



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Edile
DIISM – Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche

**TEST SPERIMENTALI SU FORNO SOLARE AD ACCUMULO
TERMICO CON MATERIALE A CAMBIAMENTO DI FASE A
BASE DI XILITOLO E MANNITOL**

Experimental tests on thermal storage based solar cooker with phase change material
based on xylitol and mannitol

Relatore:

Prof. Giovanni Di Nicola

Correlatore:

Ing. Gianluca Coccia, PhD

Laureanda:

Letizia Savoretti

Anno Accademico 2019/2020

INDICE

INTRODUZIONE	pag. 1
1. STATO DELL'ARTE	
1.1 Premessa	“ 2
1.2 Risparmio energetico	“ 2
1.3 Energie rinnovabili	“ 3
1.4 Energia solare	“ 4
1.5 Storia della cottura solare	“ 6
1.6 Forno solare	“ 7
1.7 Tipologie di forni solari	“ 7
1.7.1 Forni solari a pannelli	“ 8
1.7.2 Forni solari a scatola	“ 8
1.7.3 Forni solari parabolici	“ 9
1.8 Forni solari con accumulo termico	“ 10
2. FORNO SOLARE IN ESAME	
2.1 Premessa	“ 11
2.2 Fasi di lavorazione	“ 12
2.2.1 Realizzazione della camera di cottura e verniciatura	“ 12
2.2.2 Realizzazione della scatola esterna	“ 14
2.2.3 Isolamento con lana di vetro	“ 16
2.2.4 Sistema di concentrazione dei raggi solari	“ 18
2.3 Principali modifiche	“ 19
2.3.1 Vernice	“ 19
2.3.2 Vetro e ISO 9050_2003	“ 20
2.3.3 Alluminio	“ 23
2.4 Analisi funzionale	“ 24

3. MATERIALI A CAMBIAMENTO DI FASE

3.1 Premessa	pag. 25
3.2 Caratteristiche	“ 27
3.3 Classificazione	“ 28
3.3.1 Classificazione in base al tipo di materiale	“ 28
3.3.1.1 PCM organici	“ 28
3.3.1.2 PCM inorganici	“ 29
3.3.1.3 PCM eutettici	“ 30
3.3.2 Classificazione in base alla temperatura di fusione	“ 30
3.4 Mezzi per l'incremento delle prestazioni	“ 31
3.5 PCM utilizzati	“ 31
3.5.1 Xilitolo	“ 31
3.5.2 Mannitolo	“ 32
3.6 Formazione miscela	“ 33
3.7 Pentola con doppio fondo	“ 35
3.8 Fasi di realizzazione della pentola	“ 35
3.9 Olio silconico	“ 38

4. PROCEDURE SPERIMENTALI E BANCO DI PROVA

4.1 Premessa	“ 40
4.2 Procedure di calcolo standard internazionali	“ 40
4.2.1 Procedura proposta da Khalifa ed al.	“ 40
4.2.2 Procedura proposta da Mullick	“ 41
4.3 Elementi del banco di prova	“ 42
4.3.1 Preparazione del banco di prova	“ 42
4.3.2 Termocoppie	“ 43
4.3.2.1 Principio di funzionamento	“ 43
4.3.2.2 Affidabilità delle termocoppie	“ 44
4.3.2.3 Termocoppie utilizzate: tipo K e tipo T	“ 45
4.3.3 Pireliometro	“ 45
4.3.3.1 Struttura del pireliometro	“ 46
4.3.3.2 Installazione e manutenzione	“ 46
4.3.4 Computer e acquisitore	“ 47

5. RISULTATI DEI TEST SPERIMENTALI

5.1 Premessa	pag. 48
5.2 Prove con accumulo termico con PCM xilitolo e mannitolo	“ 48
5.3 Confronto dati	“ 60
5.3.1 Fase di riscaldamento	“ 60
5.3.2 Fase di raffreddamento	“ 61
6. CONCLUSIONI	“ 62
BIBLIOGRAFIA	“ 63

INDICE DELLE FIGURE

Fig. 1.1 – Emissioni di CO ₂ nell’atmosfera	pag. 2
Fig. 1.2 – Produzione primaria di energia da fonti rinnovabili EU-28 1990-2017	“ 4
Fig. 1.3 – Alcune fonti rinnovabili	“ 4
Fig. 1.4 – Studi effettuati sui forni solari negli anni	“ 6
Fig. 1.5 – Tipi di forni solari: forno solare a pennelli (a); forno solare parabolico (b); forno solare a scatola (c)	“ 7
Fig. 1.6 – Forno solare a pannelli	“ 8
Fig. 1.7 – Forno solare a scatola	“ 9
Fig. 1.8 – Forno solare parabolico	“ 9
Fig. 1.9 – Forno solare parabolico con sistema integrato a pannelli fotovoltaici	“ 10
Fig. 1.10 – Pentola con PCM nell’intercapedine	“ 10
Fig. 2.1 – Forno solare a scatola portatile realizzato presso il DIISM	“ 11
Fig. 2.2 – Dimensioni del forno a scatola portatile	“ 12
Fig. 2.3 – Pezzo “N”	“ 12
Fig. 2.4 – Pezzo “M”	“ 13
Fig. 2.5 – Camera di cottura	“ 13
Fig. 2.6 – Pezzo “P” piegato e zavorrato	“ 14
Fig. 2.7 – Verniciatura camera di cottura e piano inclinabile	“ 14
Fig. 2.8 – Pezzi che formano il corpo esterno	“ 15
Fig. 2.9 – Posizione dei listelli di rinforzo	“ 15
Fig. 2.10 – Involucro esterno	“ 16
Fig. 2.11 – Scatola esterna con basamento	“ 16
Fig. 2.12 – Inserimento camera di cottura nell’involucro esterno	“ 16
Fig. 2.13 – Distanziatori e isolamento della camera interna	“ 17
Fig. 2.14 – Riempimento fessure con materiale isolante	“ 17
Fig. 2.15 – Scatola forno verniciata	“ 17
Fig. 2.16 – Disegni pannelli riflettenti (specchi)	“ 18
Fig. 2.17 – Pannelli riflettenti	“ 18
Fig. 2.18 – Specchi montati	“ 18
Fig. 2.19 – Forno solare ultimato	“ 19
Fig. 2.20 – Diagramma emissività	“ 20
Fig. 2.21 – Diagramma assorbimento	“ 20

Fig. 2.22 – Struttura fogli di alluminio	pag. 23
Fig. 2.23 – Riflettanza totale dell'alluminio	“ 23
Fig. 3.1 – Differenze di energia accumulata tra calore sensibile e calore latente	“ 26
Fig. 3.2 – Ciclo di funzionamento di un PCM	“ 26
Fig. 3.3 – Classificazione dei PCM in base al materiale	“ 28
Fig. 3.4 – Confezione di xilitolo	“ 32
Fig. 3.5 – Confezione di mannitolo	“ 32
Fig. 3.6 – Xilitolo	“ 33
Fig. 3.7 – Mannitolo	“ 33
Fig. 3.8 – Granulometria xilitolo	“ 34
Fig. 3.9 – Riduzione in polvere dello xilitolo	“ 34
Fig. 3.10 – Assemblaggio delle pentole	“ 36
Fig. 3.11 – Sistema per fissaggio delle due pentole e posizionamento della termocoppia	“ 36
Fig. 3.12 – Tubo in acciaio inox saldato al dado	“ 37
Fig. 3.13 – Pentola con doppio fondo verniciata	“ 37
Fig. 3.14 – Pentola con doppio fondo terminata	“ 37
Fig. 3.15 – Sezione pentola con doppio fondo	“ 38
Fig. 3.16 – Prospetto dall'alto della pentola con doppio fondo	“ 38
Fig. 3.17 – Variazione di calore specifico in funzione della temperatura	“ 39
Fig. 3.18 – Variazione della conducibilità termica in funzione della temperatura	“ 39
Fig. 4.1 – Esempio di allestimento di banco di prova	“ 42
Fig. 4.2 – Preparazione del banco di prova	“ 43
Fig. 4.3 – Termocoppie collegate ad un acquisitore	“ 44
Fig. 4.4 – Termocoppia di tipo K a sinistra e di tipo T a destra	“ 45
Fig. 4.5 – Pireliometro	“ 46
Fig. 4.6 – Esempio della schermata del programma di acquisizione, PicoLog, durante il test sperimentale	“ 47
Fig. 5.1 – Forno solare durante la prova a carico	“ 48
Fig. 5.2 – Grafico delle rilevazioni (prova 12/09/2019)	“ 50
Fig. 5.3 – Grafico delle rilevazioni (prova 13/09/2019)	“ 53
Fig. 5.4 – Grafico delle rilevazioni (prova 16/09/2019)	“ 55
Fig. 5.5 – Grafico delle rilevazioni (prova 17/09/2019)	“ 57
Fig. 5.6 – Grafico delle rilevazioni (prova 30/09/2019)	“ 59

INDICE DELLE TABELLE

Tab. 2.1 – Caratteristiche energetiche del vetro	pag. 20
Tab. 2.2 – Distribuzione spettrale della radiazione solare globale	“ 22
Tab. 2.3 – Analisi funzionale del forno	“ 24
Tab. 3.1 – Vantaggi/svantaggi dei vari PCM	“ 30
Tab. 3.2 – Intervalli di temperatura e applicazioni per PCM	“ 31
Tab. 3.3 – Misure principali delle due pentole	“ 35
Tab. 5.1 – Dati rilevati e riportati in Excel (prova 12/09/2019)	“ 50
Tab. 5.2 – Elaborazione dati (prova 12/09/2019)	“ 51
Tab. 5.3 – Dati rilevati e riportati in Excel (prova 13/09/2019)	“ 52
Tab. 5.4 – Elaborazione dati (prova 13/09/2019)	“ 53
Tab. 5.5 – Dati rilevati e riportati in Excel (prova 16/09/2019)	“ 54
Tab. 5.6 – Elaborazione dati (prova 16/09/2019)	“ 55
Tab. 5.7 – Dati rilevati e riportati in Excel (prova 17/09/2019)	“ 56
Tab. 5.8 – Elaborazione dati (prova 17/09/2019)	“ 57
Tab. 5.9 – Dati rilevati e riportati in Excel (prova 30/09/2019)	“ 58
Tab. 5.10 – Elaborazione dati (prova 30/09/2019)	“ 59
Tab. 5.11 – Riassunto della fase di riscaldamento	“ 60
Tab. 5.12 – Riassunto della fase di raffreddamento	“ 61

NOMENCLATURA

Lettere latine:

- Aa** - Area di apertura del forno (m²)
- 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** o **NIP** - Radiazione solare (W/m²)
- DNI,av** - Radiazione solare media (W/m²)
- DNI,ref** - Radiazione solare media di riferimento (W/m²)
- F1** - Figura di merito
- F2** - Figura di merito
- g** - Fattore solare (%)
- m** - Massa della sostanza (kg)
- mf** - Massa specifica del fluido (g/cm³)
- SC** - Coefficiente di shading
- T** - Temperatura (°C)
- To** - Temperatura iniziale (°C)
- T1** - Temperatura iniziale del fluido (°C)
- T2** - Temperatura finale del fluido (°C)
- Ta** - Temperatura dell'assorbitore (°C)
- Tamb** - Temperatura ambiente (°C)
- Tamb,av** - Temperatura ambiente media (°C)
- tch** - Tempo di ebollizione caratteristico (s)
- Tf** - Temperature dei fluidi (°C)
- Tfin** - Temperatura finale della sostanza (°C)
- Tg** - Temperatura del vetro (°C)
- Tiniz** - Temperatura iniziale della sostanza (°C)
- Tm** - Temperatura di fusione del materiale (°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 X

η_{av} - Efficienza termica complessiva

λ - Conducibilità termica (kcal/h·m·°C)

λ_0 - 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)

ν - 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

INTRODUZIONE

Il lavoro svolto e raccolto in questa tesi, riguarda l'analisi tramite test sperimentali svolti con un forno solare che utilizza materiali a cambiamento di fase per l'accumulo di energia termica. I test eseguiti hanno l'obiettivo di individuare l'efficienza di questo prototipo e quella del PCM utilizzato durante le prove.

Nel primo capitolo, vengono introdotti i concetti riguardanti il risparmio energetico e l'uso di energie rinnovabili sempre più richieste, a causa dell'aumento dell'inquinamento. Sono inoltre elencate le principali fonti esistenti, approfondendo in particolar modo l'energia solare con le sue applicazioni termiche. Viene anche spiegato il forno solare e la sua classificazione in base al tipo e alle caratteristiche.

Nel secondo capitolo, viene illustrato il forno da noi utilizzato per l'esperimento realizzato presso il Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche "DIISM" dell'Università Politecnica delle Marche. Sono spiegati i materiali adottati e le loro proprietà, esponendo il principio di funzionamento del forno e le caratteristiche geometriche.

Nel terzo capitolo si presentano i materiali a cambiamento di fase, chiamati PCM (Phase Change Materials), impiegati per l'elaborazione delle prove, illustrando le relative proprietà e le varie tipologie. Si pone l'accento sulla creazione della miscela composta dal 50% xilitolo e 50% mannitolo, essendo quella utilizzata nei test.

Si illustra anche la realizzazione della doppia pentola, dove all'interno è posizionato il PCM.

Nel quarto capitolo, sono spiegate le varie procedure sperimentali, dalle formule per il calcolo delle proprietà all'allestimento del banco di prova, descrivendo anche tutti gli strumenti utilizzati.

Nel quinto capitolo sono illustrati i risultati dei test sperimentali con la relativa spiegazione. Inoltre, vengono descritte le prove svolte a carico e quelle con accumulo termico. Si confrontano infine i risultati dei diversi test.

Nel sesto capitolo sono riportate le conclusioni sul lavoro sperimentale svolto, le problematiche riscontrate e le proposte per futuri sviluppi.

CAPITOLO 1

STATO DELL'ARTE

1.1 Premessa

L'energia, in termodinamica, è una grandezza che spesso viene intesa come la capacità di un sistema di compiere un determinato lavoro ed è legata ai concetti di forza e lavoro.

La vita dell'uomo è direttamente influenzata da essa, per cui, nel tempo, ha dovuto effettuare studi e ricerche per predisporre "sistemi energetici" adeguati a garantire il suo continuo utilizzo.

1.2 Risparmio energetico

Negli ultimi quarant'anni, il consumo mondiale di energia, è molto aumentato, mettendone a rischio il suo utilizzo in futuro, data la sua limitatezza.

Le risorse energetiche maggiormente utilizzate finora sono di origine fossile (petrolio, gas e carbone), che, oltre ad essere limitate, sono la principale causa dell'inquinamento globale.

Il carbone è stato la causa della rivoluzione industriale nei secoli XVIII, XIX e in parte del XX ed è una delle fonti più inquinanti, dalla sua estrazione, fino alla sua combustione poiché emette CO₂, anidride solforosa e metalli pesanti [1]. Solo nel XX secolo, con la diffusione dei mezzi di trasporto via terra, marittimi e aerei, il principale combustibile utilizzato diventa il petrolio. L'ampio utilizzo di queste risorse energetiche, dette non rinnovabili, è stata la principale causa del surriscaldamento globale, dovuto alla smodata quantità di CO₂ emessa nell'atmosfera, come in Fig. 1.1.

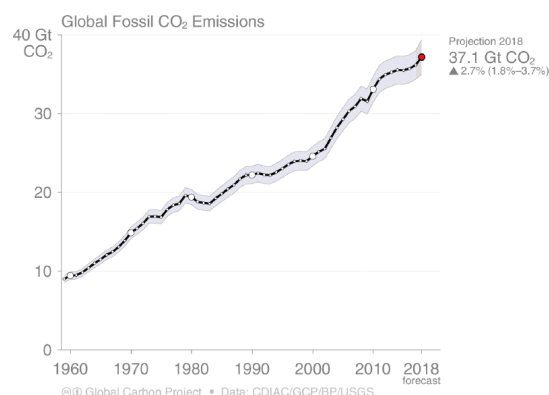


Fig. 1.1 – Emissioni di CO₂ nell'atmosfera [2]

L'anidride carbonica rimane nell'atmosfera per anni insieme ad altri gas serra, principalmente metano e ossido di azoto, provocando effetti negativi come le piogge acide che inquinano i corsi d'acqua e gli oceani, danneggiando tutti gli esseri viventi, incluso l'uomo. È necessario, quindi, ricercare nuove energie di natura rinnovabile a minor impatto ambientale, affinché il pianeta possa essere salvaguardato. Esse sono prodotte da fonti naturali come il Sole, il vento, il moto ondoso e le maree, la forza dell'acqua e il calore della terra, da cui prendono il nome l'energia solare, l'energia eolica, l'energia idroelettrica e l'energia geotermica.

Queste, diversamente dai combustibili fossili, non emettono sostanze inquinanti e nel tempo riusciranno a garantire più stabilità di fornitura, oltre che un grande risparmio economico.

1.3 Energie rinnovabili

La necessità di studiare energie rinnovabili nasce dell'esaurimento delle fonti tradizionali prodotte dalla Terra come petrolio, carbone e gas; esse vengono prodotte in milioni di anni ma consumate molto rapidamente. Inoltre, questi fossili sono fortemente inquinanti e costose.

Le nuove energie hanno vari vantaggi, come ad esempio il risparmio economico e i tempi brevi di creazione. Inizialmente si aveva la tendenza a non investire in queste nuove fonti e la produzione nel 2007, nell'UE-28 era pari a 226,5 milioni di tonnellate equivalenti di petrolio (tep). Nel 2017, l'aumento è stato del 64,0%, ovvero del 5,1% all'anno [3]. In questo anno la principale fonte, con il 42,0% della produzione di energia primaria da fonti rinnovabili, era rappresentata dal legno e altri biocombustibili, al secondo posto con il 13,8% l'energia eolica e al terzo posto con l'11,4% l'energia idroelettrica. Il biogas, i biocombustibili liquidi e l'energia solare hanno avuto un minor impiego, con circa il 7,4%, 6,7% e 6,4% del totale dell'energia rinnovabile prodotta, mentre il calore ambientale (catturato dalle pompe di calore) e l'energia geotermica, hanno rappresentato solo il 5,0% e il 3,0% del totale. Le energie mareomotrice, oceanica e delle onde sono prodotte in quantitativi minori e soprattutto in Francia e nel Regno Unito [3].

Nella figura sottostante è rappresentata la produzione primaria di energia da fonti rinnovabili.

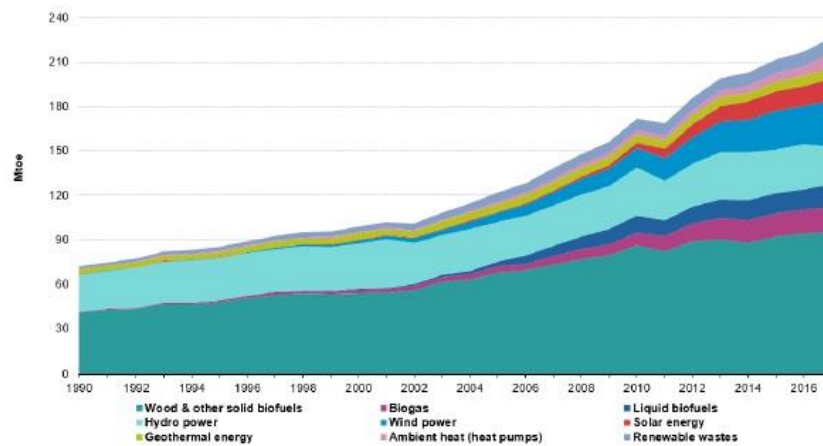


Fig. 1.2 – Produzione primaria di energia da fonti rinnovabili EU-28 1990-2017 [3]

L'UE vuole raggiungere una quota di energia prodotta da fonti rinnovabili, entro il 2020, pari al 20% del suo consumo finale lordo. Questo obiettivo è stato ripartito tra gli Stati membri dell'UE che dovranno seguire delle linee guida stabilite nella direttiva 2009/28/CE sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili [3].



Fig. 1.3 - Alcune fonti rinnovabili [4]

1.4 Energia solare

Parlando di energia solare si intende la produzione di energia termica ed elettrica ottenuta sfruttando i raggi solari. Un problema che ostacola il suo sviluppo è la differenza tra l'energia prodotta e quella richiesta, poiché dipende dalle condizioni atmosferiche. Per questo motivo sono molte le ricerche sulle strumentazioni per lo stoccaggio di energia, che hanno lo scopo di immagazzinarla quando si ha un eccesso di produzione energetica per poi utilizzarla quando è minore. Dall'energia solare derivano quasi tutte le altre fonti rinnovabili, come, l'energia eolica, l'energia dei combustibili fossili, l'energia del moto ondoso, l'energia idroelettrica e l'energia da biomassa. Il Sole irraggia il

nostro pianeta per una potenza di circa 180 mila miliardi di kilowatt; una parte viene riflessa dall'atmosfera, mentre l'altra arriva con un'energia pari a 1353 W/m^2 [5]. Esistono vari modi in cui l'energia del Sole può essere convertita: fotovoltaico, termico e termodinamico.

Le applicazioni di questo tipo di energia sono svariate e possono essere acquisite direttamente dalla radiazione solare o attraverso cicli termodinamici, per ottenere potenza frigorifera o elettrica. Le applicazioni dirette, da un punto di vista prettamente economico, sono più vantaggiose.

Alcune sono:

- riscaldamento dell'acqua è una delle applicazioni più economiche, infatti nelle parti del mondo, dove il Sole è abbondante, ha quasi sostituito totalmente le altre tecnologie. I sistemi possono essere catalogati in sistemi a circolazione naturale (o passivo) e a circolazione forzata (o attivo). Gli ultimi sono i più utilizzati in campo domestico per la produzione di acqua calda sanitaria;
- riscaldamento degli ambienti: i sistemi possono essere divisi in attivi e passivi. I primi utilizzano pompe o ventilatori per permettere la circolazione dell'HTF (Heat Transfer Fluid) nella zona da riscaldare, con i secondi, però, l'energia termica scorre negli spazi per convezione naturale senza la necessità, quindi, di dispositivi meccanici. Questi metodi, tuttavia, non sono molto utilizzati dato che non forniscono lo stesso comfort dei sistemi attivi. Nelle nuove costruzioni si sta iniziando ad utilizzare sistemi ibridi;
- raffreddamento e refrigerazione degli ambienti: può essere utilizzata sia per garantire il comfort ambientale negli edifici, sia la conservazione degli alimenti. Il ciclo frigorifero si basa sull'assorbimento di calore preso direttamente dal Sole;
- fornitura di calore per processi industriali: viene utilizzata nelle industrie dove la temperatura è medio-alta ($80\text{-}240 \text{ }^\circ\text{C}$) si utilizza una maggiore quantità di calore. La richiesta di calore industriale nell'UE è il 15% della produzione lorda di energia ed è circa 300 TWh/anno [6]. L'industria alimentare e quella di produzione dei prodotti minerali non metalliferi sono le maggiori usufruenti;
- generazione di potenza: i cicli che trasformano l'energia termica del Sole in elettrica sono classificati come: a bassa temperatura ($<100 \text{ }^\circ\text{C}$), a temperatura media ($<400 \text{ }^\circ\text{C}$) e ad alta temperatura ($>400 \text{ }^\circ\text{C}$). Grazie a questi impianti è stato riconosciuto che questa fonte può avere un reale impatto sulla produzione globale di energia elettrica [7];
- distillazione: può essere un metodo efficace per fornire acqua potabile ai paesi in cui la sua presenza scarseggia, rispetto alla presenza di acqua salmastra. Alcuni impianti che sfruttano la distillazione solare sono già operativi in molte parti dell'Africa e dell'India occidentale[7];

- essiccazione: era già utilizzata nei tempi antichi per conservare gli alimenti poiché aiuta a rimuovere l'umidità. Il processo è lento ed essendo eseguito all'aperto, c'è la possibilità di contaminazione dell'alimento, da parte di insetti e polvere. Gli essiccatori servono ad eliminare questi svantaggi [7];
- cottura: è un'opportunità importante per i paesi in via di sviluppo. Grazie all'utilizzo di forni solari è possibile cuocere varie pietanze utilizzando unicamente il Sole.

1.5 Storia della cottura solare

I primi tentativi di utilizzare forni solari risalgono al XVIII secolo. Vari esponenti hanno approcciato al suo utilizzo, come il fisico tedesco Tschim Hausen e il fisico franco-svizzero Horace de Saussure che ha provato a cucinare delle pietanze costruendo una serra con 5 strati di scatole di vetro rovesciate su un tavolo nero. In oltre, l'astronomo inglese Sir John Herschel che ha sperimentato la cottura di alimenti in una scatola isolata, fino ad arrivare al 1860 in cui il matematico francese Augustin Mouchot ha pensato di intrappolare il calore attraverso uno specchio, creando così un forno solare efficiente. Nel 1876, W. Adams, grazie allo sviluppo di un forno ottagonale provvisto di 8 specchi, ha permesso la cottura di cibo per 7 soldati in 2 ore di tempo. Mouchot, un anno dopo, ha costruito dei forni solari per i soldati francesi ed ha scritto il primo libro sull'energia solare. Nel 1891, è stato fabbricato il primo scaldabagno solare, grazie a Clarence Kemp e nel 1894 Sichuan, nel suo Xiao Anatra Shop in Cina, ha arrostito delle anatre con questo metodo.

In India nel frattempo, veniva utilizzata come alternativa per la deforestazione.

Il primo forno solare a scatole è stato costruito nel 1945, dall'indiano Sri MK Ghosh.

Nel 1970, a causa dell'aumento dei prezzi del carburante, conseguenti alla crisi petrolifera, si è iniziato a pensare alle fonti rinnovabili in maniera più concreta. Negli Stati Uniti, Barbara Kerr, costruì vari tipi di forno solare a scatola.

A conferma di quanto detto, nella Fig. 1.4 possiamo vedere i vari studi effettuati negli anni.

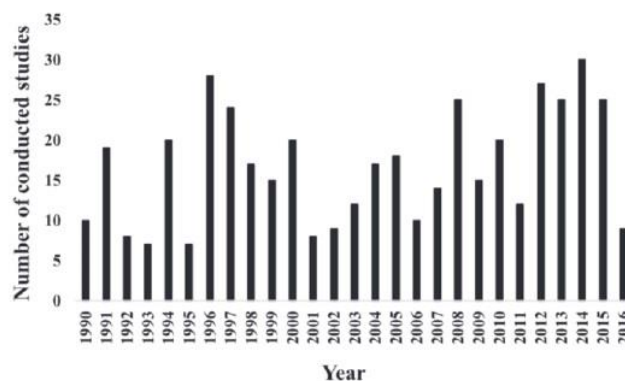


Fig. 1.4 – Studi effettuati sui forni solari negli anni [8]

I vantaggi della cottura tramite i forni solari sono svariati, tra i quali c'è il non danneggiamento dell'ambiente, il basso costo, un alto valore nutrizionale ecc., l'unico svantaggio è l'impossibilità del suo utilizzo in tarda serata o in assenza di radiazione solare. Negli ultimi anni, per questo motivo, si è studiato come ovviare il problema e la risposta è stata l'utilizzo di un'unità di accumulo di calore capace di immagazzinare l'energia durante il giorno e renderla disponibile in assenza di radiazione. I materiali per l'accumulo termico sono chiamati PCM (Phase Change Materials), cioè materiali che grazie al cambiamento di fase cedono il calore latente.

1.6 Forno solare

Il forno solare è un dispositivo capace di accumulare l'energia del Sole, raccogliendola in uno spazio mirato fino al raggiungimento di temperature che permettono la cottura degli alimenti, quindi tramite la conversione di energia della radiazione solare in radiazione termica.

È importante la posizione del forno per ottenere il massimo rendimento; esso dovrà essere mosso durante le ore del giorno per compensare la rotazione terrestre ponendo attenzione che l'orientamento azimutale e zenitale siano corretti rispetto alla posizione del Sole; è importante per permettere al forno di raggiungere temperature elevate nel minor tempo possibile. Il corretto utilizzo del forno avviene grazie alla presenza di parti riflettenti che convogliano i raggi solari nel punto focale, dove saranno assorbiti dalla superficie nera della pentola causando l'innalzamento della temperatura.

I processi in cui si utilizza maggiormente sono la pastorizzazione dei cibi e la sterilizzazione dell'acqua.

1.7 Tipologie di forni solari

Esistono varie tipologie di forni solari in continuo sviluppo e miglioramento. Si possono comunque dividere in tre categorie principali mostrate in Fig. 1.5:

- forni solari a pannelli
- forni solari a scatola
- forni solari parabolici

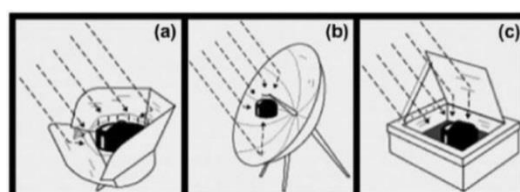


Fig. 1.5 – Tipi di forni solari: forno solare a pannelli (a); forno solare parabolico (b); forno solare a scatola (c) [8]

1.7.1 Forni solari a pannelli

Questi tipi di forni sono i più utilizzati grazie alla loro facilità di costruzione e al basso costo dei materiali. La luce solare viene concentrata dall'alto. Uno svantaggio di questo modello è che la temperatura di cottura viene influenzata dalla radiazione riflessa non efficace quindi in condizioni nuvolose. Il vantaggio, invece, sono la leggerezza, quindi, la facilità di trasporto. Questi forni utilizzano apparecchiature riflettenti che riescono a convogliare l'energia diretta del Sole in un recipiente di cottura.

Quello mostrato in Fig. 1.6 è stato realizzato dal Dr. Roger Bernard [8] ed è uno dei progetti maggiormente diffusi in questa categoria; è stato realizzato con cartone e pellicola riuscendo così a conservare i cibi senza bruciarli.

Lo sviluppo di questi modelli è continuato negli anni, difatti i ricercatori Kerr e Scott [8] hanno realizzato un apparato di energia solare per la sterilizzazione.



Fig. 1.6 – Forno solare a pannelli [9]

1.7.2 Forni solari a scatola

Il forno solare a scatola è stata la prima tipologia ad essere inventata, infatti è formato da una sola scatola isolata, nella quale avviene la preparazione di cibi, chiusa superiormente da una lastra di vetro e da delle superfici riflettenti che concentrano l'energia solare verso la camera di cottura. L'interno della camera è rivestito da vernice nera con caratteristiche adeguate a garantire l'assorbimento delle radiazioni per assicurare una temperatura maggiore e costante nel tempo. Due vantaggi di questo modello sono: la bassa velocità nel raggiungere temperature elevate e la capacità di acquisire radiazioni solari diffuse, quando le condizioni metereologiche sono avverse come ad esempio, in presenza di vento, nuvolosità intermittente e bassa temperatura ambientale.

L'efficienza del forno, negli anni, è stata migliorata grazie all'utilizzo di specchi in alluminio che aumentano le radiazioni solari incidenti nell'assorbitore. Per garantire una maggiore funzionalità degli specchi è fondamentale studiare la loro angolazione. In Fig. 1.7 è mostrato un esempio di forno solare a scatola.



Fig. 1.7 – Forno solare a scatola [9]

1.7.3 Forni solari parabolici

Il primo a realizzare questo tipo di forno è stato Ghai [8] nel 1950 presso il National Physical Laboratory, in India. Gli studi continuarono con Lof e Fester, al fine di rendere questo le geometrie e le conformazioni migliori. A differenza degli altri due modelli, non ha bisogno di un particolare recipiente per cuocere il cibo, ma può facilmente bruciarlo se lasciato incustodito a causa del calore concentrato che raggiunge in poco tempo.

Il forno consiste in un riflettore parabolico con una pentola di cottura che si trova sul punto focale del forno stesso e di un supporto per sostenere il sistema di cottura, come in Fig. 1.8.



Fig. 1.8 – Forno solare parabolico [9]

1.8 Forni solari con accumulo termico

L'elemento comune dei vari forni è la dipendenza dalla presenza di una radiazione solare, sufficiente alla cottura. Per incrementare, quindi, il suo utilizzo anche durante le ore notturne o in assenza di radiazione, è possibile impiegare sistemi di accumulo che possono essere esterni, come i collettori che rilasciano energia o interni al forno. Nel primo caso, è possibile definirli un'integrazione termica che ci permette di somministrare più calore al forno standard per incrementare la temperatura in caso di limitata radiazione. Sono stati creati vari prototipi: alcuni con delle resistenze elettriche inserite nella piastra assorbente del forno, le quali ricevono energia da un sistema integrato di pannelli fotovoltaici, come in Fig. 1.9.



Fig. 1.9 – Forno solare parabolico con sistema integrato a pannelli fotovoltaici [10]

Il secondo caso è quello inerente al nostro caso di studio. Nel forno è posta una pentola formata da due cilindri concentrici e all'interno dell'intercapedine è inserito il materiale a cambiamento di fase, PCM (Phase Change Materials) (Fig. 1.10). Essendo nello spazio tra le due pentole, il materiale acquista calore derivante dal Sole, si scalda passando così dallo stato solido a quello liquido, in un intervallo di tempo che varia in base alla sua composizione. Il calore immagazzinato per il passaggio di stato viene ceduto alla pentola sotto forma di calore latente durante il passaggio inverso, quando la radiazione solare non è presente: è possibile, quindi, cuocere un alimento anche due ore dopo il tramonto.

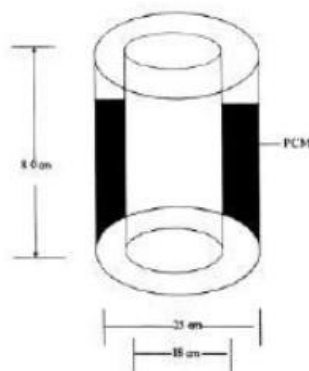


Fig. 1.10 – Pentola con PCM nell'intercapedine [11]

CAPITOLO 2

FORNO SOLARE IN ESAME

2.1 Premessa

Il forno solare, da noi utilizzato, è un prototipo di forno solare a scatola portatile, come in Fig. 2.1, costruito all'interno del "DIISM" (Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche) presso l'Università Politecnica delle Marche.



Fig. 2.1 – Forno solare a scatola portatile realizzato presso il DIISM

Il progetto è stato ideato dall'Ing. Gianni Crovatto [12] ed effettuato dai colleghi Andrea Pio Concettini [13] e Alessandro Del Re [9] nell'anno accademico 2016/2017.

Il forno ha una massa di circa 20 kg e un'altezza massima di 753 mm. Per incrementare le sue prestazioni, sono stati studiati e utilizzati materiali più idonei al fine: la vernice, con la quale è stato dipinto l'assorbitore, l'alluminio, utilizzato per la realizzazione degli specchi di riflessione ed il vetro, attraverso il quale passano i raggi solari.

Il forno è costituito da un contenitore interno che funge da camera di cottura con un coperchio vetrato, posto superiormente allo scopo di far entrare all'interno dell'assorbitore i raggi solari.

Nella Fig. 2.2 sono mostrati i dettagli costruttivi.

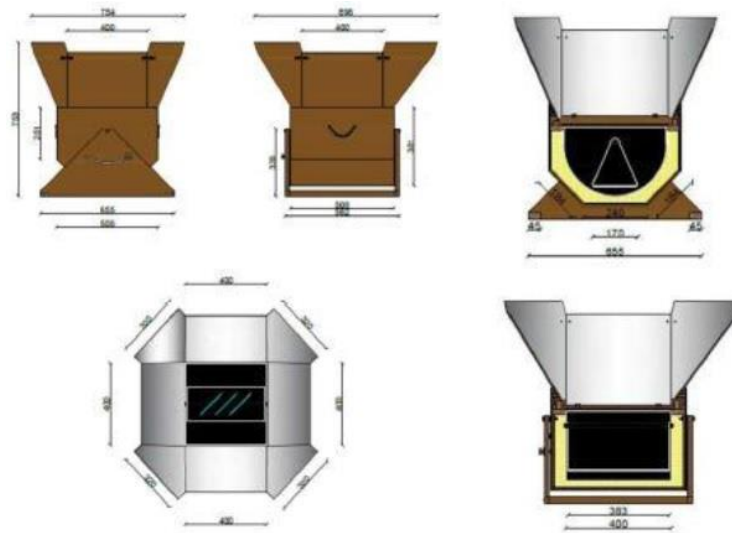


Fig. 2.2 – Dimensioni del forno a scatola portatile

2.2 Fasi di lavorazione

La costruzione del modello prevede quattro fasi:

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

2.2.1 Realizzazione della camera di cottura e verniciatura

La prima fase riguarda la camera di cottura, ovvero la parte centrale e più interna del forno solare nel quale verrà cotto il cibo. I vari pezzi sono stati rivestiti da una lamiera di acciaio inox tagliata e piegata; essi saranno poi uniti per formare l'insieme tramite viti e rivetti, come in Fig. 2.3 e 2.4.

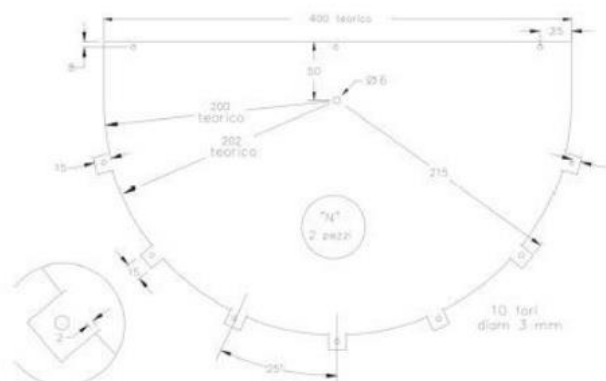


Fig. 2.3 – Pezzo "N"

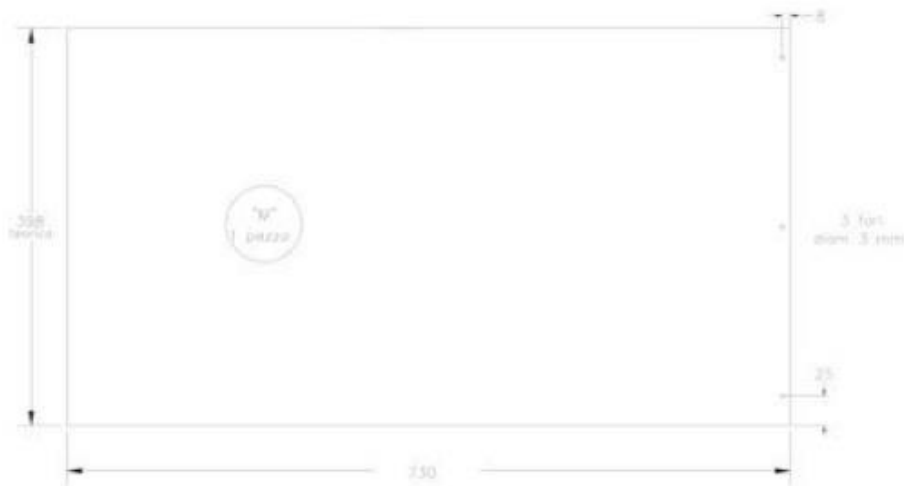


Fig. 2.4 – Pezzo “M”

Un passaggio fondamentale è la sigillatura delle giunture con un sigillante ad alta temperatura ed atossico, normalmente utilizzato nei forni per alimenti, Fig. 2.5.

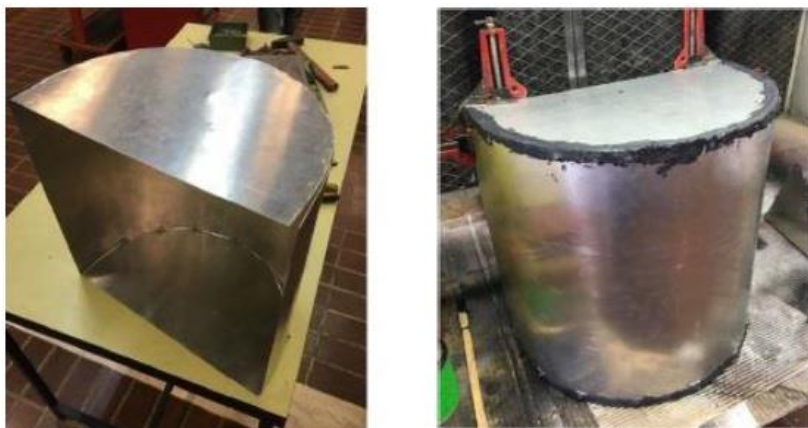


Fig. 2.5 – Camera di cottura

All'interno della camera di cottura viene inserito un piano inclinabile, rivestito di acciaio inox, utilizzato per il supporto delle teglie. Esso è indispensabile affinché le teglie, nonostante la rotazione del forno, restino in posizione parallela al terreno. In Fig. 2.6 è mostrata la piegatura del pezzo “P”, con un'inclinazione di 90° lungo i lati più lunghi, la presenza di due fori e due perni, che consentano l'oscillazione una volta installato all'interno della camera di cottura.

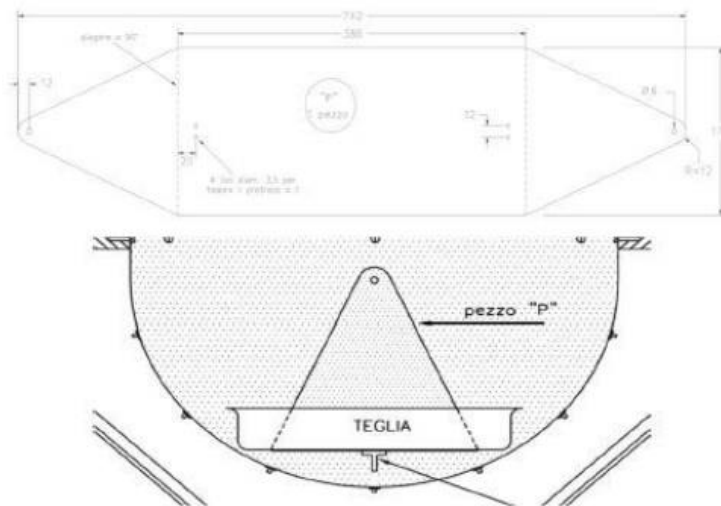


Fig. 2.6 – Pezzo “P” piegato e zavorrato

Terminato l’assemblaggio si passa alla verniciatura di nero con una vernice selettiva avente un doppio scopo: assorbire il calore dei raggi solari e proteggere le parti metalliche dall’ossidazione. Le superfici vengono pulite con l’alcool e rese ruvide tramite della carta vetrata, mentre le pareti, a contatto con l’isolante termico e la parte inferiore del piano inclinabile, possono non essere scartavetrare. Successivamente saranno date due mani di vernice facendo attenzione che si depositi anche nei bordi, Fig. 2.7.



Fig. 2.7 – Verniciatura camera di cottura e piano inclinabile

2.2.2 Realizzazione della scatola esterna

Per la realizzazione della scatola esterna, si utilizzano fogli di legno “MDF” dai quali si ricavano: due fiancate “A”, due fiancate “B”, due pannelli inferiori “C” e un pannello inferiore “D”. Si eseguono poi, fori di diverso diametro, come in Fig. 2.8.

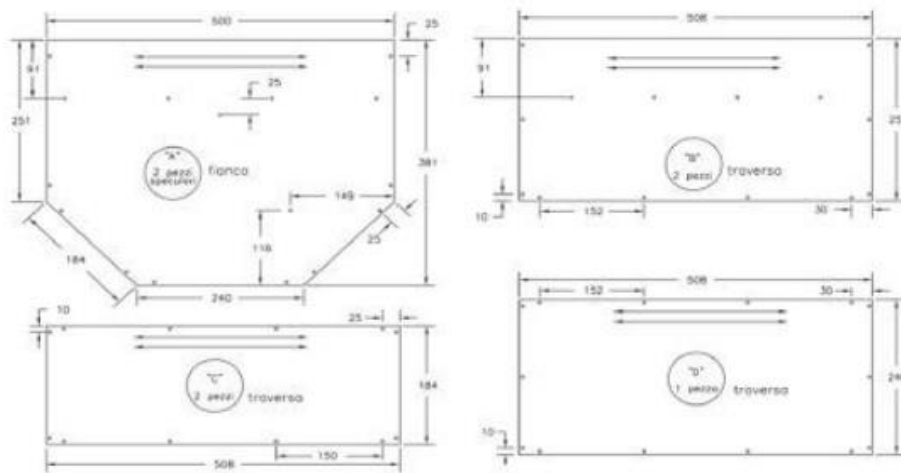


Fig. 2.8 – Pezzi che formano il corpo esterno

I diversi pezzi di compensato vengono poi rafforzati con listelli in abete, come in Fig. 2.9. Il sostegno viene unito alle fiancate e alle traverse così da ottenere un sistema più stabile e resistente.

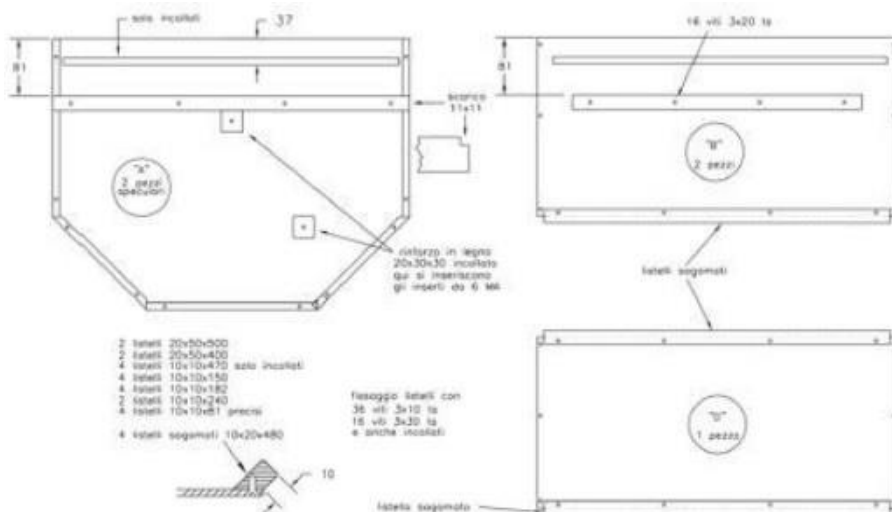


Fig. 2.9 – Posizione dei listelli di rinforzo

I pezzi verranno poi assemblati, come in Fig. 2.10, e applicate delle impugnature per facilitarne il trasporto. Infine, vengono create le due parti che formano la base del forno e un sistema di bloccaggio della rotazione del forno, utilizzando dei pannelli più robusti, Fig. 2.11.



Fig. 2.10 – Involucro esterno



Fig. 2.11 – Scatola esterna con basamento

Per ultimo viene inserita la camera di cottura all'interno della scatola esterna; essa verrà posizionata al centro tramite l'aiuto di distanziali realizzati con listelli, Fig. 2.12.



Fig. 2.12 – Inserimento camera di cottura nell'involucro esterno

2.2.3 Isolamento con lana di vetro

L'isolamento termico della camera interna, come in Fig. 2.13, avviene dopo aver inserito la camera di cottura in lamiera zincata all'interno del corpo del forno, tramite gli appositi distanziatori in legno, incollati ad avvitati sulle pareti interne ed esterne. I pannelli isolanti vengono tagliati di grandezze simili a quelle delle pareti della camera interna in forme semplice, rettangoli o quadrati.

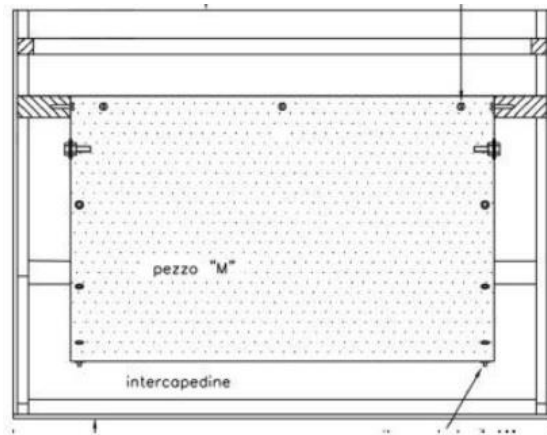


Fig. 2.13 – Distanziatori e isolamento della camera interna

Grazie ai fiocchi di lana di vetro inseriti tra la camera di cottura e il box esterno in “MDF”, si conclude l’isolamento termico. La scatola del forno sarà, poi, completata con la chiusura, Fig. 2.14.



Fig. 2.14 – Riempimento fessure con materiale isolante

Un passaggio fondamentale è la verniciatura delle pareti esterne, precedentemente scartavstrate sugli spigoli, giunture, gobbe e possibili residui di colla, per evitare che siano deformate dall’umidità. La vernice flatting può essere passata più volte, fino ad ottenere il risultato in Fig. 2.15.



Fig. 2.15 – Scatola forno verniciata

2.2.4 Sistema di concentrazione dei raggi solari

Il sistema di concentrazione dei raggi solari è ottenuto mediante l'utilizzo di supporti in legno, nei quali sono stati incollati fogli di alluminio che fungono da materiale riflettente. La chiusura è permessa grazie a 4 pannelli quadrati attaccati al box tramite delle cerniere, mentre altri 4 pannelli a forma di cuneo vengono inseriti, in maniera alternata, tra quelli quadrati, tramite dei ganci, al fine di formare una parabola. Fig. 2.16 – 2.17 – 2.18.

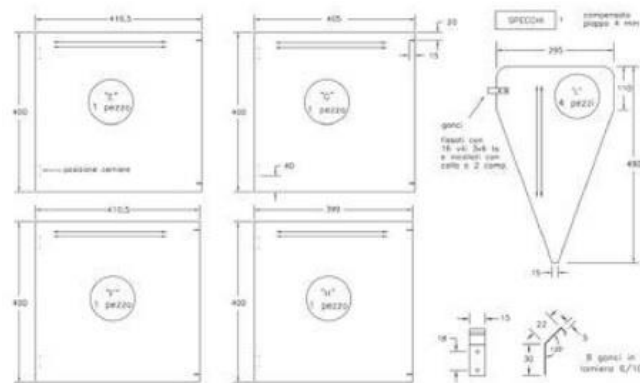


Fig. 2.16 – Disegni pannelli riflettenti (specchi)



Fig. 2.17 – Pannelli riflettenti



Fig. 2.18 – Specchi montati

Per captare il Sole in maniera efficace è molto importante l'inclinazione dei pannelli.

Nella Fig. 2.19 è visibile il forno solare ultimato.



Fig. 2.19 – Forno solare ultimato

2.3 Principali modifiche

Rispetto al primo forno progettato, sono state apportate delle modifiche con lo scopo di aumentarne le prestazioni tramite specifici materiali. Le principali variazioni riguardano la vernice, il vetro e gli specchi.

2.3.1 Vernice

Inizialmente, la vernice era una comune vernice nera, mentre quella utilizzata ora è la vernice SOLKOTE HI / SORB-IITM [14]. Essa è un particolare rivestimento ottico per le applicazioni solari. Le sue tre caratteristiche sono: la buona resistenza a temperature elevate, la resistenza all'umidità e alla degradazione UV.

Le caratteristiche ottiche sono:

- emissività: varia da 2,20 a 0,49 in base allo spessore di vernice applicato, del substrato e alla preparazione della superficie. In Fig. 2.20 si mostra un andamento dell'emissività;
- assorbimento: è compreso tra 0,88 e 0,94, nella Fig. 2.21 si vede un andamento medio dell'assorbimento;
- temperatura: il suo intervallo di tolleranza varia tra -100°F e 1000°F (da -73 °C a 538 °C).

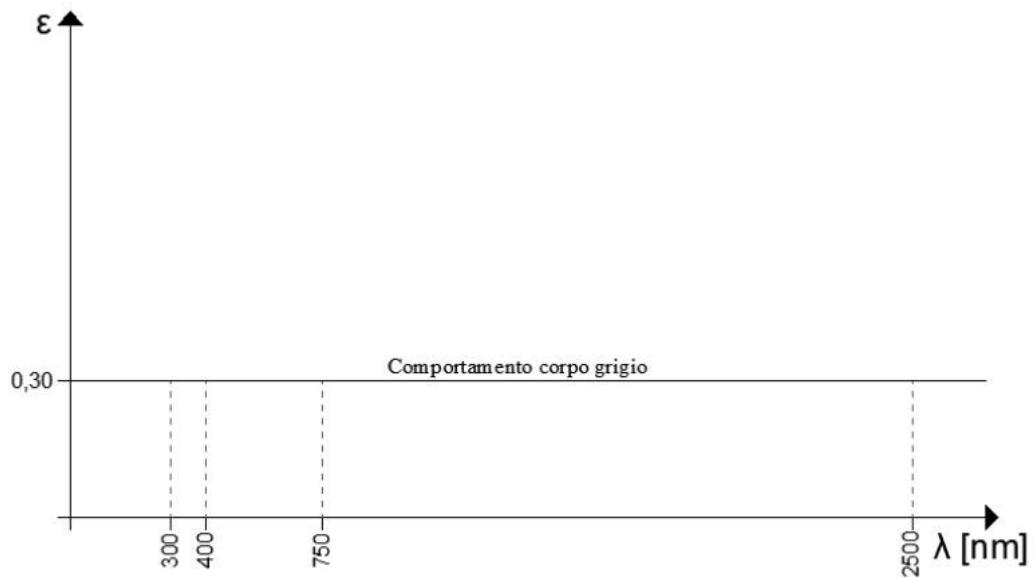


Fig. 2.20 – Diagramma emissività

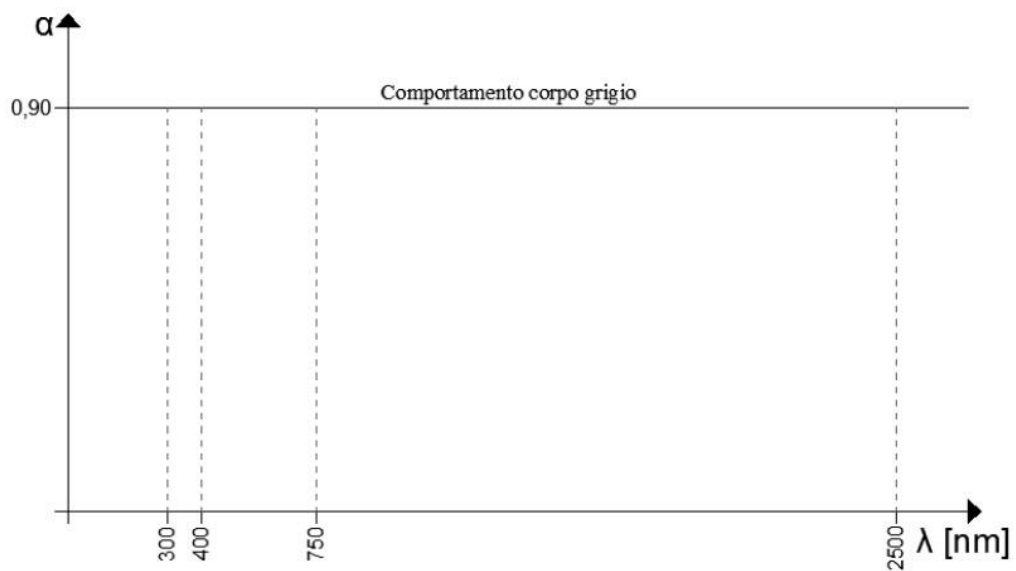


Fig. 2.21 – Diagramma assorbimento

2.3.2 Vetro e ISO 9050 2003

Per il miglioramento delle caratteristiche, invece, di un vetro sono stati utilizzati due doppi vetri temprati dello spessore di 4 mm con una trasmissione energetica pari al 90%. Nella tabella 2.1, individuiamo le sue caratteristiche energetiche.

Tab. 2.1 – 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 – a_e (%)	1	2
Coefficiente di shading - SC	1,05	1,05
Trasmisone dei raggi ultravioletti – UV (%)	85	/
Selettività	1,01	1,01

In base alla norma ISO 9050_2003, consideriamo i tre principali aspetti energetici del vetro:

- Trasmissione diretta solare: viene calcolata con la seguente formula:

$$\tau_e = \frac{\sum_{\lambda=300}^{250mm} \tau(\lambda) s\lambda \Delta\lambda}{\sum_{\lambda=300}^{250mm} s\lambda \Delta\lambda} \quad (1)$$

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 nella tabella 2.2
- Riflettanza solare diretta: la riflessione solare diretta ρ_e della vetratura viene calcolata con la formula:

$$\rho_e = \frac{\sum_{\lambda=300}^{250mm} \rho_0(\lambda) s\lambda \Delta\lambda}{\sum_{\lambda=300}^{250mm} s\lambda \Delta\lambda} \quad (2)$$

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 nella tabella 2.2
- Assorbimento solare diretto: l'assorbimento solare diretto a_e viene calcolato per differenza dalla seguente formula:

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

Tab. 2.2 – Distribuzione spettrale della radiazione solare globale

λ nm	I_{λ}	λ nm	I_{λ}
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	0,009 518
345	0,002 260	770	0,010 479
350	0,002 445	780	0,011 381
355	0,002 555	790	0,011 282
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	0,013 248	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	0,015 387	1 800	0,002 187
530	0,015 867	1 850	0,000 398
540	0,015 827	1 900	0,000 082
550	0,018 844	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	0,003 692
620	0,014 859	2 300	0,003 436
630	0,014 622	2 350	0,003 163
640	0,014526	2 400	0,003 233
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) I_{λ} for air mass = 1.5, calculated from the values given in Table 1, column 2, of ISO 9449-1:1992, multiplied by the wavelength interval $\Delta\lambda$. The values in this table are calculated according to the trapezoidal rule.

2.3.3 Alluminio

L'alluminio usato non è quello comune, ma è composto da più strati, come rappresentato in Fig. 2.22, che garantiscono il 9% della riflessione dei raggi solari.

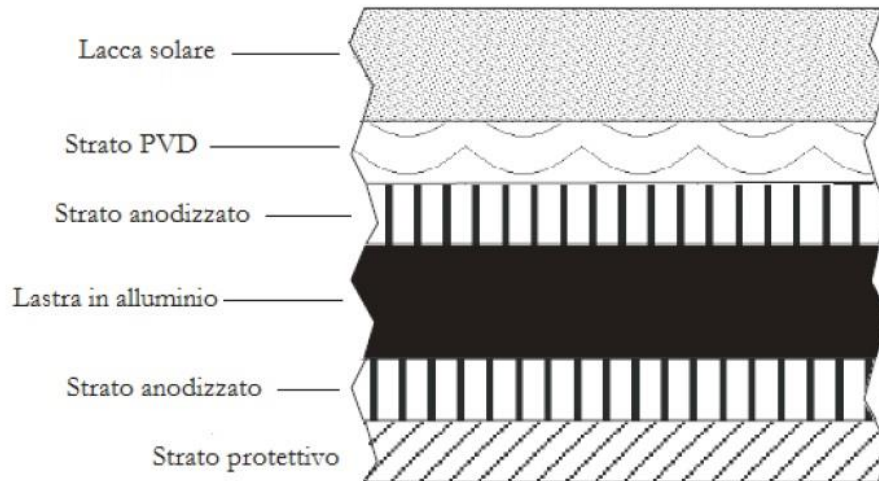


Fig. 2.22 – Struttura fogli di alluminio

Il grafico in Fig. 2.23, preso dalla scheda tecnica del materiale, mette in relazione la riflettanza totale della lega e la lunghezza d'onda in nanometri (lunghezza d'onda riferite allo spettro solare). Si può osservare che non tutta la radiazione solare incidente sull'alluminio viene riflessa, infatti è circa il 95%, mentre il restante 5% viene assorbito dallo specchio surriscaldandolo.

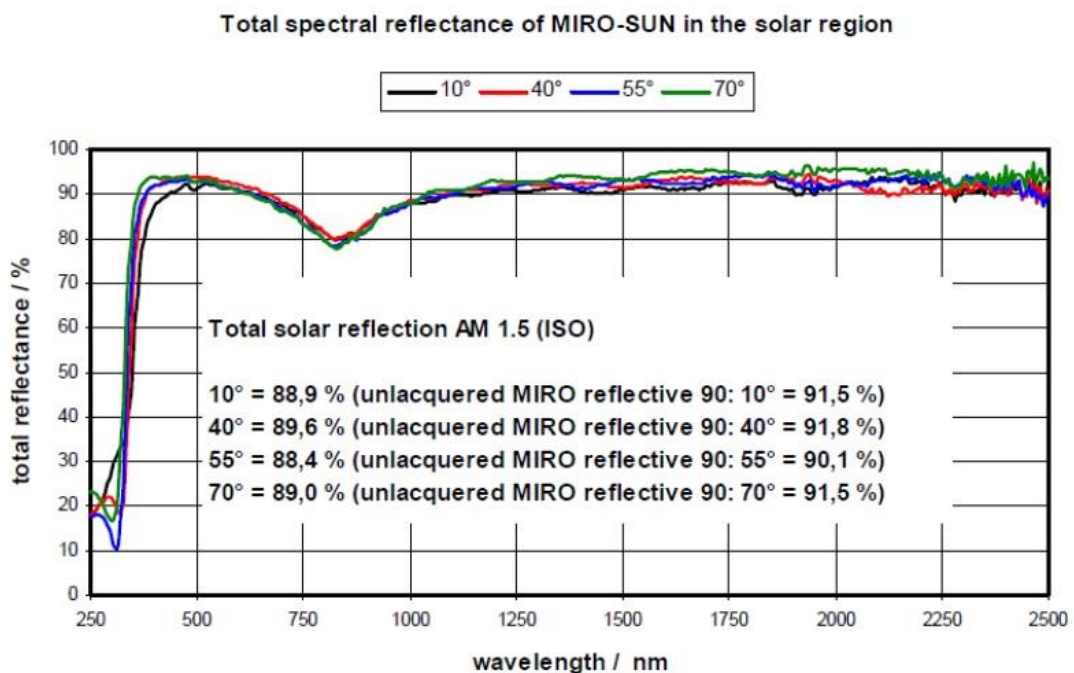


Fig. 2.23 – Riflettanza totale dell'alluminio

2.4 Analisi funzionale

L'aspetto più importante per far sì che il forno sia funzionale è il suo 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.

Possiamo vedere le sue caratteristiche tecniche nella tabella 2.3.

Tab. 2.3 – Analisi funzionale del forno

Massa	20,1 Kg
Ingombro a terra con pannelli chiusi	0,37 m ²
Ingombro a terra con pannelli aperti	0,68 m ²
Diametro massimo apertura pannelli riflettenti	0,898 m
Potenza massima raggiungibile	700 W
Temperatura massima raggiungibile	200°C
Capienza massima	2kg 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

3.1 Premessa

Essendo il non utilizzo durante le ore notturne, il principale svantaggio dei forni solari, si è fatto fronte al problema, iniziando a studiare materiali a cambiamento di fase; essendo capaci di accumulare e poi rilasciare calore latente durante un passaggio di stato. Questo materiale viene detto PCM (Phase Change Materials). La tecnologia più utilizzata prende il nome di LHS (latent heat storage) ed è basata sull'assorbimento e sul rilascio di calore durante il cambiamento di fase del PCM. Ci sono tre possibili cambiamenti:

- Solido-Solido: passaggio da una forma cristallina ad un'altra, accompagnato da modesti valori di calore latente e piccole variazioni di volume;
- Solido-Gas/Liquido-Gas: presenta un elevato valore di calore latente assorbito ed importanti variazioni di volume;
- Solido-Liquido: modesto calore latente assorbito e modeste variazioni di volume.

L'ultima è la tipologia più utilizzata poiché, avendo una modesta variazione di volume, ci permette di limitare la pressione massima per la quale deve essere dimensionato, facendoci risparmiare in termini economici [15].

Ricapitolando, il PCM durante la fase di riscaldamento assorbe calore; una volta raggiunta la temperatura di fusione, in cui inizia la transizione di fase, la temperatura del materiale rimane costante e il mezzo quindi assorbe calore latente.

La seguente formula serve per definire la quantità di calore immagazzinata:

$$Q = \int_{T_{iniz}}^{T_m} m \cdot C_{ps} \cdot dT + m \cdot \Delta h_m \cdot a_m \cdot \Delta h_m + \int_{T_m}^{T_{fin}} m \Delta h_m \cdot C_{pl} \cdot dT \quad (4)$$

Dove:

- T_m è la temperatura di fusione del materiale;
- T_{iniz} è la temperatura iniziale della sostanza;
- T_{fin} è la temperatura finale della sostanza;
- m è la massa della sostanza;
- C_{ps} è il calore specifico della sostanza liquida;
- C_{pl} è il calore specifico della sostanza liquida;
- a_m è la frazione di materiale fuso;
- Δh_m è il calore latente di fusione del materiale per unità di massa.

I sistemi utilizzati per immagazzinare energia termica sono per accumulo di calore sensibile e latente. I primi sono di più semplice utilizzo, mentre, i secondi sono utili avendo una densità maggiore. Questi, infatti, sono in grado di scaricare una grande quantità di calore da una piccola massa a temperatura costante durante un cambiamento di fase, Fig. 3.1.

Inoltre, sono più efficienti operando con piccolissime differenze di temperatura tra carico e scarico.

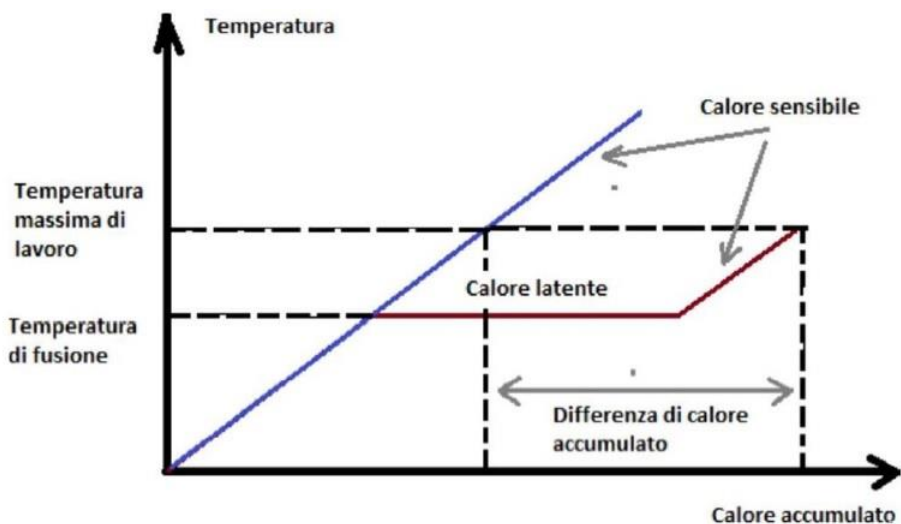


Fig. 3.1 – Differenze di energia accumulata tra calore sensibile e calore latente [16]

Nelle trasformazioni solido-liquido vengono prodotte variazioni di entalpia di rilevante entità senza importanti variazioni di densità, Fig. 3.2. Il vantaggio di questa tipologia di materiale è dovuto ad un'alta capacità termica in una piccola quantità di volume, consentendo, quindi, di realizzare sistemi di accumulo termico compatti, diminuendo così le perdite di energia. Altro vantaggio dei PCM è la buona diffusività termica, la quale garantisce un miglior trasferimento di calore tra il fluido termovettore (HTF) e il mezzo di accumulo.

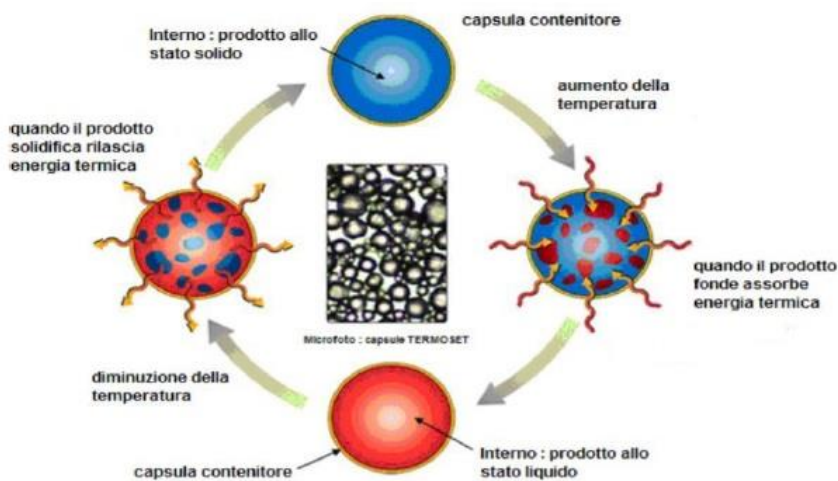


Fig. 3.2 – Ciclo di funzionamento di un PCM [19]

3.2 Caratteristiche

Riuscendo a migliorare le prestazioni delle varie tecnologie, i PCM vengono sempre più studiati, trovando impiego, non solo nel nostro caso studio ma anche nell'edilizia come pannelli, intonaci o isolanti.

Ciascun sistema, ovviamente, per essere il più possibile efficiente, deve rispettare delle caratteristiche [15]:

- essere compatto quanto più possibile per ridurre i costi e limitare le perdite di energia;
- avere un'elevata efficienza di accumulo;
- contenere un materiale di accumulo termico con proprietà termiche nel range delle temperature operative del sistema;
- avere una distribuzione delle temperature uniforme.

In commercio esistono vari materiali PCM, ognuno con caratteristiche differenti, ma per essere commerciabili devono possedere alcune proprietà che li rendono applicabili per un uso esteso:

- Proprietà termiche
 - Temperatura di fusione adatta all'impiego
 - Elevato calore latente di fusione
 - Buono scambio termico
- Proprietà fisiche
 - Elevata densità
 - Modesta variazione di volume
 - Bassa tensione di vapore
- Proprietà cinetiche
 - Velocità di cristallizzazione elevata
 - Assenza di sotto raffreddamento
- Proprietà chimiche
 - Stabilità chimica
 - Non tossicità
 - Non infiammabilità
 - Compatibilità con i materiali in cui entrerà in contatto
- Proprietà economiche
 - Abbondante
 - Poco costoso

Nessun PCM, ad oggi in commercio, soddisfa tutte le caratteristiche richieste, quindi è necessario sceglierlo in modo tal che, il punto di fusione, soddisfi le nostre esigenze.

3.3 Classificazione

La classificazione del PCM può essere fatta in base al materiale, quindi: organico, inorganico o eutettico, o in base alla temperatura di fusione [16].

3.3.1 Classificazione in base al tipo di materiale

Nella figura sottostante possiamo vedere la classificazione in base al tipo di materiale, Fig. 3.3.

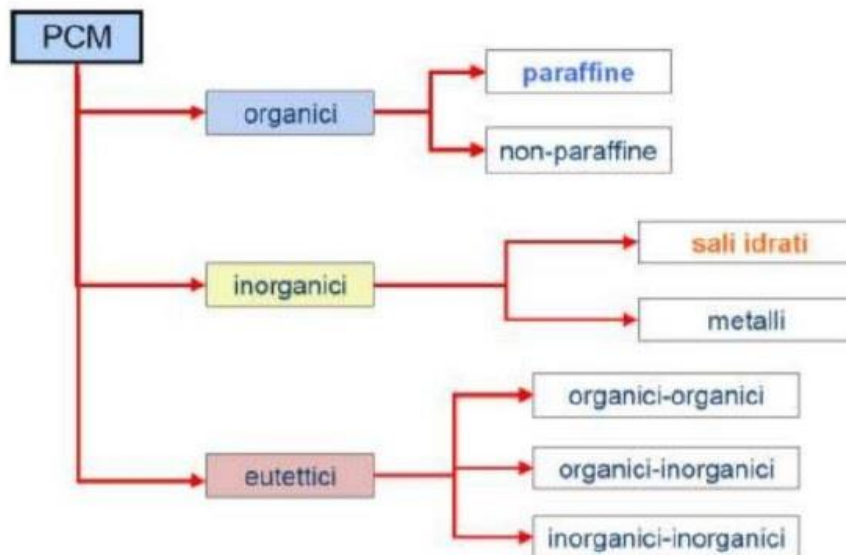


Fig. 3.3 – Classificazione dei PCM in base al materiale [17]

3.3.1.1 PCM organici

Essi non si degradano e possono essere utilizzati per più cicli esecutivi di transizione, non sono corrosivi e la loro temperatura di fusione si mantiene abbastanza costante. Si dividono in:

- paraffine: miscele di idrocarburi solidi, le cui molecole presentano catene con più di 20 atomi di carbonio. Sono ricavate dal petrolio e raffinate bianche, ma esistono anche allo stato naturale. Sono poco solubili nell'alcool, nell'acetone e abbastanza nel toluene, cloroformio e xilolo, mentre sono solubili nella trementina, nel benzolo e nell'etere etilico.

La preparazione avviene tramite un trattamento degli oli del petrolio e le sue proprietà sono [17]:

- temperature dai 30 °C ai 50 °C;
 - 80-90% in peso del PCM è contenuto nelle capsule;
 - stabilità della temperatura fino a 250 °C;
 - dimensione media delle particelle 15-25 micron;
 - colore bianco;
 - bassa conducibilità termica: 0,2 W/m·°C
 - incompatibili con materiali plastici, infiammabili;
- non paraffine: la maggior parte dei PCM appartengono a questa categoria; ne fanno parte gli acidi grassi, i minerali di origine organica e molti altri. Le loro proprietà sono:
- elevato calore di fusione, sebbene non siano infiammabili;
 - bassa conducibilità termica;
 - tossicità medio-alta;
 - instabilità alle alte temperature;
 - costi elevati.

3.3.1.2 PCM inorganici

Inizialmente erano i più utilizzati e possiamo distinguere: i sali idrati e i materiali metallici. Rispetto agli organici sono più degradabili e il calore latente di fusione è più elevato.

- sali idrati: sono solidi cristallini composti da leghe di acqua e sale; il più comune è il solfato di sodio decaidrato (sale di Galuber);

Le loro proprietà sono [18]:

- elevata conducibilità termica: 0,5 W/m·°C;
 - ridotta variazione di volume durante il cambiamento di fase;
 - bassa corrosività e tossicità;
 - elevato calore latente per unità di volume;
 - economici;
 - fusione incongruente con i sotto raffreddamenti che portano alla segregazione di fase;
- materiali metallici: non sono ancora stati utilizzati a causa del loro peso. Alcune proprietà sono:

- bassa temperatura di fusione;
- elevata conducibilità termica;
- elevato calore latente per unità di volume;
- basso calore latente per unità di peso;
- basso calore specifico.

Nella tabella 3.1 sono rappresentate le principali differenze tra PCM organici e Sali idrati.

Tab. 3.1 – Vantaggi/svantaggi dei vari PCM

	VANTAGGI	SVANTAGGI
ORGANICI	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Semplici da usare ▪ Non corrosivi ▪ No a fenomeni di sottoraffreddamento ▪ No ad agenti di nucleazione ▪ Riciclabili 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ In genere più costosi ▪ Più basso valore del calore latente ▪ Spesso campo di fusione allargato ▪ Alto valore di variazione di volume in cambiamento di fase ▪ Possono essere combustibili ▪ Possibili reazioni con il calcestruzzo
SALI IDRATI	<ul style="list-style-type: none"> ▪ In genere economici ▪ Buon valore di calore latente ▪ Elevata conducibilità termica ▪ Valore fisso di temperatura di passaggio di fase ▪ Non infiammabile ▪ Biodegradabile e riciclabile 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bisogno di accurata preparazione ▪ Bisogno di additivi per stabilità a lungo termine ▪ Incline al sottoraffreddamento ▪ Possibilità di corrodere alcuni metalli

3.3.1.3 PCM eutettici

Un materiale è definito eutettico quando è una miscela di due o più sostanze in cui il punto di fusione è più basso di quello delle singole sostanze che lo compongono. In questo PCM tutti gli elementi fondono e solidificano congruentemente e contemporaneamente, quindi senza segregazione.

3.3.2 Classificazione in base alla temperatura di fusione

La seconda modalità di classificazione dei PCM è in base alla loro temperature di fusione. Per cui sono suddivisi in intervalli di temperature con le possibili applicazioni, come mostrato in tabella 3.2.

Tab. 3.2 – Intervalli di temperatura e applicazioni per PCM

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 sono 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.

3.4 Mezzi per l'incremento delle prestazioni

Il problema comune dei materiali a cambiamento di fase è il basso valore di conducibilità termica, tale per cui è necessario prevedere delle tecniche per migliorarla. Le metodologie utilizzate possono essere varie, come alette metalliche, nanofibre di grafite e schiume metalliche.

3.5 PCM utilizzati

Durante il nostro lavoro nel DIISM, le tipologie di PCM utilizzate sono entrambi zuccheri: xilitolo e mannitolo. Questi sono stati miscelati per ottenere una temperatura di fusione non elevata, in quanto il secondo fonde tra i 162,15 °C e i 167,80 °C. La nostra miscela è composta dal 50% mannitolo e 50% xilitolo, 1,25 kg ognuno.

3.5.1 Xilitolo

La sua formula molecolare è $C_5H_{12}O_5$, Fig. 3.4, ed è un PCM organico non composto da paraffina, estratto da betulle, fragole, lampone, prugna e grano. La sua temperatura di fusione è di circa 95 °C, con densità elevata ($1,52 \text{ g/m}^3$) e con una temperatura di decomposizione intorno ai 200 °C [20].

Sono stati svolti vari studi, tra cui anche l'uso di additivi per aumentare la velocità di cristallizzazione e il rilascio di calore latente, ad esempio il mannitolo porta ad una cristallizzazione 33-170 volte più veloce rispetto allo xilitolo pure in uno stato di supercondensa a 22 °C.



Fig. 3.4 – Confezione di xilitolo

3.5.2 Mannitolo

La sua formula molecolare è $C_6H_{14}O_6$ ed è uno zucchero che si trova in natura in alghe e funghi, Fig. 3.5; appartiene ai PCM organici non contenenti paraffina. La temperatura di fusione varia dai 162,15 °C ai 167,80 °C, l'entalpia di fusione è 326,8 J/kg per 10 °C/min. La temperatura di decomposizione è di circa 300,15 °C. Questo materiale è considerato il più adatto ad applicazioni di media temperatura poiché c'è una grande differenza tra la temperatura di fusione e quella di decomposizione [22].



Fig. 3.5 – Confezione di mannitolo

3.6 Formazione miscela

Il materiale a cambiamento di fase, da noi utilizzato per i test, è composto dal 50% xilitolo e dal 50% mannitolo; il quantitativo impiegato è di 1,250 kg a zucchero, come mostrato in Fig. 3.6 e 3.7, sottraendo il peso di 50 g del contenitore, per un totale di 2,500 kg.



Fig. 3.6 - Xilitolo



Fig. 3.7 - Mannitolo

Come è possibile osservare nelle foto sopra indicate e in Fig. 3.8, i due zuccheri, nonostante siano entrambi organici e non composti da paraffina, hanno due aspetti differenti: lo xilitolo è, otticamente, più granulare, simile allo zucchero comunemente utilizzato in cucina, mentre il mannitolo ha un aspetto più sottile, come una polvere.

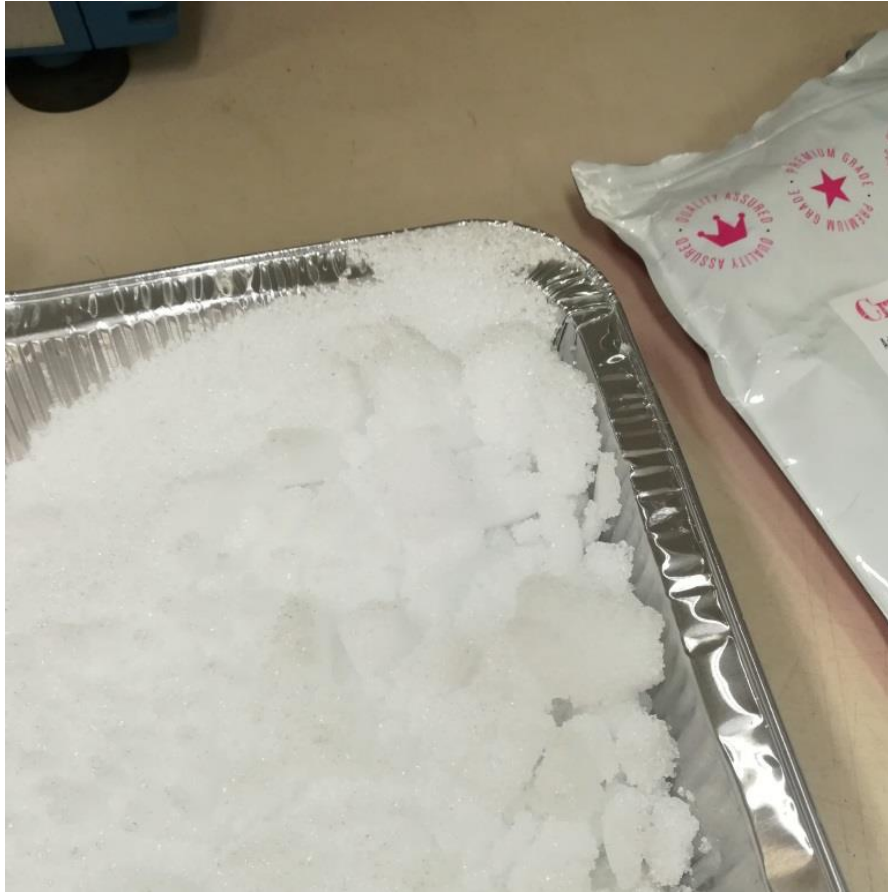


Fig. 3.8 – Granulometria xilitolo

Dopo la pesatura, avendo questa differenza di granulometria, si procede a ridurre in polvere anche lo xilitolo tramite un mixer, Fig. 3.9. Questo passaggio è fondamentale per far sì che la sostanza finale che otterremo sia il più possibile omogenea, così da non creare, al momento dei test, zone in cui il PCM è solido e zone in cui è già avvenuta la fusione.



Fig. 3.9 – Riduzione in polvere dello xilitolo

Terminata questa operazione, è necessario eliminare l'umidità e le altre sostanze volatili dal composto, tramite l'essiccazione.

Essa viene eseguita in un forno elettrico a 70 °C, poiché è una temperatura minore rispetto a quella di fusione dello xilitolo che è di circa 95 °C. Il processo durerà 5 ore con la successiva estrazione del forno ed il raffreddamento.

Successivamente, gli zuccheri saranno inseriti nella pentola ed introdotti nello stesso forno, ma questa volta a circa 200 °C, poiché deve essere maggiore della temperatura di fusione del mannitolo che è di circa 162,15 °C. E' importante sciogliere i due zuccheri e mescolarli, così da avere la corretta distribuzione del PCM.

La pentola a questo punto è pronta e potremo iniziare i test.

3.7 Pentola con doppio fondo

Per utilizzare il PCM è necessario avere una pentola con doppio fondo. L'obiettivo è quello di capire per quanto tempo rilasci calore dopo il cambiamento di fase. La pentola è realizzata da una più piccola all'interno, contenente l'olio siliconico, che acquisisce la variazione di temperatura del PCM e, da una più grande esterna, per formare l'intercapedine.

3.8 Fasi di realizzazione della pentola

Per costruire la pentola a doppio fondo sono state utilizzate 2 pentole in acciaio inossidabile, resistente alle alte temperature, di diametro differente, una di 23 cm e una di 19 cm, 4 bulloni, 3 termocoppie di tipo K, vernice nera comune e due tubicini in acciaio INOX. Le dimensioni delle pentole sono state dettate da due fattori, affinché entrasse nella camera di cottura del forno e il quantitativo di PCM da immettere nell'intercapedine.

Tab.3.3 – Misure principali delle due pentole

	PENTOLA ESTERNA	PENTOLA INTERNA
Diamentro (cm)	23	19
Altezza (cm)	15	13
Capacità (l)	5,2	3,2
Peso (Kg)	1,02	0,53

I manici delle pentole sono stati eliminati ed è stata inserita una pentola all'interno dell'altra facendo attenzione a far coincidere le estremità superiori e a mantenere la centralità, Fig. 3.10.



Fig. 3.10 – Assemblaggio delle pentole

Una volta stabilita la giusta posizione, sono praticati quattro fori diametralmente opposti, nei quali sono stati inseriti dei bulloni in acciaio inossidabile e fissato il tutto con rondelle e dadi, anch'essi di acciaio inossidabile. È fondamentale utilizzare questo tipo di acciaio per evitare la corrosione e il bloccaggio dei dadi da parte dei sali utilizzati per il PCM, se fosse necessario smontare la pentola per apportare delle modifiche. Il posizionamento delle termocoppie ha richiesto uno studio per capire quale fosse il più corretto per evitare che, le stesse, entrassero in contatto con la pentola creando, una volta che il PCM arriverà alla fase liquida, delle misure sperimentali compromesse. La soluzione, quindi, più appropriata è stata quella di inserirle nei due tubicini di acciaio INOX, come in Fig. 3.11, e fatte fuoriuscire di un centimetro. I tubicini sono stati saldati nei bulloni che bloccano le pentole, Fig. 3.12.



Fig. 3.11 – Sistema per fissaggio delle due pentole e posizionamento della termocoppia



Fig. 3.12 – Tubo in acciaio inox saldato al dado

La fase successiva è stata la verniciatura di tutte le parti esterne, al contrario del forno solare, qui è stata usata una vernice nera comune, Fig. 3.13.



Fig. 3.13 – Pentola con doppio fondo verniciata

Le termocoppie di tipo K sono stati inserite nei due tubicini per effettuare le misurazioni delle variazioni di temperatura del PCM. Per la misurazione della temperatura dell'olio siliconico si utilizza una termocoppia posta centralmente tramite un'asta orizzontale, che le permette di rimanere sospesa all'interno del liquido senza entra in contatti con le pareti della pentola, come in Fig. 3.14-3.15 e 3.16.



Fig. 3.14 – Pentola con doppio fondo terminata [22]

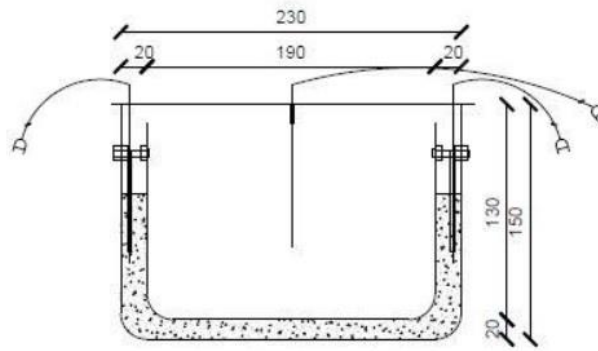


Fig. 3.15 – Sezione pentola con doppio fondo [22]

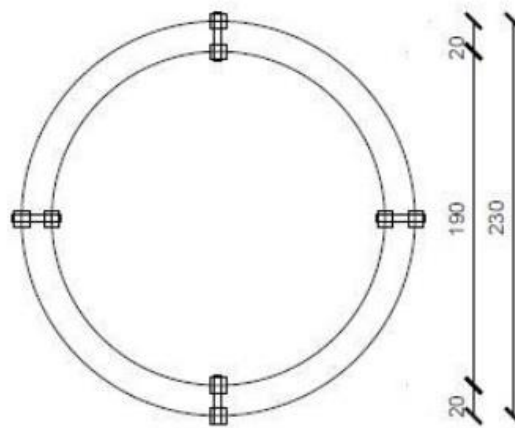


Fig. 3.16 – Prospetto dall'alto della pentola con doppio fondo [22]

3.9 Olio siliconico

L'olio siliconico è utilizzato come fluido termovettore e ne sono stati impiegati 2 kg; l'olio è il Rhodorsil Oils 47 V 100, dove: 47 rappresenta il riferimento della Bluestar Silicones per gli oli polidimentilsilossano, V sta per viscosità e 100 indica la viscosità in mm^2/s a $25\text{ }^\circ\text{C}$.

Le proprietà di questo olio sono:

- bassa viscosità;
- alta tensione superficiale;
- alta comprimibilità;
- resistenza alle alte e alle basse temperature;
- resistenza all'ossidazione e all'idrolisi;
- mancanza di invecchiamento agli agenti atmosferici;
- chimicamente inerte;
- combustibilità molto limitata.

Oltre i 200 °C, in presenza di aria, non è stabile ed iniziano i fenomeni di ossidazione. La capacità termica è indipendente dalla viscosità ed è 0,35 cal/kg/°C (o 1,46 J/g·°C) a 25 °C, che aumenta con la temperatura secondo la seguente legge: $C_p = a + b \cdot 10^{-5} T$ con: $a = 0.34708$ e $b = 43 T$ in °C, C_p in Kcal/kg/°C, Fig. 3.17. Questa legge è valida tra -50 °C e +200 °C.

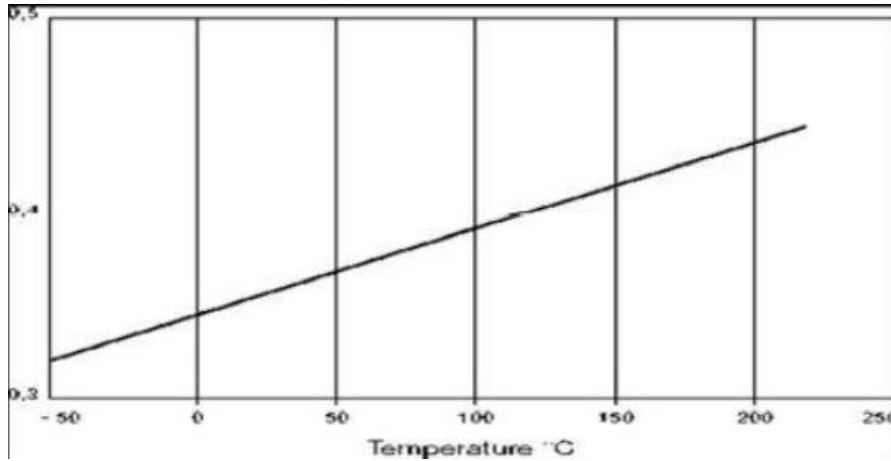


Fig. 3.17 – Variazione del calore specifico in funzione della temperatura [23]

La conducibilità termica degli oli di Rhodorsil® 47 varia poco con la temperatura nell'intervallo +20 °C a +250 °C, cambia solo in funzione della viscosità per oli molto fluidi e rimane costante da una viscosità di 50 mm²/s: la conducibilità termica di questo olio è identica a quella degli oli minerali. La legge che disciplina la variazione della conducibilità termica in funzione della temperatura, Fig. 3.18 è la seguente:

$$\lambda = \lambda_0 [1 + (T + T_0)]$$

Dove: $T_0 = 298$ K, per gli oli 47 V 50 a V 1000, $\lambda = 156,82 - 0,233 T$ (T in °C) [m·W/m·°C] e $\lambda = 0,1351 - 2,10 \cdot 10^{-4} T$ [Kcal/h·m·°C].

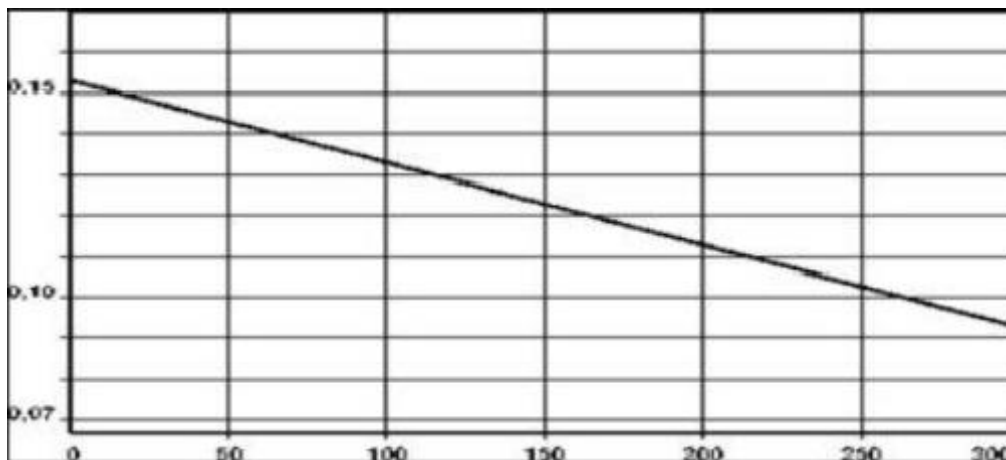


Fig. 3.18 Variazione della conducibilità termica in funzione della temperatura [23]

CAPITOLO 4

PROCEDURE SPERIMENTALI E BANCO DI PROVA

4.1 Premessa

I test sperimentali eseguiti in questa tesi sono stati effettuati nel DIISM dell'Università Politecnica delle Marche, nei mesi di settembre ed ottobre 2019. Grazie ai test effettuati precedentemente dai nostri colleghi sulle prestazioni del forno vuoto, possiamo comparare i nostri risultati individuando gli effetti della presenza del PCM sia in fase di riscaldamento sia in fase di raffreddamento.

L'olio silconico, all'interno della pentola, viene fatto riscaldare fino a 110 °C e fatto raffreddare fino a 80 °C.

4.2 Procedure di calcolo standard internazionali

I parametri da ricavare per ottenere risultati standardizzati, sono descritti in letteratura, in delle procedure standard da eseguire. Quelle valutate sono:

- procedura proposta da Khalifa et al. [24];
- il test sperimentale proposto da Mullick [24].

Bisogna capire se gli standard sono pratici da utilizzare in riferimento al nostro prototipo, quindi capire se ci sono differenze tra le varie tipologie di forni solari e se i risultati sono ripetibili e applicabili al nostro forno solare.

4.2.1 Procedura proposta da Khalifa ed al.

I parametri da determinare, per valutare le prestazioni dei forni sono:

- il tempo di cottura per i diversi prodotti alimentari;
- il tempo necessario per avvertire un sensibile riscaldamento di una quantità nota di acqua fino al punto di ebollizione;

oppure

- la temperatura massima raggiungibile registrata in una prova senza scarico.

Il primo metodo non è totalmente affidabile ed oggettivo basandosi sul giudizio dell'osservatore su quando il cibo sia completamente cotto. Il secondo ed il terzo sono i più attendibili.

Khalifa et al. utilizzano il secondo criterio per valutare le prestazioni del forno solare attraverso il calcolo dell'efficienza termica complessiva η_{av} del tempo di ebollizione specifico t_s e di quello

caratteristico tch. La quantità ts (min·m²/kg) rappresenta il tempo richiesto per bollire 1 kg di acqua utilizzando un forno solare con 1 m² di superficie di apertura, tch (min·m²/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 ts, tch e di η_{av} sono fornite da Refs e sono:

$$- \quad t_s = \frac{\Delta t \cdot A_a}{mf} \quad (5)$$

$$- \quad t_{ch} = t_s \cdot \frac{DNI_{av}}{DNI_{ref}} \quad (6)$$

$$- \quad \eta_{av} = \frac{mf \cdot cf(T_2 - T_1)}{DNI_{av} \cdot A_a \cdot \Delta t_{th}} \quad (7)$$

mf e cf sono la massa (kg) e il calore specifico (J/kg · K) del fluido, Δt_{th} 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_{th}, DNI_{ref} è l'intensità media solare di riferimento pari a 900 W/m², T₂ e T₁ sono la temperatura massima e la temperatura minima nell'intervallo considerato ed infine A_a è l'area di apertura (m²) del forno solare.

4.2.2 Procedura proposta da Mullick

La procedura di Mullick [22] è utilizzata per i forni solari a scatola, in cui individuò due parametri: F1 e F2, tramite la prova di stagnazione, quindi, senza carico e riscaldando una massa nota di acqua.

$$F1 = \frac{T_{a,max} - T_{amb}}{DNI} \quad (8)$$

T_{a,max} è la temperature dell'assorbitore, T_{amb} è la temperature ambiente e DNI è la radiazione solare individuata su un piano orizzontale una volta raggiunta la temperatura di stagnazione. F2 implica la misura dell'aumento di temperatura nel tempo di una certa quantità di acqua nota, in una pentola, come indicato nella relazione sottostante:

$$F2 = \frac{F1 \cdot mf \cdot cf}{A_a \cdot \Delta t_{th}} \ln \frac{1 - \frac{\frac{1}{F1}(T_1 - T_{amb,av})}{DNI}}{1 - \frac{\frac{1}{F2}(T_2 - T_{amb,av})}{DNI}} \quad (9)$$

Δt_{th} rappresenta l'intervallo di tempo (s) durante il quale la temperature dell'acqua passa da T₁ (temperature iniziale dell'acqua) a T₂ (temperature finale dell'acqua), DNI_{av} e T_{amb,av} sono rispettivamente la radiazione solare media (W/m²) e la temperatura ambiente media (°C), nell'intervallo di tempo Δt_{th} considerato, mf e cf sono la massa (kg) e il calore specifico (J/kg·K), A_a è l'area di apertura del forno (m²). Inoltre Mullick [24] insieme a Buddhi [24] analizzarono gli

effetti del carico mf e del numero di pentole in F2, concludendo che quest'ultimo aumenta con l'aumentare di entrambi i parametri.

4.3 Elementi del banco di prova

Gli elementi che costituiscono il banco di prova sono, Fig. 4.1:

- computer portatile;
- acquisitore;
- termocoppie di tipo K e tipo T;
- pireliometro.

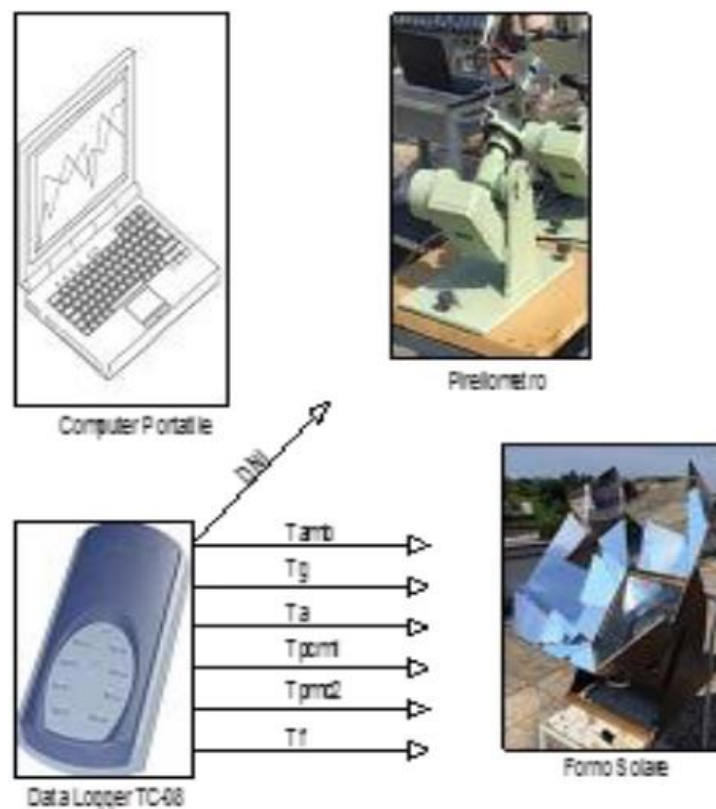


Fig. 4.1 – Esempio di allestimento di banco di prova

4.3.1 Preparazione del banco di prova

Le fasi da eseguire per ottenere un'esatta acquisizione dei dati sono:

1. pulire tutti gli specchi riflettenti ed il vetro;
2. posizionare la pentola, in modo centrale e simmetrico, già munita di PCM e olio siliconico, all'interno della camera di cottura;

3. prestare attenzione che le estremità delle termocoppie siano in posizione corretta per acquisire le temperature: ambiente esterno, vetro interno, assorbitore (sotto la pentola), olio silconico e PCM destro e sinistro;
4. posizionare il carrello su cui è installato il pireliometro in direzione Nord-Sud e procedere alla messa a fuoco e quindi all'allineamento di questo con la posizione del Sole. Collegare poi con il Data Logger;
5. posizionare i connettori delle termocoppie nei rispettivi canali del Data Logger;
6. orientare il forno in direzione del Sole;
7. controllare che i valori di temperatura acquisiti dal Data Logger siano attendibili;
8. procedere con l'acquisizione dei dati.



Fig. 4.2 – Banco di prova allestito

4.3.2 Termocoppie

La termocoppia è un trasduttore che si basa sull'effetto termoelettrico. I vantaggi sono numerosi, come: l'essere economiche, standardizzate, facilmente sostituibili e permettere di misurare un ampio intervallo di temperature. Hanno, però, problemi di accuratezza, infatti, è difficile ricavare errori sistematici inferiori ad un grado celsius.

4.3.2.1 Principio di funzionamento

Il fisico statunitense Thomas Johann Seebeck, nel 1821, scoprì che in un circuito composto da due conduttori di diversa natura, sottoposto ad un gradiente di temperatura, si instaura una differenza di potenziale. Questo fenomeno viene chiamato, appunto, Seebeck ed è sfruttato nelle termocoppie.

Una termocoppia è costituita da due conduttori elettrici uniti tramite un giunto caldo ed è il punto nel quale viene rilevata la temperatura da misurare. Le estremità libere dei due conduttori sono unite con un giunto a freddo. La termocoppia viene inserita all'interno di una guaina di protezione che penetra dentro ad una guaina di protezione all'interno dell'apparecchiatura della quale si vuole misurare la temperatura. All'esterno i due conduttori sono connessi ad una morsettiera di un registratore di temperatura, nel nostro caso un acquisitore, quello in Fig. 4.3. In questo modo il giunto freddo si trova sottoposto alla temperatura presente sulla morsettiera, che viene misurata tramite una termoresistenza e utilizzata all'interno dello strumento, per correggere elettricamente il segnale proveniente dalla termocoppia stessa. In questo modo, qualsiasi sia la temperatura presente in tale zona, è come se il giunto freddo si trovasse alla temperatura di 0 °C; questa azione si chiama compensazione della temperatura ambiente ed assicura la massima precisione di misura. Lo strumento misuratore avrà una sua scala o sul display l'indicazione direttamente in °C e non in m·V, in quanto al suo interno esistono sistemi che tengono conto della non linearità del segnale in ingresso.



Fig 4.3 – Termocoppie collegate ad un acquisitore

4.3.2.2 Affidabilità delle termocoppie

Il problema più importante dell'affidabilità di una termocoppia è dato dalla disomogeneità nei fili causata da fattori di natura chimica o fisica, come: volatilizzazione di un componente o contaminazione dovuta alla presenza di agenti corrosivi, stress meccanici come piegamenti o stiramenti, mutazione della struttura cristallina del materiale a causa di diversi trattamenti termici subiti da differenti porzioni di filo. È buona norma utilizzare fili nuovi che siano esenti da queste anomalie.

4.3.2.3 Termocoppie utilizzate: tipo K e tipo T

Le termocoppie sono di svariati tipi e si distinguono in base ai conduttori elettrici ed al campo di applicazione (industriale, scientifico, alimentare, medico, ecc.). Quelle da noi utilizzate sono:

- di tipo K, per la misura delle temperature raggiunte dal forno, sia vicino al vetro che vicino all'assorbitore; sono di uso generale ed economiche, il loro intervallo di temperatura va da -200 °C a 1260 °C. La sensibilità è di circa $41 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ e sono composte da Chromel (Ni-Cr) (+) e Alumel (Ni-Al) (-). Questo tipo di termocoppia è nata per sostituire quella in metallo nobile nelle alte temperature.
- di tipo T per misurare la temperatura del fluido, sono composte di Rame (Cu) (+) e Costantana (Cu-Ni) (-). Sono adatte a temperature inferiori di 0 °C con limite massimo di 350 °C.

Le termocoppie devono essere scelte in base alla temperatura media da misurare e sono rappresentate in Fig. 4.4.

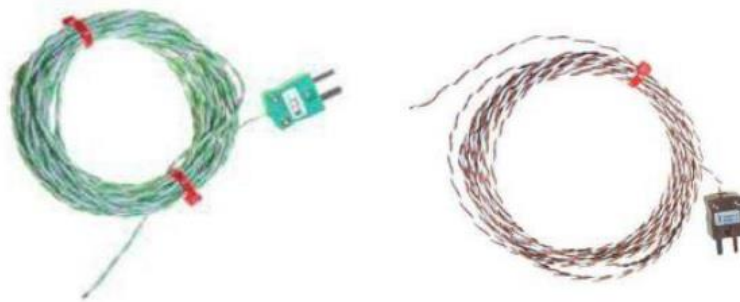


Fig. 4.4 – Termocoppia di tipo K a sinistra e di tipo T a destra

4.3.3 Pireliometro

Il pireliometro è rappresentato in Fig. 4.5 e serve a misurare l'intensità della radiazione solare diretta, ovvero quella che giunge a terra sotto un determinato angolo e senza subire riflessioni. È composto da un tubo, all'estremità del quale, perpendicolarmente, è posizionato il sensore, costituito da un corpo nero che assorbe la radiazione solare riscaldandosi e attraverso la misurazione della temperatura raggiunta, si risale all'energia da lui assorbita e quindi all'intensità della radiazione. Lo strumento viene inizialmente orientato manualmente attraverso una regolazione meccanica, in seguito, per permettergli di seguire la radiazione, è stato dotato di un motore elettrico.

Nonostante questo, è importante controllarlo frequentemente poiché un piccolo spostamento porterebbe ad un calo della radiazione misurata.

I dati acquisiti sono trasferiti al Data-Logger ed esso collegato, unito a sua volta ad un computer che ne registra i valori, misurati al secondo.



Fig. 4.5 – Pireliometro

4.3.3.1 Struttura del pireliometro

Il pireliometro è stato progettato dalla Eppley [25]. Il NIP incorpora una termopila a filo alla base di un tubo, l'apertura sulla quale passa la radiazione ha un rapporto in lunghezza che va da 1 a 10, che sottendono un angolo di $5^{\circ} 43' 30''$. Il tubo è internamente annerito e riempito con aria secca a pressione atmosferica e sigillato all'estremità. Ha inoltre un dispositivo di avvistamento per puntare direttamente al Sole, ad un'estremità del tubo, mentre montando il NIP su un inseguitore solare si ha l'allineamento.

4.3.3.2 Installazione e manutenzione

Eppley produce due tipi di inseguitori: il modello Tracker ST è un singolo asse con un orologio a motore per l'inseguimento ed il modello Tracker SMT è un computer a doppio asse controllato con un inseguitore automatico. Il vetro dello strumento deve essere pulito con un panno morbido per non graffiare la superficie.

4.3.4 Computer e acquisitore

I dispositivi devono essere collegati ad un acquisitore dati (Data Logger TC-08), che tramite un software chiamato PicoLog, Fig. 4.6, ci permette di visualizzare al computer l'andamento delle temperature e della radiazione solare sotto forma di dati numerici e con grafici che mettono in relazione il tempo con le temperature misurate e nel caso della radiazione con l'energia.

Il Data Logger ha 8 canali per presa dei dati nei quali collegare le termocoppie. Gli errori sono del 0,2% e di 0,5 °C. L'acquisizione dati è stata imposta ad una presa al secondo, anche se può arrivare a 10 al secondo.

Agli 8 canali colleghiamo:

- canale 1: pireliometro; misura la radiazione solare diretta sia in mV (NIP) che convertiti in W/m^2 (DNI);
- canale 2: temperatura ambiente esterno, T_{amb} , in °C, misurata con l'utilizzo di una termocoppia di tipo T;
- canale 3: temperatura vetro esterno, T_g , in °C, misurata con l'utilizzo di una termocoppia di tipo K;
- canale 4: temperatura del forno, T_a , in °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 °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 °C misurata con l'utilizzo di una termocoppia di tipo K;
- canale 7: temperatura olio siliconico, T_f , in °C, misurata utilizzando una termocoppia di tipo T;
- canale 8: non utilizzato durante le sperimentazioni.

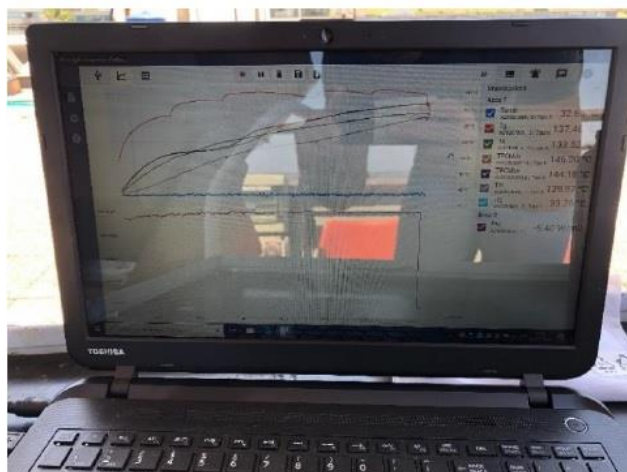


Fig. 4.6 – Esempio della schermata del programma di acquisizione, PicoLog, durante il test sperimentale

CAPITOLO 5

RISULTATI DEI TEST SPERIMENTALI

5.1 Premessa

Le prove effettuate nel DIISM, con il forno solare a scatola sono:

- a vuoto, svolte precedentemente dai colleghi Andre Pio Concettini [13] e Alessandro Del Re [9] per individuare le prestazioni del forno, in particolare la temperatura massima raggiunta;
- a carico, utilizzando l'olio silconico, per poterle confrontare con le prove successive con PCM, Fig. 5.1;
- con accumulo termico, utilizzando xilitolo e mannitolo come dispositivo di accumulo termico, sfruttando le caratteristiche delle pentola a doppio fondo.

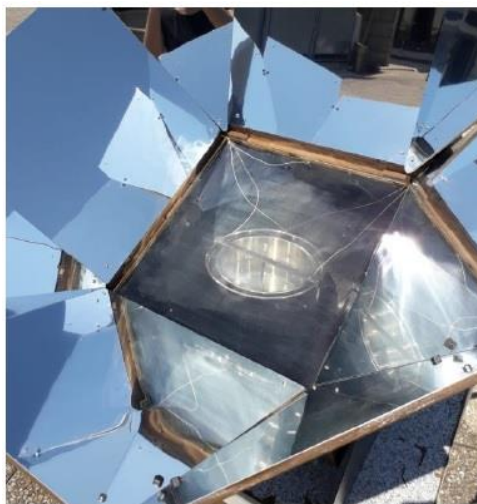


Fig. 5.1 – Forno solare durante la prova a carico

5.2 Prove con accumulo termico con PCM xilitolo e mannitolo

La pentola per questi test, come precedentemente detto, è composta da 2 kg di olio silconico e PCM, che nel nostro caso è 1,25 kg di xilitolo ed 1,25 kg di mannitolo, per un totale di 2,5 kg di materiale per l'accumulo termico.

In questo test, come nei test precedenti, sono state misurate le stesse temperature con l'aggiunta di quella del PCM:

- temperatura dell'ambiente, T_{amb} in °C;
- temperatura del 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/m²;
- temperatura PCM (destra), T_{pcm1} in °C;
- temperatura PCM (sinistra), T_{pcm2} in °C.

La prova consiste nel far salire la temperatura dell'olio fino a 110 °C per poi nascondere il forno dalla radiazione solare e dare inizio alla fase di raffreddamento che sarà terminata quando la temperatura sarà scesa a 80 °C.

In questa seconda fase è possibile scollegare il pireliometro.

Prova del 12 settembre 2019

Il test ha avuto inizio circa alle 11:00 ed è terminato alle 16.30 circa.

La fase di riscaldamento viene considerata quando l'olio arriva ai 60 °C fino ai 100 °C, impiegando circa 2 ore e mezza per passare dalla T_1 alla T_2 .

La radiazione solare media è stata di 677,35 W/m², mentre la temperatura ambiente è stata di circa 25,35 °C.

Giunto alla temperatura necessaria, inizia la fase di raffreddamento, che terminerà quando la temperatura raggiungerà gli 80 °C, impiegando circa 2 ore e mezza.

Tab. 5.1 – Dati rilevati e riportati in Excel (prova 12/09/2019)

	DNI Media (Wm2)	Tamb Media (C)	Tg Media (C)	Ta Media (C)	TPCMdx Media (C)	TPCMsx Media (C)	Tf1 Media (C)	Tf2 Media (C)
2019-09-12T11:03:47+02:00	703,78	23,78	91,06	46,16	44,08	44,88	38,69	22,91
2019-09-12T11:03:48+02:00	702,62	23,76	91,12	46,13	44,11	44,91	38,72	22,8
2019-09-12T11:03:49+02:00	701,79	23,77	91,2	46,1	44,13	44,93	38,73	22,73
2019-09-12T11:03:50+02:00	700,44	23,78	91,26	46,08	44,16	44,96	38,76	22,8
2019-09-12T11:03:51+02:00	698,84	23,78	91,27	46,07	44,18	44,98	38,77	22,62
2019-09-12T11:03:52+02:00	697,12	23,71	91,35	46,1	44,21	45,01	38,79	22,57
2019-09-12T11:03:53+02:00	695,44	23,67	91,43	46,12	44,23	45,03	38,8	22,6
2019-09-12T11:03:54+02:00	692,8	23,51	91,57	46,22	44,29	45,1	38,83	22,73
2019-09-12T11:03:55+02:00	691,98	23,46	91,64	46,24	44,32	45,13	38,85	22,66
2019-09-12T11:03:56+02:00	691,4	23,49	91,69	46,23	44,33	45,15	38,86	22,59
2019-09-12T11:03:57+02:00	690,88	23,44	91,75	46,25	44,35	45,18	38,88	22,49
2019-09-12T11:03:58+02:00	689,61	23,53	91,8	46,31	44,38	45,2	38,89	22,48
2019-09-12T11:03:59+02:00	688,16	23,54	91,83	46,36	44,4	45,23	38,91	22,53
2019-09-12T11:04:00+02:00	685,42	23,48	91,91	46,38	44,43	45,25	38,92	22,46
2019-09-12T11:04:01+02:00	682,76	23,49	91,96	46,35	44,45	45,28	38,92	22,47
2019-09-12T11:04:02+02:00	681,16	23,42	92,01	46,33	44,48	45,3	38,94	22,64
2019-09-12T11:04:03+02:00	679,62	23,38	92,12	46,37	44,52	45,36	38,96	22,49
2019-09-12T11:04:04+02:00	678,34	23,43	92,18	46,38	44,54	45,38	38,99	22,68
2019-09-12T11:04:05+02:00	676,35	23,5	92,2	46,43	44,57	45,41	39	22,78
2019-09-12T11:04:06+02:00	674,03	23,64	92,22	46,44	44,59	45,44	39,02	22,74
2019-09-12T11:04:07+02:00	671,1	23,77	92,29	46,47	44,62	45,47	39,03	22,6
2019-09-12T11:04:08+02:00	669,44	23,82	92,36	46,54	44,65	45,5	39,04	22,83
2019-09-12T11:04:09+02:00	667,28	23,9	92,39	46,56	44,67	45,53	39,06	22,74
2019-09-12T11:04:10+02:00	663,66	23,93	92,46	46,64	44,7	45,55	39,07	22,76
2019-09-12T11:04:11+02:00	660,39	23,97	92,44	46,66	44,72	45,56	39,07	22,62
2019-09-12T11:04:12+02:00	657,07	23,87	92,55	46,66	44,77	45,62	39,11	22,65
2019-09-12T11:04:13+02:00	656,33	23,76	92,63	46,67	44,79	45,66	39,12	22,49
2019-09-12T11:04:14+02:00	653,55	23,72	92,65	46,65	44,82	45,67	39,14	22,61
2019-09-12T11:04:15+02:00	648,92	23,66	92,69	46,66	44,84	45,71	39,15	22,51
2019-09-12T11:04:16+02:00	642,18	23,74	92,72	46,71	44,87	45,74	39,15	22,59
2019-09-12T11:04:17+02:00	637,17	23,76	92,77	46,76	44,89	45,76	39,17	22,66
2019-09-12T11:04:18+02:00	632,5	23,82	92,8	46,76	44,92	45,78	39,13	22,6
2019-09-12T11:04:19+02:00	628,92	23,59	92,79	46,77	44,93	45,82	39,12	22,68

Nell'immagine successiva individuiamo l'andamento delle temperature in rapporto alla radiazione solare misurata, Fig. 5.2.

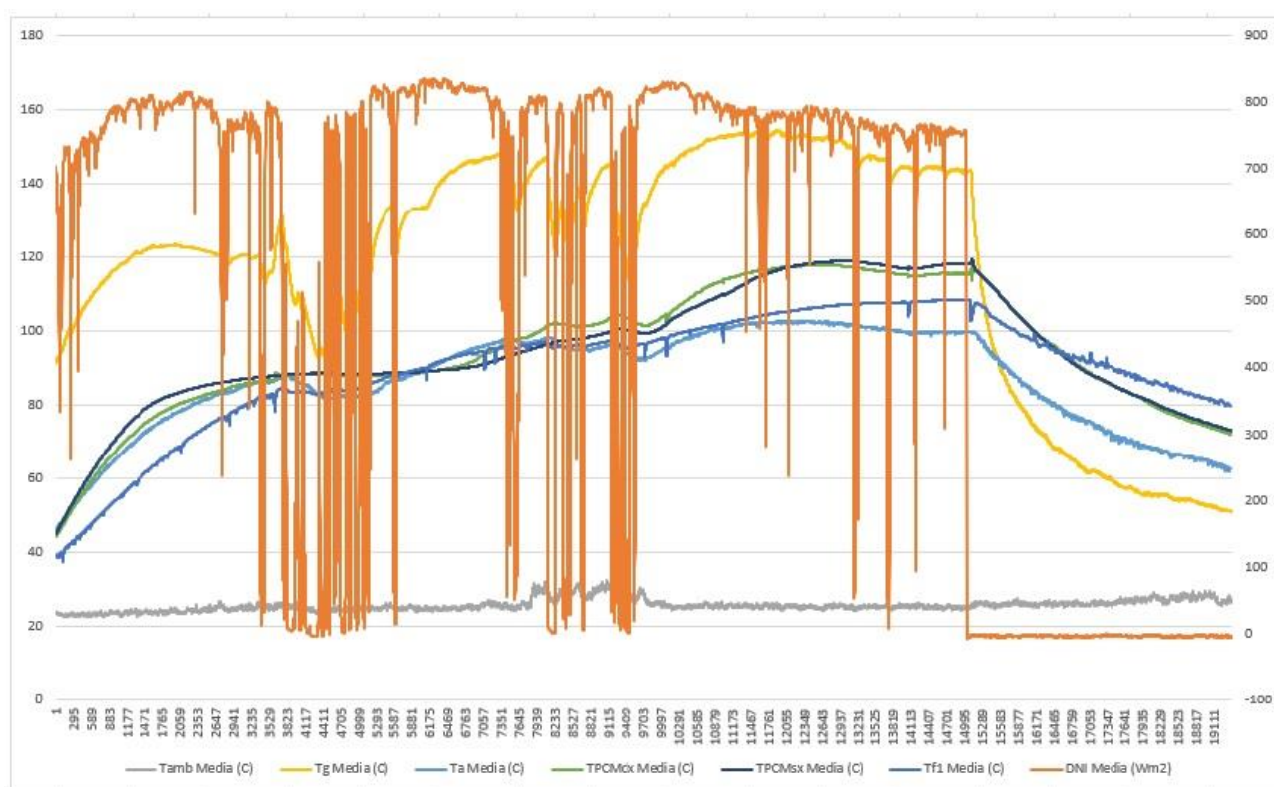


Fig. 5.2 – Grafico delle rilevazioni (prova 12/09/2019)

I dati raccolti ed i successivi calcoli sono stati svolti tramite il programma Excel.

Tab. 5.2 – Elaborazione dati (prova 12/09/2019)

RISCALDAMENTO		RAFFREDDAMENTO	
Test	1	Test	1
Data	12/09/2019	Data	12/09/2019
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)	677,35	$T_{amb,av}$ (°C)	25,93
$T_{amb,av}$ (°C)	25,69	Δt_c (h)	2,45
Δt_h (h)	2,52		
t_s ($h m^2/kg$)	1,26		
t_{ch} ($h m^2/kg$)	0,88		
η_{av}	0,05		
F2	0,09		

Prova del 13 settembre 2019

Il test ha avuto inizio circa alle 9:40 ed è terminato alle 14:40 circa.

La fase di riscaldamento viene considerata quando l'olio arriva ai 60 °C fino ai 100 °C, impiegando circa 2 ore e 25 minuti per passare dalla T₁ alla T₂.

La radiazione solare media è stata di 752,21 W/m², mentre la temperatura ambiente è stata di circa 23,91 °C.

Giunto alla temperatura necessaria, inizia la fase di raffreddamento, che terminerà quando la temperatura raggiungerà gli 80 °C, impiegando circa 1 ora.

Tab. 5.3 – Dati rilevati e riportati in Excel (prova 13/09/2019)

	DNI Media (Wm2)	Tamb Media (C)	Tg Media (C)	Ta Media (C)	TPCMdx Media (C)	TPCMsx Media (C)	Tf1 Media (C)	Tf2 Media (C)
2019-09-13T09:38:22	678,07	23,3	77,56	30,05	28	28,48	32,15	25,13
2019-09-13T09:38:23	678,07	23,3	77,56	30,05	28	28,48	32,15	25,13
2019-09-13T09:38:24	678,07	23,3	77,56	30,05	28	28,48	32,15	25,13
2019-09-13T09:38:25	678,22	23,3	77,61	30,07	28,03	28,5	32,17	24,98
2019-09-13T09:38:26	678,14	23,35	77,68	30,19	28,03	28,5	32,2	24,92
2019-09-13T09:38:27	678,38	23,44	77,77	30,25	28,06	28,53	32,24	25,09
2019-09-13T09:38:28	678,48	23,56	77,86	30,25	28,08	28,55	32,29	24,99
2019-09-13T09:38:29	678,46	23,64	77,95	30,22	28,1	28,56	32,33	25,04
2019-09-13T09:38:30	678,6	23,7	78,03	30,2	28,11	28,57	32,35	24,8
2019-09-13T09:38:31	678,65	23,74	78,09	30,21	28,12	28,58	32,37	24,81
2019-09-13T09:38:32	678,75	23,8	78,18	30,23	28,14	28,59	32,4	24,85
2019-09-13T09:38:33	678,79	23,86	78,24	30,22	28,17	28,61	32,42	24,97
2019-09-13T09:38:34	679,01	23,91	78,31	30,23	28,17	28,62	32,44	25,05
2019-09-13T09:38:35	679,06	23,99	78,38	30,3	28,2	28,64	32,47	25,03
2019-09-13T09:38:36	679,09	24,07	78,45	30,29	28,22	28,65	32,49	25,17
2019-09-13T09:38:37	679,32	24,13	78,58	30,27	28,24	28,67	32,52	25,14
2019-09-13T09:38:38	679,67	24,21	78,7	30,33	28,27	28,7	32,56	25,14
2019-09-13T09:38:39	679,86	24,25	78,76	30,41	28,29	28,72	32,58	25,1
2019-09-13T09:38:40	680,01	24,26	78,85	30,42	28,3	28,72	32,59	24,87
2019-09-13T09:38:41	680,07	24,27	78,91	30,49	28,31	28,74	32,61	25,01
2019-09-13T09:38:42	680,07	24,23	78,99	30,57	28,33	28,77	32,64	24,98
2019-09-13T09:38:43	680,05	24,18	79,07	30,61	28,36	28,77	32,64	25,05
2019-09-13T09:38:44	680,12	24,17	79,12	30,71	28,38	28,79	32,68	24,94
2019-09-13T09:38:45	680,15	24,16	79,16	30,77	28,39	28,8	32,7	24,95
2019-09-13T09:38:46	680,24	24,12	79,29	30,72	28,41	28,83	32,72	24,8
2019-09-13T09:38:47	680,27	23,91	79,39	30,79	28,44	28,84	32,74	24,87
2019-09-13T09:38:48	680,32	23,87	79,48	30,83	28,46	28,87	32,77	25,02
2019-09-13T09:38:49	680,54	23,86	79,57	30,76	28,49	28,89	32,8	24,88
2019-09-13T09:38:50	680,56	23,87	79,62	30,73	28,5	28,91	32,81	24,73
2019-09-13T09:38:51	680,56	23,86	79,7	30,73	28,53	28,93	32,84	25,1
2019-09-13T09:38:52	680,58	23,83	79,77	30,74	28,55	28,94	32,86	25,05
2019-09-13T09:38:53	680,78	23,72	79,84	30,76	28,57	28,96	32,88	24,95
2019-09-13T09:38:54	680,94	23,67	79,93	30,82	28,59	28,97	32,9	25,03

Nell'immagine successiva individuiamo le temperature in relazione alla radiazione solare.

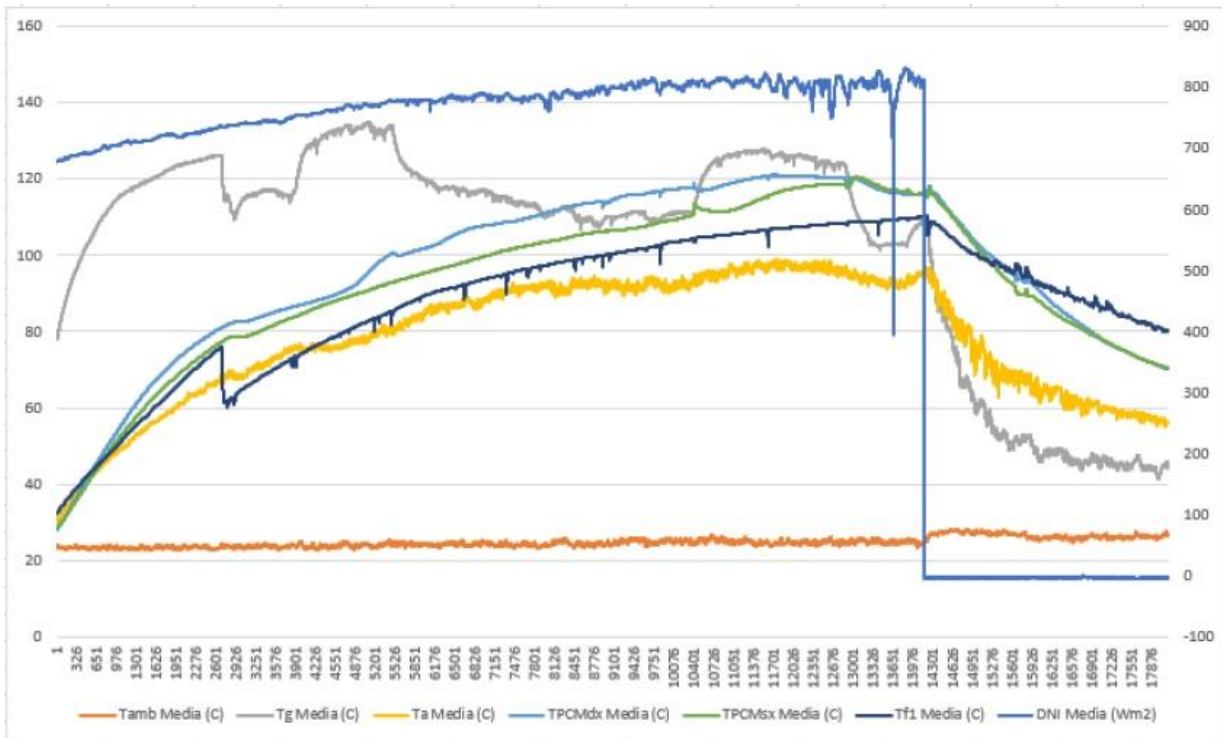


Fig. 5.3 – Grafico delle rilevazioni (prova 13/09/2019)

I dati raccolti ed i successivi calcoli sono stati svolti tramite il programma Excel.

Tab. 5.4 – Elaborazione dati (prova 13/09/2019)

RISCALDAMENTO		RAFFREDDAMENTO	
Test	2	Test	2
Data	13/09/2019	Data	13/09/2019
m_{PCM} (kg)	2,5	m_{PCM} (kg)	2,5
m_f (kg)	2	m_f (kg)	2
T1 (°C)	60	T2 (°C)	100
T2 (°C)	100	T3 (°C)	80
DNI_{av} (W/m^2)	752,71	$T_{amb,av}$ (°C)	25,54
$T_{amb,av}$ (°C)	23,91	Δt_c (h)	2,57
Δt_h (h)	2,02		
t_s ($h m^2/kg$)	1,01		
t_{ch} ($h m^2/kg$)	0,84		
η_{av}	0,05		
F2	0,08		

Prova del 16 settembre 2019

Il test ha avuto inizio circa alle 9:20 ed è terminato alle 14:45 circa.

La fase di riscaldamento viene considerata quando l'olio arriva ai 60 °C fino ai 100 °C, impiegando circa 1 ora e 5 minuti per passare dalla T₁ alla T₂.

La radiazione solare media è stata di 536,92 W/m², mentre la temperatura ambiente è stata di circa 23,91 °C.

Giunto alla temperatura necessaria, inizia la fase di raffreddamento, che terminerà quando la temperatura raggiungerà gli 80 °C, impiegando circa 50 minuti.

Tab. 5.5 – Dati rilevati e riportati in Excel (prova 16/09/2019)

	DNI Media (Wm2)	Tamb Media (C)	Tg Media (C)	Ta Media (C)	TPCMdx Media (C)	TPCMsx Media (C)	Tf1 Media (C)	Tf2 Media (C)
2019-09-16T09:20:27	713,87	28,15	52,42	34,42	33,65	29,54	28,24	30,32
2019-09-16T09:20:28	713,87	28,15	52,42	34,42	33,65	29,54	28,24	30,32
2019-09-16T09:20:29	713,87	28,15	52,42	34,42	33,65	29,54	28,24	30,32
2019-09-16T09:20:30	713,56	28,2	52,58	34,42	33,65	29,56	28,28	30,28
2019-09-16T09:20:31	713,41	28,33	52,75	34,43	33,67	29,59	28,31	30,33
2019-09-16T09:20:32	713,47	28,42	52,87	34,43	33,68	29,6	28,32	30,31
2019-09-16T09:20:33	713,33	28,43	52,99	34,44	33,69	29,6	28,36	30,17
2019-09-16T09:20:34	712,92	28,41	53,1	34,44	33,69	29,63	28,38	30,26
2019-09-16T09:20:35	713,12	28,44	53,21	34,44	33,69	29,64	28,39	30,08
2019-09-16T09:20:36	712,52	28,42	53,41	34,45	33,72	29,67	28,43	30,08
2019-09-16T09:20:37	712,27	28,44	53,59	34,47	33,75	29,7	28,47	30,09
2019-09-16T09:20:38	712,14	28,49	53,78	34,47	33,76	29,72	28,5	30,2
2019-09-16T09:20:39	712,14	28,49	53,78	34,47	33,76	29,72	28,5	30,2
2019-09-16T09:20:40	712,07	28,53	53,97	34,48	33,78	29,75	28,53	30,18
2019-09-16T09:20:41	711,78	28,46	54,08	34,47	33,78	29,76	28,55	30,1
2019-09-16T09:20:42	711,27	28,5	54,2	34,47	33,79	29,77	28,55	30,02
2019-09-16T09:20:43	711,01	28,5	54,33	34,49	33,8	29,79	28,58	30,14
2019-09-16T09:20:44	710,89	28,36	54,45	34,49	33,81	29,81	28,6	30,21
2019-09-16T09:20:45	710,84	28,37	54,59	34,51	33,82	29,82	28,62	30,06
2019-09-16T09:20:46	710,82	28,47	54,71	34,52	33,84	29,85	28,64	30,15
2019-09-16T09:20:47	710,62	28,59	54,9	34,52	33,85	29,86	28,66	30,02
2019-09-16T09:20:48	710,35	28,7	55,09	34,53	33,87	29,89	28,69	30,13
2019-09-16T09:20:49	710,14	28,76	55,22	34,54	33,88	29,92	28,71	30,13
2019-09-16T09:20:50	709,66	28,65	55,34	34,55	33,89	29,94	28,73	30,1
2019-09-16T09:20:51	709,6	28,65	55,48	34,56	33,91	29,96	28,75	30,3
2019-09-16T09:20:52	709,37	28,64	55,6	34,55	33,91	29,97	28,75	30,2
2019-09-16T09:20:53	709,19	28,53	55,73	34,54	33,91	29,97	28,76	30,17
2019-09-16T09:20:54	709,17	28,57	55,86	34,55	33,93	30	28,78	30,27
2019-09-16T09:20:55	708,96	28,48	55,99	34,56	33,94	30,02	28,8	30,22
2019-09-16T09:20:56	708,67	28,33	56,11	34,56	33,94	30,02	28,81	30,06
2019-09-16T09:20:57	708,45	28,31	56,31	34,58	33,97	30,06	28,83	29,93
2019-09-16T09:20:58	708,18	28,39	56,49	34,59	33,98	30,07	28,85	30,11
2019-09-16T09:20:59	707,84	28,42	56,63	34,59	33,98	30,09	28,86	29,87

Nell'immagine successiva individuiamo le temperature in relazione alla radiazione solare.

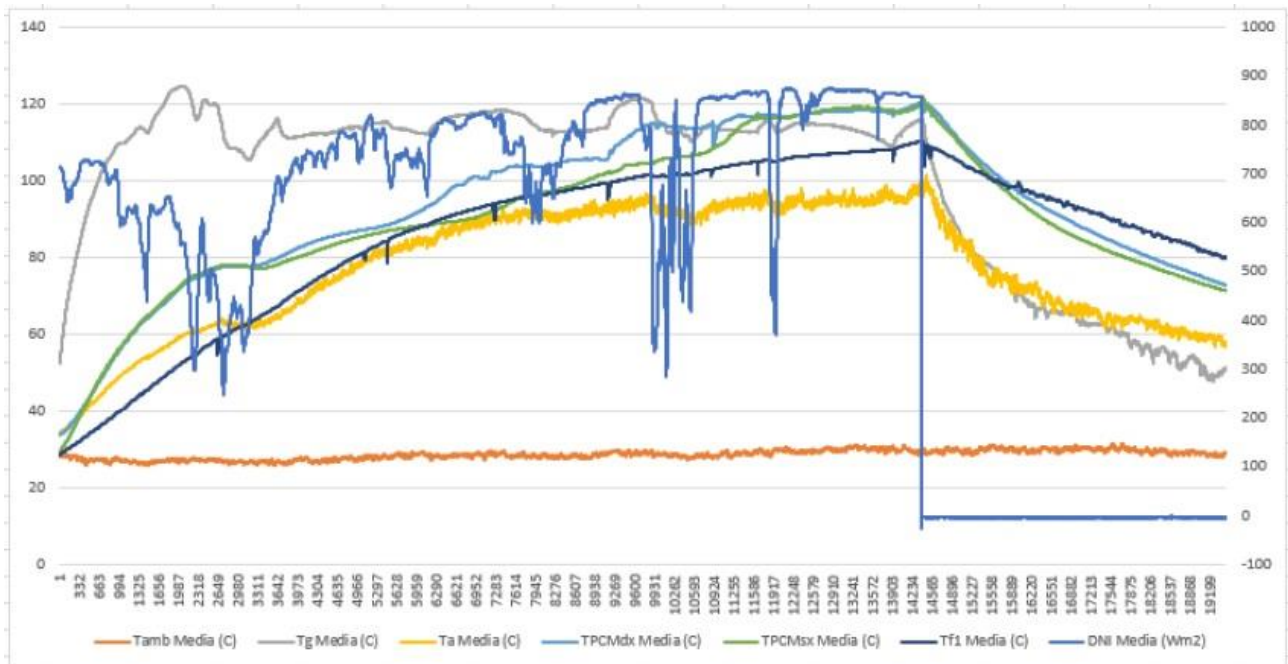


Fig. 5.4 – Grafico delle rilevazioni (prova 16/09/2019)

I dati raccolti ed i successivi calcoli sono stati svolti tramite il programma Excel.

Tab. 5.6 – Elaborazione dati (prova 16/09/2019)

RISCALDAMENTO		RAFFREDDAMENTO	
Test	3	Test	3
Data	16/09/2019	Data	16/09/2019
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)	536,92	$T_{amb,av}$ (°C)	29,45
$T_{amb,av}$ (°C)	28,04	Δt_c (h)	2,78
Δt_h (h)	1,82		
t_s (h m ² /kg)	0,91		
t_{ch} (h m ² /kg)	0,54		
η_{av}	0,08		
F2	0,17		

Prova del 17 settembre 2019

Il test ha avuto inizio circa alle 9:10 ed è terminato alle 13:20 circa.

La fase di riscaldamento viene considerata quando l'olio arriva ai 60 °C fino ai 100 °C, impiegando circa 1 ora e 15 minuti per passare dalla T₁ alla T₂.

La radiazione solare media è stata di 775,46 W/m², mentre la temperatura ambiente è stata di circa 28,07 °C.

Giunto alla temperatura necessaria, inizia la fase di raffreddamento, che terminerà quando la temperatura raggiungerà gli 80 °C, impiegando circa 1 ora.

Tab. 5.7 – Dati rilevati e riportati in Excel (prova 17/09/2019)

	DNI Media (Wm2)	Tamb Media (C)	Tg Media (C)	Ta Media (C)	TPCMdx Media (C)	TPCMsx Media (C)	Tf1 Media (C)	Tf2 Media (C)
2019-09-17T09:10:28	653,49	29,01	64,07	27,5	26,14	25,49	39,66	27,9
2019-09-17T09:10:29	653,64	29,02	64,26	27,53	26,18	25,52	39,75	28,03
2019-09-17T09:10:30	653,66	29,03	64,43	27,52	26,19	25,53	39,84	27,7
2019-09-17T09:10:31	653,66	29,03	64,43	27,52	26,19	25,53	39,84	27,7
2019-09-17T09:10:32	653,71	29	64,66	27,5	26,22	25,55	39,94	27,69
2019-09-17T09:10:33	653,72	28,94	64,79	27,48	26,23	25,56	39,98	27,73
2019-09-17T09:10:34	653,62	28,93	64,89	27,46	26,25	25,58	40,03	27,68
2019-09-17T09:10:35	653,43	28,85	64,99	27,44	26,26	25,59	40,06	27,69
2019-09-17T09:10:36	653,64	28,82	65,12	27,43	26,28	25,6	40,11	27,64
2019-09-17T09:10:37	653,76	28,8	65,31	27,4	26,3	25,62	40,22	27,65
2019-09-17T09:10:38	653,79	28,85	65,51	27,37	26,32	25,64	40,33	27,66
2019-09-17T09:10:39	653,86	28,88	65,64	27,39	26,34	25,66	40,44	27,64
2019-09-17T09:10:40	654,03	28,83	65,76	27,44	26,36	25,67	40,49	27,71
2019-09-17T09:10:41	654,32	28,74	65,87	27,48	26,38	25,69	40,5	27,86
2019-09-17T09:10:42	654,32	28,72	65,98	27,49	26,38	25,69	40,52	27,77
2019-09-17T09:10:43	654,12	28,73	66,07	27,49	26,39	25,7	40,59	27,64
2019-09-17T09:10:44	653,96	28,72	66,19	27,49	26,41	25,72	40,67	27,51
2019-09-17T09:10:45	653,86	28,7	66,3	27,48	26,43	25,73	40,71	27,47
2019-09-17T09:10:46	654,05	28,67	66,46	27,47	26,45	25,76	40,77	27,61
2019-09-17T09:10:47	653,98	28,6	66,63	27,51	26,47	25,78	40,87	27,6
2019-09-17T09:10:48	654,08	28,59	66,74	27,55	26,49	25,79	40,96	27,65
2019-09-17T09:10:49	654,12	28,61	66,84	27,63	26,51	25,82	41,02	27,77
2019-09-17T09:10:50	654,18	28,62	66,97	27,69	26,52	25,83	41,05	27,72
2019-09-17T09:10:51	654,22	28,62	67,09	27,7	26,54	25,85	41,12	27,63
2019-09-17T09:10:52	654,18	28,64	67,16	27,7	26,55	25,85	41,19	27,57
2019-09-17T09:10:53	654,12	28,68	67,25	27,7	26,56	25,87	41,26	27,67
2019-09-17T09:10:54	653,98	28,7	67,38	27,7	26,57	25,87	41,32	27,6
2019-09-17T09:10:55	654,14	28,76	67,55	27,72	26,61	25,92	41,43	27,91
2019-09-17T09:10:56	654	28,81	67,7	27,75	26,64	25,94	41,48	27,78
2019-09-17T09:10:57	653,93	28,83	67,81	27,75	26,65	25,95	41,57	27,75
2019-09-17T09:10:58	653,89	28,83	67,88	27,74	26,66	25,96	41,6	27,61
2019-09-17T09:10:59	654,03	28,83	68	27,78	26,68	25,99	41,66	27,82
2019-09-17T09:11:00	653,88	28,84	68,11	27,82	26,69	25,99	41,71	27,72

Nell'immagine successiva individuiamo le temperature in relazione alla radiazione solare.

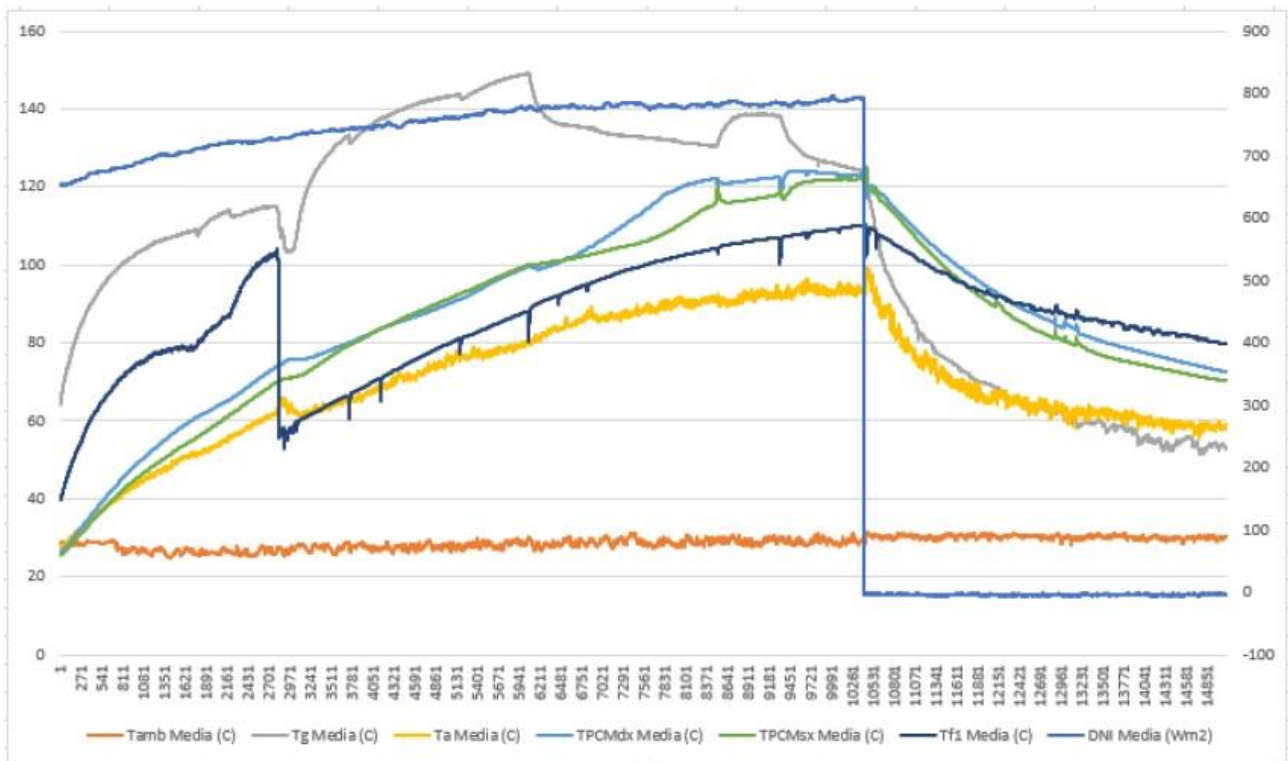


Fig. 5.5 – Grafico delle rilevazioni (prova 17/09/2019)

I dati raccolti ed i successivi calcoli sono stati svolti tramite il programma Excel.

Tab. 5.8 – Elaborazione dati (prova 17/09/2019)

RISCALDAMENTO		RAFFREDDAMENTO	
Test	4	Test	4
Data	17/09/2019	Data	17/09/2019
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)	762,97	$T_{amb,av}$ (°C)	29,7
$T_{amb,av}$ (°C)	28,07	Δt_c (h)	2,07
Δt_h (h)	1,25		
t_s (h m ² /kg)	0,63		
t_{ch} (h m ² /kg)	0,53		
η_{av}	0,08		
F2	0,13		

Prova del 30 settembre 2019

Premessa: Nella prova effettuata il 30 settembre 2019, il fluido è arrivato alla temperatura massima di 125 °C, diversamente delle prove precedenti, il raffreddamento è stato interrotto a 85 °C.

Il test ha avuto inizio circa alle 9:35 ed è terminato alle 17:10 circa.

La fase di riscaldamento viene considerata quando l'olio arriva ai 60 °C fino ai 100 °C, impiegando circa 1 ora e mezza per passare dalla T_1 alla T_2 .

La radiazione solare media è stata di 786,91 W/m², mentre la temperatura ambiente è stata di circa 26,63 °C.

Giunto alla temperatura necessaria, inizia la fase di raffreddamento, che terminerà quando la temperatura raggiungerà gli 85 °C, impiegando circa 35 minuti.

Tab. 5.9 – Dati rilevati e riportati in Excel (prova 30/09/2019)

	DNI Media (Wm2)	Tamb Media (C)	Tg Media (C)	Ta Media (C)	TPCMdx Media (C)	TPCMsx Media (C)	Tf1 Media (C)	Tf2 Media (C)
2019-09-30T09:35:37	719,3	24,83	59,31	25,17	24,91	25,62	24,55	24,69
2019-09-30T09:35:38	719	24,79	59,46	25,22	24,93	25,65	24,56	24,71
2019-09-30T09:35:39	718,65	24,84	59,6	25,25	24,95	25,67	24,57	24,79
2019-09-30T09:35:40	718,8	24,83	59,69	25,28	24,95	25,68	24,58	24,71
2019-09-30T09:35:41	718,61	24,85	59,77	25,29	24,96	25,69	24,58	24,32
2019-09-30T09:35:42	718,26	24,87	59,87	25,29	24,97	25,7	24,58	24,37
2019-09-30T09:35:43	717,69	24,88	59,97	25,3	24,98	25,72	24,6	24,63
2019-09-30T09:35:44	717,17	24,82	60,06	25,32	24,99	25,74	24,61	24,74
2019-09-30T09:35:45	716,86	24,68	60,13	25,32	25	25,75	24,6	24,49
2019-09-30T09:35:46	716,43	24,69	60,21	25,32	24,99	25,76	24,61	24,66
2019-09-30T09:35:47	716,1	24,68	60,36	25,32	25,02	25,79	24,63	24,75
2019-09-30T09:35:48	715,77	24,56	60,48	25,33	25,03	25,81	24,64	24,73
2019-09-30T09:35:49	715,14	24,49	60,56	25,34	25,04	25,82	24,64	24,96
2019-09-30T09:35:50	714,69	24,4	60,65	25,36	25,04	25,83	24,64	24,72
2019-09-30T09:35:51	714,34	24,35	60,72	25,36	25,05	25,84	24,66	24,79
2019-09-30T09:35:52	713,96	24,33	60,81	25,37	25,06	25,87	24,66	24,66
2019-09-30T09:35:53	713,6	24,32	60,91	25,39	25,07	25,87	24,67	24,76
2019-09-30T09:35:54	713,04	24,27	61	25,41	25,07	25,89	24,67	24,66
2019-09-30T09:35:55	712,75	24,36	61,09	25,43	25,08	25,9	24,69	24,64
2019-09-30T09:35:56	711,06	24,37	61,2	25,46	25,1	25,92	24,69	24,59
2019-09-30T09:35:57	711,79	24,38	61,33	25,49	25,1	25,95	24,7	24,44
2019-09-30T09:35:58	711,52	24,35	61,4	25,5	25,11	25,94	24,69	24,33
2019-09-30T09:35:59	711,54	24,24	61,48	25,51	25,11	25,96	24,72	24,48
2019-09-30T09:36:00	711,68	24,2	61,56	25,51	25,13	25,98	24,72	24,45
2019-09-30T09:36:01	711,79	24,12	61,65	25,52	25,14	25,99	24,73	24,44
2019-09-30T09:36:02	711,91	24,15	61,74	25,55	25,14	26	24,74	24,68
2019-09-30T09:36:03	712,2	24,17	61,81	25,58	25,16	26,02	24,75	24,65
2019-09-30T09:36:04	712,24	24,15	61,9	25,61	25,17	26,03	24,76	24,7
2019-09-30T09:36:05	712,39	24,18	62,02	25,66	25,17	26,06	24,77	24,6
2019-09-30T09:36:06	712,49	24,23	62,13	25,68	25,19	26,08	24,79	24,61
2019-09-30T09:36:07	712,72	24,22	62,2	25,69	25,19	26,09	24,79	24,5
2019-09-30T09:36:08	712,75	24,26	62,3	25,7	25,2	26,1	24,8	24,41
2019-09-30T09:36:09	713,16	24,24	62,38	25,69	25,21	26,13	24,81	24,43

Nell'immagine successiva individuiamo le temperature in relazione alla radiazione solare.

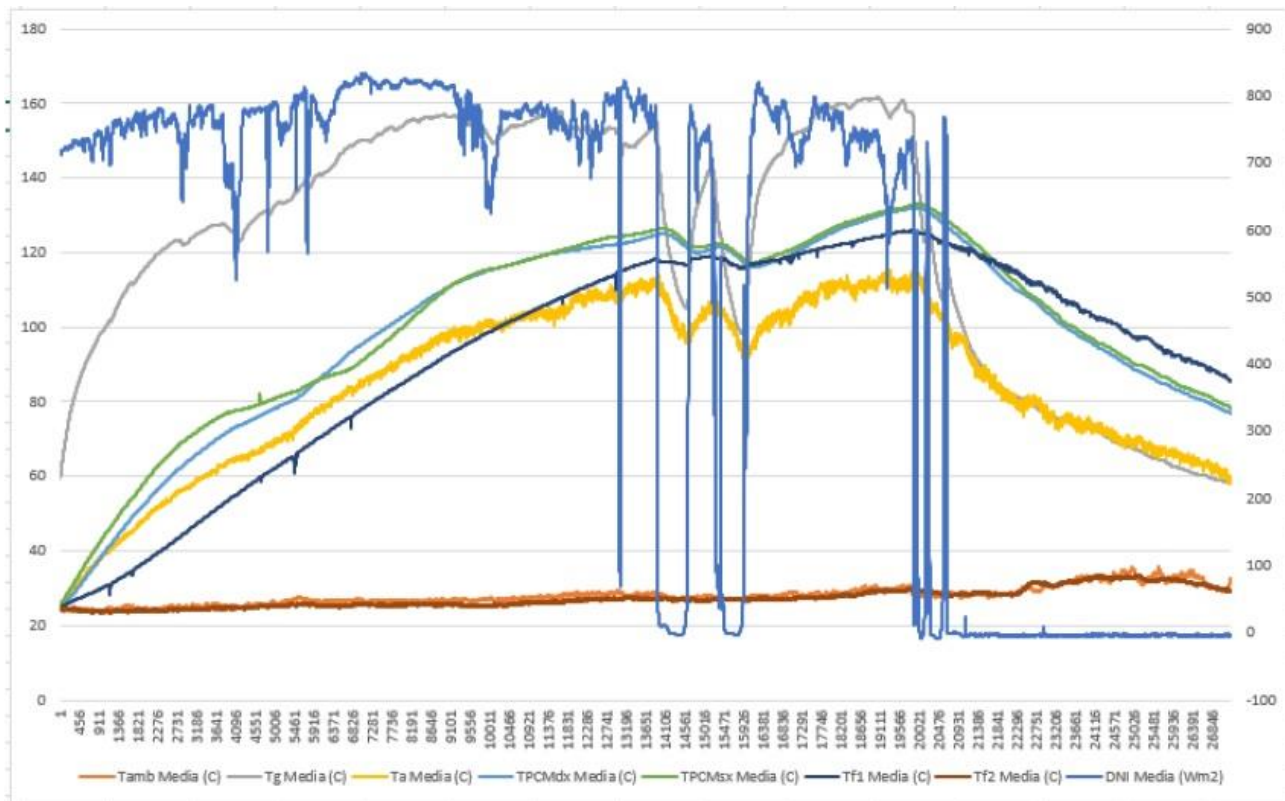


Fig. 5.6 – Grafico delle rilevazioni (prova 30/09/2019)

I dati raccolti ed i successivi calcoli sono stati svolti tramite il programma Excel.

Tab. 5.10 – Elaborazione dati (prova 30/09/2019)

RISCALDAMENTO		RAFFREDDAMENTO	
Test	5	Test	5
Data	30/09/2019	Data	30/09/2019
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)	85
DNI_{av} (W/m ²)	786,91	$T_{amb,av}$ (°C)	29,32
$T_{amb,av}$ (°C)	26,63	Δt_c (h)	4,73
Δt_h (h)	1,53		
t_s (h m ² /kg)	0,77		
t_{ch} (h m ² /kg)	0,67		
η_{av}	0,07		
F2	0,1		

5.3 Confronto dati

Avendo utilizzato lo stesso range di temperature sia in fase di riscaldamento (60-100 °C) che si raffreddamento (100-80 °C) è possibile confrontare i dati e per effettuarlo in maniera più accurata, distinguiamo la fase di riscaldamento da quello di raffreddamento.

5.3.1 Fase di riscaldamento

Nella seguente tabella vengono confrontati i dati delle prove svolte.

Il PCM, composto da xilitolo e mannitolo, è di aiuto al sistema in quanto: nelle giornate con radiazione solare incostante e bassa, gli sbalzi di potenza sono stati ridotti.

Questa funzione è detta “Buffering”: il PCM quindi garantisce una potenza costante durante la cottura del cibo.

Tab. 5.11 – Riassunto della fase di riscaldamento

Prova	1	2	3	4	5
Data (2019)	12/09	13/09	17/09	18/09	30/09
m_{PCM}	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
mf (kg)	2	2	2	2	2
T1 (°C)	60	60	60	60	60
T2 (°C)	100	100	100	100	100
DNI,av (W/m²)	677,35	752,71	536,92	762,97	786,91
Tamb,av (°C)	25,69	23,91	28,04	28,07	26,63
Δth (h)	2,52	2,02	1,82	1,25	1,53
ts (h m²/kg)	1,26	1,01	0,91	0,63	0,77
tch (h m²/kg)	0,88	0,84	0,54	0,53	0,67
ηav	0,05	0,05	0,08	0,08	0,07
F2	0,09	0,08	0,17	0,13	0,10

5.3.2 Fase di raffreddamento

L'effetto dell'accumulo termico, si percepisce nel tempo di raffreddamento infatti, rispetto alle prove in cui i nostri colleghi hanno utilizzato solo lo xilitolo, notiamo che il tempo che impiega l'olio a scendere di 20 °C è maggiore rispetto al primo caso con solo un materiale di accumulo. Questo avviene grazie al mannitolo che ha un punto più alto di fusione, per cui il cambiamento di fase avviene ad una temperatura più alta, consentendo quindi di cuocere il cibo anche nelle ore di assenza di radiazione solare.

Tab. 5.12 – Riassunto della fase di raffreddamento

Prova	1	2	3	4	5
Data (2019)	12/09	13/09	16/09	17/09	30/09
m_{PCM}	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
mf (kg)	2	2	2	2	2
T2 (°C)	100	100	100	100	100
T3 (°C)	80	80	80	80	85
T_{amb,av} (°C)	25,93	25,54	29,45	29,70	29,32
Δtc (h)	2,45	2,57	2,78	2,07	4,73

CAPITOLO 6

CONCLUSIONI

L'obiettivo di questa tesi è stato quello di acquisire e analizzare i dati derivati dai test sperimentali, tramite il forno solare a media efficienza, realizzato nel DIISM della nostra facoltà, con PCM.

Il forno solare ha il vantaggio di utilizzare energia rinnovabile e non inquinante per la cottura del cibo, ma, allo stesso tempo, presenta lo svantaggio di non poter essere usato in assenza di radiazione solare come in caso di mal tempo o di notte.

Nasce quindi l'esigenza di studiare una soluzione, ovvero l'utilizzo di accumulo termico.

Durante le prove non ci sono stati problemi, infatti anche in presenza di radiazione solare non molto alta, i risultati sono stati soddisfacenti.

La cottura tramite forno solare è in costante sviluppo, infatti si continua a cercare un materiale a cambiamento di fase che permetta l'uso del forno a scatola al massimo delle sue potenzialità, in quanto il livello di efficienza non dipende solo dalla radiazione solare ma anche dalla validità del PCM.

Le continue ricerche in questo campo permetteranno di ridurre l'utilizzo di energia non rinnovabile e quindi inquinante per il nostro pianeta, permettendo anche di allargare il campo di utilizzo.

Speriamo che nel futuro si potrà parlare di indipendenza energetica ed eco sostenibilità totale in ogni campo.

BIBLIOGRAFIA

[1] - Scripps Institution of Oceanography.

<https://scripps.ucsd.edu/>

[2] - Emissioni CO₂ nella storia

<https://www.qualenergia.it/articoli/emissioni-di-co2-ai-massimi-livelli-della-storia-nel-2018/>

[3] - Eurostat Statistics Explained.

https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Main_Page

[4] - Fonti rinnovabili

<https://www.greenplanner.it/energie-rinnovabili/>

[5] - Polo Solare Organico della Regione Lazio (CHOSE).

<http://www.chose.uniroma2.it/energia/46-definizione-di-energia.html>

[6] - H Schweiger, J F. Mendes, N Benz, K Hennecke, G Prieto, M Gusi, and H Gonçalves. “The potential of solar heat in industrial processes. A state of the art review for Spain and Portugal”.

In: Proceedings of Eurosun, Copenhagen, Denmark, 2000.

[7] - SP Sukhatme and JK Nayak. Solar Energy: Principles of Thermal Collection and Storage. Tata McGraw-Hill Publishing Company, 2008.

[8] - Erdem Cuce, Pinar Mert Cuce, A comprehensive review on solar cookers. Applied Energy 2012; Elsevier, vol. 102: pp. 1399-1421.

[9] - Progettazione e realizzazione di un prototipo di forno solare a scatola con specchi riflettenti multipli, Alessandro Del Re. Tesi di laurea triennale, discussa presso l’Università Politecnica delle Marche, 2016/2017.

[10] - F. Yettou, B. Azoui, A. Malek, A. Gama, N.L. Panwar, Solar cooker realizations in actual use: An overview. Renewable and Sustainable Energy Reviews vol. 37 (2014); Elsevier, pp. 288-306.

[11] - 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), pp. 1497-1508.

[12] - G. Crovatto, “Forno a media efficienza”.

<http://digilander.libero.it/giannicrovatto/f-meff.htm>

[13] - Analisi dei risultati delle prove sperimentali di un prototipo di forno solare a scatola con specchi riflettenti multipli, Andre Pio Concettini, Tesi di laurea triennale, discussa presso l’Università Politecnica delle Marche, 2016/2017.

- [14] - Scheda tecnica, SOLKOTE HI/SORB-II, Selective Solar Coating.
<https://www.solec.org/solkote/solkote-technical-specifications/>
- [15] - A. Abhat - "Short term thermal energy storage " - Revue de Physique Appliquee, 1980, 15 (3), pp.477-501.
<http://horizon2020-story.eu/short-and-long-term-thermal-energy-storage-in-a-residential-setting/#>
- [16] - 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].
- [17] - MyGreenBuildings.org.
<http://www.mygreenbuildings.org/2014/12/09/materiali-a-cambiamento-di-fase-pcm-riqualificazione-energetica.html>
- [18] - Mohammed M. Farid, Amar M. Khudhair, Siddique Ali K. Razack, Said Al-Hallaj "A review on phase change energy storage: materials and applications" - Energy Conversion and Management vol. 45 (2004), pp. 1597 - 1615.
- [19] - PCM Principi di funzionamento Applicazioni industriali generali. Massimiliano Gradi.
http://www.centrocot.it/download/pub/ctc_3/PresentazioneMassimilianoGradi.pdf
- [20] - Stephan Höhle; Andreas König-Haagen; Dieter Brüggemann, "Thermophysical Characterization of MgCl₂·6H₂O, Xylitol and Erythritol as Phase Change Materials (PCM) for Latent Heat Thermal Energy Storage (LHTES)" Thomas Fiedler 2017.
- [21] - Kaizawa, A.; Maruoka, N.; Kawai, A.; Kamano, H.; Jozuka, T.; Senda, T.; Akiyama, T. Thermophysical and heat transfer properties of phase change material candidate for waste heat transportation system. Heat Mass Transf. 2007, vol. 44, pp. 763 - 769.
- [22] – Coccia, G., Di Nicola, G., Tomassetti, S., Gabrielli, G., Chieruzzi, M., & Pierantozzi, M. (2017, November) - "Experimental characterization of a solar cooker with thermal energy storage based on solar salt". In Journal of Physics: Conference Series (Vol. 923, No. 1, p. 012048)
- [23] - Klemens Schwarzer, Maria Eugenia Vieira da Silva, "Solar cooking system with or without heat storage for families and institutions" - Solar Energy 75 (2003), pp. 35 – 41
- [24] - 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); vol. 30, pp. 1861-1871.
- [25] - Scheda tecnica, The Eppley Laboratory.
<http://www.eppleylab.com/>

Un grande ringraziamento al Prof. Giovanni Di Nicola e all'Ing. Gianluca Cocca,
PhD, per avermi seguito e supportato nella realizzazione di questo progetto.