido. Questa loro caratteristica rappresenta un limite allo sviluppo di sistemi di accumulo efficienti, poiché la bassa conducibilità influenza negativamente la densità di potenza e i tempi di carico/scarico. Per cercare di porre rimedio a questo problema possono essere utilizzati diversi approcci, come quello di utilizzare il trasferimento di massa che si verifica in convezione (e quindi solo allo stato liquido), oppure quello di aggiungere altre sostanze con un'alta conducibilità termica nel PCM puro [18]. Un altro aspetto importante di

cui tenere conto nella scelta del PCM è il ciclo di vita del materiale che influenza in modo diretto il tempo di possibile utilizzo.

3.2 Classificazione dei PCM

I PCM possono essere classificati in base al tipo di materiale (che può essere organico, inorganico o eutettico) [19], oppure in base alla loro temperatura di fusione [18].

3.2.1 Classificazione in base al tipo di materiale

La classificazione secondo il tipo di materiale prevede la divisione dei PCM in organici, inorganici ed eutettici, come nel seguente schema (Fig. 32):

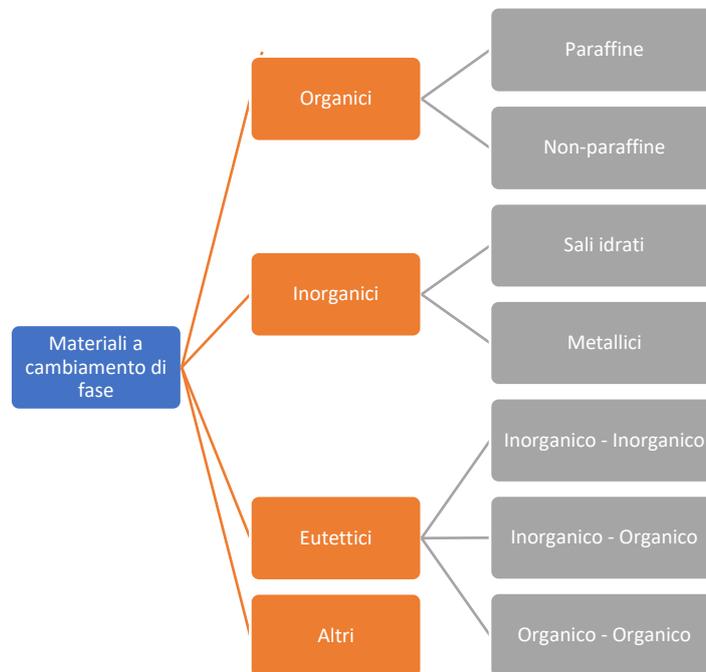


Fig. 32 - Classificazione dei PCM in base al tipo di materiale [19]

3.2.1.1 PCM organici

I materiali a cambiamento di fase organici fondono in modo congruente, non sono corrosivi e non soffrono il fenomeno della segregazione di fase durante la fusione; perciò possono far fronte a molti cicli di transizione, senza che vengano meno le loro caratteristiche di accumulo di calore latente. Inoltre, solidificando con un modesto o nullo sottoraffreddamento, la temperatura di fusione si mantiene più o meno costante. Essi, a loro volta, sono suddivisi in paraffine e non paraffine.

Paraffine:

Le paraffine (o cere paraffine) sono miscele di idrocarburi solidi, in prevalenza alcani, le cui molecole presentano catene contenenti dai 20 ai 40 atomi di carbonio [20]. Esse sono ricavate dal petrolio e sono insolubili in acqua e negli acidi; allo stato solido si presentano come masse cerose e biancastre.

La temperatura di fusione e il calore latente di questi materiali varia in modo direttamente proporzionale alla lunghezza della catena (Tab. 4) [21]. Esistono molteplici paraffine, ciascuna con diversa temperatura di fusione, per questo è molto semplice trovare quella che meglio si adatta alla temperatura operativa del sistema di accumulo termico in uso. In commercio si possono trovare paraffine con diverso grado di purezza; tuttavia, a causa dei costi elevati della paraffina pura, solitamente vengono utilizzate versioni “technical grade”, ovvero con grado di purezza più basso. Le paraffine presentano una serie di caratteristiche che le rendono interessanti per l'utilizzo nelle applicazioni termiche come PCM [22]:

- Sono chimicamente inerti e stabili sotto i 500 °C
- Non presentano segregazione né eccessivo sottoraffreddamento
- Non sono corrosivi e tossici
- Non degradano, e quindi sono adatte per applicazioni con numerosi cicli di passaggi di stato
- Sono disponibili in un ampio range di temperature

Hanno, però, anche una serie di svantaggi:

- Ciclo di condensazione-fusione molto lungo
- Bassa conducibilità termica
- Incompatibilità con contenitori di plastica
- Moderata infiammabilità

Alcune di queste problematiche possono essere risolte, ad esempio, mescolando la paraffina con materiali con una più alta conducibilità termica, e utilizzando materiali compatibili per i contenitori.

Tab. 4 - Temperatura e calore latente di fusione di paraffine in base al numero di atomi di carbonio presenti nella catena [21]

| No. atomi di carbonio | Temperatura di fusione (°C) | Calore latente di fusione (kJ/kg) |
|-----------------------|-----------------------------|-----------------------------------|
| 14 | 5.5 | 228 |
| 15 | 10 | 205 |
| 16 | 16.7 | 237.1 |
| 17 | 21.7 | 213 |
| 18 | 28.0 | 244 |
| 19 | 32.0 | 222 |
| 20 | 36.7 | 246 |
| 21 | 40.2 | 200 |
| 22 | 44.0 | 249 |
| 23 | 47.5 | 232 |
| 24 | 50.6 | 255 |
| 25 | 49.4 | 238 |
| 26 | 56.3 | 256 |
| 27 | 58.8 | 236 |
| 28 | 61.6 | 253 |
| 29 | 63.4 | 240 |
| 30 | 65.4 | 251 |
| 31 | 68.0 | 242 |
| 32 | 69.5 | 170 |
| 33 | 73.9 | 268 |
| 34 | 75.9 | 269 |

Non paraffine:

Fanno parte delle non paraffine la maggior parte dei PCM oggi utilizzati, come acidi grassi, minerali di origine organica e altri materiali organici non paraffini. Ogni materiale appartenente a questo gruppo ha le sue specifiche caratteristiche (Tab. 5), in generale però presentano degli aspetti comuni quali:

- Elevata temperatura di fusione
- Elevata infiammabilità
- Bassa conducibilità termica
- Instabilità alle alte temperature
- Alta tossicità

Tab. 5 - Elenco PCM non paraffini con relativa temperatura di fusione e calore latente di fusione [21]

| Materiale | Temperatura di fusione (°C) | Calore latente di fusione (kJ/kg) | Materiale | Temperatura di fusione (°C) | Calore latente di fusione (kJ/kg) |
|-------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|----------------------|-----------------------------|-----------------------------------|
| Formic acid | 7.8 | 247 | O-Xylene dichloride | 55.0 | 121 |
| Caprylic acid | 16.3 | 149 | β-Chloroacetic acid | 56.0 | 147 |
| Glycerin | 17.9 | 198.7 | Chloroacetic acid | 56 | 130 |
| D-Lactic acid | 26 | 184 | Nitronaphthalene | 56.7 | 103 |
| Methyl palmitate | 29 | 205 | Trimyristin | 33-57 | 201-213 |
| Camphenilone | 39 | 205 | Heptadecanoic acid | 60.6 | 189 |
| Docosyl bromide | 40 | 201 | α-Chloroacetic acid | 61.2 | 130 |
| Caprylone | 40 | 259 | Beeswax | 61.8 | 177 |
| Phenol | 41 | 120 | Glycolic acid | 63 | 109 |
| Heptadecanone | 41 | 201 | p-Bromophenol | 63.5 | 86 |
| 1-Cyclohexyl Octadecane | 41 | 218 | Azobenzene | 67.1 | 121 |
| 4-Heptadecanone | 41 | 197 | Acrylic acid | 68.0 | 115 |
| p-Toluidine | 43.3 | 167 | Dinitrotoluene (2,4) | 70.0 | 111 |
| Cyanamide | 44 | 209 | Phenylacetic acid | 76.7 | 102 |
| Methyl eicosanoate | 45 | 230 | Thiosinamine | 77.0 | 140 |
| 3-Heptadecanone | 48 | 218 | Bromocamphor | 77 | 174 |
| 2-Heptadecanone | 48 | 218 | Durene | 79.3 | 156 |
| Hydrocinnamic acid | 48.0 | 118 | Benzylamine | 78.0 | 174 |
| Cetyl alcohol | 49.3 | 141 | Methyl bromobenzoate | 81 | 126 |
| α-Nephylamine | 50.0 | 93 | Alpha naphthol | 96 | 163 |
| Camphene | 50 | 238 | Glutaric acid | 97.5 | 156 |
| O-Nitroaniline | 50.0 | 93 | p-Xylene dichloride | 100 | 138.7 |
| 9-Heptadecanone | 51 | 213 | Catechol | 104.3 | 207 |
| Thymol | 51.5 | 115 | Quinone | 115 | 171 |
| Methyl behenate | 52 | 234 | Acetanilide | 118.9 | 222 |
| Diphenylamine | 52.9 | 107 | Succinic anhydride | 119 | 204 |
| p-Dichlorobenzene | 53.1 | 121 | Benzoic acid | 121.7 | 142.8 |
| Oxalate | 54.3 | 178 | Stilbene | 124 | 167 |
| Hypophosphoric acid | 55 | 213 | Benzamide | 127.2 | 169.4 |

3.2.1.2 PCM inorganici

I PCM inorganici furono i primi materiali ad essere studiati approfonditamente per l'utilizzo in accumulatori termici, in quanto presentano un calore latente di fusione più elevato rispetto ai materiali organici. Tuttavia, le caratteristiche di questi materiali degradano nel tempo, e per questo sono incompatibili in applicazioni dove sono richiesti molti cicli di passaggi di stato. I materiali inorganici sono suddivisi in sali idrati e materiali metallici.

Sali idrati:

I sali idrati sono leghe di sali inorganici e acqua che formano un solido cristallino. Le principali caratteristiche di questi materiali sono:

- Elevato calore latente per unità di volume
- Alta conducibilità termica
- Basse variazioni di volume
- Bassa o nulla tossicità
- Compatibilità con contenitori plastici
- Costo contenuto

Il processo di fusione è in realtà una disidratazione del sale che porta alla formazione di un sale idrato e acqua. Questa caratteristica causa, però, dei

problemi di incongruenza nella fusione: infatti, ci sono dei fenomeni di segregazione di fase dovuta al fatto che l'acqua di cristallizzazione non è sufficiente per tutta la fase solida presente al momento della solidificazione; di conseguenza, per differenza di densità, il sale si dispone sul fondo del contenitore e, al successivo ciclo, la quantità di PCM disponibile sarà minore, di modo che le caratteristiche di accumulo termico del materiale diminuiscono. Per risolvere questo problema sono state sperimentate diverse sostanze in grado di aumentare la viscosità del sale che però, allo stesso tempo, portano ad un peggioramento della velocità di cristallizzazione e di conducibilità termica.

Inoltre, un'altra caratteristica negativa dei sali idrati è la presenza del fenomeno di sottoraffreddamento causato da una bassa velocità di nucleazione.

Tab. 6 - Elenco idrati con relativa temperatura di fusione e calore latente di fusione [21]

| Materiale | Temperatura di fusione (°C) | Calore latente di fusione (kJ/kg) | Materiale | Temperatura di fusione (°C) | Calore latente di fusione (kJ/kg) |
|--|-----------------------------|-----------------------------------|--|-----------------------------|-----------------------------------|
| K ₂ HPO ₄ ·6H ₂ O | 14.0 | 109 | Ca(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O | 47.0 | 153 |
| FeBr ₃ ·6H ₂ O | 21.0 | 105 | Fe(NO ₃) ₂ ·9H ₂ O | 47 | 155 |
| Mn(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O | 25.5 | 148 | Na ₂ SiO ₃ ·4H ₂ O | 48 | 168 |
| FeBr ₃ ·6H ₂ O | 27.0 | 105 | K ₂ HPO ₄ ·3H ₂ O | 48 | 99 |
| CaCl ₂ ·12H ₂ O | 29.8 | 174 | Na ₂ S ₂ O ₃ ·5H ₂ O | 48.5 | 210 |
| LiNO ₃ ·2H ₂ O | 30.0 | 296 | MgSO ₄ ·7H ₂ O | 48.5 | 202 |
| LiNO ₃ ·3H ₂ O | 30 | 189 | Ca(NO ₃) ₂ ·3H ₂ O | 51 | 104 |
| Na ₂ CO ₃ ·10H ₂ O | 32.0 | 267 | Zn(NO ₃) ₂ ·2H ₂ O | 55 | 68 |
| Na ₂ SO ₄ ·10H ₂ O | 32.4 | 241 | FeCl ₃ ·2H ₂ O | 56 | 90 |
| KFe(SO ₄) ₂ ·12H ₂ O | 33 | 173 | Ni(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O | 57.0 | 169 |
| CaBr ₂ ·6H ₂ O | 34 | 138 | MnCl ₂ ·4H ₂ O | 58.0 | 151 |
| LiBr ₂ ·2H ₂ O | 34 | 124 | MgCl ₂ ·4H ₂ O | 58.0 | 178 |
| Zn(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O | 36.1 | 134 | CH ₃ COONa·3H ₂ O | 58.0 | 265 |
| FeCl ₃ ·6H ₂ O | 37.0 | 223 | Fe(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O | 60.5 | 126 |
| Mn(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O | 37.1 | 115 | NaAl(SO ₄) ₂ ·10H ₂ O | 61.0 | 181 |
| Na ₂ HPO ₄ ·12H ₂ O | 40.0 | 279 | NaOH·H ₂ O | 64.3 | 273 |
| CaSO ₄ ·7H ₂ O | 40.7 | 170 | Na ₃ PO ₄ ·12H ₂ O | 65.0 | 190 |
| KF·2H ₂ O | 42 | 162 | LiCH ₃ COO·2H ₂ O | 70 | 150 |
| MgI ₂ ·8H ₂ O | 42 | 133 | Al(NO ₃) ₂ ·9H ₂ O | 72 | 155 |
| CaI ₂ ·6H ₂ O | 42 | 162 | Ba(OH) ₂ ·8H ₂ O | 78 | 265 |
| K ₂ HPO ₄ ·7H ₂ O | 45.0 | 145 | Mg(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O | 89.9 | 167 |
| Zn(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O | 45 | 110 | KAl(SO ₄) ₂ ·12H ₂ O | 91 | 184 |
| Mg(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O | 47.0 | 142 | MgCl ₂ ·6H ₂ O | 117 | 167 |

Materiali metallici:

I materiali metallici sono poco diffusi a causa dell'elevato peso per unità di volume che rende più difficile il loro inserimento in sistemi di accumulo termico portatili o in ambito edile. Le caratteristiche di questa categoria di materiali sono:

- Basso calore latente per unità di peso
- Elevato calore latente per unità di volume
- Elevata conducibilità termica
- Basso calore specifico
- Bassa temperatura di fusione

Tab. 7 - Elenco di alcuni metalli utilizzati come PCM con relativa temperatura di fusione e calore latente di fusione [21]

| Materiale | Temperatura di fusione (°C) | Calore latente di fusione (kJ/kg) |
|-----------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|
| Gallium-gallium antimony eutectic | 29.8 | - |
| Gallium | 30.0 | 80.3 |
| Cerrolow eutectic | 58 | 90.9 |
| Bi-Cd-In eutectic | 61 | 25 |
| Cerrobend eutectic | 70 | 32.6 |
| Bi-Pb-In eutectic | 70 | 29 |
| Bi-In eutectic | 72 | 25 |
| Bi-Pb-tin eutectic | 96 | - |
| Bi-Pb eutectic | 125 | - |

3.2.1.3 PCM eutettici

Per materiale eutettico (o miscela eutettica) si intende una miscela di sostanze il cui punto di fusione è più basso di quello delle singole sostanze che la compongono [23].

I materiali eutettici, pur avendo una composizione ed una temperatura di fusione ben definite, non sono però composti chimici, ma sistemi polibasici costituiti da tante fasi quante sono le specie chimiche che li costituiscono. Tali composti possono essere formati da sostanze organiche, inorganiche o miste organiche-inorganiche. In un materiale eutettico, tutti i suoi elementi fondono e solidificano congruentemente e simultaneamente, quindi senza segregazione.

3.2.2 Classificazione in base alla temperatura di fusione

Questo tipo di classificazione divide i materiali solamente in base alla loro temperatura di fusione, senza tener conto della loro tipologia. La divisione per range di temperatura risulta molto comoda nell'individuazione dei PCM, in quanto, a seconda dell'intervallo di riferimento, abbiamo diverse possibili applicazioni.

Viene di seguito riportato un esempio di classificazione per temperatura di fusione, con le relative applicazioni, proposto dal gruppo ENEA:

Tab. 8 - Intervalli di temperatura e relative applicazioni dei PCM [18]

| INTERVALLO DI TEMPERATURA | CLASSIFICAZIONE TERMICA | POSSIBILE APPLICAZIONE |
|---------------------------|-------------------------|--|
| < 120°C | Bassa temperatura | Solare termico senza concentrazione o con bassa concentrazione (pannelli piani). |
| 120 - 200°C | Medio-bassa temperatura | Fornitura di calore di processo, generazione di potenza con cicli organici, climatizzazione ad alta efficienza, desalinizzazione. A queste temperature è possibile utilizzare come fluido termovettore anche acqua a bassa pressione |
| 200 – 300 °C | Media temperatura | Applicazioni in multi-generazione ma, chiaramente, i livelli di temperatura impongono l'utilizzo di oli diatermici e permettono di avere generazione di potenza e rendimenti abbastanza elevati. |
| 300 – 400 °C | Medio-alta temperatura | Generazione di potenza con gli impianti solari parabolici lineari ad olio diatermico sino ad oggi realizzati. Le efficienze di conversione termo-elettrica solo elevate. |
| 400 – 600°C | Alta temperatura | Generazione di potenza con gli impianti solari parabolici lineari od a torre ma non può essere più utilizzato l'olio diatermico. Il fluido termovettore sarà un sale fuso. In questo caso le efficienze di conversione termo-elettrica sono molto elevate. |
| > 600°C | Altissima temperatura | Applicazioni ad energia solare molto concentrata tipo dish o fornaci solari. Il fluido termovettore spesso è aria/gas. L'uso di PCM, in questo caso, è ancora possibile ma in condizioni limite. |

3.3 Incremento delle prestazioni nei PCM

Come visto nei paragrafi precedenti, i problemi comuni alla maggior parte dei PCM sono relativi alla bassa conducibilità termica e allo scambio termico in generale. Una bassa conducibilità termica, infatti, porta ad uno scambio termico lento, e quindi a fasi di carica e scarica prolungate. Questo rischia di rendere i sistemi che sfruttano questi materiali come accumulo termico non sufficienti a soddisfare le esigenze che l'applicazione richiede; inoltre, un basso valore di scambio termico richiede superfici più grandi, e quindi un aumento degli ingombri. Al fine di ottenere un sistema compatto ed efficiente vengono utilizzati diversi metodi per incrementare lo scambio termico dei PCM, tra questi quelli più comuni includono:

- Utilizzo di superfici estese o alette
- Unità multiple di PCM
- Microincapsulamento del materiale
- Incremento della conducibilità termica

Superfici estese o alette:

L'utilizzo di superfici estese o alette consente di incrementare la superficie di scambio termico tra PCM e fluido termovettore, determinando di conseguenza delle fasi di carica e scarica del materiale più rapide. Bisogna considerare, però, che l'effettivo incremento delle prestazioni dipende da vari fattori come configurazione, posizione, orientamento, numero e distanza tra le alette. Le geometrie utilizzate possono essere varie: rettangolari, cilindriche, sferiche e a tubi coassiali, con alette longitudinali, trasversali o di tipo anulare. Questo tipo di applicazioni comporta, però, anche degli svantaggi: vi è un notevole aumento di peso e ingombro dell'impianto.

Nella figura seguente sono mostrati degli esempi di applicazioni termiche con l'utilizzo di alette.

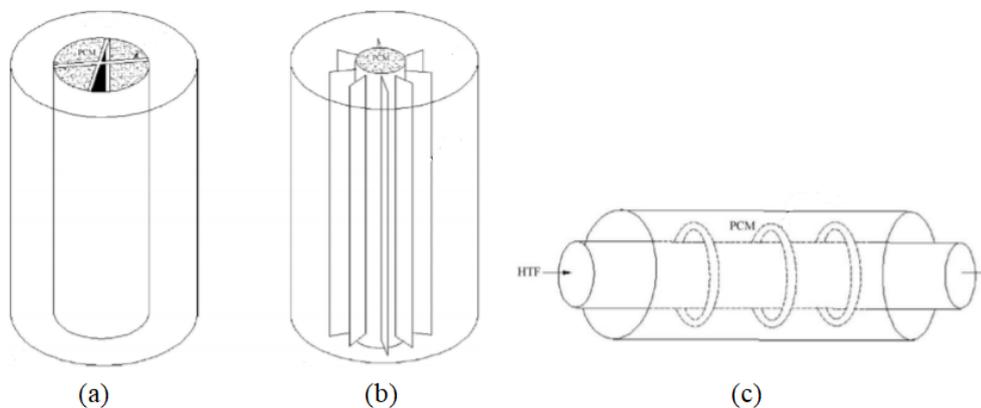


Fig. 33 - (a) Unità di accumulo a calore latente con alette longitudinali interne, (b) unità di accumulo a calore latente con alette longitudinali esterne, (c) unità di accumulo a tubi coassiali con alette anulari [24]

Unità multiple di PCM:

Questa tecnica consiste nell'utilizzo di unità multiple di PCM caratterizzate da diversi materiali con differenti punti di fusione. Queste, posizionate nel verso decrescente delle temperature, determinano un flusso termico pressoché costante. Nelle figure successive sono mostrati degli esempi di utilizzo di unità multiple di PCM con variazione di temperatura di tipo assiale (Fig. 34), oppure senza variazione della stessa. Quest'ultimo è il caso tipico in cui il PCM è posto all'interno di un serbatoio, e scambia calore con il fluido termovettore in ingresso e in uscita dallo stesso (Fig.35).

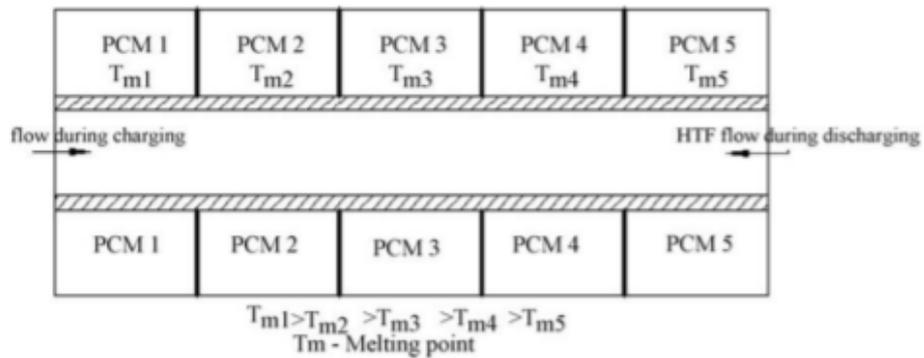


Fig. 34 - Esempio di sistema con unità multiple di PCM con variazione di temperatura assiale [24]

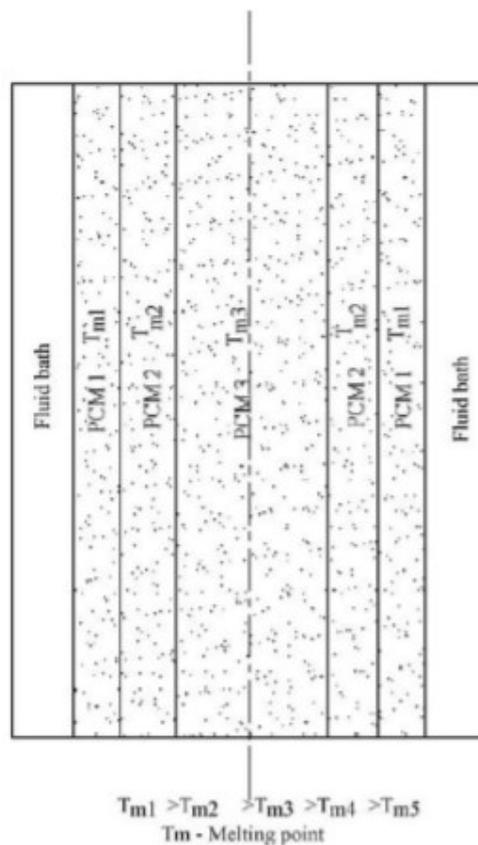


Fig. 35 - Esempio di sistema con unità multiple di PCM senza variazione di temperatura assiale [24]

Microincapsulamento:

La tecnica del microincapsulamento consiste nell'inserire il PCM all'interno di capsule, le quali solitamente sono sferiche e di materiali metallici o polimerici. I benefici di questa pratica sono molteplici, infatti abbiamo:

- Maggiore superficie di scambio termico tra PCM e fluido
- Maggiore stabilità nei cicli di carica e scarica
- Aumento di compatibilità tra PCM e materiali circostanti

- Maggiore capacità di contenimento

La diffusione di questa tecnica è dovuta soprattutto alla necessità di risolvere alcuni problemi derivanti dall'utilizzo di materiali sfusi, soprattutto in edilizia, dove non sono ammesse delle perdite di PCM che potrebbe causare danni ed essere tossico per l'uomo.

L'utilizzo di materiali micro incapsulati, però, presenta anche delle forti limitazioni. Il principale svantaggio è la bassa conducibilità termica dovuta ai tipi di materiali utilizzati per le capsule; inoltre, a causa della poca quantità di PCM contenuto nelle singole capsule, la capacità di accumulo risulta limitata.

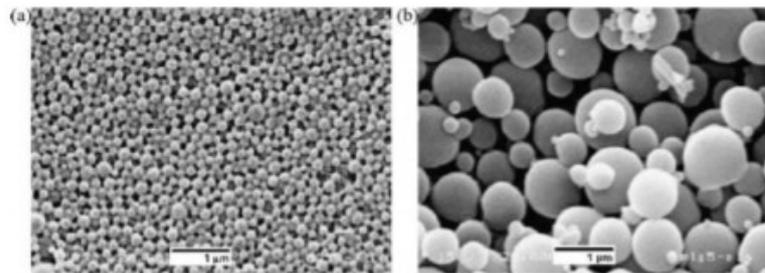


Fig. 36 - Esempi di PCM incapsulato [24]

Metodi per incrementare la conducibilità termica dei PCM:

La maggior parte dei PCM sono caratterizzati da una bassa conducibilità termica, per superare la quale si possono integrare questi ultimi con altri materiali ad elevata conducibilità, quali ad esempio la grafite, le particelle e nano particelle metalliche, e le fibre di carbonio. Un'altra tecnica consiste nell'utilizzo di schiume metalliche a celle aperte, ovvero di un materiale poroso formato da una matrice solida in metallo che viene attraversata dal PCM. In fase liquida si instaura un movimento dello stesso nella schiuma, mentre, in fase solida, vi è la formazione di un composto eterogeneo caratterizzato da due solidi a diversa conducibilità termica.

Nonostante l'utilizzo di questa tecnica comporti una diminuzione di volume del PCM, l'incremento della conducibilità termica può arrivare anche a due ordini di grandezza superiore.

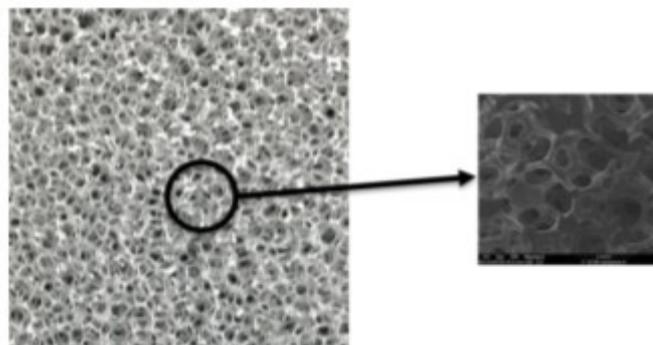


Fig. 37 - Schiuma metallica a celle aperte [24]

3.4 PCM utilizzato: xilitolo

Il lavoro di questa tesi, svolto presso il laboratorio “DIISM”, si basa sull’utilizzo di xilitolo come materiale a cambiamento di fase per l’accumulo termico.

Lo xilitolo (Fig. 39), la cui formula molecolare è $C_5H_{12}O_6$ (Fig.38), è un alditolo la cui molecola contiene una catena di cinque atomi di carbonio. Esso viene principalmente usato come sostituto del saccarosio ad uso alimentare e viene estratto da betulle, fragole, lampone, prugna e anche dal grano. Negli ultimi anni, da diversi studi, è emerso che può essere utilizzato come PCM in sistemi di accumulo termico con range di temperatura compresi tra gli 80 e i 200 °C, grazie alla grande quantità di calore latente che riesce ad accumulare e alla buona sicurezza operativa [25,26]. Viene classificato tra i PCM organici non paraffinici, e si caratterizza per la fusione che avviene in maniera congruente alla temperatura di circa 95 °C.

Inoltre, nel corso dei vari studi su questo materiale, sono stati sperimentati additivi in grado di migliorare le sue prestazioni termiche: ad esempio il metanolo, che è in grado di portarlo ad una cristallizzazione di 33-170 volte più veloce, e pertanto aumenta la velocità di rilascio del calore latente [27].

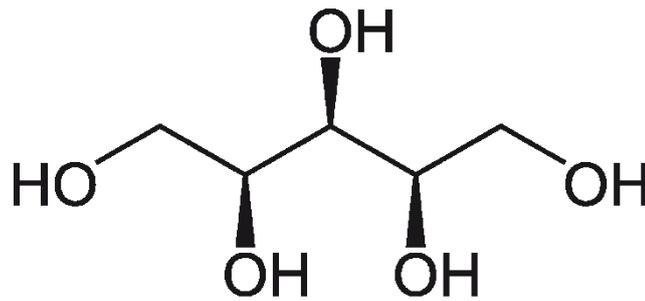


Fig. 38 - Struttura dello xilitolo



Fig. 39 - Xilitolo utilizzato per i test di questo lavoro

3.5 Pentola con doppio fondo

Al fine di valutare le caratteristiche e le proprietà dello Xilitolo, è stata realizzata nel dipartimento “DIISM” una pentola a doppio fondo, costituita da due pentole di misure diverse. Durante le prove, all’interno della pentola più piccola viene inserito l’olio silconico, mentre, in quella più grande lo xilitolo. In questo modo il PCM in questione continuerà a fornire calore all’olio anche quando il forno non sarà più esposto al sole, durante la fase di solidificazione.

3.6 Realizzazione della pentola

Per la realizzazione della pentola sono state utilizzate due pentole di diametri diversi in acciaio INOX, 4 bulloni, 3 termocoppie di tipo K, vernice nera e due tubicini in acciaio INOX. Le dimensioni delle pentole sono state scelte sulla base di quelle della camera di cottura del forno e della quantità di PCM da immettere nell’intercapedine.

Nella tabella successiva sono mostrate le misure riferite alle due pentole:

Tab. 9 - Misure principali delle pentole

| | Pentola esterna | Pentola interna |
|---------------|-----------------|-----------------|
| Diametro (cm) | 23 | 19 |
| Altezza (cm) | 15 | 13 |
| Capacità (l) | 5.2 | 3.2 |
| Peso (kg) | 1.02 | 0.53 |

Nella fase iniziale sono stati eliminati i manici da entrambe le pentole. Successivamente, la pentola più piccola è stata inserita in quella più grande mantenendo lo spessore dell’intercapedine pari a 2 cm in tutta la circonferenza, e alla base delle due pentole attraverso l’utilizzo di listelli di legno (Fig. 40).



Fig. 40 - Fase di assemblaggio delle pentole utilizzate.

Una volta definita la posizione corretta, sono stati effettuati quattro fori diametralmente opposti, che sono stati utilizzati per fissare il tutto attraverso bulloni, rondelle e dadi in acciaio INOX. Una volta assemblate le pentole, sono state inserite le due termocoppie di tipo K per la misurazione delle temperature del PCM. Al fine di scongiurare uno spostamento delle stesse durante i passaggi di stato del materiale, e quindi un'acquisizione sbagliata delle temperature dovute al contatto delle termocoppie con le pareti della pentola, sono stati utilizzati due tubicini in acciaio inox saldati al bullone che blocca le due pentole (Fig. 41-42), all'interno dei quali sono state fatte passare le termocoppie, facendole uscire solamente di un centimetro dai tubicini.



Fig. 41 - Sistema di fissaggio delle pentole con tubicino in acciaio INOX per il passaggio delle termocoppie.



Fig. 42 - Tubicini in acciaio INOX saldati ai bulloni

Successivamente, la pentola esterna è stata verniciata di nero. Questa volta, al contrario della camera di cottura del forno (come mostrato nel capitolo 2), è stata utilizzata una vernice generica (Fig.43).



Fig. 43 - Pentola verniciata

Invece, per misurare la variazione di temperatura dell'olio siliconico posto all'interno della pentola di diametro minore, è stata utilizzata una termocoppia posta centralmente, mantenuta da un'asta orizzontale che permette alla termocoppia di restare sospesa all'interno del liquido senza entrare in contatto con le pareti della pentola.



Fig. 44 - Pentola terminata

Nelle Fig. 45 e 46 sono riportati la sezione e il prospetto della pentola.

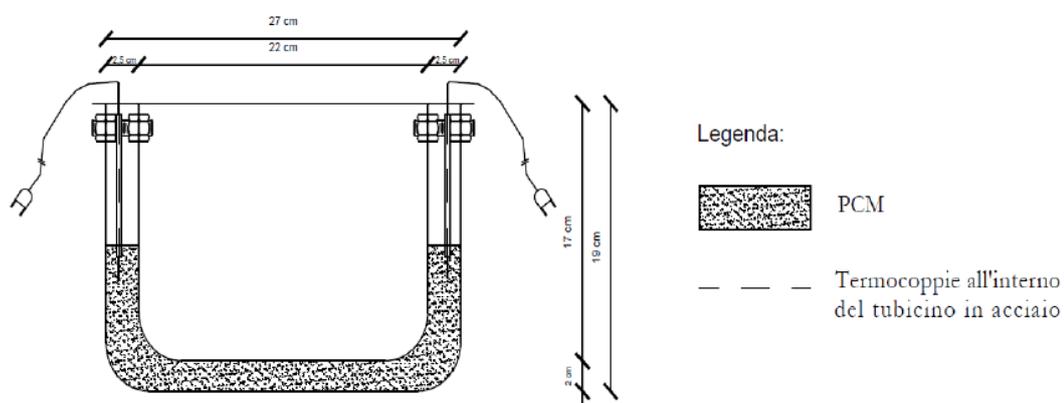


Fig. 45 - Sezione della pentola [28]

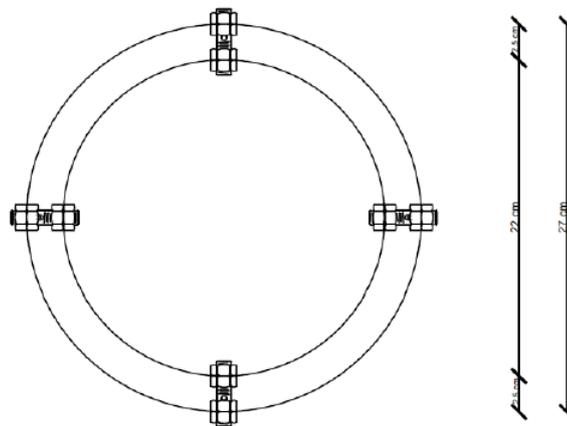


Fig. 46 - Prospetto dall'alto della pentola [28]

3.7 Olio siliconico

In questo lavoro, come fluido termovettore, sono stati utilizzati 2 kg di olio siliconico per le prime due prove, e 1,5 kg per le restanti. Nello specifico, è stato utilizzato un olio Rhodorsil Oils 47 V 100 (dove 47 è il riferimento della Bluestar Silicones per gli oli polidimetilsilossano; V sta per viscosità; 100 indica la viscosità in mm^2/s a 25°C).

L'olio in esame presenta le seguenti caratteristiche dai -50°C ai 200°C :

- Bassa viscosità
- Alta comprimibilità
- Resistenze alle alte e basse temperature
- Resistenza all'ossidazione e all'idrolisi
- Assenza di invecchiamento se esposto agli agenti atmosferici
- Chimicamente inerte
- Combustibilità limitata

Superati i 200°C l'olio perde la sua stabilità e tende ad ossidarsi. La capacità termica specifica è indipendente dalla viscosità ed è di $0,35 \text{ cal/kg/}^\circ\text{C}$ a 25°C . Essa aumenta con l'aumentare della temperatura secondo tale legge: $C_p = a + b \cdot 10^{-5} T$ con $a=0.34708$ e $b=43$ T in $^\circ\text{C}$, C_p in $\text{kcal/kg/}^\circ\text{C}$, (Fig. 46), che vale però per una temperatura compresa tra -50°C e 220°C .

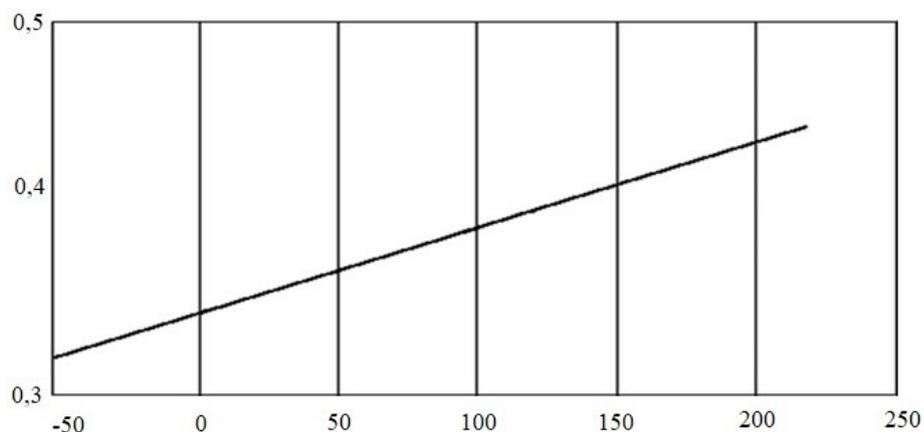


Fig. 47- *Variazione del calore specifico in funzione della temperatura [29]*

La conducibilità termica degli oli di Rhodorsil® 47 varia poco con la temperatura nell'intervallo da +20 a +250 °C. Cambia solo in funzione della viscosità per oli molto fluidi, e rimane sostanzialmente costante da una viscosità di 50 mm²/s: la conducibilità termica degli oli di Rhodorsil® 47 è fondamentalmente identica a quella degli oli minerali.

La legge generale che disciplina la variazione della conducibilità termica in funzione della temperatura (Fig. 48) è la seguente:

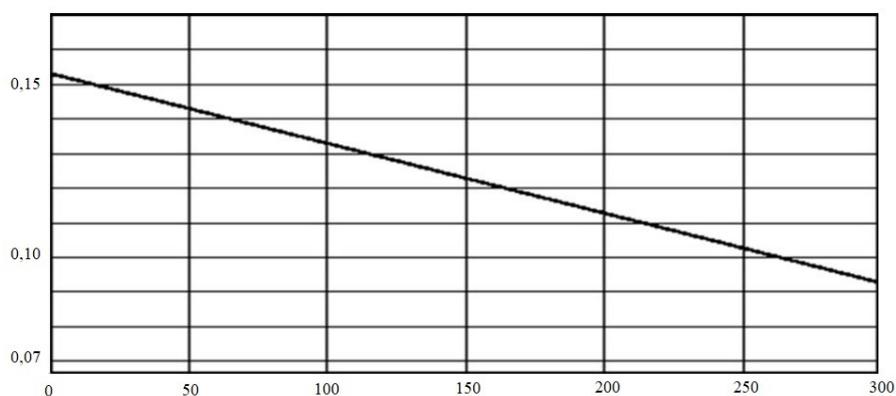


Fig. 48 - *Variazione della conducibilità termica in funzione della temperatura [29]*

CAPITOLO 4

PROCEDURE SPERIMENTALI

Per far sì che le prove sperimentali abbiano una reale utilità è necessario utilizzare delle procedure e dei parametri comuni: solo in questo modo i risultati saranno confrontabili con i dati ottenuti dai ricercatori di tutto il mondo. Le procedure sperimentali riportate in questo capitolo approfondiscono, quindi, la preparazione delle prove secondo degli standard comuni e le caratteristiche degli strumenti utilizzati per i test.

4.1 Procedure di calcolo standard

Per i test di questo lavoro sono state valutate delle procedure di calcolo già presenti in letteratura, che ci permettono di ricavare dei risultati standardizzati. In tal modo, i dati ottenuti potranno essere confrontati con altri lavori di ricerca. Le procedure sperimentali che sono state valutate a tal fine sono:

- Procedura proposta da Khalifa et al. [33]
- Test sperimentale proposto da Mullick [33]

L'analisi di queste procedure servirà a valutare se gli standard descritti sono adatti alla nostra tipologia di forno solare e se i risultati così ottenuti ci permettono di valutarne la reale efficienza.

4.1.1 Procedura proposta da Khalifa et al.

Per valutare le prestazioni dei forni solari bisogna determinare i seguenti parametri:

- Tempi di cottura di diversi prodotti alimentari
- Tempo necessario che impiega una quantità nota di acqua per raggiungere il punto di ebollizione
- Temperatura massima registrata in una prova senza carico

Il primo metodo risulta poco affidabile, in quanto non si può valutare oggettivamente la cottura di un alimento. Il secondo e il terzo, invece, riescono a fornire dei dati misurabili con apposite strumentazioni, in questo modo si possono ottenere dei dati utili a misurare la reale efficienza del nostro forno. Khalifa et al. [33] hanno utilizzato il secondo metodo per valutare le prestazioni del forno solare attraverso il calcolo dell'efficienza termica complessiva η_{av} e del tempo di ebollizione specifico t_s e di quello caratteristico t_{ch} , dove la quantità t_s espressa in ($\text{min}\cdot\text{m}^2/\text{Kg}$) rappresenta il tempo richiesto per bollire 1 Kg di acqua utilizzando un forno solare con 1 m^2 di superficie di apertura, t_{ch} ($\text{min}\cdot\text{m}^2/\text{Kg}$) è usato come parametro di confronto tra i vari forni solari con differenti livelli di radiazione solare. Le espressioni matematiche per il calcolo di t_s , t_{ch} e di η_{av} sono fornite da Refs e sono rispettivamente:

$$t_s = \frac{\Delta t A_a}{mf} \quad (4)$$

$$t_{ch} = t_s \frac{DNI, av}{DNI, ref} \quad (5)$$

$$\eta_{av} = \frac{mf cf (T_2 - T_1)}{DNI, av A_a \Delta t_h} \quad (6)$$

dove mf e cf sono la massa (kg) e il calore specifico (J/kg·K) del fluido, Δt_h è il tempo necessario per raggiungere la massima temperatura del fluido, DNI, av è l'intensità media solare (W/m²) durante l'intervallo di tempo Δt_h . DNI, ref è l'intensità media solare di riferimento pari a 900 W/m². T_2 e T_1 sono, rispettivamente, la temperatura massima e la temperatura minima nell'intervallo di tempo considerato, mentre A_a è l'area di apertura (m²) del forno solare.

4.1.2 Procedura proposta da Mullick

Mullick [33] ha proposto una procedura di prova per i forni solari a scatola, dalla quale si ricavano due parametri F_1 ed F_2 attraverso una prova di stagnazione (prova senza carico) e portando ad ebollizione una massa nota di acqua.

Il parametro F_1 (°Cm²/W) è definito come segue:

$$F_1 = \frac{T_{a, max} - T_{amb}}{DNI} \quad (7)$$

Dove $T_{a, max}$, T_{amb} e DNI sono, rispettivamente, la temperatura dell'assorbitore, la temperatura ambiente e la radiazione solare individuata su un piano orizzontale una volta raggiunta la temperatura di stagnazione.

Il parametro F_2 , invece, indica la misura dell'alzamento di temperatura nel tempo di una certa quantità di acqua nota in una pentola, come indicato nella successiva relazione:

$$F_2 = \frac{F_1 mf cf}{A_a \Delta t_h} \ln \frac{1 - \frac{1}{F_1} (T_1 - T_{amb, av}) / DNI, av}{1 - \frac{1}{F_1} (T_2 - T_{amb, av}) / DNI, av} \quad (8)$$

Dove Δt_h è l'intervallo di tempo in cui la temperatura dell'acqua passa dal valore T_1 al valore T_2 , che sono, rispettivamente, la temperatura iniziale e finale.

DNI, av e $T_{amb, av}$ sono, rispettivamente, la radiazione solare media (W/m²) e la temperatura ambiente media (°C) nell'intervallo di temperatura considerato Δt_h .

I valori di mf , cf e A_a sono, rispettivamente, la massa di acqua (kg), il calore specifico (J/kg K) e l'area del collettore (m²).

4.2 Banco di prova

Il banco di prova utilizzato per effettuare i test sul forno solare è composto da:

- Termocoppie di tipo T
- Termocoppie di tipo K
- Pireliometro
- Computer portatile
- Acquisitore Data-Logger TC-08

4.2.1 Termocoppie di tipo T e K

La termocoppia è un trasduttore di temperatura il cui funzionamento si basa sull'effetto termoelettrico. È costituita da due conduttori di materiale noto uniti ad un estremo detto "giunto caldo", dove va effettuata la misura della temperatura, mentre, gli altri due estremi vanno collegati ad un morsetto detto "giunto freddo". Il morsetto, a sua volta, va collegato ad un acquisitore che serve a ricavare i dati relativi alla temperatura misurata.

Quando esiste una differenza di temperatura tra la zona del giunto caldo e la zona del giunto freddo, si può rilevare una differenza di potenziale elettrico tra le estremità libere della termocoppia in corrispondenza del giunto freddo. Tale valore di potenziale elettrico è funzione diretta della differenza di temperatura, secondo una legge non lineare. L'acquisitore, quindi, elabora continuamente i valori di potenziale elettrico e li converte in temperatura.

Le termocoppie utilizzate nelle nostre prove sono di tipo T (Rame/Costantana) che supportano temperature dai $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ai $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ con una sensibilità di $48,2\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$ e di tipo K (Chromel/Alumel) con temperature supportate dai $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ai $1260\text{ }^{\circ}\text{C}$ con una sensibilità di circa $41\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$. La scelta di queste tipologie di termocoppie deriva dal range di temperatura operativa del forno che è compreso in tali valori.



Fig. 49 - Termocoppie di tipo T e K

4.2.2 Pireliometro

Il pireliometro è uno strumento che serve a misurare la radiazione solare diretta, ovvero quella che giunge sulla terra con un determinato angolo senza subire riflessioni. È costituito da un lungo tubo alla cui estremità è posizionato un sensore (generalmente un corpo nero) che, assorbendo la radiazione solare, si riscalda. Dalla misura della temperatura del corpo si può risalire all'energia assorbita e, quindi, all'intensità della radiazione solare. Il pireliometro utilizzato per le nostre prove è costituito, inoltre, da un motore elettrico che gli permette di ruotare e, quindi, continuare ad effettuare le misurazioni in tutto l'arco della giornata, senza la necessità di essere riposizionato manualmente. Anche il pireliometro, come le termocoppie, va collegato al data-logger per l'acquisizione dei dati.



Fig. 50 – Pireliometro

4.2.3 Computer e acquisitore

Sia le termocoppie che il pireliometro sono collegate ad un Data-Logger TC-08 (Fig. 51) che, attraverso il software PicoLog (Fig. 52), permette di acquisire sul computer i dati relativi ai test effettuati. Il Data-Logger è dotato di 8 canali per l'acquisizione dei dati, ai quali possono essere collegate altrettante termocoppie. L'acquisizione dei dati su PicoLog è stata impostata una volta al secondo, anche

se il programma permette acquisizioni fino a 10 volte al secondo. Agli 8 canali sono state assegnate le seguenti misurazioni:

- Canale 1: Pireliometro; misura la radiazione solare diretta sia in mV (NIP) che in W/m^2 (DNI)
- Canale 2: Temperatura ambiente esterno, T_{amb} , in $^{\circ}C$, misurata con l'utilizzo di una termocoppia di tipo T
- Canale 3: Temperatura vetro esterno, T_g , in $^{\circ}C$, misurata con l'utilizzo di una termocoppia di tipo K
- Canale 4: Temperatura assorbitore del forno, T_a , in $^{\circ}C$, misurata con l'utilizzo di una termocoppia di tipo K
- Canale 5: Temperatura del PCM lato destro, (guardando dalla camera di cottura), T_{pcm1} , in $^{\circ}C$, misurata con l'utilizzo di una termocoppia di tipo K
- Canale 6: Temperatura del PCM lato sinistro, (guardando dalla camera di cottura), T_{pcm2} , in $^{\circ}C$, misurata con l'utilizzo di una termocoppia di tipo K
- Canale 7: Temperatura Olio siliconico, T_f , in $^{\circ}C$, misurata con l'utilizzo di una termocoppia di tipo T
- Canale 8: non utilizzato durante le sperimentazioni



Fig. 51 - Data-Logger TC-08

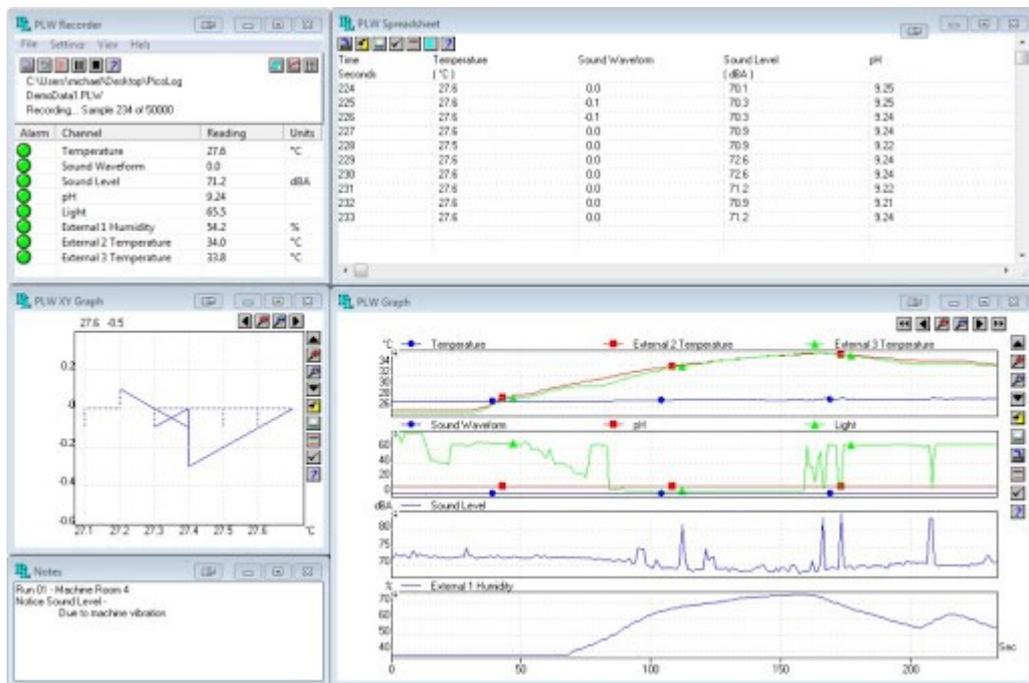


Fig. 52 - Esempio della schermata di PicoLog durante l'acquisizione dei dati

CAPITOLO 5

RISULTATI DEI TEST SPERIMENTALI

In questo capitolo verranno analizzati i dati ricavati dai test sperimentali svolti nel Dipartimento “DIISM” dell’Università Politecnica delle Marche. Le prove sono state svolte su un forno solare a scatola costruito presso lo stesso dipartimento, la cui costruzione è descritta nel secondo capitolo.

Le tipologie di prove effettuate su questo forno sono di diverso tipo:

- Prove a vuoto
- Prove a carico con olio siliconico
- Prove con accumulo termico utilizzando diversi materiali

In questo lavoro andremo ad analizzare i risultati delle ultime due tipologie di prove, e nello specifico verrà utilizzato come PCM per l’accumulo termico lo Xilitolo. Verranno, in seguito, confrontati i risultati delle prove con e senza accumulo termico, al fine di rilevare le variazioni di rendimento del forno e valutare eventuali miglioramenti apportabili.

5.1 Prove a carico con olio siliconico

Nelle prove a carico sono stati utilizzati 1,5 kg di olio siliconico come fluido termovettore, le cui caratteristiche sono descritte nel capitolo 3.7. Durante il test, attraverso l’utilizzo delle termocoppie, sono state acquisite le temperature nelle fasi di riscaldamento e raffreddamento. Le temperature acquisite riguardano:

- Temperatura ambiente (T_{amb}) in °C
- Temperatura vetro (T_g) in °C
- Temperatura dell’assorbitore (T_a) in °C
- Temperatura dell’olio siliconico (T_f) in °C
- Radiazione solare (DNI) in W/m^2

Nei test effettuati, la fase di riscaldamento viene interrotta quando l’olio raggiunge la temperatura di 130 °C; successivamente, il forno viene spostato in modo da non ricevere più la radiazione solare; quindi, inizia la fase di raffreddamento che viene considerata conclusa quando l’olio raggiunge gli 80 °C.

Test n°6 del 11/06/2019

Il test è stato svolto dalle ore 11:00 fino alle 14:00. Consideriamo la fase di riscaldamento, quella compresa nel range di temperatura del fluido, che va dalla temperatura iniziale T_1 di 60 °C a quella finale T_2 di 100 °C. Nell'arco di tempo della fase di riscaldamento, la radiazione solare media rilevata è pari a 720,07 W/m². La temperatura ambiente media, riferita, invece, al tempo totale della prova, è pari a 31,18 °C. In questa prima fase, l'olio siliconico impiega circa 35 minuti per passare dalla temperatura T_1 a quella T_2 . Una volta raggiunta T_2 , il forno è stato spostato all'ombra, in modo da non ricevere più la radiazione solare diretta e iniziare la fase di raffreddamento. In questa seconda fase, viene considerato l'intervallo di temperature che va da T_2 pari a 100 °C a T_3 di 80 °C: ne risulta che l'olio impiega circa 35 minuti per scendere di una temperatura di 20 °C.

Tab. 10 - Dati rilevati nella fase iniziale (test del 11/06/2019)

| Ora | DNI (W/m ²) | Tamb (°C) | Tg (°C) | Ta (°C) | Tf (°C) |
|----------|----------------------------|--------------|------------|------------|------------|
| 11:00:00 | 666,75 | 31,4 | 33,48 | 43,55 | 31,23 |
| 11:00:01 | 666,78 | 30,96 | 33,43 | 43,68 | 31,24 |
| 11:00:02 | 667,01 | 30,75 | 33,37 | 43,67 | 31,27 |
| 11:00:03 | 667,36 | 30,75 | 33,41 | 43,75 | 31,29 |
| 11:00:04 | 667,42 | 30,91 | 33,29 | 43,79 | 31,31 |
| 11:00:05 | 666,65 | 31,49 | 33,5 | 43,89 | 31,33 |
| 11:00:06 | 665,74 | 31,33 | 33,34 | 44,01 | 31,34 |
| 11:00:07 | 664,65 | 31,18 | 33,2 | 44,13 | 31,35 |
| 11:00:08 | 663,8 | 31,4 | 33,33 | 44,21 | 31,36 |
| 11:00:09 | 663,72 | 31,65 | 33,21 | 43,93 | 31,37 |
| 11:00:10 | 664,02 | 31,85 | 33,26 | 43,89 | 31,38 |
| 11:00:11 | 665,75 | 32,24 | 33,26 | 44,03 | 31,39 |
| 11:00:12 | 667,77 | 32,25 | 33,29 | 44,16 | 31,39 |
| 11:00:13 | 668,85 | 32,25 | 33,25 | 44,18 | 31,41 |
| 11:00:14 | 669,27 | 32,25 | 33,11 | 44,25 | 31,44 |
| 11:00:15 | 669,36 | 32,25 | 33,14 | 44,35 | 31,46 |
| 11:00:16 | 669,09 | 32,26 | 33,27 | 44,43 | 31,49 |
| 11:00:17 | 668,49 | 32,27 | 33,46 | 44,5 | 31,51 |
| 11:00:18 | 667,94 | 32,27 | 33,2 | 44,55 | 31,52 |
| 11:00:19 | 667,89 | 32,28 | 33,31 | 44,59 | 31,53 |
| 11:00:20 | 667,51 | 32,29 | 33,28 | 44,64 | 31,55 |
| 11:00:21 | 667,38 | 32,29 | 33,11 | 44,65 | 31,57 |
| 11:00:22 | 667,09 | 32,31 | 33,09 | 44,67 | 31,59 |
| 11:00:23 | 667,01 | 32,33 | 33,33 | 44,69 | 31,59 |
| 11:00:24 | 666,55 | 32,32 | 33,23 | 44,67 | 31,6 |

Nel grafico seguente viene mostrato l'andamento delle temperature in relazione alla radiazione solare durante tutta la prova:

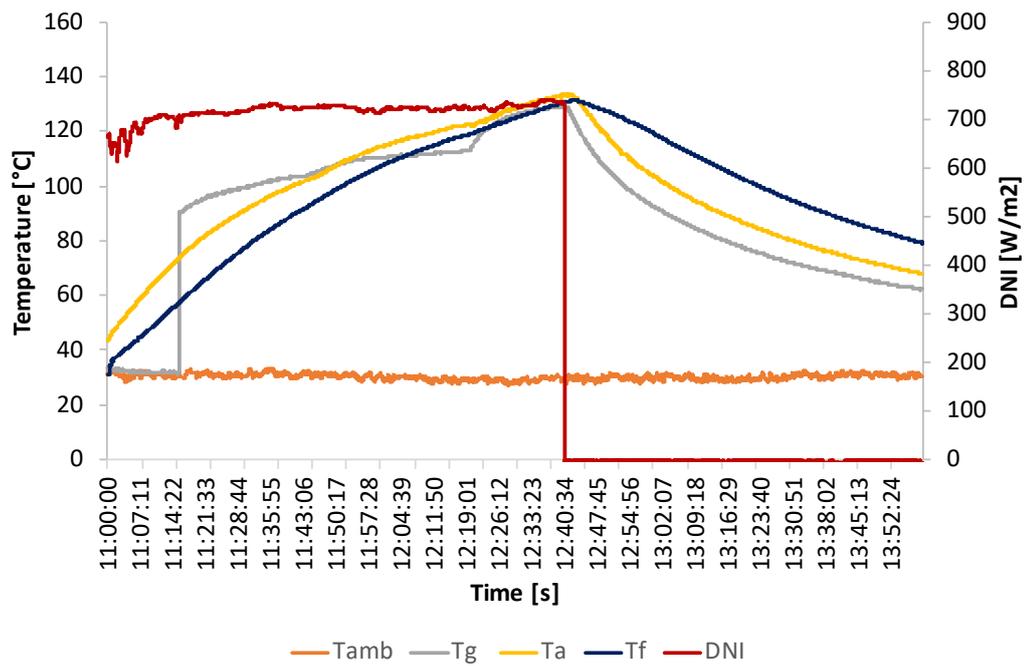


Fig. 53 - Grafico delle rilevazioni (test del 11/06/2019)

I dati raccolti sono stati elaborati utilizzando il programma Excel. Nella tabella seguente vengono mostrati i risultati della prova nella fase di riscaldamento e raffreddamento:

Tab. 11 - Risultati della prova (test del 11/06/2019)

| RISCALDAMENTO | | RAFFREDDAMENTO | |
|---------------------------------|----------|------------------|----------|
| Test | 6 | Test | 6 |
| Data | 11/06/19 | Data | 11/06/19 |
| m_{PCM} (kg) | / | m_{PCM} (kg) | / |
| mf (kg) | 1,5 | mf (kg) | 1,5 |
| T1 (°C) | 60 | T2 (°C) | 100 |
| T2 (°C) | 100 | T3 (°C) | 80 |
| DNI,av (W/m ²) | 720,07 | Tamb,av (°C) | 30,7 |
| Tamb,av (°C) | 31,18 | Δt_c (h) | 0,57 |
| Δt_h (h) | 0,57 | | |
| t_s (h m ² /kg) | 0,26 | | |
| t_{ch} (h m ² /kg) | 0,21 | | |
| η_{av} | 0,10 | | |
| F2 | 0,16 | | |

Test n°7 del 12/06/2019

Il test è stato svolto dalle ore 9:50 fino alle 12:25. Consideriamo la fase di riscaldamento, quella compresa nel range di temperatura del fluido, che va dalla temperatura iniziale T_1 di 60 °C a quella finale T_2 di 100 °C. Nell'arco di tempo della fase di riscaldamento, la radiazione solare media rilevata è pari a 583,23 W/m². La temperatura ambiente media, riferita, invece, al tempo totale della prova, è pari a 28,22 °C. In questa prima fase, l'olio siliconico impiega circa 30 minuti per passare dalla temperatura T_1 a quella T_2 . Una volta raggiunta T_2 , il forno è stato spostato all'ombra, in modo da non ricevere più la radiazione solare diretta e iniziare la fase di raffreddamento. In questa seconda fase, viene considerato l'intervallo di temperature che va da T_2 pari a 100 °C a T_3 di 80 °C: ne risulta che l'olio impiega circa 26 minuti per scendere di una temperatura di 20 °C.

Tab. 12 - Dati rilevati nella fase iniziale (test del 12/06/2019)

| Ora | DNI | Tamb | Tg | Ta | Tf |
|----------|------------------|-------|--------|-------|-------|
| | W/m ² | °C | °C | °C | °C |
| 09:51:14 | 569,38 | 27,66 | 109,6 | 64,63 | 48,15 |
| 09:51:15 | 569,38 | 27,66 | 109,6 | 64,63 | 48,15 |
| 09:51:16 | 569,71 | 27,59 | 109,62 | 64,64 | 48,23 |
| 09:51:17 | 569,93 | 27,7 | 109,64 | 64,66 | 48,29 |
| 09:51:18 | 569,96 | 27,64 | 109,67 | 64,67 | 48,31 |
| 09:51:19 | 569,86 | 27,72 | 109,7 | 64,74 | 48,26 |
| 09:51:20 | 569,99 | 27,81 | 109,71 | 64,76 | 48,19 |
| 09:51:21 | 570,49 | 27,85 | 109,7 | 64,75 | 48,11 |
| 09:51:22 | 570,81 | 27,84 | 109,76 | 64,74 | 48,01 |
| 09:51:23 | 570,76 | 27,74 | 109,78 | 64,77 | 47,92 |
| 09:51:24 | 570,61 | 27,77 | 109,82 | 64,77 | 47,82 |
| 09:51:25 | 570,73 | 27,77 | 109,8 | 64,79 | 47,73 |
| 09:51:26 | 570,73 | 27,93 | 109,82 | 64,79 | 47,65 |
| 09:51:27 | 570,61 | 27,77 | 109,88 | 64,86 | 47,55 |
| 09:51:28 | 570,9 | 27,69 | 109,91 | 64,98 | 47,48 |
| 09:51:29 | 571,07 | 27,6 | 109,95 | 65,02 | 47,45 |
| 09:51:30 | 571,12 | 27,6 | 109,97 | 65,03 | 47,43 |
| 09:51:31 | 571,34 | 27,46 | 110 | 65,03 | 47,41 |
| 09:51:32 | 571,34 | 27,55 | 110,01 | 65,06 | 47,41 |
| 09:51:33 | 571,27 | 27,5 | 110,04 | 65,11 | 47,42 |
| 09:51:34 | 571,32 | 27,52 | 110,06 | 65,13 | 47,43 |
| 09:51:35 | 571,38 | 27,59 | 110,05 | 65,16 | 47,45 |
| 09:51:36 | 571,21 | 27,49 | 110,08 | 65,22 | 47,47 |
| 09:51:37 | 571,14 | 27,46 | 110,13 | 65,26 | 47,52 |
| 09:51:38 | 570,92 | 27,44 | 110,16 | 65,25 | 47,55 |

Nel grafico seguente viene mostrato l'andamento delle temperature in relazione alla radiazione solare durante tutta la prova:

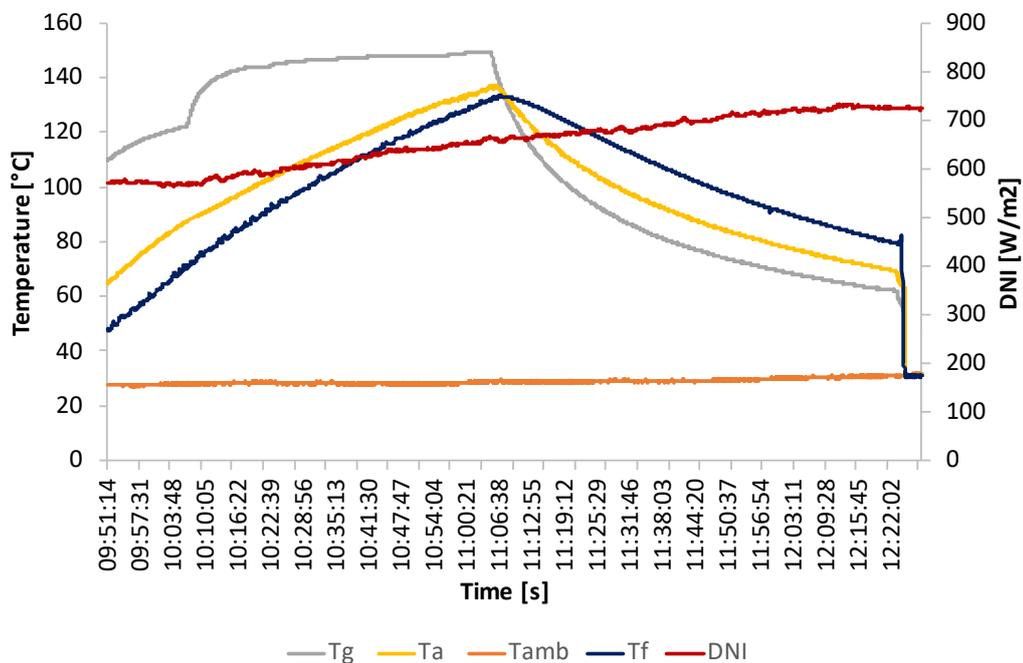


Fig. 54 - Grafico delle rilevazioni (test del 12/06/2019)

I dati raccolti sono stati elaborati utilizzando il programma Excel. Nella tabella seguente vengono mostrati i risultati della prova nella fase di riscaldamento e raffreddamento:

Tab. 13 - Risultati della prova (test del 12/06/2019)

| RISCALDAMENTO | | RAFFREDDAMENTO | |
|---------------------------------------|----------|-----------------------|----------|
| Test | 7 | Test | 7 |
| Data | 12/06/19 | Data | 12/06/19 |
| m _{PCM} (kg) | / | m _{PCM} (kg) | / |
| m _f (kg) | 1,5 | m _f (kg) | 1,5 |
| T1 (°C) | 60 | T2 (°C) | 100 |
| T2 (°C) | 100 | T3 (°C) | 80 |
| DNI _{av} (W/m ²) | 583,23 | Tamb,av (°C) | 30,16 |
| Tamb,av (°C) | 28,22 | Δtc (h) | 0,44 |
| Δth (h) | 0,49 | | |
| ts (h m ² /kg) | 0,22 | | |
| tch (h m ² /kg) | 0,14 | | |
| η _{av} | 0,14 | | |
| F2 | 0,18 | | |

Test n°8 del 17/06/2019

Il test è stato svolto dalle ore 9:50 fino alle 12:25. Consideriamo la fase di riscaldamento, quella compresa nel range di temperatura del fluido, che va dalla temperatura iniziale T_1 di 60 °C a quella finale T_2 di 100 °C. Nell'arco di tempo della fase di riscaldamento, la radiazione solare media rilevata è pari a 746,60 W/m². La temperatura ambiente media, riferita, invece, al tempo totale della prova, è pari a 28,52 °C. In questa prima fase, l'olio siliconico impiega circa 30 minuti per passare dalla temperatura T_1 a quella T_2 . Una volta raggiunta T_2 , il forno è stato spostato all'ombra, in modo da non ricevere più la radiazione solare diretta e iniziare la fase di raffreddamento. In questa seconda fase, viene considerato l'intervallo di temperature che va da T_2 pari a 100 °C a T_3 di 80 °C: ne risulta che l'olio impiega circa 30 minuti per scendere di una temperatura di 20 °C.

Tab. 14 - Dati rilevati nella fase iniziale (test del 17/06/2019)

| Ora | DNI W/m ² | Tamb °C | Tg °C | Ta °C | Tf °C |
|----------|-------------------------|------------|----------|----------|----------|
| 09:49:51 | 717,06 | 27,47 | 103,8 | 47,67 | 39,51 |
| 09:49:52 | 717,37 | 27,38 | 103,84 | 47,74 | 39,51 |
| 09:49:53 | 717,32 | 27,41 | 103,88 | 47,76 | 39,51 |
| 09:49:54 | 717,28 | 27,41 | 103,92 | 47,81 | 39,52 |
| 09:49:55 | 717,15 | 27,35 | 103,97 | 47,85 | 39,51 |
| 09:49:56 | 717,03 | 27,36 | 104,04 | 47,89 | 39,52 |
| 09:49:57 | 717,03 | 27,36 | 104,09 | 47,96 | 39,53 |
| 09:49:58 | 717,15 | 27,4 | 104,14 | 48,01 | 39,53 |
| 09:49:59 | 716,93 | 27,47 | 104,18 | 48,03 | 39,53 |
| 09:50:00 | 716,88 | 27,55 | 104,22 | 48,03 | 39,53 |
| 09:50:01 | 716,84 | 27,6 | 104,26 | 48,04 | 39,54 |
| 09:50:02 | 716,93 | 27,69 | 104,31 | 48,06 | 39,56 |
| 09:50:03 | 716,74 | 27,73 | 104,35 | 48,13 | 39,56 |
| 09:50:04 | 716,81 | 27,8 | 104,39 | 48,13 | 39,57 |
| 09:50:05 | 716,75 | 27,88 | 104,46 | 48,15 | 39,59 |
| 09:50:06 | 716,81 | 27,86 | 104,52 | 48,2 | 39,61 |
| 09:50:07 | 716,81 | 27,81 | 104,56 | 48,25 | 39,6 |
| 09:50:08 | 716,77 | 27,81 | 104,59 | 48,31 | 39,61 |
| 09:50:09 | 716,84 | 27,73 | 104,64 | 48,36 | 39,61 |
| 09:50:10 | 716,76 | 27,78 | 104,68 | 48,35 | 39,62 |
| 09:50:11 | 716,86 | 27,88 | 104,73 | 48,4 | 39,63 |
| 09:50:12 | 716,91 | 27,93 | 104,78 | 48,44 | 39,63 |
| 09:50:13 | 716,82 | 27,95 | 104,82 | 48,45 | 39,64 |
| 09:50:14 | 716,82 | 28,03 | 104,88 | 48,46 | 39,64 |
| 09:50:15 | 716,94 | 28,06 | 104,93 | 48,45 | 39,63 |

Nel grafico seguente viene mostrato l'andamento delle temperature in relazione alla radiazione solare durante tutta la prova:

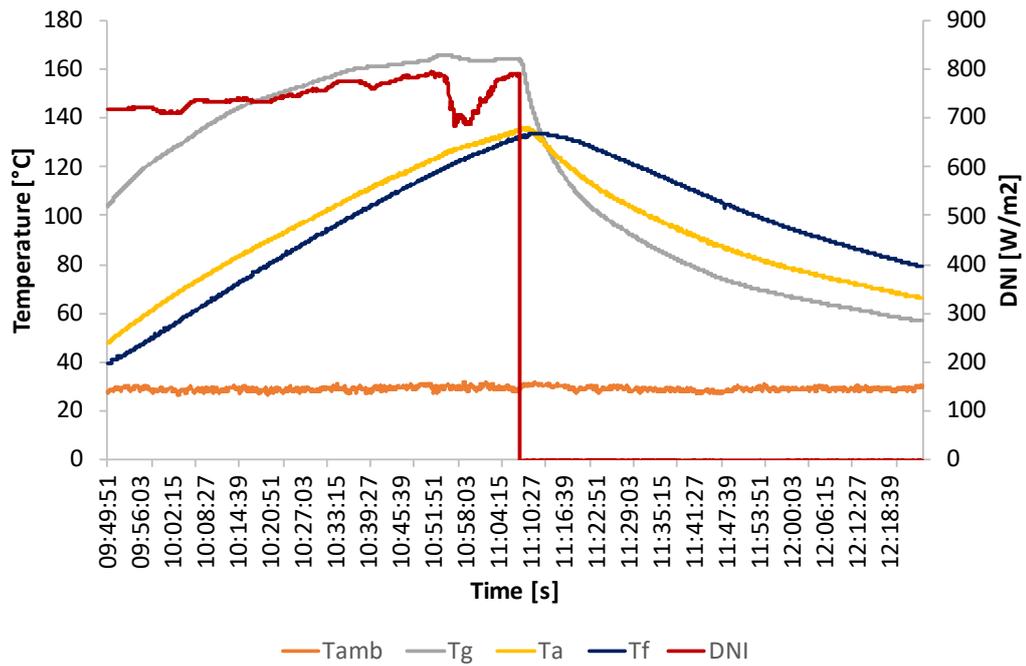


Fig. 55 - Grafico delle rilevazioni (test del 17/06/2019)

I dati raccolti sono stati elaborati utilizzando il programma Excel. Nella tabella seguente vengono mostrati i risultati della prova nella fase di riscaldamento e raffreddamento:

Tab. 15 - Risultati della prova (test del 17/06/2019)

| RISCALDAMENTO | | RAFFREDDAMENTO | |
|---------------------------------------|----------|-----------------------|----------|
| Test | 8 | Test | 8 |
| Data | 17/06/19 | Data | 17/06/19 |
| m _{PCM} (kg) | / | m _{PCM} (kg) | / |
| m _f (kg) | 1,5 | m _f (kg) | 1,5 |
| T1 (°C) | 60 | T2 (°C) | 100 |
| T2 (°C) | 100 | T3 (°C) | 80 |
| DNI _{av} (W/m ²) | 746,60 | Tamb,av (°C) | 28,81 |
| Tamb,av (°C) | 28,52 | Δtc (h) | 0,49 |
| Δth (h) | 0,51 | | |
| ts (h m ² /kg) | 0,23 | | |
| tch (h m ² /kg) | 0,19 | | |
| η _{av} | 0,10 | | |
| F2 | 0,17 | | |

5.2 Prove con accumulo termico a base di xilitolo

Per questa tipologia di prove è stato utilizzato come fluido lo stesso olio siliconico delle prove precedenti. A differenza delle altre prove, sono stati inseriti nell'intercapedine tra le due pentole 2,5 kg di xilitolo, che ha la funzione di accumulare calore durante la fase di riscaldamento, per poi fornirlo all'olio durante la fase di raffreddamento. Sono stati utilizzati 2 kg di olio siliconico per le prime due prove (test n°4 e n°5) e 1,5 kg per le altre. In questi test sono state misurate le stesse temperature dei test precedenti, con l'aggiunta di due termocoppie per la misurazione della temperatura del PCM:

- Temperatura ambiente T_{amb} in °C
- Temperatura vetro T_g in °C
- Temperatura dell'assorbitore T_a in °C
- Temperatura dell'olio siliconico T_f in °C
- Radiazione solare DNI in W/m^2
- Temperatura PCM (destra) T_{pcm1} in °C
- Temperatura PCM (sinistra) T_{pcm2} in °C

La fase di riscaldamento termina quando l'olio arriva ad una temperatura di 110 °C; successivamente, il forno viene spostato all'ombra e si procede con la fase di raffreddamento che termina quando il fluido avrà raggiunto la temperatura di 80 °C.

Test n°1 del 03/06/2019

Il test è stato effettuato dalle ore 11:00 alle 16:00. Al fine di rendere comparabile la prova con i test a carico con solo olio siliconico, sono stati utilizzati gli stessi range di temperatura per considerare i tempi di riscaldamento e raffreddamento. Quindi, il tempo considerato per il riscaldamento è quello compreso tra T_1 di 60 °C e T_2 di 100 °C. La radiazione solare media misurata nell'intervallo di tempo della fase di riscaldamento è di 901,34 W/m^2 , mentre la temperatura media riferita al tempo totale della prova è di 27,16 °C. Nella fase di riscaldamento, l'olio impiega circa 2 ore per passare dalla temperatura T_1 alla temperatura T_2 . Successivamente, quando l'olio arriva a 110 °C, inizia la fase di raffreddamento. Come descritto in precedenza, durante questa fase il forno viene spostato all'ombra, e viene preso come intervallo di tempo quello compreso tra T_2 di 100 °C e T_3 di 80 °C. In questo test l'olio impiega circa un'ora e mezza per passare da T_2 a T_3 .

Tab. 16 - Dati rilevati nella fase iniziale (test del 03/06/2019)

| Ora | DNI W/m ² | Tamb °C | Tg °C | Ta °C | Tpcm1 °C | Tpcm2 °C | Tf °C |
|----------|-------------------------|------------|----------|----------|-------------|-------------|----------|
| 11:00:16 | 857,52 | 27,05 | 76,06 | 49,69 | 49,57 | 44,24 | 33,44 |
| 11:00:17 | 857,67 | 27,1 | 76,09 | 49,74 | 49,6 | 44,26 | 33,44 |
| 11:00:18 | 857,72 | 27,1 | 76,13 | 49,72 | 49,62 | 44,27 | 33,44 |
| 11:00:19 | 857,72 | 27,12 | 76,21 | 49,83 | 49,68 | 44,29 | 33,44 |
| 11:00:20 | 857,45 | 27,21 | 76,24 | 49,79 | 49,71 | 44,29 | 33,46 |
| 11:00:21 | 857,52 | 27,27 | 76,28 | 49,8 | 49,75 | 44,31 | 33,45 |
| 11:00:22 | 857,84 | 27,3 | 76,34 | 49,82 | 49,78 | 44,33 | 33,46 |
| 11:00:23 | 857,58 | 27,35 | 76,38 | 49,8 | 49,81 | 44,35 | 33,47 |
| 11:00:24 | 857,57 | 27,44 | 76,44 | 49,85 | 49,85 | 44,37 | 33,49 |
| 11:00:25 | 857,11 | 27,48 | 76,48 | 49,9 | 49,87 | 44,36 | 33,48 |
| 11:00:26 | 857,53 | 27,51 | 76,51 | 49,91 | 49,92 | 44,39 | 33,5 |
| 11:00:27 | 857,53 | 27,51 | 76,56 | 49,96 | 49,95 | 44,4 | 33,5 |
| 11:00:28 | 857,72 | 27,5 | 76,65 | 49,97 | 50,01 | 44,43 | 33,52 |
| 11:00:29 | 857,91 | 27,42 | 76,69 | 49,96 | 50,04 | 44,44 | 33,52 |
| 11:00:30 | 857,77 | 27,44 | 76,73 | 49,93 | 50,07 | 44,46 | 33,53 |
| 11:00:31 | 857,79 | 27,45 | 76,77 | 49,91 | 50,09 | 44,47 | 33,53 |
| 11:00:32 | 858,18 | 27,5 | 76,79 | 49,97 | 50,13 | 44,49 | 33,54 |
| 11:00:33 | 858,23 | 27,53 | 76,79 | 50,07 | 50,16 | 44,49 | 33,55 |
| 11:00:34 | 858,27 | 27,55 | 76,86 | 50,14 | 50,19 | 44,51 | 33,55 |
| 11:00:35 | 858,06 | 27,56 | 76,91 | 50,16 | 50,22 | 44,52 | 33,56 |
| 11:00:36 | 857,92 | 27,59 | 76,95 | 50,19 | 50,25 | 44,53 | 33,56 |
| 11:00:37 | 858,23 | 27,62 | 77,03 | 50,22 | 50,33 | 44,56 | 33,59 |
| 11:00:38 | 858,21 | 27,67 | 77,08 | 50,19 | 50,37 | 44,58 | 33,6 |
| 11:00:39 | 858,04 | 27,66 | 77,12 | 50,17 | 50,39 | 44,61 | 33,61 |
| 11:00:40 | 858,42 | 27,71 | 77,14 | 50,22 | 50,43 | 44,62 | 33,62 |

Nel grafico seguente viene mostrato l'andamento delle temperature in relazione alla radiazione solare durante tutta la prova:

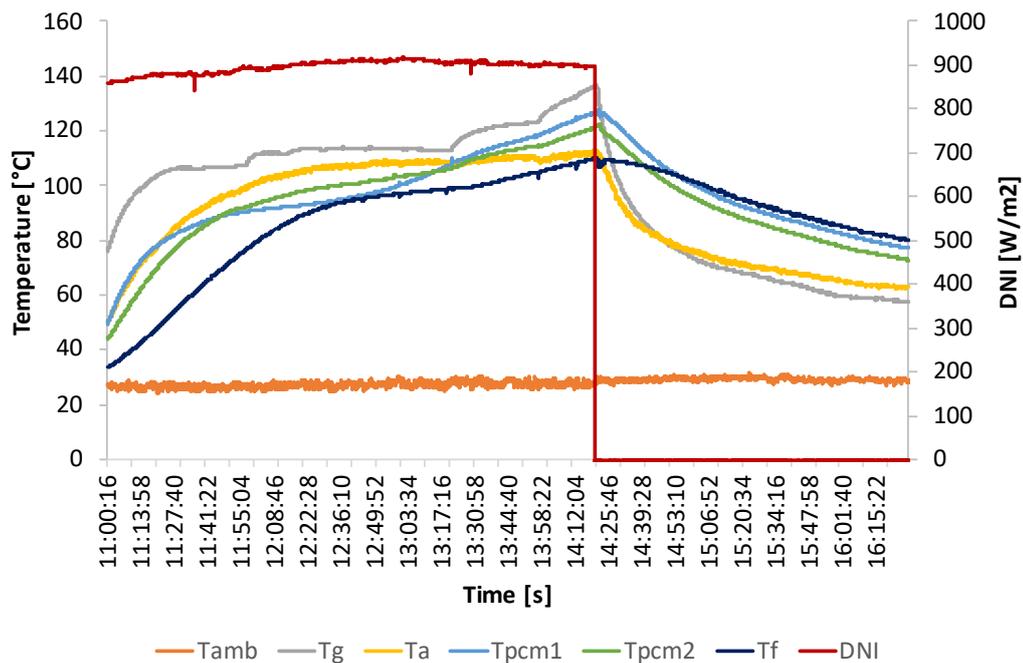


Fig. 56 - Grafico delle rilevazioni (test del 03/06/2019)

I dati raccolti sono stati elaborati utilizzando il programma Excel. Nella tabella seguente vengono mostrati i risultati della prova nella fase di riscaldamento e raffreddamento:

Tab. 17 - Risultati della prova (test del 03/06/2019)

| RISCALDAMENTO | | RAFFREDDAMENTO | |
|---------------------------------------|----------|-----------------------|----------|
| Test | 1 | Test | 1 |
| Data | 03/06/19 | Data | 03/06/19 |
| m _{PCM} (kg) | 2,5 | m _{PCM} (kg) | 2,5 |
| mf (kg) | 2 | mf (kg) | 2 |
| T1 (°C) | 60 | T2 (°C) | 100 |
| T2 (°C) | 100 | T3 (°C) | 80 |
| DNI _{av} (W/m ²) | 901,34 | Tamb,av (°C) | 29,30 |
| Tamb,av (°C) | 27,16 | Δtc (h) | 1,39 |
| Δth (h) | 1,95 | | |
| ts (h m ² /kg) | 0,66 | | |
| tch (h m ² /kg) | 0,66 | | |
| ηav | 0,03 | | |
| F2 | 0,06 | | |

Test n°2 del 04/06/2019

Il test è stato effettuato dalle ore 9:40 alle 14:25. Al fine di rendere comparabile la prova con i test a carico con solo olio silconico, sono stati utilizzati gli stessi range di temperatura per considerare i tempi di riscaldamento e raffreddamento. Quindi, il tempo considerato per il riscaldamento è quello compreso tra T_1 di 60 °C e T_2 di 100 °C. La radiazione solare media misurata nell'intervallo di tempo della fase di riscaldamento è di 790,42 W/m², mentre la temperatura media riferita al tempo totale della prova è di 28,08 °C. Nella fase di riscaldamento, l'olio impiega circa un'ora e 10 minuti per passare dalla temperatura T_1 alla temperatura T_2 . Successivamente, quando l'olio arriva a 110 °C, inizia la fase di raffreddamento. Come descritto in precedenza, durante questa fase il forno viene spostato all'ombra, e viene preso come intervallo di tempo quello compreso tra T_2 di 100 °C e T_3 di 80 °C. In questo test l'olio impiega circa un'ora e 40 minuti per passare da T_2 a T_3 .

Tab. 18 - Dati rilevati nella fase iniziale (test del 04/06/2019)

| Ora | DNI W/m ² | Tamb °C | Tg °C | Ta °C | Tpcm1 °C | Tpcm2 °C | Tf °C |
|----------|-------------------------|------------|----------|----------|-------------|-------------|----------|
| 09:42:14 | 781,24 | 26,81 | 99,6 | 40,46 | 37,86 | 44,17 | 31,1 |
| 09:42:15 | 781,13 | 26,88 | 99,65 | 40,41 | 37,88 | 44,21 | 31,12 |
| 09:42:16 | 781,19 | 26,87 | 99,7 | 40,4 | 37,9 | 44,25 | 31,13 |
| 09:42:17 | 781,08 | 26,59 | 99,79 | 40,43 | 37,95 | 44,33 | 31,16 |
| 09:42:18 | 781,22 | 26,52 | 99,84 | 40,42 | 37,97 | 44,36 | 31,17 |
| 09:42:19 | 781,13 | 26,44 | 99,89 | 40,4 | 37,99 | 44,41 | 31,19 |
| 09:42:20 | 781,12 | 26,41 | 99,93 | 40,4 | 38,01 | 44,44 | 31,2 |
| 09:42:21 | 780,95 | 26,4 | 99,99 | 40,36 | 38,03 | 44,48 | 31,22 |
| 09:42:22 | 781,31 | 26,44 | 100,04 | 40,38 | 38,07 | 44,52 | 31,23 |
| 09:42:23 | 781,29 | 26,58 | 100,09 | 40,45 | 38,08 | 44,56 | 31,25 |
| 09:42:24 | 781,36 | 26,66 | 100,13 | 40,51 | 38,1 | 44,59 | 31,25 |
| 09:42:25 | 781,29 | 26,69 | 100,18 | 40,49 | 38,12 | 44,62 | 31,26 |
| 09:42:26 | 781,02 | 26,61 | 100,27 | 40,51 | 38,17 | 44,7 | 31,28 |
| 09:42:27 | 780,93 | 26,57 | 100,31 | 40,58 | 38,18 | 44,73 | 31,31 |
| 09:42:28 | 781,19 | 26,6 | 100,36 | 40,55 | 38,21 | 44,77 | 31,31 |
| 09:42:29 | 781,08 | 26,62 | 100,4 | 40,54 | 38,23 | 44,8 | 31,32 |
| 09:42:30 | 781,19 | 26,66 | 100,45 | 40,54 | 38,24 | 44,85 | 31,34 |
| 09:42:31 | 781,25 | 26,8 | 100,51 | 40,66 | 38,27 | 44,89 | 31,35 |
| 09:42:32 | 781,24 | 26,9 | 100,55 | 40,78 | 38,29 | 44,93 | 31,37 |
| 09:42:33 | 781,22 | 26,92 | 100,6 | 40,82 | 38,32 | 44,97 | 31,39 |
| 09:42:34 | 781,39 | 26,92 | 100,64 | 40,83 | 38,35 | 45,01 | 31,4 |
| 09:42:35 | 781,49 | 26,93 | 100,72 | 40,81 | 38,39 | 45,07 | 31,41 |
| 09:42:36 | 781,53 | 26,88 | 100,77 | 40,81 | 38,39 | 45,1 | 31,42 |
| 09:42:37 | 781,59 | 26,8 | 100,81 | 40,88 | 38,41 | 45,13 | 31,43 |
| 09:42:38 | 781,7 | 26,79 | 100,86 | 40,88 | 38,44 | 45,17 | 31,45 |

Nel grafico seguente viene mostrato l'andamento delle temperature in relazione alla radiazione solare durante tutta la prova:

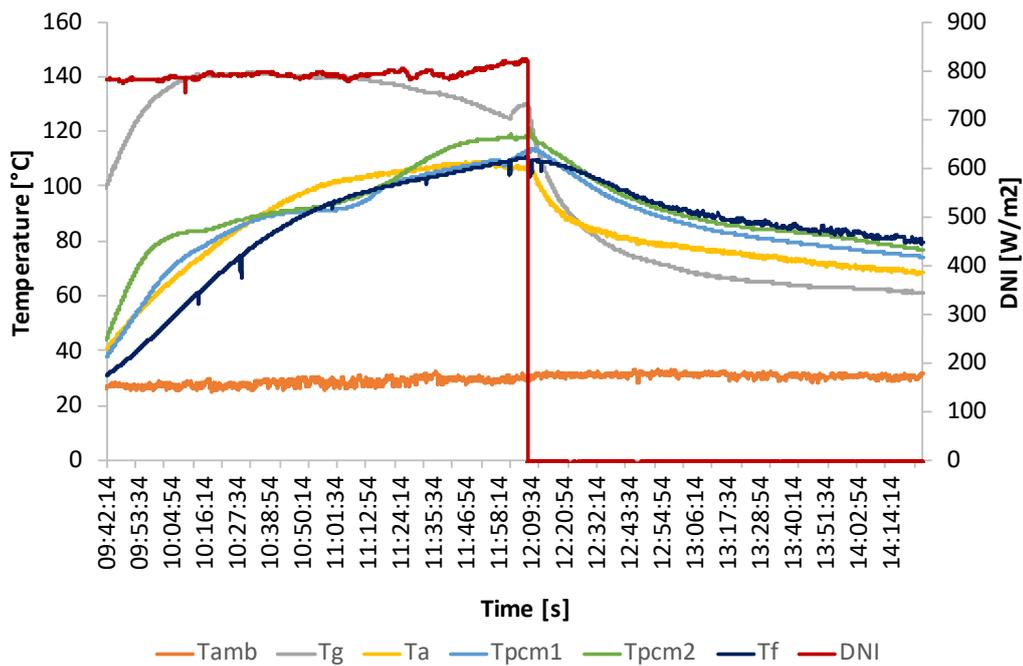


Fig. 57 - Grafico delle rilevazioni (test del 04/06/2019)

I dati raccolti sono stati elaborati utilizzando il programma Excel. Nella tabella seguente vengono mostrati i risultati della prova nella fase di riscaldamento e raffreddamento:

Tab. 19 - Risultati della prova (test del 04/06/2019)

| RISCALDAMENTO | | RAFFREDDAMENTO | |
|---------------------------------------|----------|-----------------------|----------|
| Test | 2 | Test | 2 |
| Data | 04/06/19 | Data | 04/06/19 |
| m _{PCM} (kg) | 2,5 | m _{PCM} (kg) | 2,5 |
| mf (kg) | 2 | mf (kg) | 2 |
| T1 (°C) | 60 | T2 (°C) | 100 |
| T2 (°C) | 100 | T3 (°C) | 80 |
| DNI _{av} (W/m ²) | 790,42 | Tamb,av (°C) | 31,01 |
| Tamb,av (°C) | 28,08 | Δtc (h) | 1,75 |
| Δth (h) | 1,12 | | |
| ts (h m ² /kg) | 0,38 | | |
| tch (h m ² /kg) | 0,33 | | |
| η _{av} | 0,06 | | |
| F2 | 0,11 | | |

Test n°3 del 05/06/2019

In questa prova ci sono stati dei problemi con il connettore di una delle due termocoppie che misura la temperatura dello xilitolo. Per questo motivo nella fase di riscaldamento le temperature riferite a quest'ultimo sono state considerate uguali e pari a quelle della termocoppia funzionante.

Il test è stato effettuato dalle ore 10:30 alle 14:30. Al fine di rendere comparabile la prova con i test a carico con solo olio silconico, sono stati utilizzati gli stessi range di temperatura per considerare i tempi di riscaldamento e raffreddamento. Quindi, il tempo considerato per il riscaldamento è quello compreso tra T_1 di 60 °C e T_2 di 100 °C. La radiazione solare media misurata nell'intervallo di tempo della fase di riscaldamento è di 789,32 W/m², mentre la temperatura media riferita al tempo totale della prova è di 28,04 °C. Nella fase di riscaldamento, l'olio impiega circa un'ora e 5 minuti per passare dalla temperatura T_1 alla temperatura T_2 . Successivamente, quando l'olio arriva a 110 °C, inizia la fase di raffreddamento. Come descritto in precedenza, durante questa fase il forno viene spostato all'ombra, e viene preso come intervallo di tempo quello compreso tra T_2 di 100 °C e T_3 di 80 °C. In questo test l'olio impiega circa un'ora e 50 minuti per passare da T_2 a T_3 .

Tab. 20 - Dati rilevati nella fase iniziale (test del 05/06/2019)

| Ora | DNI W/m ² | Tamb °C | Tg °C | Ta °C | Tpcm1 °C | Tpcm2 °C | Tf °C |
|----------|-------------------------|------------|----------|----------|-------------|-------------|----------|
| 10:26:07 | 771,69 | 28,53 | 122,64 | 56,58 | 65,93 | 65,93 | 51,16 |
| 10:26:08 | 771,88 | 28,32 | 122,69 | 56,64 | 65,96 | 65,96 | 51,18 |
| 10:26:09 | 771,76 | 28,52 | 122,73 | 56,79 | 65,98 | 65,98 | 51,19 |
| 10:26:10 | 771,88 | 28,31 | 122,77 | 56,89 | 65,99 | 65,99 | 51,2 |
| 10:26:11 | 772,06 | 28,32 | 122,85 | 56,88 | 66,03 | 66,03 | 51,23 |
| 10:26:12 | 772,13 | 28,31 | 122,91 | 57 | 66,06 | 66,06 | 51,25 |
| 10:26:13 | 772,13 | 28,31 | 122,91 | 57 | 66,06 | 66,06 | 51,25 |
| 10:26:14 | 772,3 | 29,2 | 123,02 | 57,06 | 66,11 | 66,11 | 51,29 |
| 10:26:15 | 772,66 | 28,16 | 123,07 | 57,05 | 66,13 | 66,13 | 51,32 |
| 10:26:16 | 772,63 | 28,56 | 123,12 | 57,12 | 66,15 | 66,15 | 51,33 |
| 10:26:17 | 772,59 | 28,3 | 123,16 | 57,08 | 66,17 | 66,17 | 51,33 |
| 10:26:18 | 772,73 | 28,53 | 123,21 | 57,08 | 66,18 | 66,18 | 51,36 |
| 10:26:19 | 772,92 | 28,27 | 123,25 | 57,09 | 66,21 | 66,21 | 51,38 |
| 10:26:20 | 773,07 | 28,31 | 123,3 | 57,17 | 66,23 | 66,23 | 51,38 |
| 10:26:21 | 773,24 | 29,31 | 123,34 | 57,29 | 66,26 | 66,26 | 51,41 |
| 10:26:22 | 773,46 | 28,51 | 123,4 | 57,37 | 66,28 | 66,28 | 51,42 |
| 10:26:23 | 773,19 | 28,51 | 123,48 | 57,38 | 66,32 | 66,32 | 51,45 |
| 10:26:24 | 773 | 28,32 | 123,52 | 57,29 | 66,34 | 66,34 | 51,46 |
| 10:26:25 | 772,97 | 28,81 | 123,56 | 57,27 | 66,36 | 66,36 | 51,48 |
| 10:26:26 | 772,61 | 28,57 | 123,6 | 57,22 | 66,38 | 66,38 | 51,49 |
| 10:26:27 | 772,41 | 28,22 | 123,63 | 57,24 | 66,4 | 66,4 | 51,51 |
| 10:26:28 | 772,59 | 28,2 | 123,69 | 57,31 | 66,42 | 66,42 | 51,53 |
| 10:26:29 | 772,59 | 28,14 | 123,74 | 57,4 | 66,44 | 66,44 | 51,54 |
| 10:26:30 | 772,87 | 28,47 | 123,78 | 57,44 | 66,46 | 66,46 | 51,56 |
| 10:26:31 | 772,73 | 28,43 | 123,81 | 57,46 | 66,47 | 66,47 | 51,56 |

Nel grafico seguente viene mostrato l'andamento delle temperature in relazione alla radiazione solare durante tutta la prova:

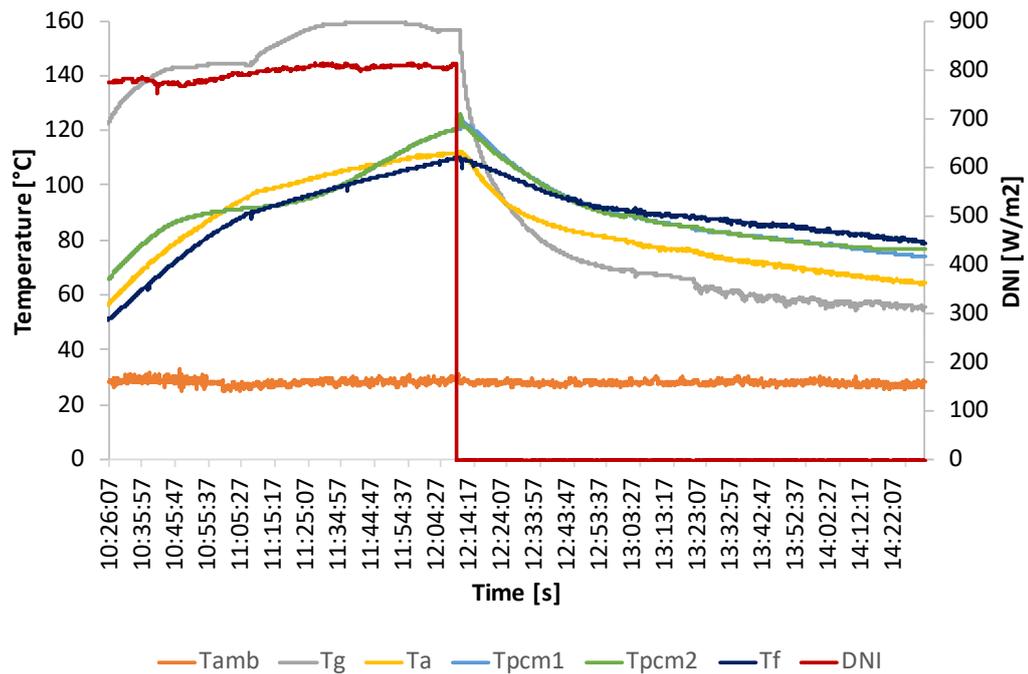


Fig. 58 - Grafico delle rilevazioni (test del 05/06/2019)

I dati raccolti sono stati elaborati utilizzando il programma Excel. Nella tabella seguente vengono mostrati i risultati della prova nella fase di riscaldamento e raffreddamento:

Tab. 21 - Risultati della prova (test del 05/06/2019)

| RISCALDAMENTO | | RAFFREDDAMENTO | |
|---------------------------------------|----------|----------------|----------|
| Test | 3 | Test | 3 |
| Data | 05/06/19 | Data | 05/06/19 |
| mPCM (kg) | 2,5 | mPCM (kg) | 2,5 |
| mf (kg) | 1,5 | mf (kg) | 1,5 |
| T1 (°C) | 60 | T2 (°C) | 100 |
| T2 (°C) | 100 | T3 (°C) | 80 |
| DNI _{av} (W/m ²) | 789,32 | Tamb,av (°C) | 27,99 |
| Tamb,av (°C) | 28,04 | Δtc (h) | 1,82 |
| Δth (h) | 1,05 | | |
| ts (h m ² /kg) | 0,48 | | |
| tch (h m ² /kg) | 0,42 | | |
| η _{av} | 0,05 | | |
| F2 | 0,09 | | |

Test n° 4 del 06/06/2019

Il test è stato effettuato dalle ore 10:15 alle 16:00. Al fine di rendere comparabile la prova con i test a carico con solo olio silconico, sono stati utilizzati gli stessi range di temperatura per considerare i tempi di riscaldamento e raffreddamento. Quindi, il tempo considerato per il riscaldamento è quello compreso tra T_1 di 60 °C e T_2 di 100 °C. La radiazione solare media misurata nell'intervallo di tempo della fase di riscaldamento è di 775,46 W/m², mentre la temperatura media riferita al tempo totale della prova è di 26,7 °C. Nella fase di riscaldamento, l'olio impiega circa un'ora e 35 minuti per passare dalla temperatura T_1 alla temperatura T_2 . Successivamente, quando l'olio arriva a 110 °C, inizia la fase di raffreddamento. Come descritto in precedenza, durante questa fase il forno viene spostato all'ombra, e viene preso come intervallo di tempo quello compreso tra T_2 di 100 °C e T_3 di 80 °C. In questo test l'olio impiega circa un'ora e 35 minuti per passare da T_2 a T_3 .

Tab. 22 - Dati rilevati nella fase iniziale (test del 06/06/2019)

| Ora | DNI W/m ² | Tamb °C | Tg °C | Ta °C | Tpcm1 °C | Tpcm2 °C | Tf °C |
|----------|-------------------------|------------|----------|----------|-------------|-------------|----------|
| 10:15:00 | 775,99 | 23,68 | 77,73 | 32,35 | 31,28 | 33,28 | 27,26 |
| 10:15:01 | 775,99 | 23,68 | 77,73 | 32,35 | 31,28 | 33,28 | 27,26 |
| 10:15:02 | 776,19 | 23,71 | 77,85 | 32,37 | 31,31 | 33,32 | 27,27 |
| 10:15:03 | 776,19 | 23,69 | 77,96 | 32,41 | 31,35 | 33,36 | 27,27 |
| 10:15:04 | 776,59 | 23,74 | 78,12 | 32,44 | 31,4 | 33,42 | 27,29 |
| 10:15:05 | 777,4 | 23,75 | 78,27 | 32,49 | 31,46 | 33,5 | 27,3 |
| 10:15:06 | 777,2 | 23,74 | 78,37 | 32,51 | 31,48 | 33,53 | 27,31 |
| 10:15:07 | 776,68 | 23,63 | 78,48 | 32,49 | 31,52 | 33,57 | 27,3 |
| 10:15:08 | 776,02 | 23,66 | 78,55 | 32,55 | 31,56 | 33,61 | 27,31 |
| 10:15:09 | 776,28 | 23,82 | 78,64 | 32,62 | 31,59 | 33,65 | 27,32 |
| 10:15:10 | 776,6 | 23,96 | 78,75 | 32,66 | 31,62 | 33,69 | 27,32 |
| 10:15:11 | 777,21 | 24,1 | 78,82 | 32,71 | 31,65 | 33,74 | 27,34 |
| 10:15:12 | 777,11 | 24,15 | 78,79 | 32,75 | 31,68 | 33,77 | 27,34 |
| 10:15:13 | 777,06 | 24,11 | 78,95 | 32,84 | 31,74 | 33,84 | 27,37 |
| 10:15:14 | 776,43 | 24,1 | 78,99 | 32,84 | 31,8 | 33,91 | 27,37 |
| 10:15:15 | 776,72 | 24,12 | 79,06 | 32,85 | 31,83 | 33,95 | 27,39 |
| 10:15:16 | 776 | 24,1 | 78,48 | 32,99 | 31,87 | 33,99 | 27,39 |
| 10:15:17 | 776,02 | 24,12 | 78,42 | 33,02 | 31,89 | 34,03 | 27,4 |
| 10:15:18 | 775,83 | 23,98 | 78,69 | 32,99 | 31,93 | 34,08 | 27,4 |
| 10:15:19 | 775,51 | 23,84 | 78,87 | 33,02 | 31,96 | 34,12 | 27,42 |
| 10:15:20 | 775,18 | 23,85 | 79,09 | 33,05 | 32,01 | 34,16 | 27,43 |
| 10:15:21 | 775,46 | 23,75 | 79,2 | 33,09 | 32,04 | 34,21 | 27,43 |
| 10:15:22 | 775,3 | 23,75 | 79,31 | 33,12 | 32,09 | 34,26 | 27,44 |
| 10:15:23 | 775,3 | 23,78 | 79,44 | 33,15 | 32,14 | 34,33 | 27,45 |
| 10:15:24 | 775,08 | 23,79 | 79,37 | 33,11 | 32,18 | 34,38 | 27,46 |

Nel grafico seguente viene mostrato l'andamento delle temperature in relazione alla radiazione solare durante tutta la prova:

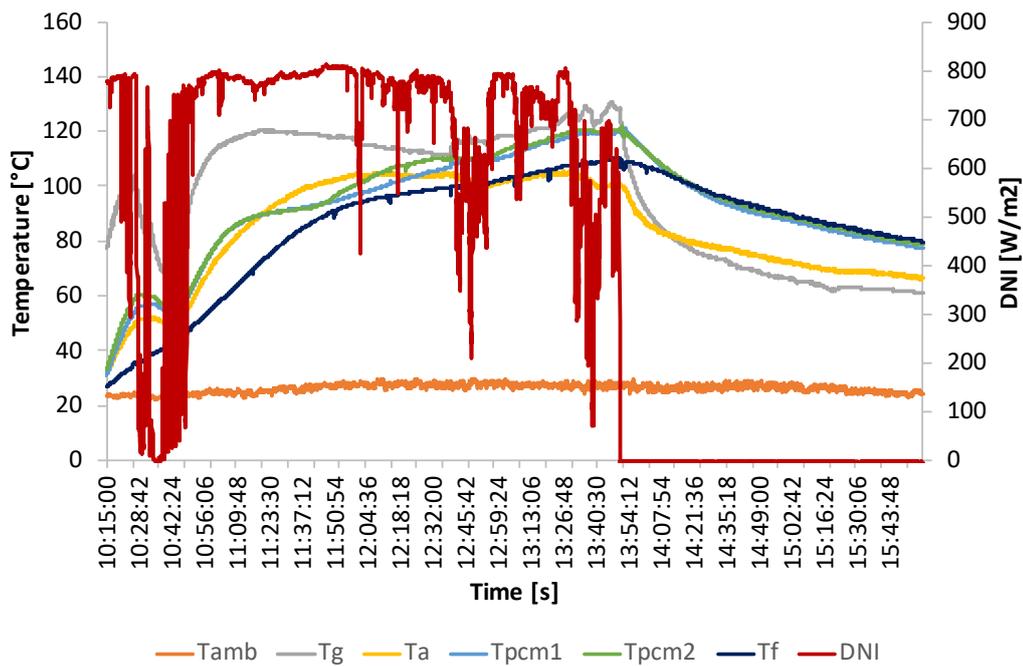


Fig. 59 - Grafico delle rilevazioni (test del 06/06/2019)

I dati raccolti sono stati elaborati utilizzando il programma Excel. Nella tabella seguente vengono mostrati i risultati della prova nella fase di riscaldamento e raffreddamento:

Tab. 23 - Risultati della prova (test del 06/06/2019)

| RISCALDAMENTO | | RAFFREDDAMENTO | |
|---------------------------------|----------|------------------|----------|
| Test | 4 | Test | 4 |
| Data | 06/06/19 | Data | 06/06/19 |
| m_{PCM} (kg) | 2,5 | m_{PCM} (kg) | 2,5 |
| m_f (kg) | 1,5 | m_f (kg) | 1,5 |
| T1 (°C) | 60 | T2 (°C) | 100 |
| T2 (°C) | 100 | T3 (°C) | 80 |
| DNI,av (W/m ²) | 775,46 | Tamb,av (°C) | 26,13 |
| Tamb,av (°C) | 26,7 | Δt_c (h) | 1,60 |
| Δt_h (h) | 1,60 | | |
| t_s (h m ² /kg) | 0,73 | | |
| t_{ch} (h m ² /kg) | 0,63 | | |
| η_{av} | 0,03 | | |
| F2 | 0,06 | | |

Test n° 5 del 07/06/2019

Il test è stato effettuato dalle ore 09:35 alle 14:25. Al fine di rendere comparabile la prova con i test a carico con solo olio silconico, sono stati utilizzati gli stessi range di temperatura per considerare i tempi di riscaldamento e raffreddamento. Quindi, il tempo considerato per il riscaldamento è quello compreso tra T_1 di 60 °C e T_2 di 100 °C. La radiazione solare media misurata nell'intervallo di tempo della fase di riscaldamento è di 713,97 W/m², mentre la temperatura media riferita al tempo totale della prova è di 25,82 °C. Nella fase di riscaldamento, l'olio impiega circa un'ora e 15 minuti per passare dalla temperatura T_1 alla temperatura T_2 . Successivamente, quando l'olio arriva a 110 °C, inizia la fase di raffreddamento. Come descritto in precedenza, durante questa fase il forno viene spostato all'ombra, e viene preso come intervallo di tempo quello compreso tra T_2 di 100 °C e T_3 di 80 °C. In questo test l'olio impiega circa un'ora e 35 minuti per passare da T_2 a T_3 .

Tab. 24 - Dati rilevati nella fase iniziale (test del 07/06/2019)

| Ora | DNI W/m ² | Tamb °C | Tg °C | Ta °C | Tpcm1 °C | Tpcm2 °C | Tf °C |
|----------|-------------------------|------------|----------|----------|-------------|-------------|----------|
| 09:34:33 | 659,25 | 23,28 | 70,96 | 27,9 | 26,82 | 34,63 | 25,09 |
| 09:34:34 | 659,49 | 23,2 | 71 | 27,88 | 26,84 | 34,66 | 25,1 |
| 09:34:35 | 659,86 | 23,21 | 71,06 | 27,88 | 26,85 | 34,69 | 25,1 |
| 09:34:36 | 659,65 | 23,28 | 71,02 | 27,94 | 26,88 | 34,74 | 25,12 |
| 09:34:37 | 659,64 | 23,37 | 71,05 | 27,96 | 26,9 | 34,78 | 25,14 |
| 09:34:38 | 659,52 | 23,35 | 71,15 | 27,96 | 26,93 | 34,83 | 25,15 |
| 09:34:39 | 659,5 | 23,17 | 71,26 | 27,97 | 26,95 | 34,86 | 25,15 |
| 09:34:40 | 659,42 | 23,2 | 71,28 | 27,99 | 26,97 | 34,9 | 25,16 |
| 09:34:41 | 659,52 | 23,16 | 71,37 | 28,01 | 26,99 | 34,93 | 25,17 |
| 09:34:42 | 659,66 | 23,2 | 71,39 | 28,02 | 27 | 34,96 | 25,18 |
| 09:34:43 | 659,57 | 23,21 | 71,36 | 28,02 | 27,02 | 34,99 | 25,19 |
| 09:34:44 | 659,28 | 23,24 | 71,41 | 28,01 | 27,03 | 35,02 | 25,19 |
| 09:34:45 | 659,07 | 23,27 | 71,35 | 28,07 | 27,07 | 35,08 | 25,22 |
| 09:34:46 | 659,13 | 23,22 | 71,44 | 28,1 | 27,11 | 35,12 | 25,24 |
| 09:34:47 | 659,15 | 23,19 | 71,55 | 28,11 | 27,12 | 35,16 | 25,25 |
| 09:34:48 | 659,01 | 23,15 | 71,48 | 28,1 | 27,14 | 35,19 | 25,26 |
| 09:34:49 | 658,98 | 23,18 | 71,66 | 28,1 | 27,16 | 35,23 | 25,27 |
| 09:34:50 | 658,75 | 23,1 | 71,77 | 28,1 | 27,18 | 35,25 | 25,27 |
| 09:34:51 | 658,6 | 23 | 71,85 | 28,1 | 27,2 | 35,28 | 25,29 |
| 09:34:52 | 658,16 | 22,94 | 71,93 | 28,14 | 27,22 | 35,31 | 25,29 |
| 09:34:53 | 657,85 | 22,88 | 72,02 | 28,21 | 27,24 | 35,36 | 25,31 |
| 09:34:54 | 657,8 | 22,84 | 72,02 | 28,29 | 27,28 | 35,41 | 25,32 |
| 09:34:55 | 657,92 | 22,84 | 72,14 | 28,31 | 27,3 | 35,46 | 25,33 |
| 09:34:56 | 657,94 | 22,83 | 72,16 | 28,3 | 27,32 | 35,49 | 25,34 |
| 09:34:57 | 658,07 | 22,89 | 72,21 | 28,31 | 27,34 | 35,53 | 25,36 |

Nel grafico seguente viene mostrato l'andamento delle temperature in relazione alla radiazione solare durante tutta la prova:

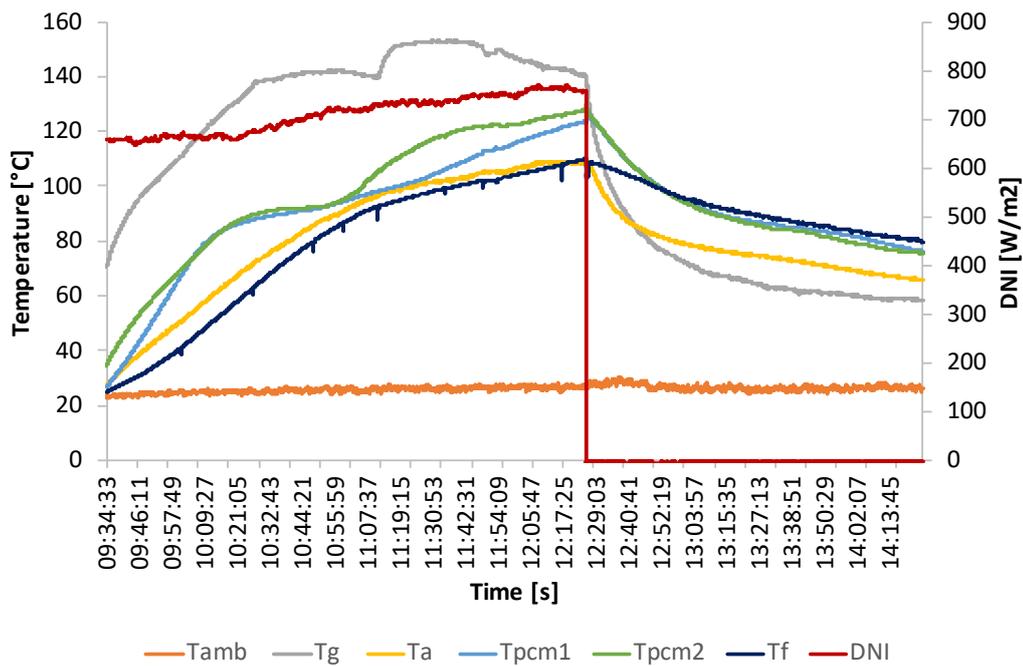


Fig. 60 - Grafico delle rilevazioni (test del 07/06/2019)

I dati raccolti sono stati elaborati utilizzando il programma Excel. Nella tabella seguente vengono mostrati i risultati della prova nella fase di riscaldamento e raffreddamento:

Tab. 25 - Risultati della prova (test del 07/06/2019)

| RISCALDAMENTO | | RAFFREDDAMENTO | |
|---------------------------------------|----------|-----------------------|----------|
| Test | 5 | Test | 5 |
| Data | 07/06/19 | Data | 07/06/19 |
| m _{PCM} (kg) | 2,5 | m _{PCM} (kg) | 2,5 |
| mf (kg) | 1,5 | mf (kg) | 1,5 |
| T1 (°C) | 60 | T2 (°C) | 100 |
| T2 (°C) | 100 | T3 (°C) | 80 |
| DNI _{av} (W/m ²) | 713,97 | Tamb,av (°C) | 26,3 |
| Tamb,av (°C) | 25,82 | Δtc (h) | 1,62 |
| Δth (h) | 1,26 | | |
| ts (h m ² /kg) | 0,57 | | |
| tch (h m ² /kg) | 0,45 | | |
| ηav | 0,04 | | |
| F2 | 0,07 | | |

5.3 Confronto dei dati

Il confronto dei dati delle due diverse tipologie di prove effettuate è possibile grazie all'utilizzo degli stessi range di temperatura sia per la fase di riscaldamento (60 – 100 °C) che per quella di raffreddamento (100 – 80 °C). Per comodità, nei paragrafi successivi verranno studiate separatamente la fase di riscaldamento da quella di raffreddamento delle diverse prove.

5.3.1 Fase di riscaldamento

Confrontando le prove svolte con solo olio silconico con quelle in cui abbiamo utilizzato il PCM, possiamo giungere alla prima evidente osservazione: le prove con PCM hanno richiesto un tempo nettamente maggiore per la fase di riscaldamento. Infatti, nelle prove senza PCM, il tempo medio per passare dalla temperatura T_1 di 60 °C a T_2 di 100 °C è stato di circa 31 minuti, mentre, nelle prove con PCM, di 84 minuti, con un incremento di tempo del 171%. Di conseguenza, c'è stata una diminuzione del rendimento correlato alle singole prove, dovuto al fatto che il PCM assorbe gran parte dell'energia che arriva nel forno, sottraendo, quindi, energia che sarebbe stata assorbita dall'olio in sua assenza. Tale effetto può considerarsi negativo per la cottura dei cibi, in quanto bisogna esporre il forno al sole molto tempo prima per raggiungere temperature elevate. Però, può essere interessante per tutti gli usi del forno solare che richiedono un quantitativo di potenza basso per un tempo prolungato, come ad esempio lo scongelamento.

Dall'analisi dei grafici dell'andamento delle temperature e della radiazione solare si può notare, inoltre, che il PCM tende a rendere costante la potenza fornita, anche quando siamo in presenza di una radiazione solare incostante. Questo effetto è detto “buffering” ed è positivo per la cottura dei cibi, in quanto una potenza costante si traduce in una cottura migliore.

Nella tabella successiva vi è un riassunto delle fasi di riscaldamento delle diverse prove effettuate:

Tab. 26 - Riassunto delle fasi di riscaldamento

| Test | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Data (2019) | 03/06 | 04/06 | 05/06 | 06/06 | 07/06 | 11/06 | 12/06 | 17/06 |
| mPCM | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | - | - | - |
| mf (kg) | 2 | 2 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 |
| T1 (°C) | 60 | 60 | 60 | 60 | 60 | 60 | 60 | 60 |
| T2 (°C) | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| DNI_{av} (W/m²) | 901,34 | 790,42 | 789,32 | 775,46 | 713,97 | 720,07 | 583,23 | 746,60 |
| T_{amb,av} (°C) | 27,16 | 28,08 | 28,04 | 26,7 | 25,82 | 31,18 | 28,22 | 28,52 |

| | | | | | | | | |
|---------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Δth (h) | 1,95 | 1,12 | 1,05 | 1,60 | 1,26 | 0,57 | 0,49 | 0,51 |
| t_s (h m^2/kg) | 0,66 | 0,38 | 0,48 | 0,73 | 0,57 | 0,26 | 0,22 | 0,23 |
| t_{ch} (h m^2/kg) | 0,66 | 0,33 | 0,42 | 0,63 | 0,45 | 0,21 | 0,14 | 0,19 |
| η_{av} | 0,03 | 0,06 | 0,05 | 0,03 | 0,04 | 0,10 | 0,14 | 0,10 |
| F2 | 0,06 | 0,11 | 0,09 | 0,06 | 0,07 | 0,16 | 0,18 | 0,17 |

Come si può notare dalla tabella, nel test n°1 del 03/06/2019 la durata della fase di riscaldamento è molto elevata, nonostante sia stata la giornata con la radiazione solare media più alta. La motivazione di questo tempo di riscaldamento molto lungo è il vento. Purtroppo, nelle nostre prove non è stato previsto l'utilizzo di apparecchiature per la misurazione della velocità del vento, quindi non possiamo mettere questo dato in relazione con i tempi di riscaldamento.

5.3.2 Fase di raffreddamento

Le fasi di raffreddamento hanno dei tempi molto più lunghi nelle prove svolte con l'utilizzo del PCM. Infatti, il tempo medio di raffreddamento delle prove con PCM è di 98 minuti, mentre per le prove a carico con il solo olio silconico di 30 minuti. Ne risulta che lo xilitolo riesce ad incrementare mediamente i tempi di raffreddamento del 227%. Questo permette di fornire energia termica per tempi più lunghi, e quindi di poter cuocere i cibi anche dopo il tramonto, oppure quando siamo in presenza di nuvolosità irregolare.

Nella tabella successiva vi è un riassunto delle fasi di raffreddamento delle diverse prove effettuate:

Tab. 27 - Riassunto delle fasi di raffreddamento

| Test | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Data (2019) | 03/06 | 04/06 | 05/06 | 06/06 | 07/06 | 11/06 | 12/06 | 17/06 |
| m_{PCM} | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | - | - | - |
| m_f (kg) | 2 | 2 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 |
| T₂ (°C) | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| T₃ (°C) | 80 | 80 | 80 | 80 | 80 | 80 | 80 | 80 |
| T_{amb,av} (°C) | 29,30 | 31,01 | 27,99 | 26,13 | 26,3 | 30,7 | 30,14 | 28,81 |
| Δt_c (h) | 1,39 | 1,75 | 1,82 | 1,60 | 1,62 | 0,57 | 0,44 | 0,49 |

Anche in questo caso, nel test n°1 del 03/06/2019 riscontriamo gli effetti del vento: i tempi di raffreddamento risultano essere addirittura minori dei test effettuati con solo 1,5 kg di olio silconico.

CAPITOLO 6

CONCLUSIONI

L'obiettivo di questa tesi è stato quello di acquisire e analizzare i dati relativi alle prove svolte nel dipartimento "DIISM" dell'Università Politecnica delle Marche, al fine di valutare il rendimento di un forno solare a scatola con e senza la presenza di materiale a cambiamento di fase, nello specifico, lo xilitolo.

Con i risultati ottenuti siamo stati in grado di capire quali sono i punti di forza e i limiti di questa tecnologia. Questi ultimi, infatti, sono rappresentati dall'impossibilità di utilizzare i forni solari nelle ore notturne o quando il cielo è molto nuvoloso. Attraverso i nostri test abbiamo cercato di porre rimedio a questo aspetto con l'utilizzo del PCM.

Dall'analisi dei risultati è emerso come l'accumulo di energia termica porti a notevoli miglioramenti, allungando di molto i tempi di raffreddamento. Allo stesso tempo, però, è emerso che il PCM assorbendo molto calore, fa sì che i tempi di riscaldamento e, quindi, di cottura aumentino. Un altro aspetto interessante emerso dalle prove è l'influenza che può avere il vento sul rendimento del forno. Sarebbe interessante in futuro introdurre anche questa variabile nei test per valutare l'efficienza dei forni solari.

Sicuramente c'è bisogno che la ricerca sui forni solari e sulle varie tecnologie di accumulo continui, con la speranza di arrivare ad un livello di efficienza tale che la cottura solare possa diventare una reale alternativa alla cottura tradizionale.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Energia, Vocabolario Treccani
- [2] Working Group I: The Physical Basis for Climate Change, Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC
- [3] Quantifying environmental health impacts, World Health Organization (WHO)
- [4] ENEA, Rapporto Energia e Ambiente, 2013, pp. 15
- [5] Agenzia per la protezione dell'ambiente e per i servizi tecnici (APAT), Energia e radiazioni (PDF), 2006
- [6] Renewables - Global status report, 2019
- [7] Luigi Mirri Michele Parente, Fisica ambientale energie alternative e rinnovabili, Zanichelli, p. 40
- [8] Solar cooling – ENEA
- [9] T. Crescenzi, M. Falchetta, A. Fontanella, E. Metelli, A. Miliozzi, F. Spinelli, L. Sipione – Opportunità di applicazione delle tecnologie solari termodinamiche in Italia – ENEA, 2016
- [10] Erdem Cuce, Pinar Mert Cuce, A comprehensive review on solar cookers. Applied Energy 2012; 102: 1399 - 1421.
- [11] Progettazione e realizzazione di un prototipo di forno solare a scatola con specchi riflettenti multipli, Alessandro Del Re, 2016/2017.
- [12] Analisi dei risultati delle prove sperimentali di un prototipo di forno solare a scatola con specchi riflettenti multipli, Andrea Pio Concettini, 2016/2017
- [13] F. Yettou, B. Azoui, A. Malek, A. Gama, N.L. Panwar, Solar cooker realizations in actual use: An overview. Renewable and Sustainable Energy Reviews 37 (2014) 288-306.
- [14] S.D. Sharma, D. Buddhi*, R.L. Sawhney, Atul Sharma, Design, development and performance evaluation of a latent heat storage unit for evening cooking in a solar cooker. Energy Conversion & Management 41 (2000) 1497-1508.
- [15] DOE Fundamentals Handbook - "Thermodynamics, Heat transfer, and fluid flow", p. 21.
- [16] DOE Fundamentals Handbook - "Thermodynamics, Heat transfer, and fluid flow", pp. 20-21.

- [17] Aceves-Saborio S, Nakamura H, Reistad GM. Optimum efficiencies and phase change temperatures in latent heat storage systems. ASME Adv Energy Syst Div Publ AES 1992;27:17–24
- [18] A. Miliozzi, E. Veca, S. Sau, R. Grena, M. Celino, M. Falconieri, F. Rondino- “Individuazione e caratterizzazione di miscele di materiali a cambiamento di fase e nanoparticelle da impiegare come sistemi alternativi di accumulo termico” – Report RdS/2013/079 [ENEA]
- [19] V. T. C. C. D. B. Atul Sharma, "Review on thermal energy storage with phase change materials and applications," Renewable and Sustainable Energy Reviews, p. 318–345, 2009
- [20] Freund, Mihály; Mózes, Gyula (1982). Paraffin products: properties, technologies, applications. Translated by Jakab, E. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier. p. 121. ISBN 978-0-444-99712-8
- [21] Sharma et al. - Renewable and Sustainable Energy Reviews 2009
- [22] F. D’Annibale, G. Zummo, C. Menale, F. Sfrattoni – “Test sperimentali di nuovi materiali a cambiamento di fase in grado di assicurare performance più elevate in termini velocità di risposta del PCM alla variazione di temperatura del fluido primario” - Report RdS/PAR2013/156 [ENEA
]
- [23] Paolo Silvestroni, Fondamenti di chimica, 10^a ed., CEA, 1996, pp. 271-277, ISBN 88-408-0998-8.
- [24] A. Andreozzi, F. Ascione, N. Bianco, M. Caliano, M. Iasiello - Studio e individuazione di soluzioni tecniche per il miglioramento della trasmissione del calore in sistemi di accumulo termico basati sui materiali a cambiamento di fase (PCM) nell’ambito dell’accumulo del freddo - Report RdS/PAR2015/152 [ENEA]
- [25] H. Kakiuchi, M. Yamazaki, M. Yabe, S. Chihara, T. Terunuma, Y..Sakata, T.Usami, A study of erythritol as phase change material, IEA Annex 10, Proceedings of the Second PCMs and Chemical Reactions for Thermal EnergyStorage Workshop, Chemical Engineering and Technology, Royal Institute of Technology, Sofia, 1998.
- [26] E.P. Ona, X. Zhang, K. Kyaw, F. Watanabe, H. Matsuda, H. Kakiuchi, M. Yabe, S. Chihara - Relaxation of supercooling of erythritol for latent heat storage - Journal of Chemical Engineering of Japan 34 (2001) 376–382.
- [27] Ari Seppälä, Arttu Meriläinen, Lisa Wikström, Pertti Kauranen - The effect of additives on the speed of the crystallization front of xylitol with various degrees of supercooling - Experimental thermal and fluid science, 523-527

[28] - G. Coccia, G. Di Nicola, S. Tomassetti, G. Gabrielli, M. Chieruzzi, M. Pierantozzi – “Experimental characterization of a solar cooker with thermal energy storage based on solar salt”

[29] Klemens Schwarzer, Maria Eugenia Vieira da Silva “Solar cooking system with or without heat storage for families and institutions ” - Solar Energy 75 (2003) 35 – 41

[30] Analisi dei risultati delle prove sperimentali di un prototipo di forno solare a scatola con specchi riflettenti multipli, Andrea Pio Concettini, 2016/2017

[31] Progettazione e realizzazione di un prototipo di forno solare a scatola con specchi riflettenti multipli, Alessandro del Re, 2016/2017

[32] Scheda tecnica, SOLKOTE HI/SORB-II, Selective solar Coating.

[33] A. A. El-Sebaii, A. Ibrahim - Experimental testing of a box-type solar cooker using the standard procedure of cooking power - “Renewable Energy” A. (2005); 30: 1861-1871.

[34] www.be-next.it/fotovoltaico/perche-il-fotovoltaico-residenziale-conviene-nel-2019

[35] <https://www.italiapuntosolare.it/solare-termico/>

RINGRAZIAMENTI

Il mio primo ringraziamento va al Professor Giovanni Di Nicola, per avermi permesso di partecipare a questo interessante lavoro che tratta di tematiche attuali nel campo delle energie rinnovabili, ed avermi permesso quindi di approfondire degli argomenti per me nuovi. Ringrazio l'Ing. Gianluca Coccia per la sua gentilezza, professionalità, disponibilità e per il suo continuo aiuto durante tutto questo percorso. Ringrazio Gabriele Gabrielli, che fin dall'inizio è stata la nostra guida per la costruzione del forno.