

UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE



FACOLTÀ DI INGEGNERIA

LAUREA TRIENNALE

In Ingegneria Edile

**ANALISI DEI TEST SPERIMENTALI E CARATTERIZZAZIONE DI UN
PROTOTIPO DI FORNO SOLARE AD ELEVATO RAPPORTO DI
CONCENTRAZIONE**

*ANALYSIS OF EXPERIMENTAL TESTS AND CHARACTERIZATION OF A HIGH
CONCENTRATION RATIO SOLAR COOKER PROTOTYPE*

Relatore:

Prof. Giovanni Di Nicola

Candidato:

Nicola Bucciante

A.A. 2019/2020

INDICE

INTRODUZIONE	7
CAPITOLO 1: ENERGIA	8
1.1 DEFINIZIONE DI ENERGIA	9
1.2 FORME DI ENERGIA	10
1.2.1 Energia Meccanica	10
1.2.2 Energia Chimica	10
1.2.3 Energia Elettromagnetica	11
1.2.4 Energia Gravitazionale	11
1.2.5 Energia Termica	12
1.2.6 Energia Nucleare	12
1.3 FONTI DI ENERGIA NON RINNOVABILI	13
1.3.1 Combustibili Fossili.....	13
1.3.2 Energia Nucleare	14
1.4 FONTI DI ENERGIE RINNOVABILI	14
1.4.1 Energia Idroelettrica	14
1.4.2 Energia Mareomotrice	15
1.4.3 Energia Eolica.....	15
1.4.4 Energia Geotermica	16
1.4.5 Energia a Idrogeno.....	16
1.4.6 Energia a Biomasse	17
1.4.7 Energia Solare.....	17
CAPITOLO 2: FORNI SOLARI	20
2.1 TIPOLOGIE DI FORNI SOLARI	21
2.1.1 Forni Solari a Pannelli	22
2.1.2 Forni Solari Parabolici.....	23
2.1.3 Forni Solari a Scatola	24
2.1.4 Forni Solari ad Accumulo Termico	25
2.1.5 Forni Solari a Concentrazione	27

CAPITOLO 3: CONFORMAZIONE DEL FORNO SOLARE HELIAC.....	28
3.1 Premessa.....	28
3.2 Componenti Principali	29
3.2.1 Struttura Reticolare in Legno	29
3.2.2 Piano Cottura	31
3.2.3 Lente a Concentrazione	32
3.2.4 Superficie Riflettente.....	33
3.2.5 Copertura	34
3.3 Principio di Funzionamento	35
CAPITOLO 4: SETUP SPERIMENTALE	36
4.1 Premessa.....	36
4.2 Banco di Prova	36
4.2.1 Pireliometro	37
4.2.2 Termocoppie.....	39
4.2.3 Acquisitore Dati.....	40
4.2.3 Computer Portatile.....	41
4.3 Materiali Utilizzati	42
4.3.1 Il Supporto	42
4.3.2 I Fluidi	43
CAPITOLO 5: ACQUISIZIONE ED ELABORAZIONE DATI	46
5.1 Premessa.....	46
5.2 Procedura di Acquisizione Dati.....	46
5.3 Prove Sperimentali con Acqua.....	49
5.4 Prove Sperimentali con Olio Siliconico	60
5.5 Procedura di elaborazione dati	64
5.6 Elaborazione Dati.....	66
CAPITOLO 6: CONCLUSIONI	74
BIBLIOGRAFIA.....	77

Indice Figure

Figura 1 - Grafico Mix Energetico 1970 - 2050	8	
Figura 2 - Spettro Elettromagnetico	18	
Figura 3 - Tipologie di forno solare: (a) forno solare a pannelli; (b) forno solare parabolico; (c) forno solare a scatola	21	
Figura 4 - Forno solare a pannelli	22	
Figura 5- Forno solare parabolico	23	
Figura 6 - Forno solare a scatola	24	
Figura 7 - Dettagli	24	
Figura 8 - Pentola con doppio fondo per prove con PCM	Figura 9 - Schema intercapedine	26
Figura 10 - PCM: Confezione di Eritritolo	Figura 11- PCM: Confezione di Xilitolo	26
Figura 12 - Prototipo Heliac realizzato in laboratorio (DIISM)	28	
Figura 13- Schematizzazione della struttura	29	
Figura 14 - Assi in legno riciclato	Figura 15 - Verniciatura listelli	30
Figura 16 - Piano Cottura	31	
Figura 17 - Lente di materiale Polimerico	Figura 18 - Principio di Rifrazione	32
Figura 19 - Dinamica di Rifrazione	Figura 20 - Processo di Produzione	32
Figura 21 - Superficie Riflettente	33	
Figura 22 - Copertura per operatore	34	
Figura 23 - Schematizzazione del funzionamento di un forno Heliac	35	
Figura 24 - Schematizzazione banco di prova	37	
Figura 26 - Pireliometro	38	
Figura 27 - Termocoppia di Tipo T	39	
Figura 28 - Data Logger	40	
Figura 29 - Computer Portatile	41	
Figura 30 - Supporto per test sperimentali con fluidi	42	

INTRODUZIONE

Il lavoro di questa tesi è finalizzato allo studio e alle analisi delle prestazioni di un particolare prototipo di forno solare a concentrazione realizzato presso il Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche (DIISM) dell'Università Politecnica delle Marche.

Per forno solare si intende un dispositivo in grado di concentrare la luce del sole ed utilizzare l'energia assorbita per la cottura di alimenti. I forni solari sono un'ottima alternativa ecologica ai più comuni strumenti per la preparazione dei cibi moderni, garantendo non solo benefici a livello ambientale, ma anche economico, soprattutto in quelle aree rurali dove la radiazione solare è disponibile su larga scala, mentre vi è mancanza di altre forme di energia.

Nel CAPITOLO 1 si andrà a presentare il fabbisogno energetico mondiale, con annesso mix energetico delle varie fonti di energia utilizzate nel mondo, in un arco temporale che va dal 1970 al 2019, e una previsione degli obiettivi energetici mondiali che si è intenti a raggiungere entro il 2050. Verrà introdotto il concetto di energia, e successivamente verranno descritte in maniera sintetica tutte le tipologie di energia conosciute, e le loro modalità di utilizzo. Si passerà dunque alla distinzione tra energie non rinnovabili e rinnovabili, con particolare considerazione sull'energia solare.

Nel CAPITOLO 2 si andrà ad esplicitare una definizione accurata dei forni solari, elencando le loro caratteristiche principali e descrivendo il loro funzionamento. Successivamente verranno introdotte le principali tipologie di forni solari esistenti.

Nel CAPITOLO 3 verrà descritto dettagliatamente il prototipo di forno solare realizzato presso il DIISM dell'Università Politecnica delle Marche su cui sono stati eseguiti i test, i componenti principali, i materiali utilizzati, e il principio di funzionamento del dispositivo.

Nel CAPITOLO 4 si passerà alla descrizione dettagliata della strumentazione utilizzata per eseguire i test sperimentali sul prototipo di forno solare, la loro conformazione e il loro funzionamento. Dopodiché verranno descritte le proprietà e le caratteristiche fisiche e chimiche dei fluidi utilizzati durante le prove, il tipo di supporto utilizzato e degli accorgimenti per migliorarne le prestazioni.

Nel CAPITOLO 5 verranno descritte le procedure eseguite per l'acquisizione dei dati durante i test, e i risultati di tutte le prove effettuate con gli annessi grafici che riportano l'andamento in tempo reale dei dati raccolti. In seguito verranno descritte le procedure di elaborazione dati, definendo i parametri utilizzati per la valutazione dell'indice prestazionale COR, e il loro significato. Verranno poi riportati i dati elaborati da ogni singola prova su tabelle e con i relativi grafici delle curve di efficienza.

Infine nelle CONCLUSIONI, si provvederà a trascrivere i risultati ottenuti, le problematiche riscontrate, le opportune migliorie applicabili al prototipo, e i possibili sviluppi futuri.

CAPITOLO 1: ENERGIA

Premessa

Il progresso tecnologico ha portato enormi e innegabili vantaggi all'umanità negli anni, mediante un prevalente utilizzo di risorse energetiche molto efficienti, ma altrettanto dannose per l'uomo e per l'ambiente. I combustibili di natura fossile come petrolio, carbone e gas naturale, sono le principali fonti di energia su cui l'intero sistema industriale e civile si basa ancora oggi, infatti il consumo mondiale di energie derivanti dai combustibili fossili è circa l' 86% (secondo i dati dell' IEA aggiornati al 2018) [1], e anche se da diversi decenni si parla di convertire l'intero sistema energetico mondiale in fonti di energia rinnovabile, gli enormi investimenti economici effettuati per l'estrazione, la lavorazione, la distribuzione e l'adeguamento delle utenze (centrali elettriche, caldaie, auto, ecc) dei combustibili fossili, e la difficoltà delle nuove energie green a sostenere il carico energetico mondiale purtroppo non permettono una immediata conversione, ma c'è bisogno di un adeguamento progressivo alle nuove fonti di energia rinnovabili, inoltre il rendimento di quest'ultime è di gran lunga inferiore alle prime, ma grazie al continuo progresso tecnologico e agli innumerevoli studi di ricerca, le tecniche e gli strumenti per utilizzare al meglio le nuove fonti di energia pulita stanno diventando sempre più funzionali ed efficienti. Negli ultimi anni si è visto un maggiore incremento dell'utilizzo delle nuove fonti di energia pulita, che ad oggi corrisponde al 13,83% del consumo energetico globale, e secondo il New Energy Outlook 2019 di Bloomberg [2] l'obiettivo per i prossimi anni mira a soddisfare almeno il 62% del fabbisogno energetico mondiale da fonti rinnovabili entro il 2050.

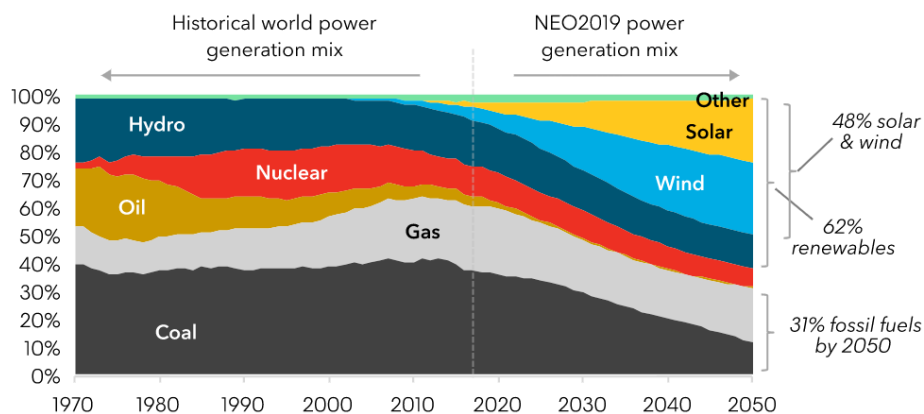


Figura 1 - Grafico Mix Energetico 1970 - 2050

Nei seguenti capitoli verranno analizzate le diverse fonti di energie rinnovabile, in particolare quella solare, e le sue applicazioni relative all'ambito dei "forni solari", studio centrale del lavoro di questa tesi.

1.1 DEFINIZIONE DI ENERGIA

Quante volte ogni giorno pronunciamo, o sentiamo pronunciare la parola energia?

Sembra essere un concetto così vicino a noi, che circonda la nostra quotidianità (energia elettrica, solare, termica, chimica, meccanica ecc.), eppure tutt'oggi resta un concetto particolarmente difficile da spiegare.

Una precisa definizione di energia non è semplice da fornire, l'energia non ha alcuna realtà materiale ma è piuttosto un concetto matematico astratto che esprime un vincolo rispetto ai processi possibili e una simmetria temporale delle leggi fisiche. Non esiste quindi nessuna sostanza o fluido corrispondente all'energia pura. Come scrisse Feynman:

«È importante tener presente che nella fisica odierna, non abbiamo alcuna conoscenza di cosa sia l'energia.»

(Richard Feynman, *La fisica di Feynman*, Vol I, p 4-1)

Possiamo considerare l'energia come una grandezza fisica estensiva che ha una importanza centrale nella formulazione di molte teorie, dalla meccanica classica alla termodinamica, dalla teoria della relatività alla meccanica quantistica. Un corpo può incrementare o diminuire la sua energia in seguito a una interazione con altri corpi: la variazione di energia riflette quindi i cambiamenti occorsi nelle sue proprietà microscopiche. Esistono numerose possibili interazioni; dal punto di vista qualitativo si possono distinguere la meccanica, con ad esempio urti fra corpi rigidi o forze fra particelle puntiformi, dalla termodinamica, dove si considerano ad esempio le reazioni fra gas a temperature differenti. Dal punto di vista del tipo di interazione, esistono in natura diversi tipi di forze, come quella gravitazionale, quella nucleare o quella elettrica. Tuttavia, tutti questi possibili processi lasciano invariata la quantità totale di energia, che quindi diviene la grandezza fisica costante per sistemi chiusi o isolati. [3] Possiamo quindi definire l'energia come una grandezza fisica che esplicita la capacità di un oggetto o di un sistema a produrre lavoro.

1.2 FORME DI ENERGIA

L'unità di misura derivata del Sistema Internazionale per l'energia è il J (Joule), che in termini di unità fondamentale del SI $1\text{J} = 1\text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$, ma a seconda dell'ambito essa può avere altre unità di riferimento.

1.2.1 Energia Meccanica

L'energia meccanica è l'energia che un oggetto possiede per il suo movimento o per la sua posizione, può essere di natura cinetica quando l'oggetto preso in considerazione è in movimento, oppure potenziale quando lo stesso si trova in una determinata posizione rispetto ad un determinato sistema di riferimento. L'insieme delle due energie, cinetica e potenziale costituiscono dunque l'energia meccanica. Essa viene anche definita come la capacità di compiere "lavoro", e un oggetto che compie lavoro su un altro oggetto non è altro la capacità di far variare lo stato di quiete o di moto di quest'ultimo. [4]

L'energia meccanica è una delle forme di energia più antica utilizzata dall'uomo, ne è un esempio quando nelle battute di caccia di grossi animali, gruppi di uomini lanciavano grandi massi dall'alto per abbattere delle prede particolarmente grandi, riuscendo così a sfruttare la grandissima energia potenziale del masso (funzione del suo peso e dall'altezza dalla testa del povero animale), trasformandola in energia cinetica grazie all'accelerazione gravitazionale.

1.2.2 Energia Chimica

L'energia chimica è una forma di energia in cui il valore varia in seguito alla formazione e/o alla rottura di legami chimici di sostanze coinvolte in reazioni chimiche. È sostanzialmente riconducibile alla somma dell'energia potenziale delle interazioni elettrostatiche delle cariche presenti nella materia più l'energia cinetica degli elettroni. Essa è dunque una forma di energia accumulata nei legami chimici ed è data dalla somma dell'energia cinetica degli elettroni e dall'energia potenziale dovuta alle interazioni elettriche tra le cariche presenti negli atomi della materia.

Alcuni esempi di energia chimica sono: il processo di combustione, dove l'energia chimica viene trasformata in calore e luce; l'alimentazione, dove mediante la digestione degli alimenti il corpo è in grado di trasformare l'energia chimica di questi ultimi in energia come quella che viene sfruttata per la termoregolazione e per il movimento. Un altro esempio pratico sono le Pile, che trasformano

l'energia chimica presente nei legami chimici di opportune sostanze in un flusso di elettroni, ovvero in energia elettrica. Utilizzando il sistema opposto è possibile convertire l'energia elettrica in energia chimica mediante l'utilizzo di celle elettrolitiche che permettono lo sviluppo di reazioni redox che non avverrebbero in maniera spontanea. Anche la fotosintesi clorofilliana è un importante esempio, l'energia solare viene assorbita e convertita in energia chimica consentendo la formazione di molecole di glucosio a partire dalle molecole di anidride carbonica presenti nell'atmosfera. [5]

1.2.3 Energia Elettromagnetica

In fisica, l'energia del campo elettromagnetico è l'energia immagazzinata in una data regione di spazio da un campo elettromagnetico, ed è costituita dalla somma delle energie associate al campo elettrico ed al campo magnetico. Nelle onde elettromagnetiche queste due quantità sono sempre uguali ed è conveniente parlare di flusso di energia trasportata dall'onda nell'unità di tempo attraverso una superficie. Nel caso specifico delle onde elettromagnetiche l'energia elettromagnetica prende il nome di energia radiante, per sottolineare il fatto che le onde rappresentano un flusso di energia nello spazio. Se l'onda appartiene allo spettro di frequenze della luce visibile, l'energia radiante prende il nome di energia luminosa. [6] L'argomento verrà approfondito nel capitolo 1.4.7 in quanto verrà analizzata in maniera più dettagliata la radiazione solare e alcune modalità di utilizzo di questo tipo di energia.

1.2.4 Energia Gravitazionale

In meccanica classica, e specificamente nella teoria newtoniana della gravitazione, l'energia potenziale gravitazionale è l'energia potenziale relativa alla forza di attrazione gravitazionale fra masse.

L'interazione gravitazionale, o gravitazione, o gravità nel linguaggio comune, è una delle quattro interazioni fondamentali note nella fisica insieme alla forza elettromagnetica, quella nucleare debole e quella nucleare forte. Nella fisica classica newtoniana la gravità è interpretata come una forza conservativa di attrazione a distanza agente fra corpi dotati di massa, secondo la legge di gravitazione universale; la sua manifestazione più evidente nell'esperienza quotidiana è la forza peso. [7]

1.2.5 Energia Termica

L'energia termica è la somma dell'energia cinetica generata dal moto degli atomi, delle particelle e delle molecole all'interno della materia. Quando un corpo viene scaldato aumenta il moto, le vibrazioni e le collisioni degli atomi. L'eccitazione degli atomi genera l'energia termica. L'energia termica è posseduta da qualsiasi corpo che abbia una temperatura superiore allo zero assoluto (-273,15 °C).

L'energia termica è alla base di molte le fonti di energia. Può essere utilizzata direttamente ad esempio usufruendo del calore fornito da una fiamma, oppure può essere trasformata in altre fonti di energia, come ad esempio in energia meccanica nelle vecchie locomotive, o in energia elettrica nelle centrali termoelettriche.

1.2.6 Energia Nucleare

L'energia nucleare è una forma di energia derivata dalle reazioni nucleari cioè dai nucleoni (protoni e neutroni) degli atomi. Le reazioni che portano la liberazione di energia nucleare sono i processi di fusione dei nuclei di basso peso atomico, e i processi di fissione di nuclei pesanti. La caratteristica fondamentale di questo tipo di reazioni è la trasformazione della materia in energia.

Infatti secondo la celebre relazione di Einstein $E = mc^2$ il noto fisico aveva introdotto il primo principio di equivalenza tra massa ed energia e quindi la possibilità teorica di trasformare la prima nella seconda, con un coefficiente di trasformazione uguale al quadrato della velocità della luce nel vuoto. È dunque evidente che a differenza delle reazioni chimiche, nelle reazioni nucleari le forze in gioco sono di gran lunga più grandi. Per dare un ordine di grandezza possiamo ricordare che dall'annichilazione (processo di combinazione tra una particella di materia e la sua antiparticella detta antimateria, con scomparsa di entrambe e liberazione di energia) di 1 grammo di materia si producono 24 milioni di kWh. Mentre dalla fissione di un grammo di uranio, che consiste nel processo fisico nucleare in cui il nucleo atomico di un elemento chimico pesante (uranio-235) decade in frammenti di minori dimensioni, ovvero in nuclei di atomi a numero atomico inferiore, rilasciando una notevole quantità di energia, ma di mille volte inferiore rispetto a quella liberata dal processo di annichilimento.

[8]

1.3 FONTI DI ENERGIA NON RINNOVABILI

Mediante il progresso tecnologico l'uomo ha scoperto e perfezionato diversi metodi per ricavare energia, per poi poterla riutilizzare in diversi ambiti della società, al fine di soddisfare le sempre più crescenti necessità o al semplice scopo di migliorare la qualità della vita. È

un dato di fatto che la società moderna sia estremamente dipendente dall'energia in tutti i suoi processi produttivi e gestionali (ad esempio riscaldamento, illuminazione, apparecchiature elettriche, trasporti, processi industriali ecc.). Nell'ultimo secolo l'incremento del fabbisogno energetico mondiale ha sviluppato un grande interesse a livello globale nell'ambito, in particolar modo sulle tematiche di impatto ambientale, sostenibilità ed efficienza.

Possiamo definire le fonti di energie non rinnovabili come fonti di energia che si generano molto lentamente, rispetto al loro consumo, e una volta terminate non saranno nuovamente disponibili in tempi brevi. L'impatto ambientale associato al loro sfruttamento risulta dannoso per l'ecosistema.

Spesso, l'utilizzo di tali fonti porta con sé problemi di inquinamento ambientale quali la produzione di gas serra o scorie radioattive. [9]

1.3.1 Combustibili Fossili

Derivanti dalla trasformazione, sviluppatasi in milioni di anni, di sostanza organica, seppellitasi sottoterra nel corso delle ere geologiche, in forme molecolari via via più stabili e ricche di carbonio. Si presentano in tre diversi stati, solido liquido e gassoso, a seconda della materia organica di origine e dei processi di trasformazione subiti, e sono:

- **Carbone**
- **Petrolio** (e altri idrocarburi)
- **Gas Naturale**

In particolar modo il petrolio e il gas rappresentano una delle principali fonti di energia di sostentamento dell'economia energetica mondiale. Sono considerate come fonti di energia non rinnovabili in quanto il loro consumo è infinitamente più rapido rispetto alla sua formazione.

1.3.2 Energia Nucleare

Per energia nucleare si intende l'energia prodotta a seguito di tutti quei fenomeni fisici in cui si hanno trasformazioni nei nuclei atomici, detti reazioni nucleari. [10]

È una forma di energia che deriva da modifiche della struttura stessa della materia e, insieme all'energia derivante dai combustibili fossili rappresenta una delle fonti di energia primaria.

Per quanto sia presente in natura e non derivata dalla trasformazione di un'altra forma di energia, è stata considerata dalla Commissione europea non rinnovabile. Benché rappresenti in gran parte una forma di energia pulita dal punto di vista delle emissioni di anidride carbonica (CO₂) in atmosfera, alternativa ai tradizionali combustibili fossili, presenta diversi altri problemi ambientali e di pubblica sicurezza per quanto riguarda i fenomeni connessi alle scorie radioattive, che possono mantenersi tali per circa diecimila anni.

1.4 FONTI DI ENERGIE RINNOVABILI

Sono da considerarsi energie rinnovabili quelle forme di energia generate da fonti che per loro caratteristica intrinseca hanno una velocità di rigenerazione uguale o maggiore rispetto alla velocità del loro consumo, o il loro consumo non potrà mai portare all'esaurimento, nella scala temporale umana, della fonte energetica stessa (come ad esempio l'energia solare, geotermica, eolica ecc.).

Inoltre l'impatto ambientale derivante dal loro utilizzo è da considerarsi meno significativo, se non nullo rispetto a quello proveniente dalle fonti di energie non rinnovabili.

1.4.1 Energia Idroelettrica

L'energia idroelettrica è considerata una fonte di energia alternativa e rinnovabile, che sfrutta la trasformazione dell'energia potenziale gravitazionale, posseduta da una certa massa d'acqua ad una certa quota altimetrica, in energia cinetica, al superamento di un certo dislivello; tale energia cinetica viene infine trasformata in energia elettrica in una centrale idroelettrica grazie ad un alternatore accoppiato ad una turbina [11]

1.4.2 Energia Mareomotrice

Con energia mareomotrice si intende la creazione di energia mediante i naturali movimenti dell'acqua generati dalle maree. Si tratta quindi di una fonte di energia rinnovabile e alternativa alle fonti fossili, utilizzata fin dall'antichità dai "mulini a marea" che, trasformavano l'energia delle maree in energia meccanica fornita a una macina.

Esistono due principali modalità per produrre energia dal moto ondoso e sono:

Centrali mareomotrici (o sistemi a barriera): possono essere costruite lungo i fiumi, oppure in mare aperto in quanto si basano sullo spostamento orizzontale delle grandi masse d'acqua. Durante la fase di alta marea l'acqua viene raccolta all'interno di un bacino artificiale o naturale, mentre nel corso della bassa marea l'acqua defluisce passando attraverso una serie di condutture idrauliche al cui interno ci sono le turbine collegate ai generatori elettrici messe in moto dal passaggio dell'acqua. I sistemi a barriera hanno un costo molto elevato ed un impatto ambientale molto alto.

Idrogeneratori: si tratta di turbine marine galleggianti sia in acque basse, in prossimità della costa, che in acque profonde, ancorate al fondo del mare, oppure a mezz'acqua. Queste centrali sfruttano l'energia cinetica contenuta nella corrente di acqua, per produrre energia elettrica. Il flusso all'interno di un condotto di un metro quadrato di superficie ad una velocità di 3 m/s permette di ottenere circa 3 kW di potenza, pari ai consumi massimi all'interno di un'abitazione. Questa tipologia di impianti ha un impatto ambientale di gran lunga inferiore rispetto alle centrali mareomotrici. [12]

1.4.3 Energia Eolica

L'energia eolica è una fonte molto antica che sfrutta l'energia del vento, cioè l'energia cinetica di una massa d'aria in movimento. In passato trovava applicazioni nel settore nautico e alimentava il meccanismo dei mulini a vento, da cui oggi derivano i moderni impianti eolici.

Fonte di energia rinnovabile e a sostegno dell'economia verde, pulita, che non produce emissioni di gas serra durante il funzionamento e richiede una superficie di terra non eccessivamente vasta, gli effetti sull'ambiente sono in genere meno problematici rispetto a quelli provenienti da altre fonti di energia, ed è possibile sfruttarla grazie a delle apparecchiature chiamate aerogeneratori, composti da una turbina eolica in cima ad una torre di sostegno ed un generatore elettrico che funziona esattamente con lo stesso principio dei mulini a vento. [13]

1.4.4 Energia Geotermica

L'energia geotermica è la forma d'energia dovuta al calore endogeno della terra. Tale calore si manifesta con l'aumento progressivo della temperatura delle rocce con la profondità, secondo un gradiente geotermico, in media, di 3°C ogni 100m di profondità, salvo particolari casi in cui il gradiente risulta superiore a causa di particolari conformazioni geologiche e/o vulcaniche

L'energia termica accumulata nel sottosuolo è resa disponibile tramite fluido-vettori (acqua o vapore), naturali o iniettati, che fluiscono dal serbatoio geotermico alla superficie spontaneamente (geyser, soffioni, sorgenti termali) o erogati artificialmente tramite perforazione meccanica (pozzo geotermico). [14]

1.4.5 Energia a Idrogeno

L'idrogeno è uno degli elementi più semplici dal punto di vista chimico molecolare: è composto solo da un protone e un elettrone, ma grazie al suo elevato contenuto energetico per unità di massa è una fonte di energia molto interessante. Si tratta infatti del principale combustibile nell'Universo: le stelle sono quasi interamente composte da idrogeno sotto forma di plasma, necessario per le reazioni nucleari.

Nonostante sia l'elemento più abbondante dell'Universo, sulla Terra è difficile trovarlo allo stato puro, ma solamente combinato con altri elementi, ad esempio con l'ossigeno nell'acqua (H₂O), nei composti organici e negli esseri viventi. Per ottenerlo allo stato puro è quindi necessario produrlo attraverso determinati processi.

L'energia dell'idrogeno oggi è impiegata nel mercato chimico ed elettronico, nonché in aeronautica, come carburante alternativo. Essendo un combustibile molto efficiente, pulito e poco inquinante, ma non essendo presente sulla Terra le sue fasi di produzione richiedono un elevato consumo di energia, e può considerarsi una fonte energetica rinnovabile solo se l'energia applicata per la sua produzione non provenga da fonti energetiche non rinnovabili.

Esistono principalmente due modi per produrre idrogeno:

-Steam Reforming: un processo di produzione dell'idrogeno a partire dal metano;

-Elettrolisi: un processo che prevede l'utilizzo di energia elettrica ed acqua ed il cui risultato è la produzione di idrogeno e ossigeno. Nel caso in cui l'energia elettrica venga prodotta solo tramite fonti rinnovabili è possibile considerare l'impatto dell'idrogeno sull'ambiente bassissimo. [15]

1.4.6 Energia a Biomasse

L'energia da biomasse è l'energia prodotta mediante la combustione di materiali di origine organico-vegetale quali piante, alghe marine, rifiuti organici vegetali, legno, rami e legname da ardere, scarti di lavorazione dell'industria agroalimentare o del legno, scarti e reflui dell'allevamento del bestiame e residui delle attività agricole o forestali.

Le biomasse usate per produrre energia elettrica sono materiali di scarto che vengono riconvertiti tramite processi termici, chimici o biochimici. Quando le biomasse vengono bruciate all'interno delle centrali a biomasse, quest'ultime rilasciano calore, emettendo una quantità di anidride carbonica sostanzialmente assimilabile a quella emessa in natura nel corso di un normale processo di fotosintesi. Il calore sprigionato permette l'evaporazione dell'acqua del circuito termodinamico, dove diventa vapore e viene incanalata nelle tubature. Il vapore fa funzionare le turbine che, a loro volta, producono elettricità o calore da utilizzare negli impianti domestici o industriali. L'energia derivante dalle biomasse è una fonte di energia rinnovabile, infatti il tempo di sfruttamento delle biomasse è pressoché analogo a quello di rigenerazione e la loro combustione re-immette in atmosfera l'anidride carbonica che era stata precedentemente assorbita dalle biomasse stesse. [16]

1.4.7 Energia Solare

L'energia solare è l'energia che viene prodotta grazie allo sfruttamento diretto dell'energia irradiata dal Sole sulla Terra. Il Sole è una stella di dimensioni medio-piccole costituita principalmente da idrogeno (circa il 74% della sua massa, il 92,1% del suo volume) ed elio (circa il 24-25% della massa, il 7,8% del volume), cui si aggiungono altri elementi più pesanti presenti in tracce.

È classificato come una "nana gialla" di tipo spettrale G2 V: "G2" indica che la stella ha una temperatura superficiale di 5 777 K (5 504 °C), caratteristica che le conferisce un colore bianco estremamente intenso e cromaticamente freddo. La V (5 in numeri romani) indica che il Sole, come la maggior parte delle stelle, è nella sequenza principale, ovvero in una lunga fase di equilibrio stabile in cui l'astro fonde, nel proprio nucleo, l'idrogeno in elio.

Tale processo genera ogni secondo una grande quantità di energia (equivalente a una potenza di $3,9 \times 10^{26}$ W), emessa nello spazio sotto forma di radiazioni elettromagnetiche, flusso di particelle (vento solare) e neutrini. La radiazione solare, emessa come luce visibile e infrarossi consente la vita sulla Terra fornendo l'energia necessaria ad attivare i principali meccanismi che ne stanno alla base; inoltre l'insolazione della superficie terrestre regola il clima e la maggior parte dei fenomeni meteorologici. [17]

La radiazione solare

L'energia solare deriva dall'energia elettromagnetica emessa dai processi di fusione dell'idrogeno contenuto nel sole, nota come radiazione solare.

Lo spettro della radiazione elettromagnetica ha un'ampiezza espressa in lunghezza d'onda che va dai 0.1 nm per i raggi gamma, fino a 10 km per le onde radio.

Le frequenze relative al campo di luce visibile hanno un range di lunghezza d'onda che va da 380 nm per i colori più freddi, ai 740 nm per quelli più caldi.

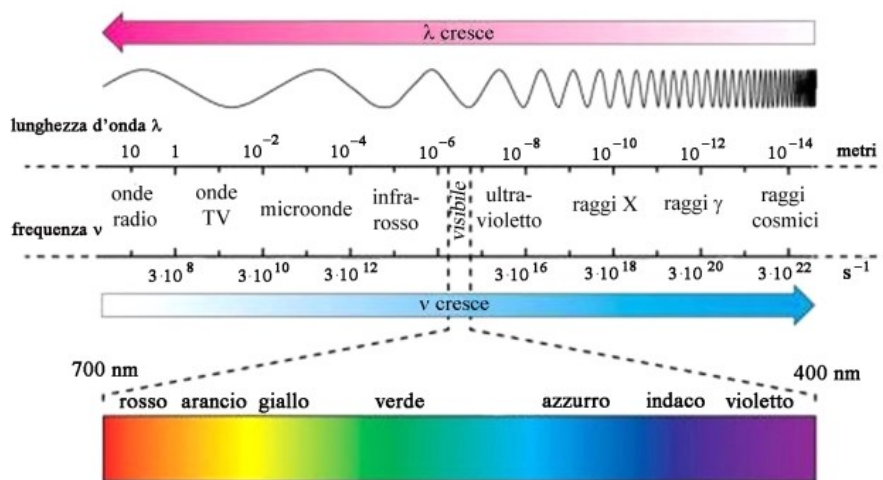


Figura 2 - Spettro Elettromagnetico

Per energia solare si intende dunque la radiazione elettromagnetica emessa dal sole con la totalità delle frequenze.

Il termine scientifico "radiazione solare" indica quanta energia proveniente dal sole colpisce una superficie di 1 mq nell'arco di un giorno oppure di un anno; l'unità di misura è il kWh/m²/giorno oppure kWh/m²/anno. Per indicare la potenza dei raggi solari in un determinato istante si usa il termine "intensità della radiazione solare" la cui l'unità di misura è il kW/m² o il W/m². Il termine "costante solare" definisce la quantità di radiazione elettromagnetica solare per unità di superficie, misurandola a livello della superficie esterna dell'atmosfera terrestre. La costante solare include tutti i tipi di radiazione solare, non soltanto la luce visibile. Il suo valore è stato misurato da satelliti a circa 1.366,1 W/m², anche se può variare di circa lo 6,9% durante l'anno (da circa 1.412 W/m² a gennaio a 1.321 W/m² a luglio) a causa della variazione della distanza della terra dal sole, oltre ad una lieve variazione della luminanza solare di poche parti su mille da un giorno all'altro [18] [19].

La radiazione solare è una fonte di energia rinnovabile che ha il grande vantaggio di essere disponibile

in misura praticamente illimitata e di non inquinare l'ambiente. L'utilizzo di questa fonte, tuttavia, presenta alcuni svantaggi.

Uno è la sua discontinuità (dovuta all'alternanza del giorno e della notte, al ciclo delle stagioni e alla variazione delle condizioni meteorologiche), che obbliga ad utilizzare sistemi di accumulo dell'energia o integrazione con degli impianti che utilizzano altre fonti energetiche. Un altro è la bassa densità energetica che rende necessario l'impiego di ampie superfici di raccolta con elevati costi di impianto.

All'interno del sole infatti si verificano continuamente reazioni termonucleari, a temperature elevatissime che raggiungono i 15 milioni di gradi centigradi. Tali fusioni termonucleari liberano quantità elevatissime di energia sotto forma di radiazioni elettromagnetiche, ma questa energia indirizzata sulla superficie terrestre varia da luogo a luogo, dalla stagione e anche da ora a ora.

L'energia solare può essere dunque utilizzata per generare elettricità o per generare calore.

Le tecnologie principali per trasformare in energia sfruttabile l'energia del sole sono le seguenti:

Pannelli solari termici, che sfruttano i raggi solari per scaldare un liquido con speciali caratteristiche, contenuto nel suo interno. Cedendo calore, tramite uno scambiatore di calore, all'acqua contenuta in un serbatoio di accumulo, è possibile immagazzinare il potere energetico proveniente dal sole mediante la radiazione elettromagnetica.

Pannelli fotovoltaici, che sfruttano le proprietà di particolari elementi semiconduttori il più utilizzato è il Silicio, che gode della proprietà di generare una tensione ai suoi capi quando è colpito da radiazione luminosa e conseguentemente di generare corrente elettrica all'interno di un circuito chiuso.

Pannelli solari a concentrazione, che sfrutta una serie di specchi parabolici a struttura lineare per convogliare i raggi solari in un unico punto. Le applicazioni possibili di questo pannello possono essere molteplici, ad esempio la radiazione può essere concentrata su un tubo, o un serbatoio ricevitore in cui scorre un fluido termovettore, oppure come nello studio effettuato, questa tecnologia può essere applicata nell'ambito della ricerca di metodi alternativi per fini alimentari come i **forni solari**, mediante l'utilizzo di energia pulita proveniente da fonti rinnovabili ed ecosostenibili. [20]

CAPITOLO 2: FORNI SOLARI

Il forno solare è un apparecchio che converte l'energia della radiazione solare in energia termica e può essere impiegato per fini alimentari, come la cottura dei cibi e la sterilizzazione dell'acqua per renderla potabile. Gli elementi principali, che anche un forno solare rudimentale solitamente possiede per consentirne il funzionamento, sono delle parti in grado di riflettere e convogliare in un punto la radiazione solare, e un'area adibita alla cottura degli alimenti. Essendo uno strumento che sfrutta l'energia solare, è strettamente dipendente dalla radiazione solare, e per ottenere il massimo rendimento da questo strumento è necessario correggere periodicamente l'orientamento del forno e delle sue componenti verso il Sole per compensare l'effetto della rotazione terrestre.

L'impiego dei forni solari, a differenza delle tradizionali tecniche di cottura, comporta numerosi vantaggi. Il primo tra tutti è il vantaggio ecologico: nessun utilizzo di combustibili significa nessuna emissione di CO₂, nessun danno all'atmosfera, nessuna privazione di scarse e costose risorse naturali e nessuna deforestazione. In secondo luogo si avrà un vantaggio economico: infatti il sole rappresenta una fonte di energia reperibile ovunque e gratuita. Un altro aspetto da rimarcare è la sicurezza che il forno solare assicura se paragonato ai tradizionali metodi di cottura: infatti vengono ridotte notevolmente i rischi di incendio e di esposizione ai fumi se paragonato alla cottura a legna, non ci sono rischi legati ad esplosioni in quanto dal momento che non vengono utilizzati combustibili o gas e le basse temperature delle superfici riducono il rischio di eventuali ustioni della pelle. È inoltre possibile cucinare in quei parchi dove, per questione di sicurezza, è proibito accendere fuochi trasformando un'attività comune in un momento pedagogico. L'utilizzo di questi forni hanno si sta parecchio diffondendo anche in molti campi profughi, vista la loro grande utilità e praticità.

Le ONG (organizzazioni non governative) operanti nei campi profughi, si occupano dell'implementazione della cucina solare in questi luoghi; la maggior parte dei progetti da esse avviati sono finanziati da donazioni da parte di privati e si occupano principalmente di fornire il materiale necessario alla produzione di semplici forni solari (spesso a pannelli), rifacendosi al design del Cookit, prodotto dalla Solar Cooker International e costituito esclusivamente da cartone e fogli di alluminio. La distribuzione di questo forno consente alle famiglie di cucinare due pasti al giorno senza utilizzare alcun tipo di combustibile.

Uno studio condotto nel 2015 nei campi di Touloum e Iridimi (Chad), ha rivelato le problematiche legate al Cookit, che ne hanno causato sempre una minore diffusione ed utilizzo: Scarsa resistenza strutturale del forno, basso grado di formazione degli utenti dei campi, necessità di sostituire periodicamente i sacchetti resistenti che contengono la pentola.

Per poter garantire il massimo risparmio di combustibile, in molti campi dell’Africa Orientale e del Nepal, si è adottata la cosiddetta “cucina integrata”, la quale consiste nell’utilizzare i forni solari in condizioni di cielo limpido, stufe a legna a basso consumo in caso contrario. In entrambe le circostanze si utilizzano dei contenitori termici per migliorare l’efficienza di tutti e due i metodi, poiché si possono introdurre cibi già a temperature abbastanza alte. [21]

2.1 TIPOLOGIE DI FORNI SOLARI

Il primo forno solare che conosciamo fu inventato da Horace de Saussure, un naturalista svizzero che lo sperimentò già nel 1767, ma è solo dopo la crisi energetica del 1973, e dell’elevato incremento delle popolazioni di India e Cina, che i governi incoraggiarono la ricerca verso altre fonti di energia, e già nei primi anni ’80 nacquero numerose compagnie anche nel resto dell’Asia, Europa e Stati Uniti, permettendo uno sviluppo sempre più efficiente di questi dispositivi, e la loro distribuzione nel mondo. La maggior parte dei forni solari rientra in tre principali categorie: forni “parabolici”, “a scatola”, “a pannelli”, e “a concentrazione”. [22]

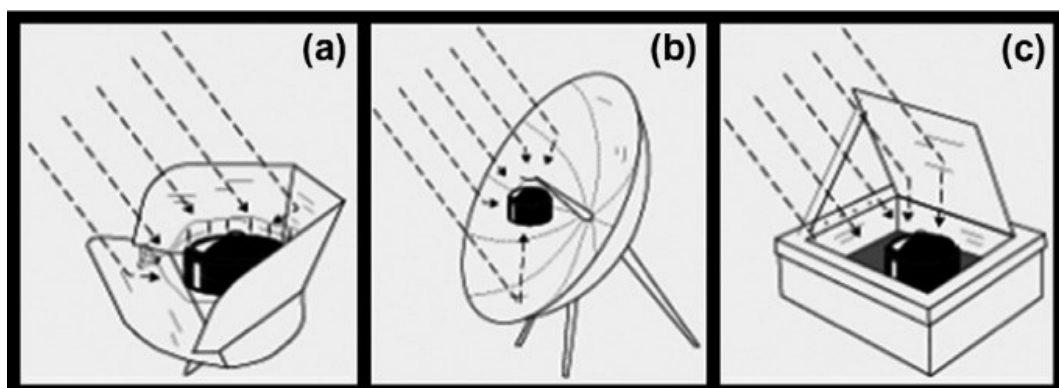


Figura 3 - Tipologie di forno solare: (a) forno solare a pannelli; (b) forno solare parabolico; (c) forno solare a scatola

2.1.1 Forni Solari a Pannelli

I forni solari a pannelli possono essere considerati i più comuni grazie alla loro facilità di costruzione e la possibilità di reperire i materiale a bassi costi.

Questa tipologia incorpora elementi propri del forno solare a scatola e di quello parabolico. Essa è caratterizzata da un corpo composto da pannelli, in genere di carta o plastica, rivestiti di materiali riflettenti, al cui centro viene posto il contenitore per la cottura del cibo, preferibilmente di colore nero ed inserito in un sacchetto di plastica resistente, che isola la struttura interna al forno impedendone la fuoriuscita del calore. Spesso questi pannelli sono facce di un unico corpo pieghevole ed è possibile che sia presente anche un vetro esterno per poter ottenere temperature più alte. (Fig.4) [23]



Figura 4 - Forno solare a pannelli

2.1.2 Forni Solari Parabolici

Questa tipologia di forni concentra la radiazione solare attraverso l'uso di superfici paraboloidi riflettenti; la pentola è posta al centro del riflettore parabolico ed è quindi riscaldata direttamente dalla concentrazione della radiazione solare nel punto di fuoco. Tale metodologia di cottura è molto efficiente e consente di raggiungere temperature di circa 200-250 °C in tempi relativamente brevi.

L'efficienza di questi forni dipende fondamentalmente dalla dimensione della parabola, dalla capacità di riflessione degli specchi, e dalla precisione del punto focale: tanto più precisa è la parabola, tanto più piccolo è il punto focale, tanto maggiori saranno le temperature raggiungibili.

La superficie della parabola è rivestita esternamente da un materiale riflettente, che influisce notevolmente sulle prestazioni del forno; in genere vengono utilizzati materiali quali: vinile riflettente cromato, alluminio anodizzato, specchi, mylar (film di polietilene tereftalato). [24] [25](Fig.5)

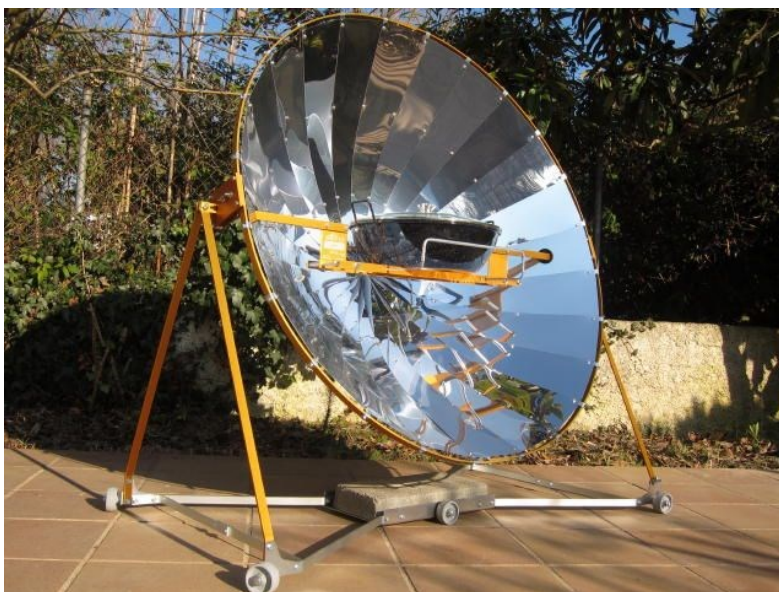


Figura 5- Forno solare parabolico

2.1.3 Forni Solari a Scatola

Il forno a scatola si presenta con un design semplice: una serie di riflettori montati sulla scatola avente un coperchio di vetro, orientati in maniera tale da convogliare all'interno di essa la maggiore radiazione possibile. (Fig.6) Il principio fisico è molto semplice: la radiazione solare attraversa il vetro con facilità ed entra nel forno, dove viene assorbita dalla superficie nera. Si crea così all'interno una radiazione termica la cui fuoriuscita viene ostacolata dal vetro superiore. La spiegazione fisica di questo fenomeno è data dal fatto che la radiazione solare e quella termica presentano lunghezze d'onda differenti, per cui il vetro assorbe la prima e riflette la seconda, creando una sorta di effetto serra all'interno della scatola. Anche se a livello prestazionale non è il migliore, un vantaggio di questa tipologia di forno è la sua mobilità e trasportabilità, infatti quando questo prototipo viene chiuso, esso assume la forma di una scatola facile da trasportare e dal peso contenuto.



Figura 6 - Forno solare a scatola



Figura 7 - Dettagli

2.1.4 Forni Solari ad Accumulo Termico

Nonostante il fabbisogno energetico per la cottura viene in gran parte soddisfatto dall'utilizzo di combustibili fossili non commerciali il forno solare potrebbe costituire una valida alternativa. La limitazione di questo tipo di forni è dovuta al fatto che le loro prestazioni dipendano strettamente dalle condizioni meteorologiche e dai naturali cicli giorno-notte. Tuttavia, è possibile risolvere il problema utilizzando dei forni ad accumulo termico così da poter cuocere anche nelle ore notturne o di scarso irraggiamento solare.

I sistemi di accumulo utilizzati possono essere di due tipi:

- il primo esterno al forno, formato da collettori solari che rilasciano energia al forno come integrazione termica fornendo così un surplus di calore per incrementare la temperatura o fornire calore in assenza di radiazione solare; oppure è possibile utilizzare una pompa di ricircolo che mette in movimento un fluido termovettore che varia in funzione del range di temperatura richiesto;
- il secondo metodo utilizza un sistema di accumulo posizionato all'interno della pentola di cottura. Due pentole vengono assemblate una dentro l'altra concentricamente, e posizionate in modo tale che tra di loro venga a crearsi un'intercapedine, dove all'interno viene predisposto un materiale a cambiamento di fase, il PCM (Phase Change Material). (Fig.8) (Fig.9)

Il PCM posizionato nell'intercapedine si riscalda passando dalla fase solida a quella liquida, la temperatura di fusione dipende dalla tipologia e dalla miscela di PCM utilizzato. Durante il cambiamento di fase, il PCM immagazzina calore che verrà poi rilasciato sotto forma di calore latente quando avverrà il passaggio da liquido a solido in assenza di radiazione solare. Grazie a questa modalità di accumulo di calore è possibile effettuare la cottura dei cibi anche due ore dopo il tramonto per ovviare al problema dei cicli giorno-notte. [26] [27] [28]



Figura 8 - Pentola con doppio fondo per prove con PCM

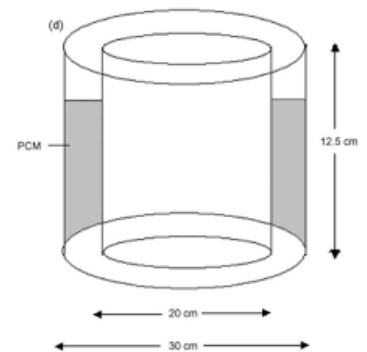


Figura 9 - Schema intercapedine



Figura 10 - PCM: Confezione di Eritritolo



Figura 11- PCM: Confezione di Xilitolo

2.1.5 Forni Solari a Concentrazione

Il funzionamento del forno solare a concentrazione avviene grazie all'utilizzo di una speciale lente rettangolare attraverso la quale i raggi solari vengono concentrati in un unico punto focale verso una superficie a specchio, che a sua volta riflette i raggi concentrati sotto un piano di cottura. La concentrazione dei raggi solari in un solo punto dà origine ad elevate temperature. Sfruttando la conversione dell'energia solare in energia termica con grandi rese, ad esempio il forno solare a concentrazione proposto dall'azienda danese Heliac raggiunge una potenza di cottura che va dai 250 ai 370 W (Fig.12). Se il sistema fisico alla base del forno solare è molto semplice, non altrettanto può dirsi dell'aspetto tecnologico. Negli ultimi 40 anni la ricerca sta compiendo veri e propri passi da gigante per realizzare una tecnologia in grado di garantire una grande efficacia nella produzione e una buona efficienza nei costi. [29]



Figura 12 - Forno solare a concentrazione

CAPITOLO 3: CONFORMAZIONE DEL FORNO SOLARE HELIAC

3.1 PREMESSA

Il Forno solare con cui sono stati eseguiti i test sperimentali è stato realizzato presso il “Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche” (DIISM), dell’ “Università Politecnica delle Marche”. Il prototipo è stato ispirato al progetto dell’azienda danese Heliac ApS, che si occupa prevalentemente di sviluppo e applicazioni dell’energia solare in ambito civile. Questa azienda ha l’obiettivo di eliminare la dipendenza dai combustibili fossili, e di abbattere i costi di produzione di energia rispetto ad altre fonti, in modo da poter soddisfare le esigenze dell’intera popolazione mondiale. La Heliac opera già in molti di quei paesi dove non ancora sussiste un vero e proprio impianto di distribuzione energetica, e il prototipo del loro forno solare è pensato per quelle zone in cui la radiazione solare è particolarmente intensa e prolungata durante le ore del giorno. La sua conformazione è pensata per far sì che i costi di realizzazione siano incredibilmente bassi, in modo da poter garantire un’ampia gamma di utenti, anche nei paesi in via di sviluppo che si trovano particolarmente indietro sul piano tecnologico, offrendo così un approccio ecosostenibile a partire dal consumo di energia destinato alla cottura dei cibi e non solo.



Figura 13 - Prototipo Heliac realizzato in laboratorio (DIISM)

3.2 COMPONENTI PRINCIPALI

Esclusa la lente, componente fondamentale di sviluppo tecnologico da parte della “Heliac ApS”, che verrà descritta con maggiori dettagli nei paragrafi successivi, le restanti parti del forno posso essere facilmente ricavate da materiali di riciclo, o alternativamente da materiali a basso impatto di costo.

Per le lavorazioni invece non è necessario l'intervento di personale tecnico, purché si abbiano delle minime competenze in ambito di lavorazioni come il sezionamento di componenti lignee, il loro assemblaggio, verniciatura, ritaglio e saldatura elementare di profilati in acciaio. È evidente che così facendo i costi relativi alla struttura saranno incredibilmente bassi.

Le parti principali del forno verranno descritte nelle sottosezioni successive.

3.2.1 Struttura Reticolare in Legno

La struttura in legno è stata realizzata a partire da semplici listelli, ricavati da materiale di riciclo, tagliati, piallati e levigati in laboratorio in modo da renderle idonee all'assemblaggio, in base alle dimensioni di progetto. Le dimensioni del prototipo sono di 2050 mm in altezza, 1400 mm in larghezza, e 960 mm di profondità quando il forno si trova in condizione di non utilizzo, in massima estensione della lente mobile invece abbiamo una profondità massima di 2350mm.

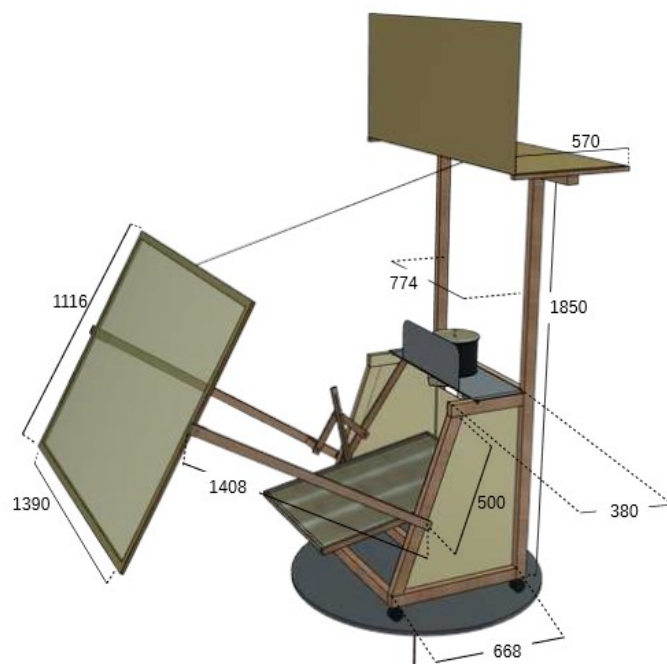


Figura 14- Schematizzazione della struttura

Per garantire durabilità e resistenza agli agenti atmosferici si è provveduto a verniciare ogni componente ligneo con una speciale vernice ignifuga a base di resine acriliche/siliconiche, applicate come unico prodotto nella protezione della superficie (Fig.16). Tale vernice ha la capacità di resistere a temperature fino a 450 °C.



Figura 15 - Assi in legno riciclato

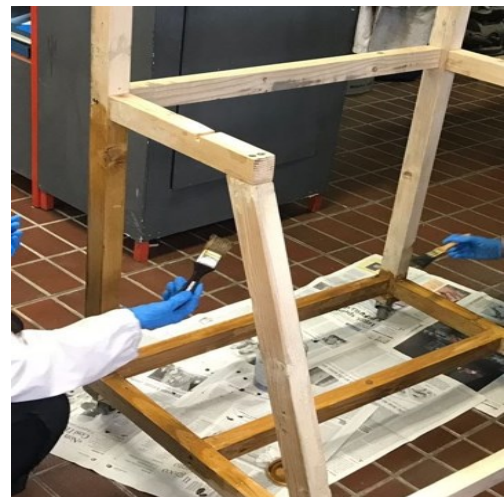


Figura 16 - Verniciatura listelli

La struttura risulta particolarmente leggera, ma per questioni di praticità per il trasporto e il posizionamento della stessa sono state installate delle ruote girevoli.

3.2.2 Piano Cottura

Il piano cottura è stato ricavato da una lastra di alluminio di spessore 2 mm e dimensioni di 337x850 mm. Agli angoli sono stati ritagliati quadrati di uguali dimensioni (40x67 mm) per rendere possibile l'appoggio della lamiera al supporto in legno, mentre al centro è stato realizzato un foro di diametro 220 mm per consentire il passaggio dei raggi solari. Infine, un'altra piastra verticale avente una lunghezza di 600 mm e un'altezza di 200 mm è stata fissata alla prima (Fig.17).

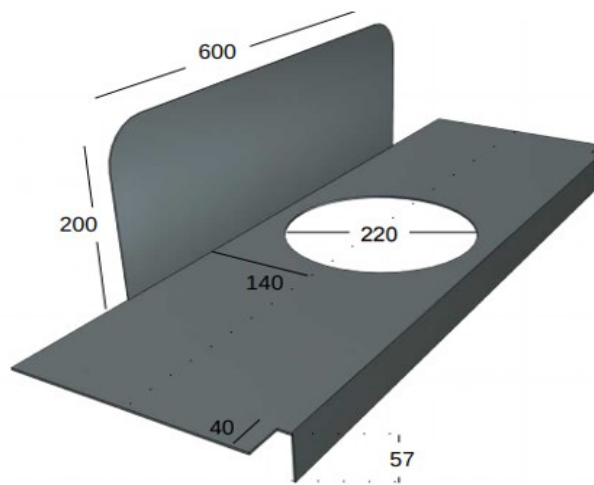


Figura 17 - Piano Cottura

3.2.3 Lente a Concentrazione

Uno degli elementi più importanti della struttura è la lente (Fig.18) , realizzata mediante l'uso di uno speciale materiale polimerico sviluppato dalla "Heliac ApS", la quale ha ideato un processo per creare un film trasparente con un profilo che imita la forma della lente di Fresnel tradizionale ma a costi incredibilmente bassi (Fig.20). La funzione di questa speciale lente è quella di rifrangere, o più semplicemente concentrare i raggi solari su una superficie ridotta, come farebbe una lente di ingrandimento. La lente utilizzata ha dimensioni 1090x1400 mm, è progettata in modo tale da avere una superficie di concentrazione della radiazione pari a 80mm (Fig.20) su una distanza focale di 2000mm, ha un peso pari a 300g e il suo costo è di circa 10,00 €.



Figura 18 - Lente di materiale Polimerico

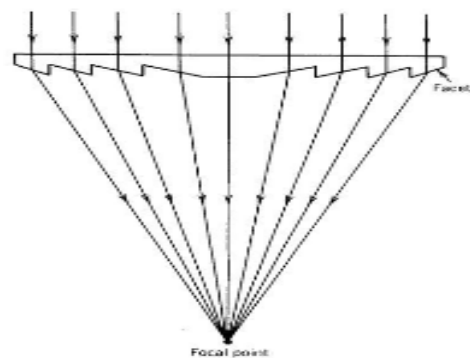


Figura 19 - Principio di Rifrazione

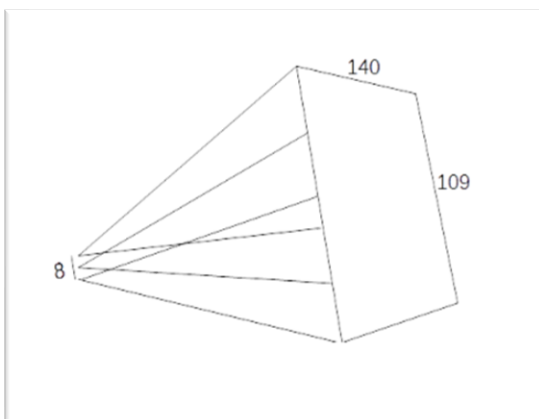


Figura 20 - Dinamica di Rifrazione

Production of lenses

- Extrusion coating
- Lenses produced at 1m/s
- 10GW/year \approx 25% district heat

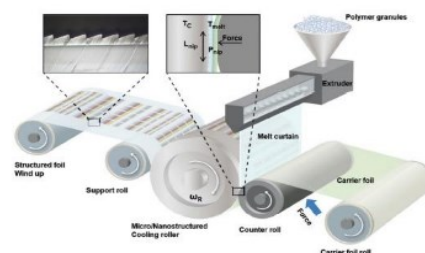


Figura 21 - Processo di Produzione

3.2.4 Superficie Riflettente

La superficie riflettente usata per il forno Heliac, posizionata al disotto della lente, ha la funzione di proiettare la radiazione luminosa concentrata da quest'ultima e rifletterla sotto il piano di cottura.

Tale superficie è applicata su un pannello di compensato avente una corniciatura in legno con una lunghezza di 900mm, una larghezza di 730mm e uno spessore di 30mm. Si compone principalmente di una speciale pellicola di vinile che riflette non soltanto la frazione di radiazione solare cosiddetta visibile, ovvero quella che anche i nostri occhi sono in grado di percepire, ma anche le frazioni ultravioletta ed infrarossa che rappresentano un contributo non trascurabile all'energia totale trasmessa. Per poter ottenere il massimo risultato, è necessario che tale pellicola sia sempre pulita e in tensione, altrimenti il fascio di luce risulta essere meno concentrato e quindi, meno efficace a causa della dissipazione di energia della radiazione.



Figura 22 - Superficie Riflettente

3.2.5 Copertura

Il Prototipo prevede anche una copertura, posizionata sopra al piano di cottura, con la funzione di creare una zona d'ombra per riparare dai raggi solari diretti l'operatore durante l'utilizzo del forno.

La copertura è realizzata con un telo in materiale plastico di colorazione bianca, vincolata ad una sottostruttura in legno avente dimensioni di 1140mm di lunghezza e 1400mm di larghezza.



Figura 23 - Copertura per operatore

3.3 Principio di Funzionamento

Il forno studiato è stato realizzato secondo le specifiche riportate da Heliac ApS, azienda specializzata nel solare termico. Il funzionamento alla base dello strumento è semplice [30]: grazie all'utilizzo della speciale lente rettangolare, il forno Heliac concentra un fascio luminoso in direzione di una superficie a specchio, che a sua volta riflette i raggi solari verso un piano di cottura.

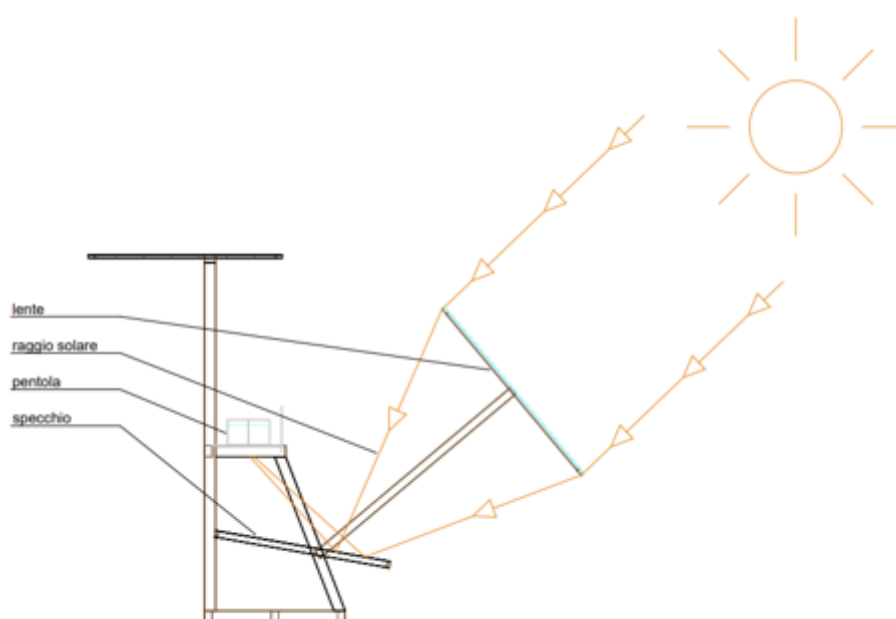


Figura 24 - Schematizzazione del funzionamento di un forno Heliac

Il principio fisico che regola il funzionamento della lente plastificata è lo stesso delle lenti in vetro che si utilizzano per vedere i dettagli più minuti. Se la lente è ben allineata con il sole sarà possibile concentrare l'energia solare in un unico fascio e indirizzarlo in una superficie più ristretta che corrisponde, all'incirca, al centro della superficie dello specchio posto nella parte inferiore del forno. Lo specchio, inclinato secondo un preciso angolo, sarà in grado di riflettere la radiazione solare verso il punto scelto che in questo caso è il piano di cottura e più precisamente il fondo della pentola. Per far sì che il fascio di luce arrivi sempre a colpire il punto prestabilito è necessario l'intervento di un operatore che si occupi di mantenere la lente inclinata in direzione del sole e regoli di conseguenza il riflesso dello specchio. Sarà inoltre necessario ruotare periodicamente, circa ogni 5/10 minuti, l'intera struttura per fare in modo che le prestazioni siano sempre massime. In questo modo e con dei tempi idonei, sarà possibile la cottura dei cibi e/o il loro riscaldamento.

CAPITOLO 4: SETUP SPERIMENTALE

4.1 PREMESSA

Nel seguente capitolo verranno descritte dettagliatamente la strumentazione e le metodologie utilizzate per effettuare i test sperimentali sul prototipo di forno solare “Heliac”, mirati a valutarne le prestazioni in termini di energia trasferita dalla radiazione solare media, ai fluidi presi in esame, su unità di tempo.

4.2 BANCO DI PROVA

Il banco di prova è composto da tutta la strumentazione necessaria per rilevare e registrare i dati raccolti durante l’esecuzione dei test sperimentali effettuati sul prototipo di forno solare, in modo da poterli prima elaborare e successivamente confrontare.

Il banco di prova utilizzato si compone principalmente della seguente strumentazione:

- Pireliometro;
- Termocoppie di tipo T;
- Acquisitore Dati (Data Logger)
- Computer portatile;

Gli elementi del banco di prova sono collegati come indica lo schema nella seguente pagina (Fig.25).

Il Data Logger è parte centrale di tutto il banco di prova, ad esso infatti sono collegate le termocoppie che hanno il compito di misurare la temperatura dell’ambiente e quella del fluido in esame posizionato sul forno solare Heliac. All’acquisitore dati è anche collegato il pireliometro, che permette di registrare la radiazione solare. A sua volta il Data Logger è collegato ad un computer portatile che, tramite un apposito software, permette di visualizzare e raccogliere i dati in tempo reale con la possibilità di esprimerli in tabelle e grafici.

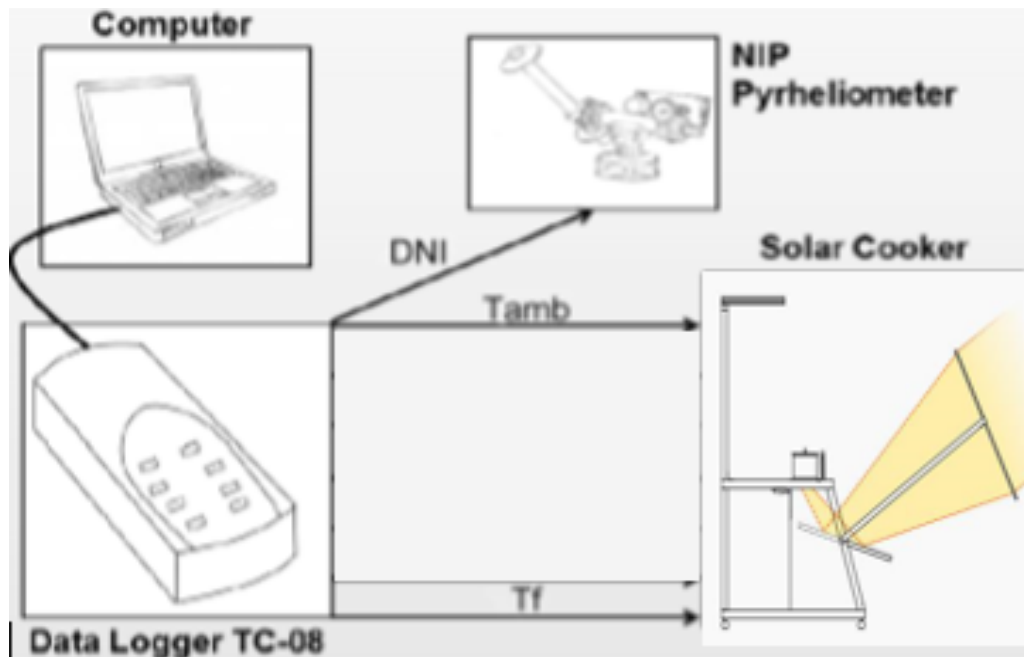


Figura 25 - Schematizzazione banco di prova

Nei paragrafi successivi verrà descritta in maniera più dettagliata tutta la strumentazione utilizzata nel banco di prova.

4.2.1 Pireliometro

Il pireliometro (o piroeliometro) è uno strumento per la misurazione dell'intensità della radiazione solare. Questa viene espressa dal valore della costante solare, cioè la quantità di energia che attraversa l'unità di superficie disposta, perpendicolarmente ai raggi del Sole, al di fuori dell'atmosfera terrestre. Tuttavia, lo strumento in questione misura la radiazione solare sulla superficie terrestre che in generale è sempre minore della costante solare extra-atmosferica a causa dell'assorbimento e della riflessione delle molecole di aria, vapore, CO₂, polvere, ecc. Il suo principio di funzionamento è quello di misurare la quantità di calore assorbita nell'unità di tempo da un ricevitore integrale di energia raggiante (di solito una superficie metallica annerita), di area nota, esposto perpendicolarmente ai raggi solari. [31] Il pireliometro è costituito da un lungo tubo all'estremità del quale, perpendicolarmente, è posizionato il sensore. Tale elemento funge da corpo nero che assorbe tutta la radiazione solare scaldandosi. Da una misura della temperatura del corpo si può risalire all'energia assorbita ovvero alla radiazione che

l'ha colpito. Inoltre, il pireliometro è dotato di una calibrazione (sensibilità) costante che, divisa per il segnale rilevato, restituisce l'irraggiamento in watt per metro quadro (W/m^2). (Fig.26)



Figura 26 - Pireliometro

Per un corretto funzionamento esso deve sempre essere in allineamento con la provenienza della radiazione solare e per questo motivo è dotato sia di un meccanismo manuale che permette all'operatore di allineare inizialmente lo strumento, che un meccanismo elettrico in grado di seguire automaticamente lo spostamento del sole nel tempo. Tuttavia, è necessario tenere sotto controllo la strumentazione per assicurarsi che funzioni correttamente e intervenire manualmente nel caso non lo facesse. Come accennato nel capitolo precedente i dati raccolti dal piroeliometro vengono campionati da un Data Logger ad esso collegato e comunicati, tramite un cavo, ad un computer che elabora i dati ottenuti.

4.2.2 Termocoppie

La termocoppia è un trasduttore di temperatura il cui funzionamento è basato sull'effetto termoelettrico, cioè un effetto per cui, in un circuito costituito da conduttori metallici o semiconduttori, per effetto della differenza di temperatura, viene generata elettricità. Le termocoppie sono ampiamente utilizzate perché economiche, facilmente sostituibili, standardizzate e possono misurare un ampio intervallo di temperature. Il loro limite più grande è l'accuratezza, infatti errori sistematici minori di un grado Celsius sono difficili da ottenere.

La termocoppia è costituita da due conduttori di materiale ben noto che si uniscono in un punto detto "giunzione calda" in prossimità della quale va effettuata la misura di temperatura da rilevare. Gli altri due estremi sono collegati ad una morsettiera alla quale è connesso lo strumento di misura; questa morsettiera rappresenta la "giunzione fredda", della quale è importante conoscere la temperatura al fine di misurare la differenza di potenziale elettrico dovuta ad una differenza di temperatura rispetto al giunto caldo. La giunzione calda è inserita all'interno di una guaina di protezione che penetra all'interno dell'apparecchiatura della quale si vuole misurare la temperatura. La guaina è utilizzata come protezione alla corrosione e all'usura; infatti se una delle estremità della termocoppia viene danneggiata le misurazioni non risultano più attendibili.

Esiste una grande varietà di termocoppie, distinguibili in base ai due conduttori elettrici che compongono la giunzione ed al campo di applicazione, cioè in base al fluido che si sta testando e la temperatura che si pensa di raggiungere.

Il tipo di termocoppia utilizzato al fine di rilevare la temperatura ambientale e anche quella del fluido in esame è la termocoppia di tipo T (Fig.). L'intervallo di misurazione oscilla tra i $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ e i $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ anche se la ripetitività è ottimale quando si arriva ad un massimo di $+200\text{ }^{\circ}\text{C}$. La sensibilità della termocoppia è di $48,2\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$. Presentano una composizione di rame e di una lega di rame e nichel. [32]



Figura 27 - Termocoppia di Tipo T

4.2.3 Acquisitore Dati

I dati che si vogliono misurare attraverso l'utilizzo delle termocoppie e del pireliometro vengono raccolti da un acquisitore di dati (Data Logger TC-08) che, grazie ad uno specifico software chiamato PicoLog e ad un collegamento al computer, permette di visualizzare i risultati sotto forma di misurazione e grafici. Tuttavia, questo strumento può funzionare anche indipendentemente da un computer memorizzando i dati nella memoria interna. In tabella è possibile vedere la scheda tecnica dell'acquisitore.

Tabella 1 - Scheda Tecnica Acquisitore Dati

NUMERO DI CANALI	8
INCERTEZZA SULLA TEMPERATURA	$\pm 0.2\%$ e $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$
INCERTEZZA SUL VOLTAGGIO	$\pm 0.2\%$ e $\pm 10\text{ }\mu\text{V}$
PROTEZIONE DI SOVRACARICO	$\pm 30\text{ V}$
TENSIONE IN INGRESSO	$\pm 70\text{ mV}$
VELOCITA' DI LETTURA	Fino a 10 per secondo
INGRESSO CONNETTORI	Termocoppie in miniatura
CONNESSIONE CON IL COMPUTER	USB
DIMENSIONI	201 x 104 x 34 mm

Il Data Logger (Fig.28) è provvisto di 8 canali di ingresso da cui è possibile ricevere dati; nel caso in esame le misure assegnate sono state le seguenti:

- Canale 1: pireliometro. La radiazione solare diretta misurata in W/m^2 (DNI);
- Canale 2: temperatura ambiente esterno, chiamata T_{amb} , misurata in $^{\circ}\text{C}$;
- Canale 8: temperatura del fluido, chiamata T_{f2} , misurata in $^{\circ}\text{C}$.



Figura 28 - Data Logger

Una volta raccolta i dati attraverso il Data Logger, il computer li riceve elaborandoli grazie all'utilizzo del programma PicoLog che consente di visualizzare i dati misurati e di vederne l'andamento in un grafico. Questo tipo di acquisizione è molto utile dal punto di vista pratico in quando è possibile rilevare immediatamente delle anomalie nelle registrazioni e quindi correggerne gli errori. [33]

4.2.4 Computer Portatile

Il Computer utilizzato per collegare l'acquisitore che consente di visualizzare e salvare i dati durante i test, come tutta la strumentazione precedentemente elencata, è stato fornito dal DIISM – Dipartimento di Ingegneria Industriale e Matematica dell' Università Politecnica delle Marche.

Ai fini di questo tipo di utilizzi non necessita un computer con delle particolari prestazioni tecniche, un pc da ufficio è più che sufficiente a svolgere questo tipo di mansioni, l'unico prerequisito fondamentale è che sul dispositivo sia installato il software dell'acquisitore dati "Picolog".



Figura 29 - Computer Portatile

4.3 MATERIALI UTILIZZATI

Per poter ricavare dalle prove dei dati da elaborare successivamente, sarà necessaria una conoscenza del materiale che si testa e del supporto grazie al quale sono condotte le prove. È importante che le prove siano eseguite sempre con la stessa quantità di fluido e con un supporto dalle caratteristiche pressoché simili per poter avere una standardizzazione del risultato.

4.3.1 Il Supporto

Il supporto utilizzato per svolgere i test è una comune pentola in acciaio usata per la cottura dei cibi avente un diametro di 20 cm.

La pentola presentava un fondo d'acciaio, e durante i primi test parte dei raggi solari venivano riflessi in tutte le direzioni, manifestando un minore assorbimento di calore da parte del fluido, e una quindi una scarsa efficienza del forno solare. Al fine di ottimizzare i risultati ottenuti, il fondo della pentola è stato verniciato con una vernice nera termoresistente, Presto® – Thermo Lack, avente base legante in resina di silicone, in grado di resistere fino alla temperatura di 600°C. [34]

Si è scelto di verniciare unicamente la parte inferiore della pentola in quanto solamente questa è direttamente esposta ai raggi solari nel momento in cui vengono eseguite le prove, e si è scelto di utilizzare il colore nero in quanto è risaputo che questo colore aumenta l'assorbanza.

Grazie all'utilizzo di questa vernice è stato possibile raggiungere risultati migliori.



Figura 30 - Supporto per test sperimentali con fluidi

4.3.2 I Fluidi

Durante le prove condotte con il forno a concentrazione solare Heliac sono stati testati due tipi di fluidi, utilizzando una quantità di fluido costante per ogni prova, pari a 3 kg ciascuno:

- Il primo fluido testato è stata l'acqua. L'acqua è dotata di proprietà fisiche e chimiche particolari che sono conseguenza dell'esistenza dei legami a idrogeno tra le molecole. Il calore specifico dell'acqua corrisponde alla quantità di energia assorbita da un grammo di acqua durante un aumento della temperatura di 1°C ed è pari a $4,18 \text{ J/g}^{\circ}\text{C}$ o a $1,0 \text{ cal/g}^{\circ}\text{C}$. L'acqua inoltre non è un buon conduttore termico, cioè ha una bassa attitudine a trasmettere calore, nello specifico la conducibilità termica dell'acqua vale $0,6 \text{ W/mK}$. Per l'elevato calore specifico, che le consente d'immagazzinare energia termica, per la debole viscosità che ne facilita la circolazione entro tubazioni e per il debole potere corrosivo, l'acqua si presta come mezzo di scambio termico per impianti di riscaldamento e come fluido evolvente nelle macchine termiche a vapore, fisse o mobili, alternative o rotative. L'acqua destinata a tali impianti deve contenere la minore quantità possibile di sali disciolti, specie di calcio, magnesio, silicio ecc. [35] Inoltre, è noto che la temperatura di ebollizione dell'acqua è di 100°C alla pressione di 1 atm;

- Il secondo fluido testato è un olio siliconico chiamato Rhodorsil Oils 47. Tale materiale è costituito da catene molecolari lineari di varia lunghezza composte dall'alternarsi di gruppi di molecole di silicio e ossigeno. La viscosità di questi oli aumenta con il loro grado di polimerizzazione, che corrisponde al valore dell'indice "n" come mostrato nel grafico (Fig.28). Questi oli si trovano allo stato liquido alla temperatura ambiente fino ad un valore dell'indice "n" di circa 2000. Per valori maggiori dell'indice essi tendono a presentarsi in uno stato simile alla gomma.

La struttura macromolecolare conferisce a questo tipo di olio caratteristiche specifiche tra cui: bassa viscosità e bassa variazione della stessa in funzione della temperatura, bassa tensione superficiale, alta compressibilità, ottima resistenza alle basse temperature, all'ossidazione e all'idrolisi, resistenza agli agenti atmosferici, limitata combustibilità e difficile miscibilità.

La pressione di vapore, e conseguentemente la volatilità, di Rhodorsil Oils 47 sono molto basse quando abbiamo una viscosità maggiore di $50 \text{ mm}^2/\text{s}$.

Questo tipo di materiale è molto stabile anche quando raggiunge elevate temperature, infatti, il fenomeno di ossidazione, in presenza di aria, inizia solo al raggiungimento dei 200 °C.

Questo accade grazie al grande contenuto di energia nei legami delle catene silossaniche che compongono la molecola.

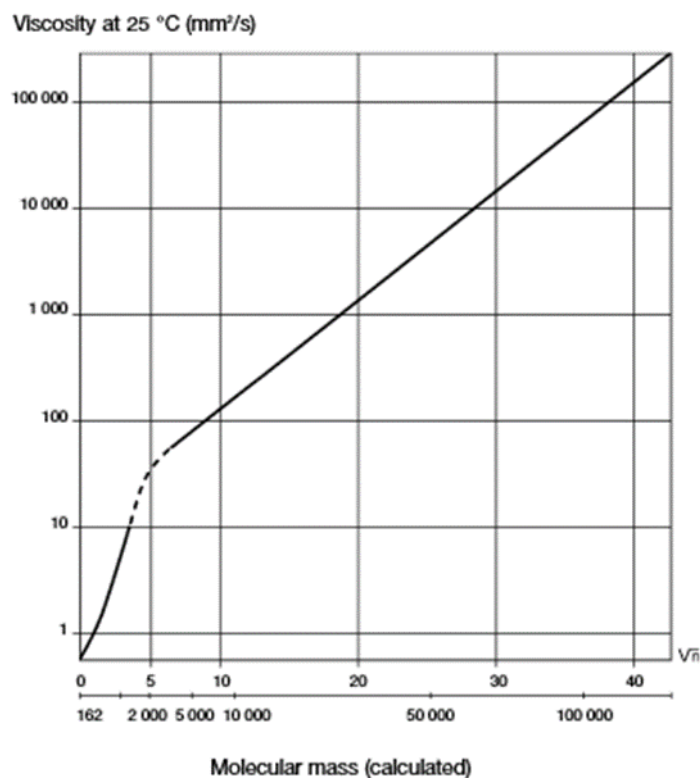


grafico 1 - Massa molecolare/viscosità olio siliconico Rhodorsil Oils 47

L'olio siliconico utilizzato ha precise proprietà fisiche come ad esempio il punto di infiammabilità che è circa 300 °C in un recipiente chiuso ma può arrivare a 315-330 °C in uno aperto. Il punto di fuoco si raggiunge ad una temperatura di circa 350 °C, mentre il punto di autoaccensione è intorno ai 450 °C. Analizzando l'estremo opposto, si avrà il raggiungimento del punto di scorrimento intorno ai -50 °C. Tali temperature cambiano in funzione della viscosità dell'olio considerato. La viscosità a sua volta, anche se in maniera lieve, è influenzata dalla temperatura come è possibile vedere dal grafico che segue (graf.2). [36]

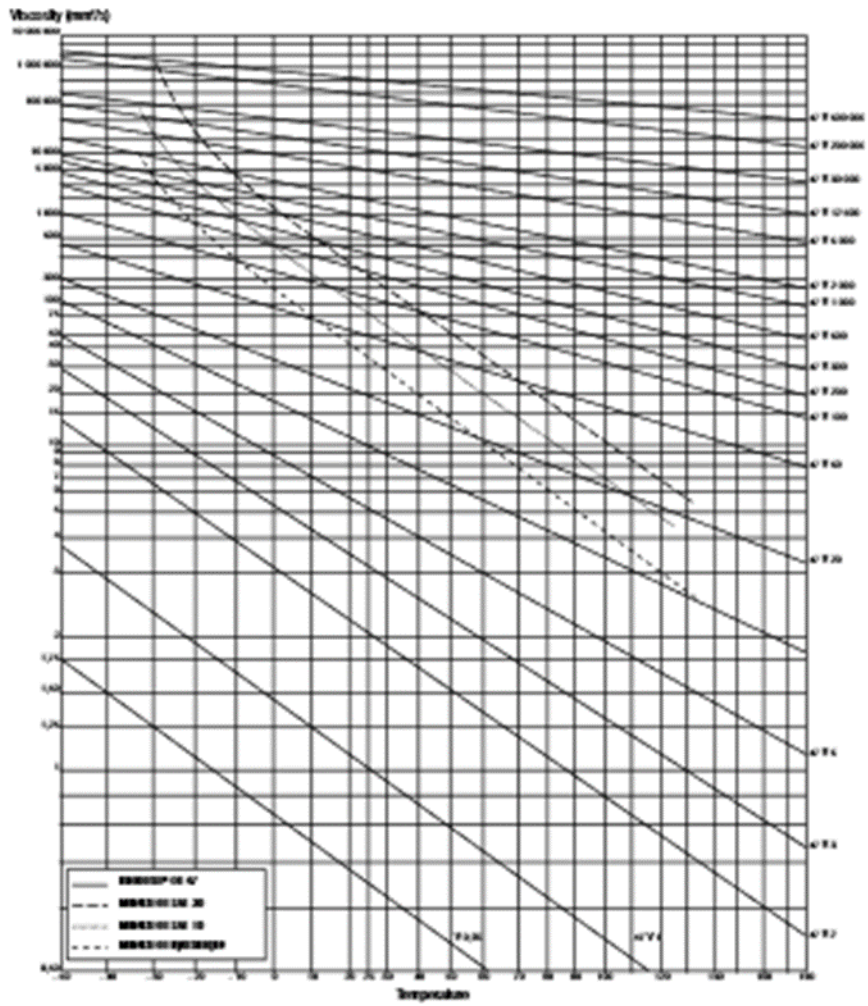


grafico 2 - Temperatura/Viscosità Rhodorsil Oils 47

CAPITOLO 5: ACQUISIZIONE ED ELABORAZIONE DATI

5.1 PREMESSA

I risultati dei test sperimentali riportati nei prossimi paragrafi sono stati effettuati nel dipartimento “DIISM” (Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche), dell’Università Politecnica delle Marche, durante i mesi di Giugno e Luglio 2020. Si è scelto il periodo estivo in quanto le condizioni metereologiche sono ovviamente più favorevoli a questo tipo di test, in quanto la radiazione solare è più intensa e prolungata rispetto al periodo invernale. Inoltre la possibilità di avere lunghe giornate soleggiate prive di interferenze nuvolose è di gran lunga maggiore.

Come anticipato nei capitoli precedenti i fluidi utilizzati per le prove sperimentali sono stati l’acqua e l’olio silconico . Nelle prove con l’acqua sono stati misurati i tempi necessari al raggiungimento della temperatura di ebollizione (100 °C), mentre nelle prove con l’olio silconico sono state misurate le temperature massime ottenute dallo stesso (200 ° C circa) e i tempi necessari al loro raggiungimento.

5.2 PROCEDURA DI ACQUISIZIONE DATI

Durante la fase dei test e dell’acquisizione dei dati le operazioni da eseguire sono state meticolose ed effettuate con grande accuratezza, al fine di garantire una maggiore attendibilità nei risultati finali.

Le operazioni che sono state eseguite in ogni prova sono le seguenti:

- Predisposizione sul tetto della facoltà di tutta la strumentazione necessaria per eseguire i test (il banco di prova, il forno solare Heliac, e relativa strumentazione di supporto, come carrelli, prolunghe, appoggi e apparecchiature per proteggersi dai raggi solari diretti);
- Posizionamento del Forno Solare Heliac in modo che la lente risulti “inattiva” e che il punto di fuoco sia direzionato verso la pavimentazione in pietra e non verso parti della struttura portante del forno, oggetti o persone con il rischio di arrecare danni da combustione;
- Pulizia della strumentazione, in particolare della lente e della superficie riflettente;
- Posizionamento del pireliometro con orientamento sull’asse Nord-Sud, collegamento all’alimentazione di corrente, e messa in direzione parallela rispetto ai raggi solari del tubo mediante apposita strumentazione di supporto dello stesso;

- Predisposizione del supporto (pentola in acciaio) con il relativo fluido selezionato per la prova del giorno (avente sempre massa pari a 3 kg), e collocamento momentaneo all'ombra in modo da non alterare la sua temperatura per effetto della radiazione solare diretta;
- Posizionamento del Data Logger, ad una distanza tale da permettere la regolazione periodica del forno solare senza che le termocoppie subiscano uno spostamento dalla posizione stabilita per le prove, e connessione al pireliometro (Canale 1);
- Predisposizione delle termocoppie per monitorare la temperatura dei seguenti elementi:
 - Ambiente esterno (Canale 2) N.B. (posizionato sempre all'ombra),
 - Fluido (Canale 8);
- Posizionamento e connessione del Data Logger al computer portatile, avvio del programma per l'acquisizione dei dati "PicoLog" e predisposizione di un supporto da protezione dai raggi solari per l'utente e la strumentazione sensibile;
- Posizionamento della pentola con il fluido sul supporto di cottura del forno solare, ma con la lastra di acciaio chiusa sotto il supporto, in modo da non permettere l'irraggiamento sul fondo della pentola prima di aver avviato la registrazione dei dati tramite il programma per l'acquisizione;
- Orientamento della lente, della superficie riflettente e del forno solare in modalità "attiva", con conseguente regolazione periodica in base allo spostamento del sole;
- Inserimento della termocoppia relativa al fluido all'interno della pentola mediante apposito foro su coperchio, in modo che l'estremità della termocoppia sia sempre immersa nel fluido, ma senza mai toccare il fondo e/o le pareti (se ciò accadesse infatti si avrebbero delle letture di temperatura falsate);
- Verificare che tutta la strumentazione sia posizionata in modo corretto e tutti i dati rilevati dal Data Logger sul computer siano veritieri e sensati;
- Avvio della registrazione per l'acquisizione dei dati tramite il programma "PicoLog";
- Rimozione della lastra posizionata sotto la pentola e sotto il supporto nel punto di cottura in modo tale da permettere il libero flusso dei raggi solari convogliati nel punto di fuoco
- Orientamento periodico del forno (ogni 5/10 minuti circa) e controllo dei dati in fase di raccolta;
- Termine della Prova:
 - **Prove con Acqua:** la prova può considerarsi terminata quando il fluido raggiunge i 100 °C, o si mantiene costante ad una temperatura prossima a quella di ebollizione;

- **Prove con Olio:** la prova può considerarsi terminata quando la temperatura del fluido non presenta più incrementi di valore, e rimanga costante per qualche minuto a parità di DNI;
- Stop all'acquisizione dati, verifica dell'attendibilità dei dati raccolti, e salvataggio degli stessi;
- Rimozione della termocoppia dal fluido utilizzato per la prova
- Smaltimento del Fluido:
 - Acqua: possibilità di smaltimento su pavimentazione in pietra o su terra;
 - Olio: posizionamento del fluido all'ombra, in attesa che torni a temperatura ambiente per poter essere riposto in magazzino o riutilizzato per un'altra prova;
- Posizionamento del forno in modalità "inattiva" ;
- Smantellamento e ricollocamento di tutta la strumentazione all'interno delle diverse aree del dipartimento.

5.3 PROVE SPERIMENTALI CON ACQUA

Prova del 19/06/2020

La prima prova è stata effettuata previa previsione meteorologica, con una aspettativa di una giornata pienamente soleggiata in totale assenza di nuvole. Purtroppo da come possiamo vedere dall'andamento della DNI nel grafico si sono manifestati alcuni raggruppamenti nuvolosi durante la prova, che però non hanno modificato in modo particolarmente sensibile l'andamento di crescita della temperatura del fluido di prova.

La temperatura ambiente media registrata è stata di 26,5 °C, e la DNI media è stata pari a 873 W/m².

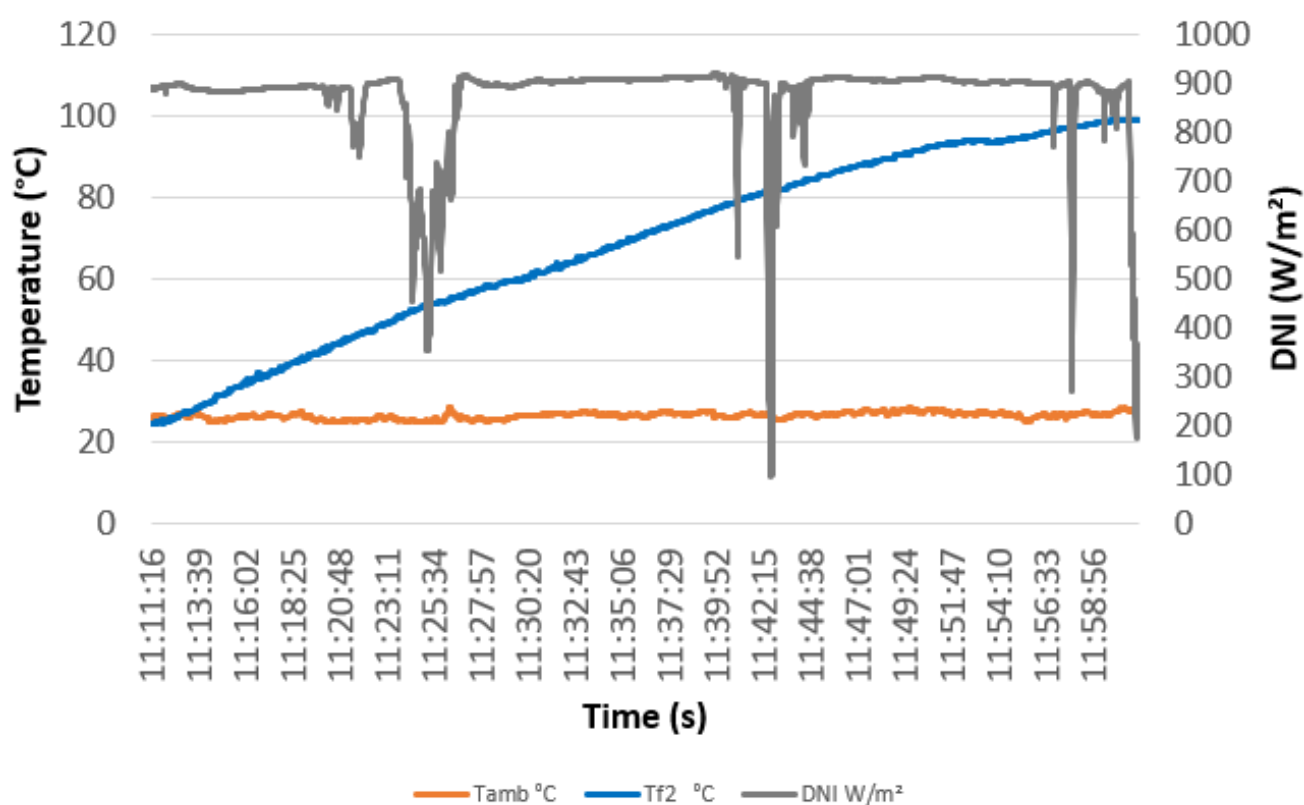


grafico 3 - Prima prova con acqua 19/06/2020

La prova ha avuto inizio alle ore 11:11 del mattino, con una temperatura iniziale del fluido di 24,5 °C e si è conclusa una volta stabilizzatasi la temperatura massima di ebollizione di 99,2 °C alle ore 11:58, con una durata complessiva di 47 minuti.

PROVE DEL 23/06/2020

Prima Prova

La prove eseguite in questa data sono state effettuate in una giornata pienamente soleggiata e in totale assenza di interferenze nuvolose.

La temperatura ambiente media registrata è stata di 26,3 °C, mentre la DNI media registrata è stata di 857 W/ m².

L'avvio della registrazione per l'acquisizione dei dati è stato effettuato alle ore 10:20 con una temperatura iniziale del fluido pari a 26,9 °C, e si è conclusa una volta stabilizzatasi la temperatura massima di ebollizione di 99,6 °C, alle ore 11:09, con una durata complessiva di 49 minuti.

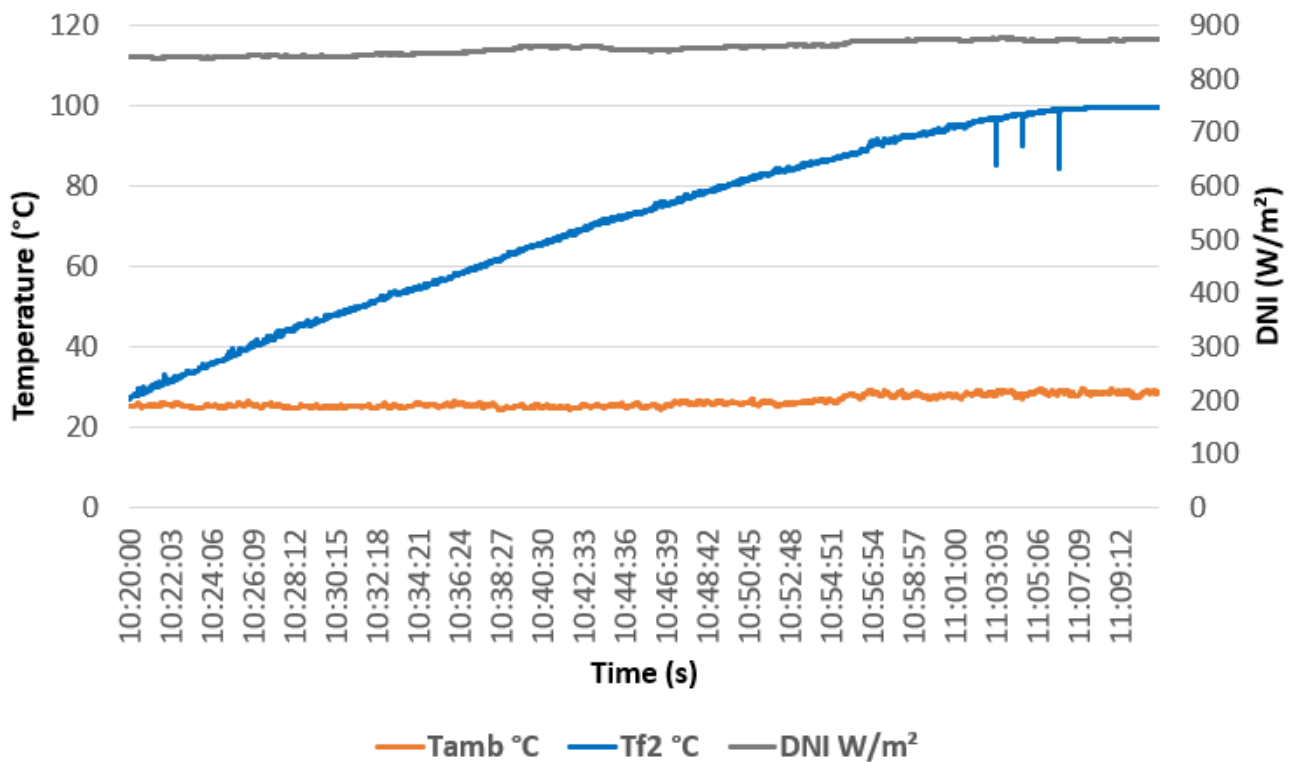


grafico 4 - Prima prova con acqua del 23/06/2020

Seconda Prova

La seconda prova ha avuto inizio alle ore 11:11, nella quale si è registrata una temperatura ambiente media pari a 26,4 °C e una DNI media pari a 873 W/m².

La temperatura iniziale del fluido era di 18,8 °C, e la prova si è conclusa una volta stabilizzatasi la temperatura massima di ebollizione di 99,3 °C, alle ore 12:01, con una durata complessiva di 50 minuti.

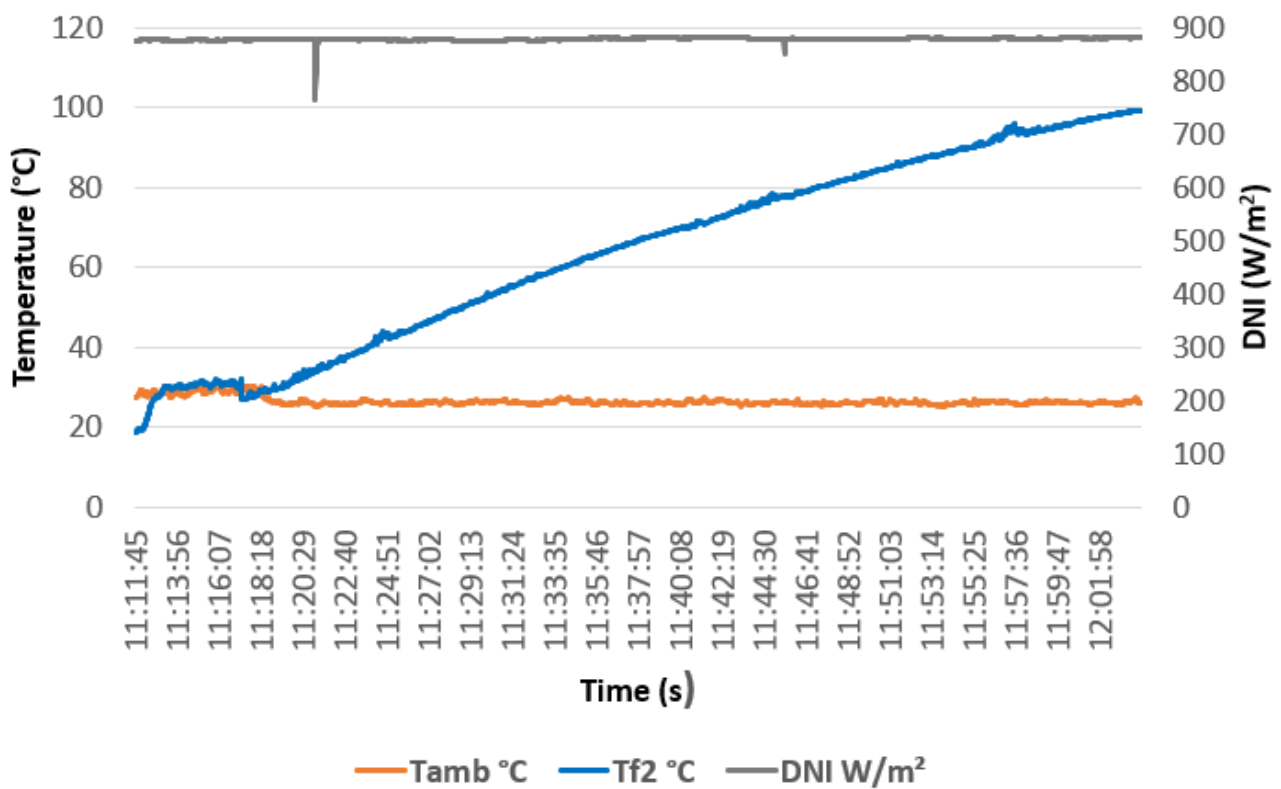


grafico 5 - Seconda prova con acqua del 23/06/2020

Terza Prova

La terza prova ha avuto inizio alle ore 12:04, con una temperatura ambiente media pari a 26,8 °C e una DNI media pari a 883 W/m².

La temperatura iniziale del fluido era di 20,3 °C, e la prova si è conclusa una volta stabilizzatasi la temperatura massima di ebollizione di 99,6 °C, alle ore 13:00, con una durata complessiva di 56 minuti.

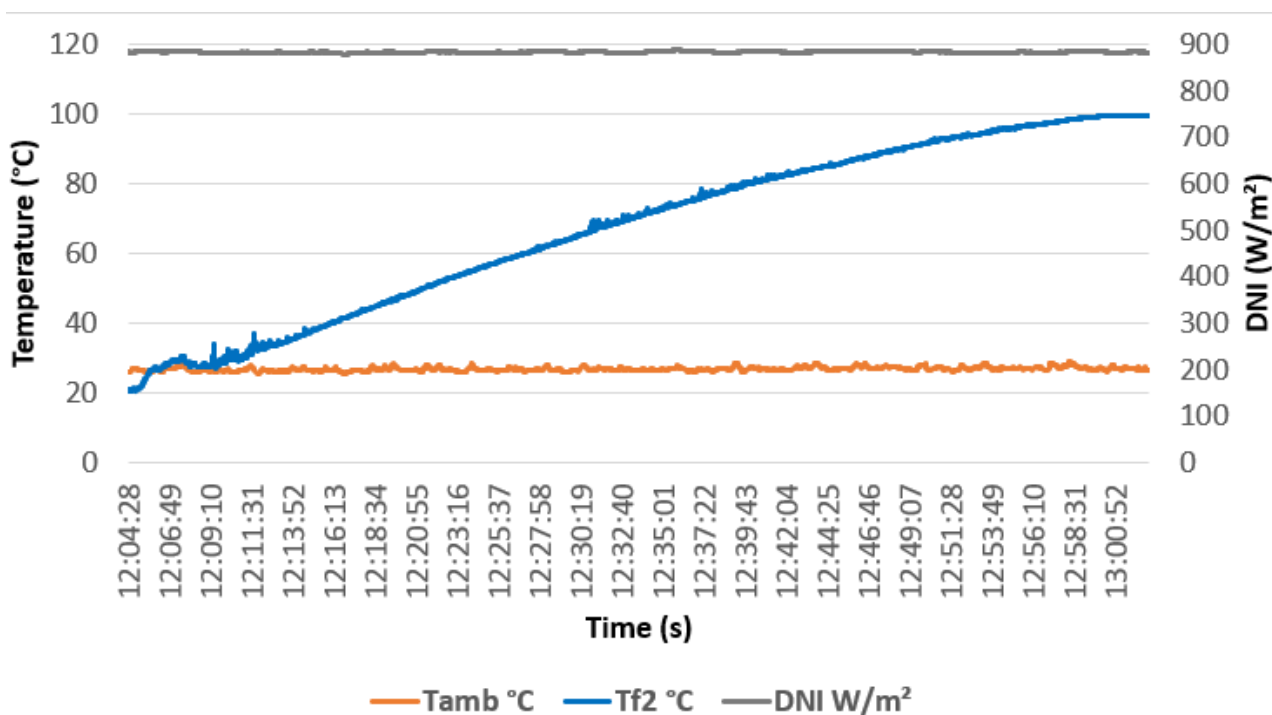


grafico 6 - Terza prova con acqua del 23/06/2020

Quarta Prova

La quarta prova ha avuto inizio alle ore 14:00, con una temperatura ambiente media pari a 27,4 °C, mentre la DNI media registrata è stata di 876 W/m².

La temperatura iniziale del fluido era di 27,2 °C, e la prova si è conclusa una volta stabilizzatasi la temperatura massima di ebollizione di 99,5 °C, alle ore 15:02, con una durata complessiva di 62 minuti.

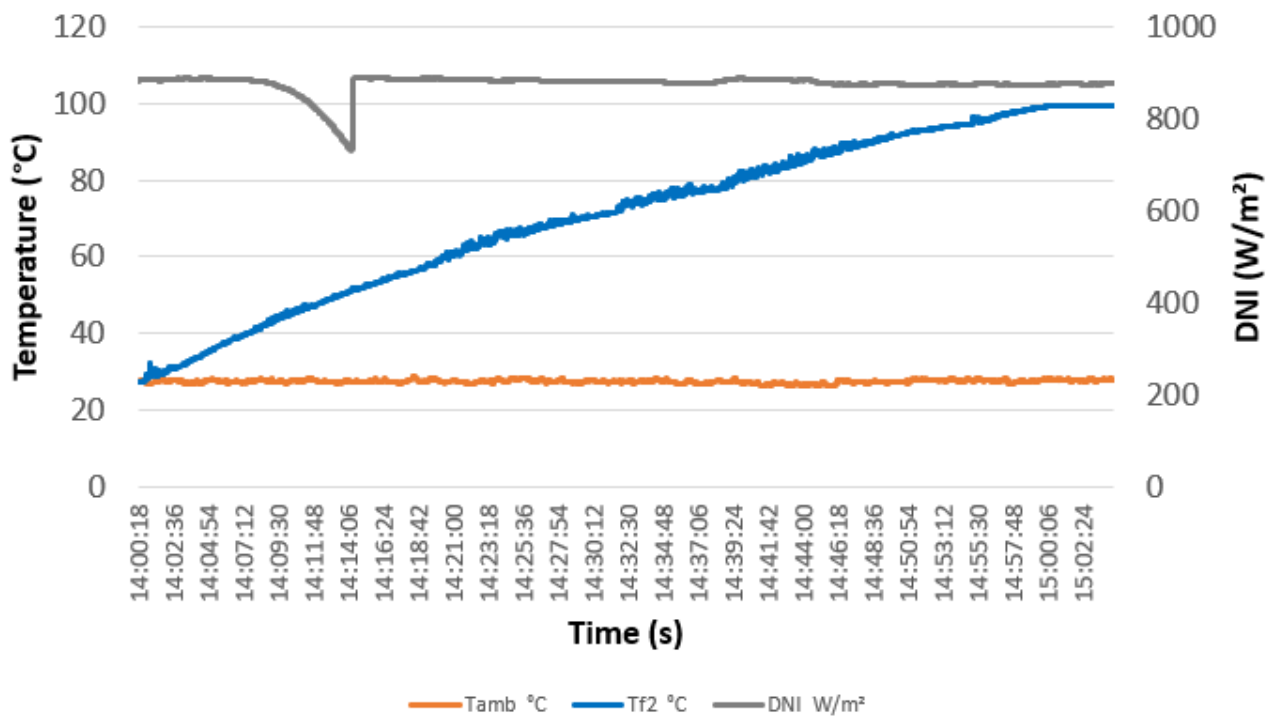


grafico 7 - Quarta prova con acqua del 23/06/2020

Quinta Prova

La quinta prova ha avuto inizio alle ore 15:14, con una temperatura ambiente media pari a 28,7 °C, mentre la DNI media registrata è stata di 858 W/m².

La temperatura iniziale del fluido era di 21,5 °C, e la prova si è conclusa una volta stabilizzatasi la temperatura massima di ebollizione di 99,3 °C, alle ore 16:06, con una durata complessiva di 52 minuti.

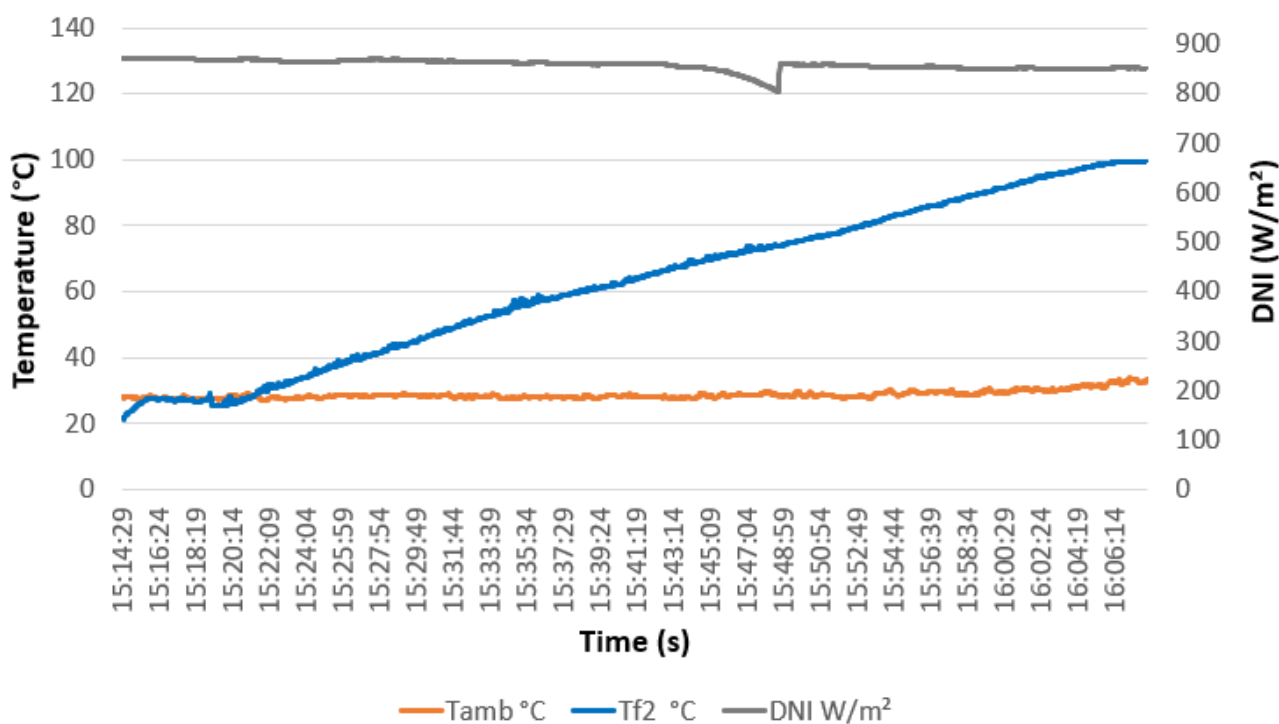


grafico 8 - Quinta prova con acqua del 23/06/2020

PROVE DEL 24/06/2020

Prima Prova

La prove effettuate in questa data sono state eseguite in una giornata pienamente soleggiata e in totale assenza di interferenze nuvolose.

La temperatura ambiente media registrata è stata di 28,7 °C, mentre la DNI media registrata è stata di 816 W/ m².

L'avvio della registrazione per l'acquisizione dei dati è stato effettuato alle ore 12:21 con una temperatura iniziale del fluido pari a 28,6 °C, e si è conclusa una volta stabilizzatasi la temperatura massima di ebollizione di 99,4 °C, alle ore 13:24, con una durata complessiva di 62 minuti.

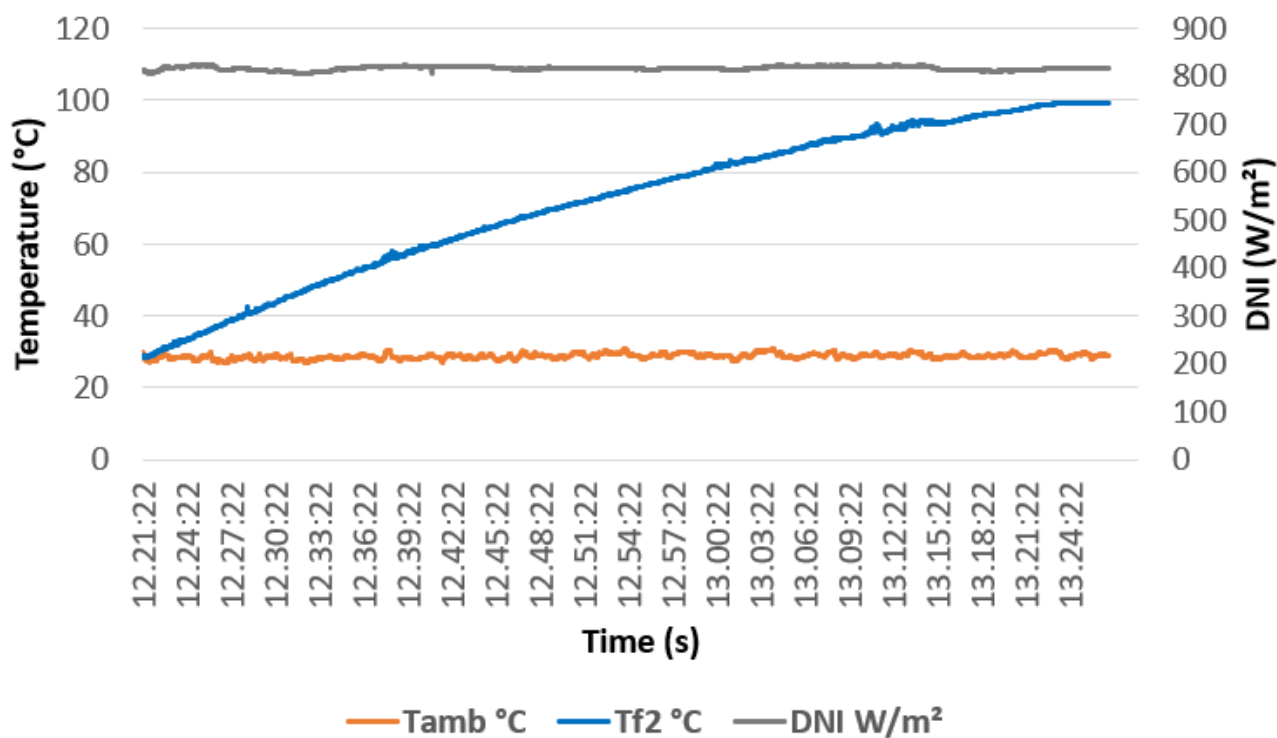


grafico 9 - Prima prova con acqua del 24/06/2020

Seconda Prova

La seconda prova ha avuto inizio alle ore 13:35, con una temperatura ambiente media pari a 29,4 °C e una DNI media pari a 802 W/m².

La temperatura iniziale del fluido era di 25,4 °C, e la prova si è conclusa una volta stabilizzatasi la temperatura massima di ebollizione di 99,4 °C, alle ore 14:44, con una durata complessiva di 69 minuti.

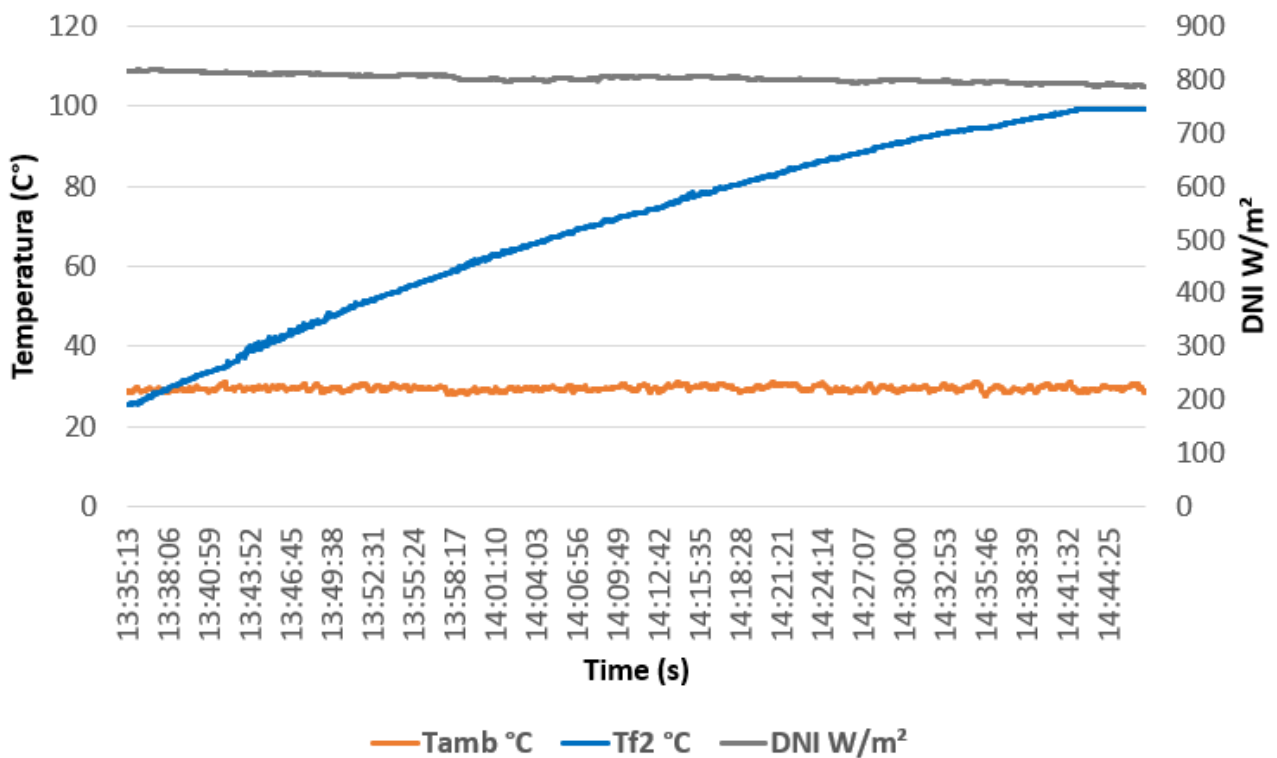


grafico 10 - Seconda prova con acqua del 24/06/2020

PROVA DEL 25/06/2020

La prova effettuata in questa data è stata eseguita in una giornata inizialmente soleggiata, ma in prossimità della conclusione della stessa si sono manifestate delle interferenze nuvolose tali da non poter permettere l'esecuzione di ulteriori prove sperimentali. Inoltre la presenza di tali nubi ha causato una evidente riduzione delle prestazioni del forno, in quanto il tempo necessario al raggiungimento della temperatura di ebollizione si è rivelato essere di circa 20 minuti superiore rispetto alle tempistiche medie delle altre prove che si sono aggirate sempre intorno ai 50/60 minuti.

La temperatura ambiente media registrata è stata di 30 °C, mentre la DNI media registrata è stata di 800 W/ m².

L'avvio della registrazione per l'acquisizione dei dati è stato effettuato alle ore 13:40 con una temperatura iniziale del fluido pari a 28,3 °C, e si è conclusa una volta stabilizzatasi la temperatura massima di ebollizione di 99,3 °C, alle ore 15:12, con una durata complessiva di 82 minuti.

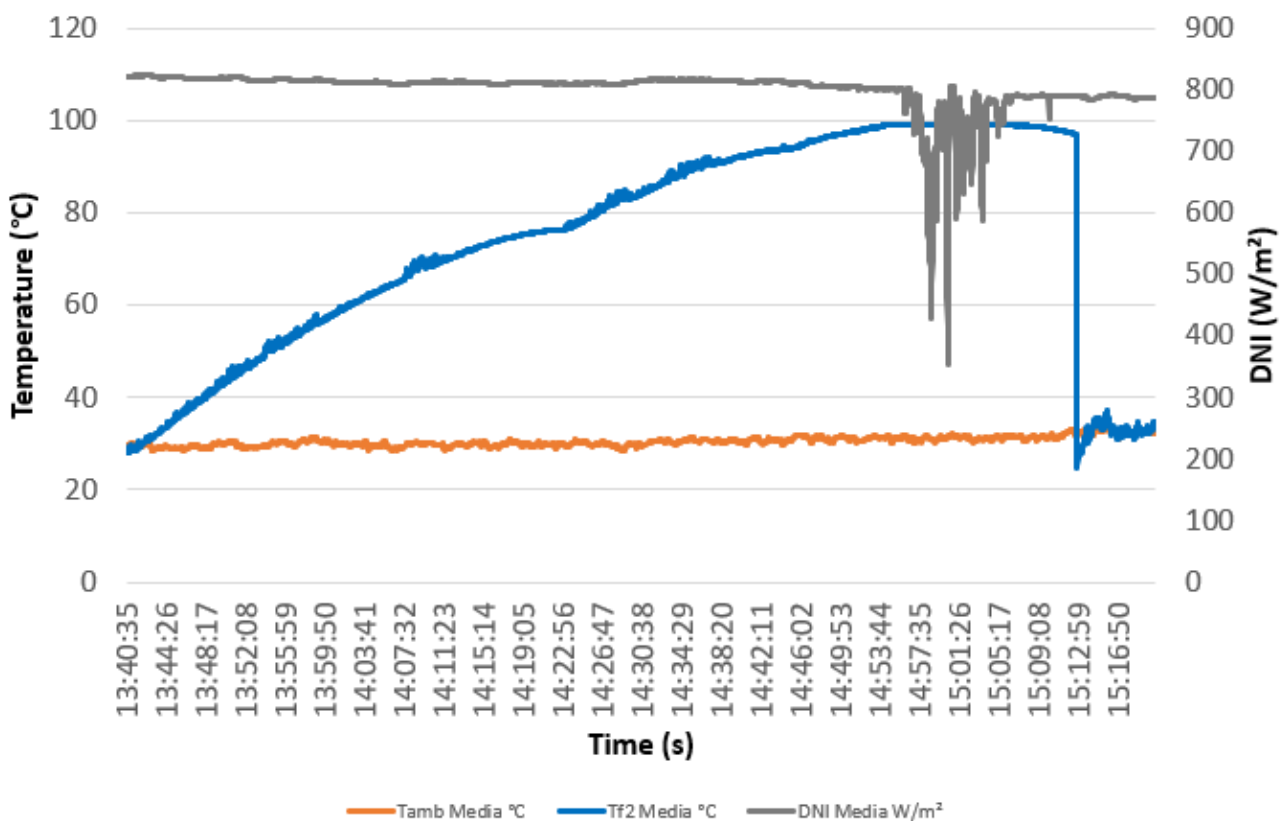


grafico 11 - Prova con acqua del 25/06/2020

PROVE DEL 26/06/2020

Prima Prova

La prove effettuate in questa data sono state eseguite in una giornata pienamente soleggiata e in totale assenza di interferenze nuvolose.

La temperatura ambiente media registrata è stata di 30 °C, mentre la DNI media registrata è stata di 848 W/ m².

L'avvio della registrazione per l'acquisizione dei dati è stato effettuato alle ore 13:47 con una temperatura iniziale del fluido pari a 29,3 °C, e si è conclusa una volta stabilizzatasi la temperatura massima di ebollizione di 99,8 °C, alle ore 14:42, con una durata complessiva di 55 minuti.

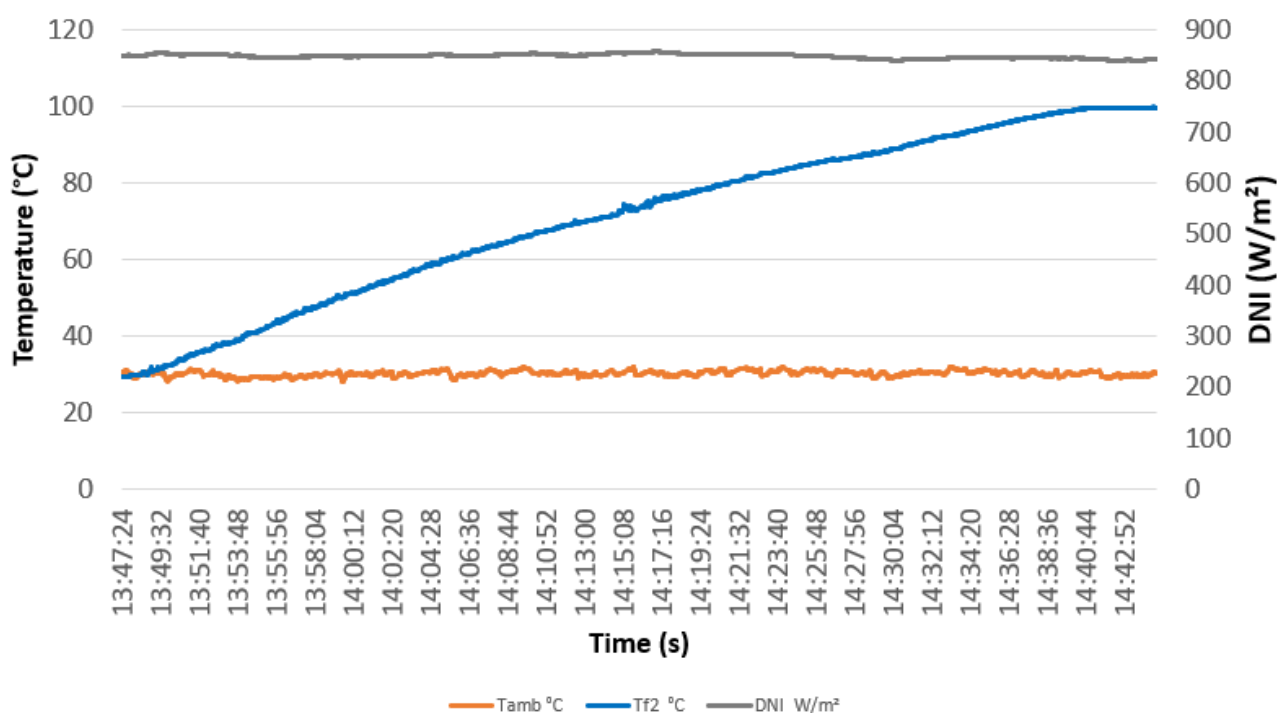


grafico 12 - Prima prova con acqua del 26/06/2020

Seconda Prova

La seconda prova ha avuto inizio alle ore 14:45, con una temperatura ambiente media pari a 30,9 °C e una DNI media pari a 831 W/m².

La temperatura iniziale del fluido era di 24,7 °C, e la prova si è conclusa una volta stabilizzatasi la temperatura massima di ebollizione di 99,6 °C, alle ore 15:37, con una durata complessiva di 52 minuti.

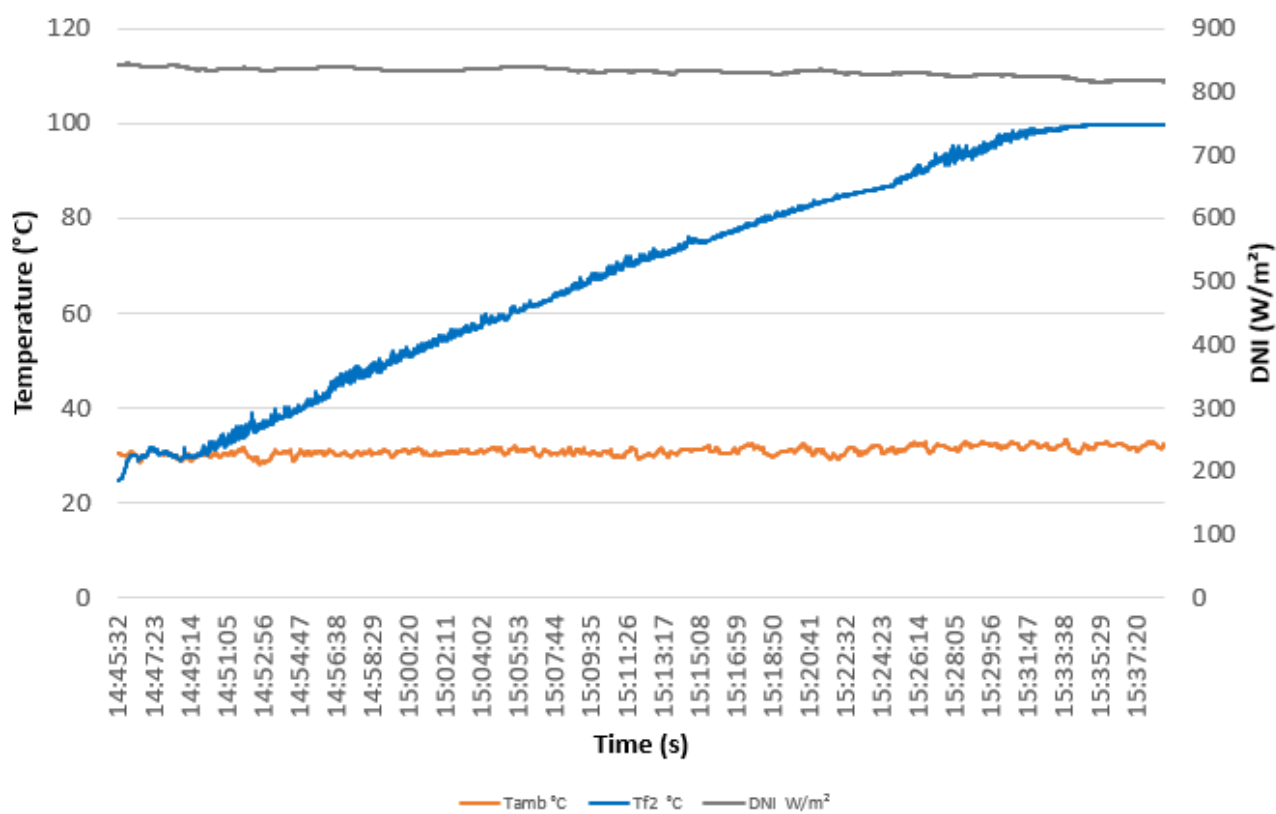


grafico 13 - Seconda prova con acqua del 26/06/2020

5.4 PROVE SPERIMENTALI CON OLIO SILICONICO

PROVE DEL 24/06/2020

Prima Prova

Le prove effettuate in questa data sono state eseguite in una giornata pienamente soleggiata e in totale assenza di interferenze nuvolose.

La temperatura ambientale media registrata è stata di 27 °C, mentre la DNI media registrata è stata di 812 W/ m².

L'avvio della registrazione per l'acquisizione dei dati è stato effettuato alle ore 10:20 con una temperatura iniziale del fluido pari a 26,3 °C, e si è conclusa una volta stabilizzatasi la temperatura massima di circa 182 °C, alle ore 11:50, con una durata complessiva di 90 minuti.

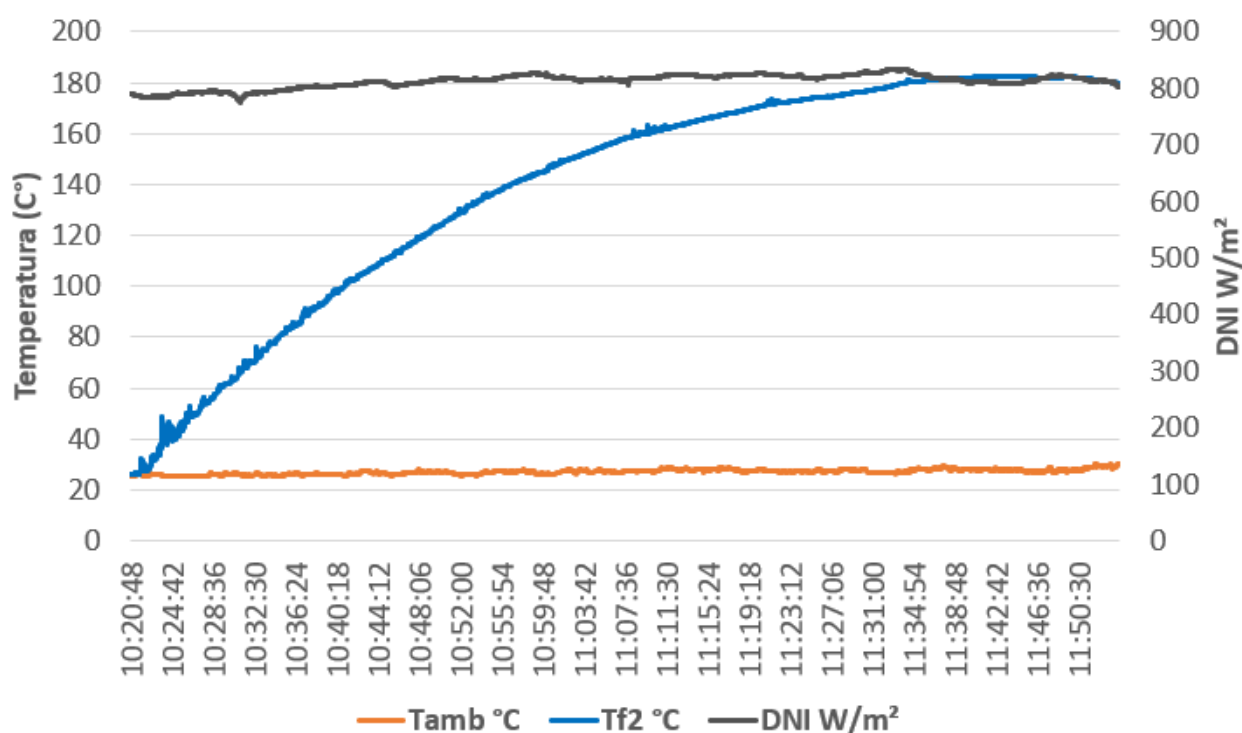


grafico 14 - Prima prova con olio del 24/06/2020

Seconda Prova

La seconda prova ha avuto inizio alle ore 14:55, con una temperatura media ambientale pari a 29,8 °C e una DNI media pari a 752 W/m². Durante la fase di acquisizione dei dati, intorno alle 15:15 la termocoppia che aveva il compito di rilevare l'andamento di temperatura del fluido in esame, ha iniziato a registrare dei dati non riconducibili allo stato termico effettivo dell'olio, manifestando dei salti di temperatura inaspettati. Sospettando un un malfunzionamento della termocoppia si è provveduto ad una repentina sostituzione, permettendo la continuazione della prova, senza comprometterne l'esito.

La temperatura iniziale del fluido risulta essere pari a 35,6 °C, temperatura leggermente superiore alle solite, in quanto è stato necessario attendere circa 3 ore dopo la precedente prova affinché l'olio si raffreddasse, tornando così ad una temperatura utile per poter condurre un altro test.

La conclusione della prova è avvenuta alle ore 16:25 una volta stabilizzatasi la temperatura massima raggiunta di circa 167 °C, con una durata complessiva di 90 minuti.

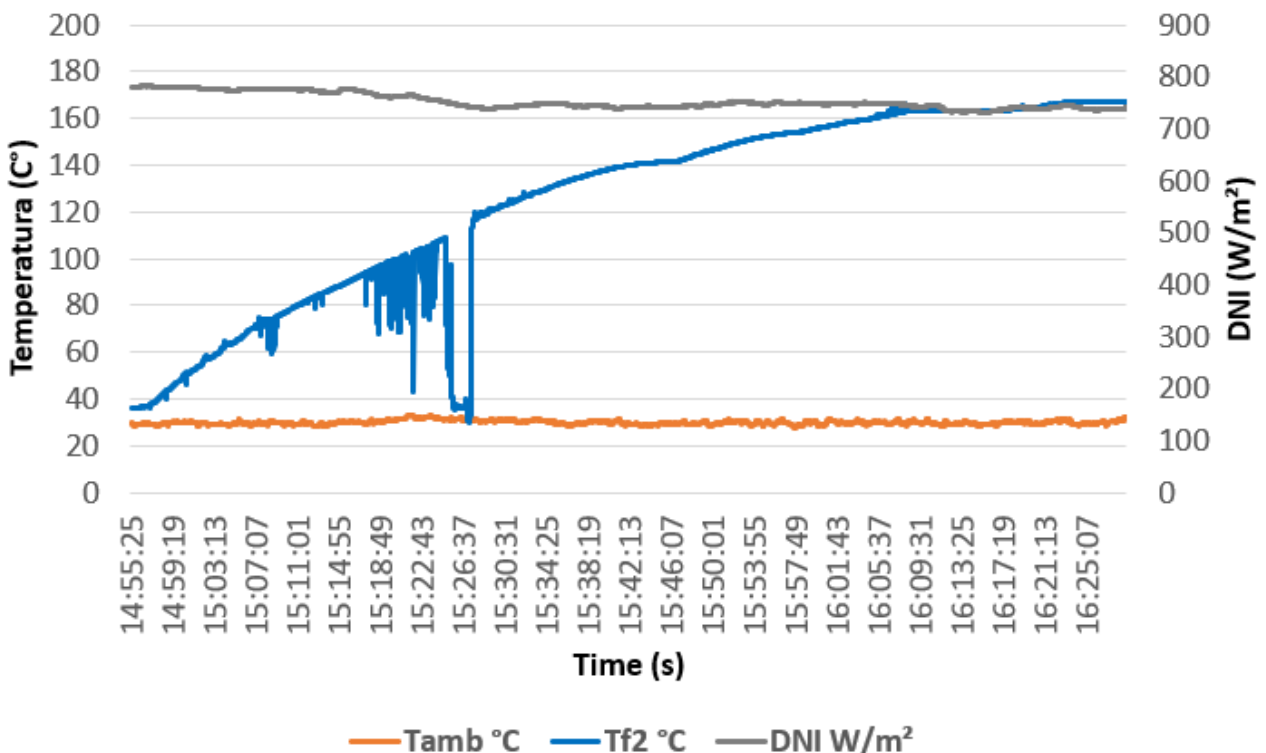


grafico 15 - Seconda prova con olio del 24/06/2020

PROVE DEL 24/06/2020

Prima Prova

La prove effettuate in questa data sono state eseguite in una giornata pienamente soleggiata e in totale assenza di interferenze nuvolose.

La temperatura ambientale media registrata è stata di 26,6 °C, mentre la DNI media registrata è stata di 905 W/m².

L'avvio della registrazione per l'acquisizione dei dati è stato effettuato alle ore 10:38 con una temperatura iniziale del fluido pari a 27,7 °C, e si è conclusa una volta stabilizzatasi la temperatura massima di circa 197 °C, alle ore 12:52, con una durata complessiva di 134 minuti.

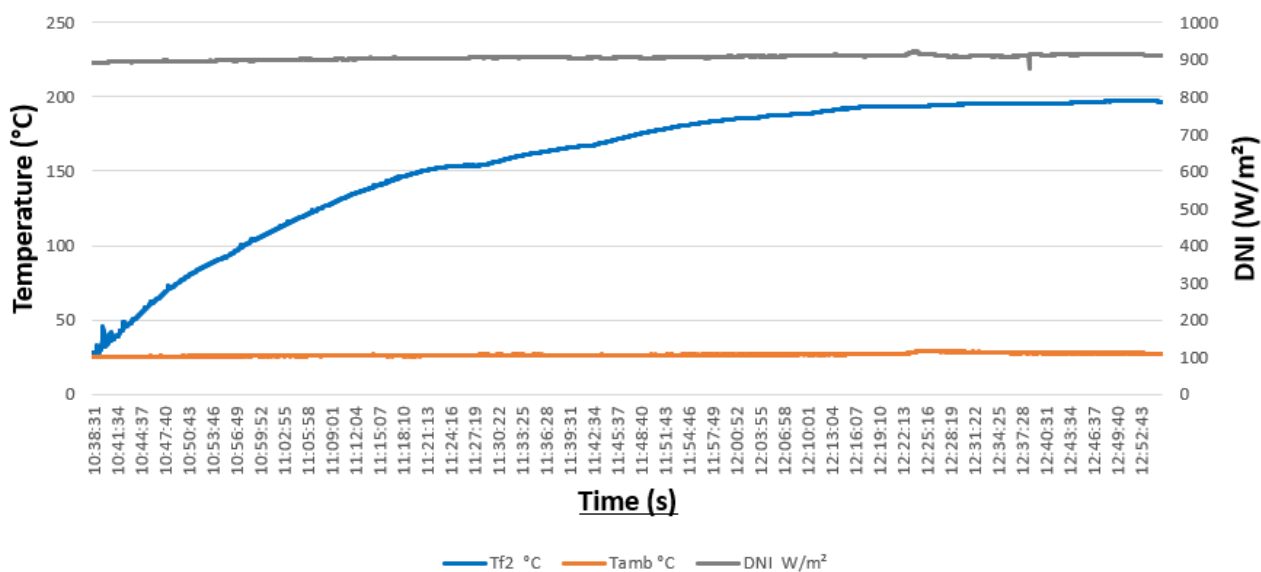


grafico 16 - Prima prova con olio del 09/07/2020

Seconda Prova

La seconda prova ha avuto inizio alle ore 13:55, con una temperatura media ambientale pari a 28,9 °C e una DNI media pari a 917 W/m².

La temperatura iniziale del fluido era di 33,3 °C, e la prova si è conclusa una volta stabilizzatasi la temperatura massima raggiunta di circa 206 °C, alle ore 15:52, con una durata complessiva di 117 minuti.

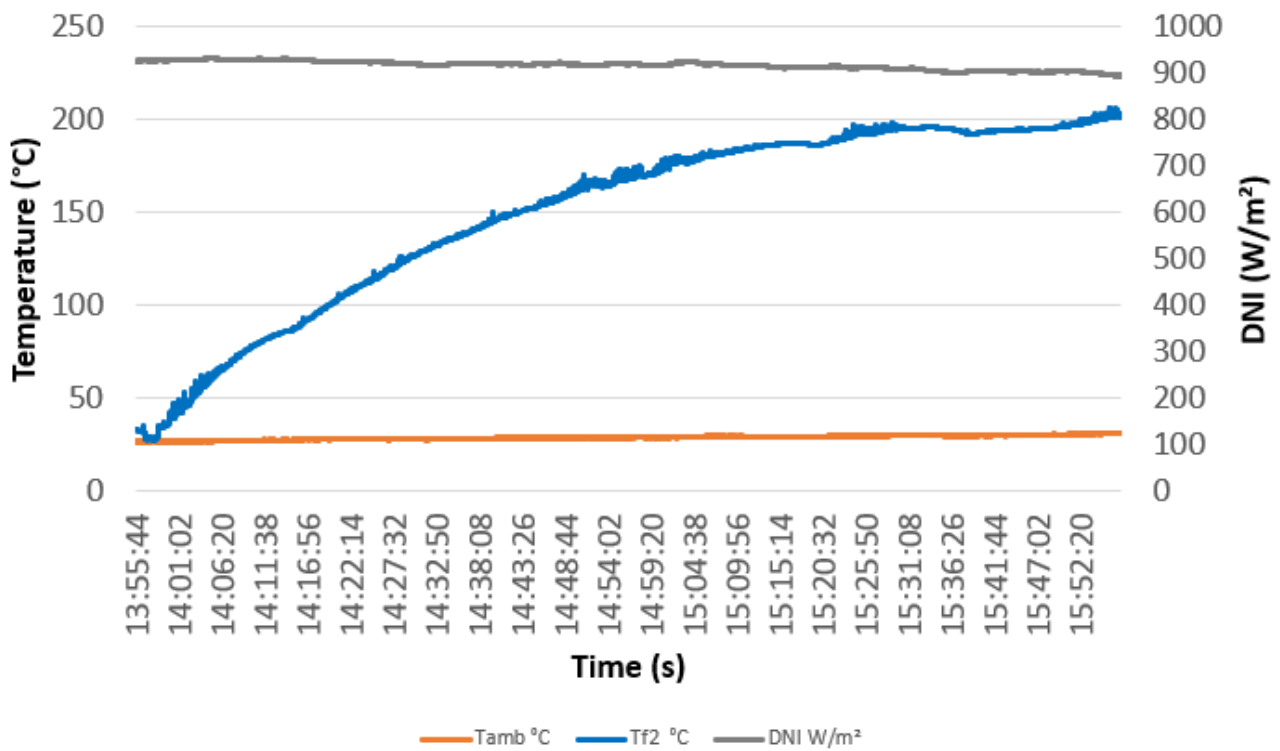


grafico 17 - Seconda prova con olio del 09/07/2020

5.5 PROCEDURA DI ELABORAZIONE DATI

I dati raccolti dalle diverse prove sperimentali sono stati elaborati al fine di ottenere il parametro **COR** (Cooker Opto-thermal Ratio), ovvero rapporto termo-ottico del forno.

Questo parametro viene utilizzato in alternativa alla TPP (Thermal Performance Parameters), cioè al parametro di prestazione termica, per valutare appunto le prestazioni dei forni solari, uniformando le tipologie di test da eseguire sulle diverse varietà presenti in commercio o in fase di sperimentazione. La determinazione del parametro COR permette quindi delle procedure di l'acquisizione dei dati e dei test, versatili, più semplici e più veloci rispetto alle precedenti modalità di valutazione delle prestazioni termiche. [37] Uno degli obiettivi del COR è la stima della massima temperatura raggiungibile del fluido (T_{fx}), all'interno della pentola. Questo parametro proposto recentemente, ha lo scopo di poter semplificare la valutazione del tipo di cottura da eseguire, come la bollitura, friggitura, torrefazione, cottura a secco ecc.

Il COR viene definito mediante la seguente formula.

$$\text{COR} = \frac{\eta_0 C}{U_L}$$

Dove:

η_0 (eta zero) rappresenta l'efficienza ottica;

C rappresenta il rapporto di concentrazione;

U_L rappresenta il fattore di perdita di calore ($\text{W/m}^2 \text{K}$).

Un elevato valore del COR rappresenta una maggiore efficienza del forno solare, dunque ad elevati valori di η_0 e di C , e a bassi valori di U_L , le prestazioni dello strumento tenderanno ad essere di maggiore efficienza.

Uno dei primi parametri utilizzati per la caratterizzazione delle prestazioni di un forno solare è il tempo necessario al raggiungimento dell'evaporazione del fluido Δt , anche indicato come tempo di cottura. Questo tempo è stato impiegato per ottenere il **tempo specifico di ebollizione** (t_s), definito come:

$$t_s = \frac{\Delta t A_a}{m}$$

Un altro parametro è il **tempo caratteristico di ebollizione** (t_c):

$$t_c = t_s \frac{G_{av}}{G_{ref}}$$

Dove:

- Δt è il tempo necessario al raggiungimento di evaporazione del fluido (h o min);
- A_a è l'area di apertura del forno (m^2);
- m è la massa del fluido in esame (kg);
- G_{av} è la radiazione solare media durante l'intervallo di tempo Δt (W/m^2);
- G_{ref} è riferito ad un valore della radiazione solare pari a $900 W/m^2$.

Il tempo caratteristico di ebollizione t_c può essere utilizzato come parametro per mettere a confronto diversi tipi di forni solari sotto l'azione di differenti livelli di radiazione solare.

Un altro parametro necessario è l'**efficienza termica media complessiva** del forno solare (η_{av}), definito dal rapporto tra il calore assorbito dal fluido, e il calore rilasciato dalla radiazione solare sulla superficie del forno, esprimibile mediante la seguente formula:

$$\eta_{av} = \frac{m c \Delta T}{G_{av} A_a \Delta t}$$

Dove:

- c è il calore specifico del fluido ($J/kg \text{ } ^\circ C$);
- ΔT è la differenza di temperatura tra quella massima raggiunta dal fluido durante la cottura e la temperatura ambiente.

5.6 ELABORAZIONE DATI

Procediamo con i risultati dell'elaborazione dei dati raccolti durante le diverse prove.

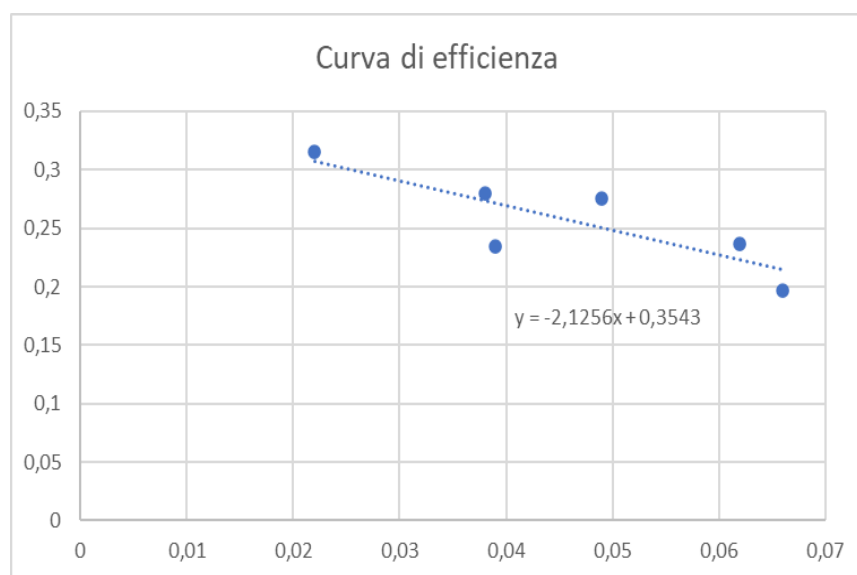
PROVE CON ACQUA

L'intervallo di temperature utilizzato nella fase di elaborazione dei dati per l'acqua è stato dai 40°C ai 90°C. Nella prima prova a scopo illustrativo viene riportato l'andamento della curva di efficienza dove sulle ascisse abbiamo i valori relativi a $(T_{f,media} - T_{amb,media})/G_T$, mentre sulle ordinate abbiamo i valori relativi a Q''/G_T .

G_T è il totale della radiazione solare media sul piano di apertura (W/m^2);

Q'' è il tasso di accumulo di calore utile per unità di superficie del fluido (W/m^2).

Prove del 19/06/2020



Prova #	1
$T_{f,0}$ (°C)	24.5
$T_{f,1}$ (°C)	99.2
$T_{amb, media}$ (°C)	26.5
DNI_{media} (W/m^2)	873
Δt (h)	0.50
t_s ($h m^2/kg$)	0.26
t_c ($h m^2/kg$)	0.25
η	0.26
COR	0.167

grafico 18 - Curva di efficienza (W) del 19/06/2020

Prove del 23/06/2020

Prova #	1	2	3	4	5
$T_{f,0}$ (°C)	26.3	18.8	20.3	27.2	21.52
$T_{f,1}$ (°C)	99.6	99.9	99.6	99.5	99.3
$T_{amb, media}$ (°C)	26.3	26.4	26.8	27.4	28.7
DNI_{media} (W/m ²)	857	879	883	876	858
Δt (h)	0.51	0.52	0.54	0.69	0.54
t_s (h m ² /kg)	0.27	0.27	0.28	0.36	0.28
t_c (h m ² /kg)	0.25	0.26	0.28	0.35	0.27
η	0.26	0.24	0.23	0.19	0.24
COR	0.199	0.134	0.133	0.143	0.257

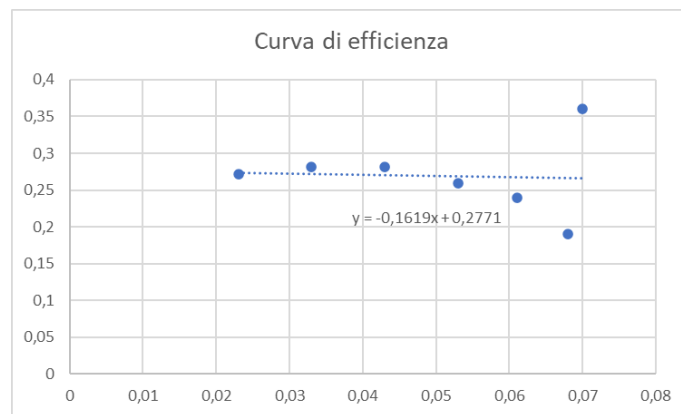


grafico 19 - Curva di efficienza prova n.1 (W) 23/06/2020

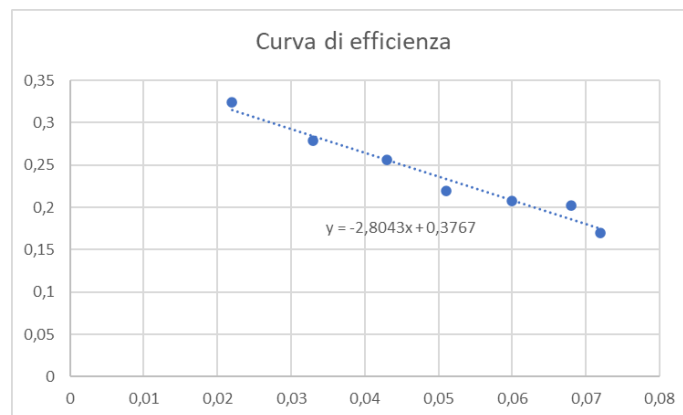


grafico 20 - Curva di efficienza prova n.2 (W) 23/06/2020

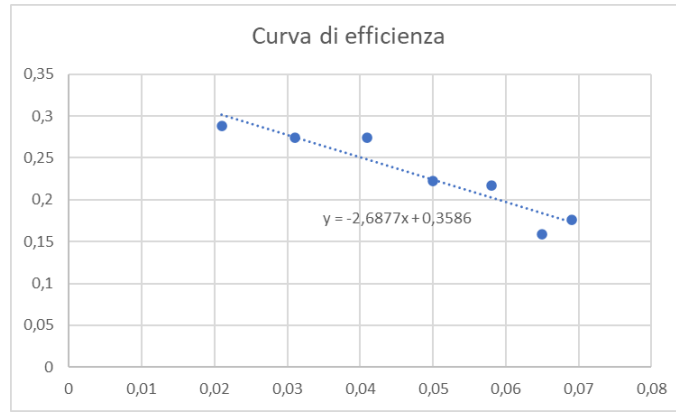


grafico 21 - Curva di efficienza prova n.3 (W) 23/06/2020

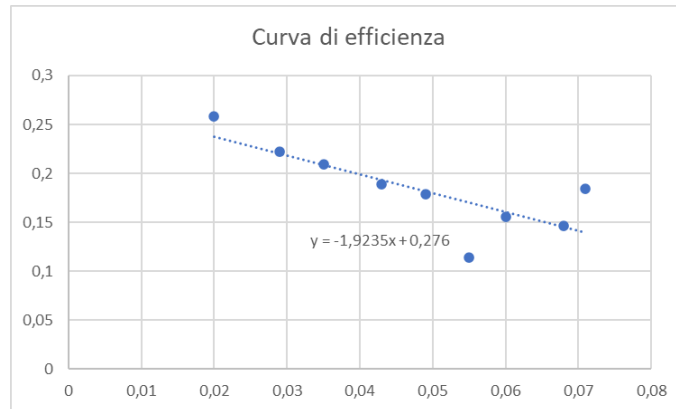


grafico 22 - Curva di efficienza prova n.4 (W) 23/06/2020

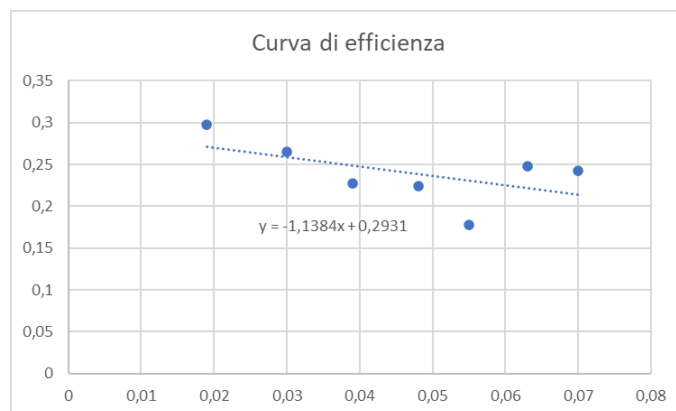


grafico 23 - Curva di efficienza prova n.5 (W) 23/06/2020

Prove del 24/06/2020

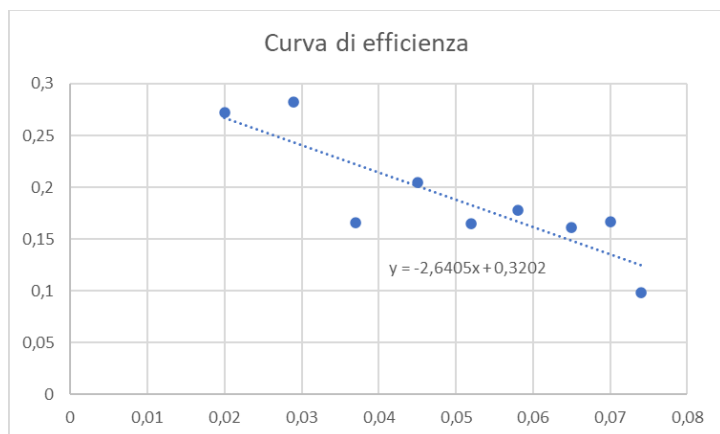


grafico 24
Curva di efficienza, prova n. 1 (W) 24/06/2020

Prova #	1	2
$T_{f,0}$ (°C)	28.6	25.4
$T_{f,1}$ (°C)	99.4	99.4
$T_{amb, media}$ (°C)	28.7	29.4
DNI_{media} (W/m ²)	816	802
Δt (h)	0.69	0.73
ts (h m ² /kg)	0.36	0.38
tc (h m ² /kg)	0.33	0.34
η	0.2	0.19
COR	0.121	0.151

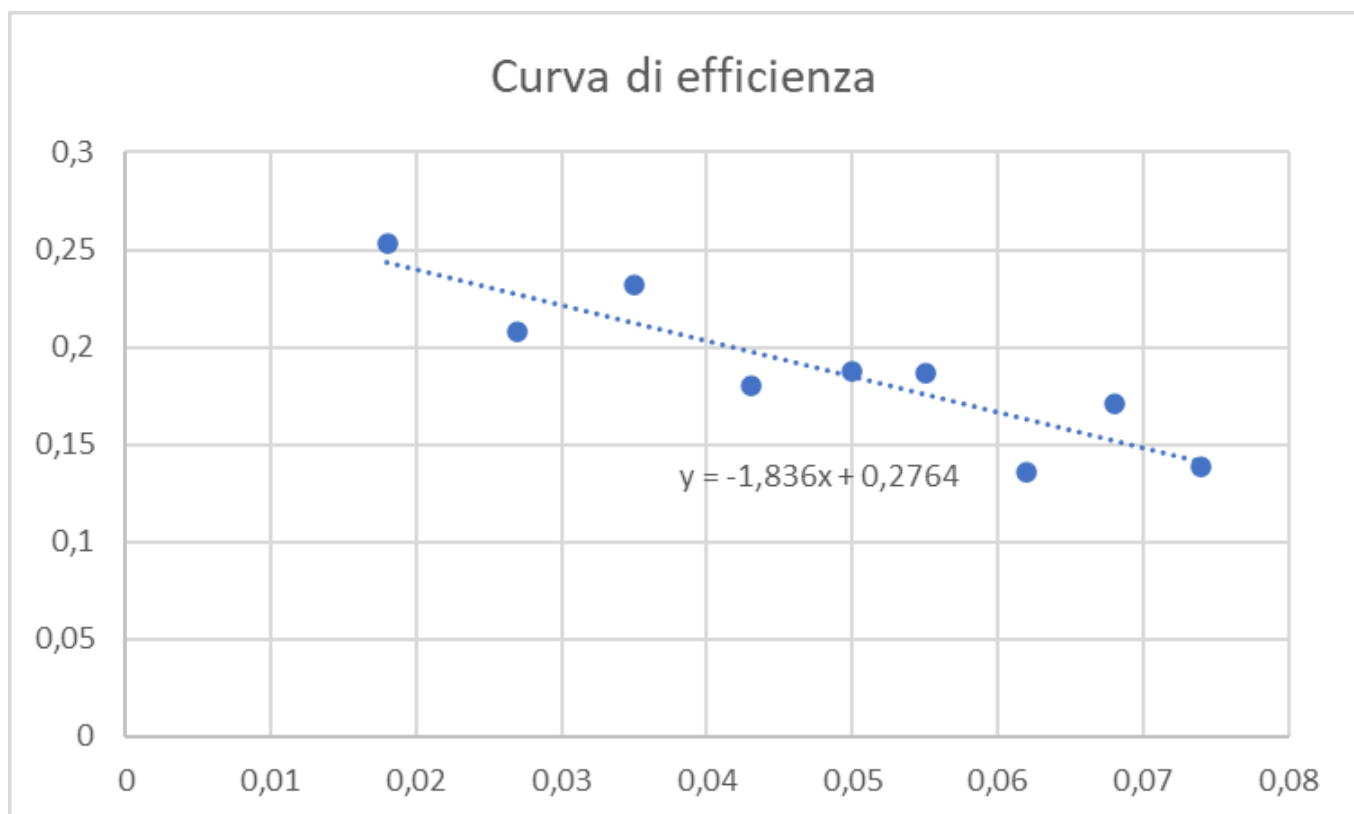


grafico 25 - Curva di efficienza prova n.2 (W) 24/06/2020

Prove del 25/06/2020

Prova #	1
$T_{f,0}$ (°C)	28.3
$T_{f,1}$ (°C)	99.3
$T_{amb, media}$ (°C)	30.4
DNI_{media} (W/m ²)	800
Δt (h)	0.79
t_s (h m ² /kg)	0.41
t_c (h m ² /kg)	0.37
η	0.17
COR	0.115

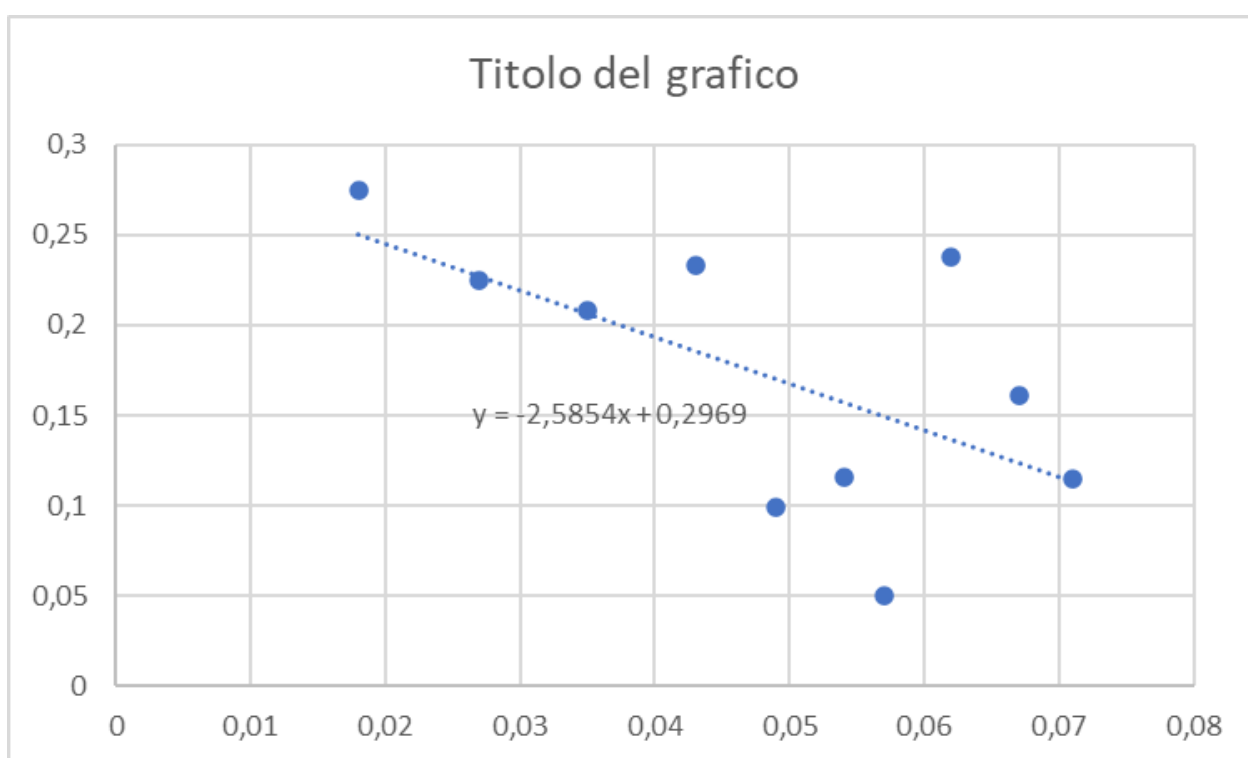


grafico 26 - Curva di efficienza prova n.1 (W) 25/06/202

Prove del 26/06/2020

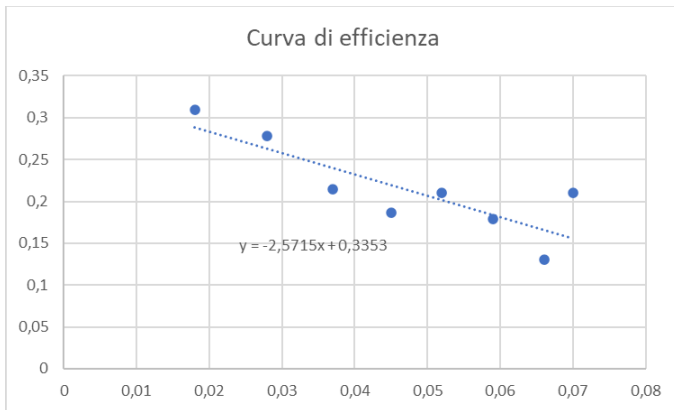


grafico 27 - Curva di efficienza prova n.1
26/06/2020

Prova #	1	2
$T_{f,0}$ (°C)	29.3	24.7
$T_{f,1}$ (°C)	99.8	99.6
$T_{amb, media}$ (°C)	30.1	30.9
DNI_{media} (W/m ²)	848	831
Δt (h)	0.61	0.53
ts (h m ² /kg)	0.32	0.27
tc (h m ² /kg)	0.30	0.25
η	0.22	0.26
COR	0.130	0.225

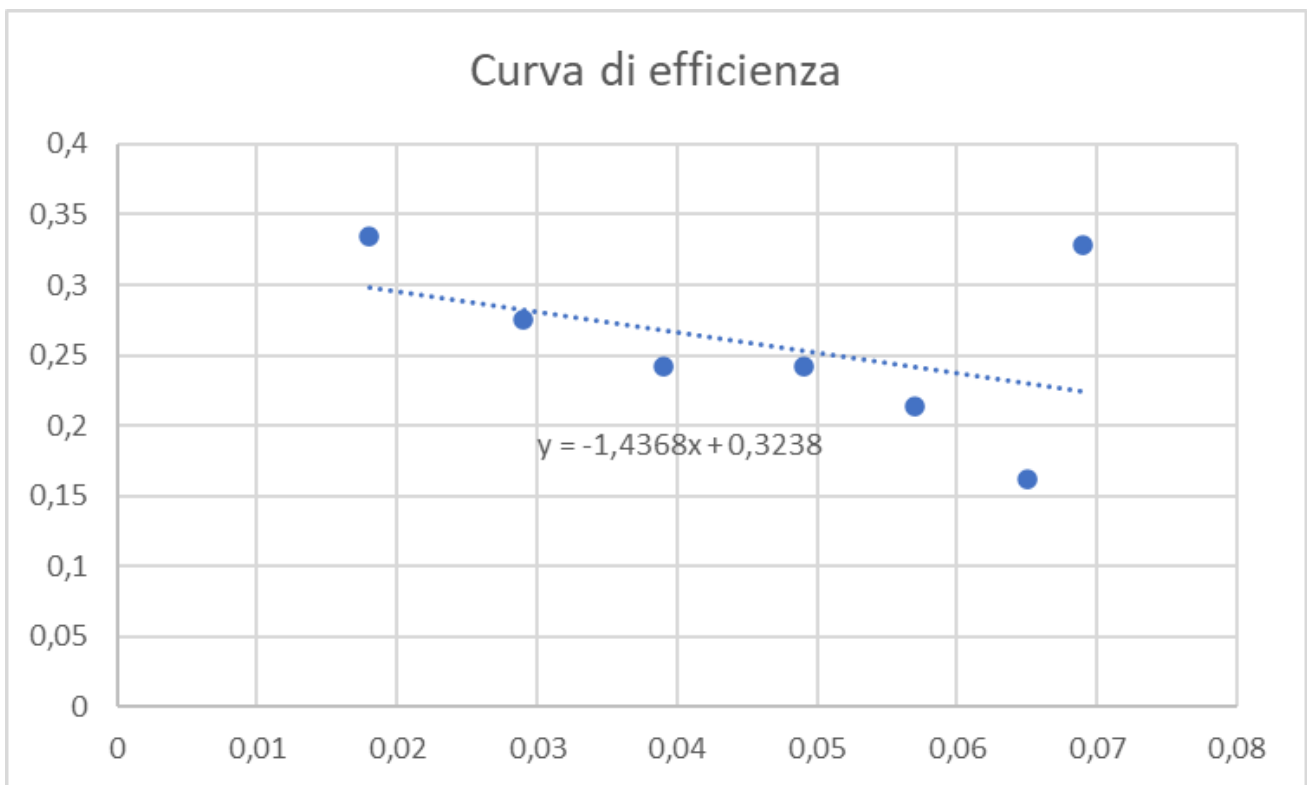


grafico 28 - Curva di efficienza prova n.2 (W) 26/06/2020

PROVE CON OLIO SILICONICO

L'intervallo di temperature utilizzato nella fase di elaborazione dei dati per l'olio siliconico è stato dagli 80°C ai 180°C. Nella prove a scopo illustrativo viene riportato l'andamento della curva di efficienza dove sulle ascisse abbiamo i valori relativi a $(T_{f,media} - T_{amb,media})/G_T$, mentre sulle ordinate abbiamo i valori relativi a Q''/G_T .

G_T è il totale della radiazione solare media sul piano di apertura (W/m^2);

Q'' è il tasso di accumulo di calore utile per unità di superficie del fluido (W/m^2).

Prove del 24/06/2020

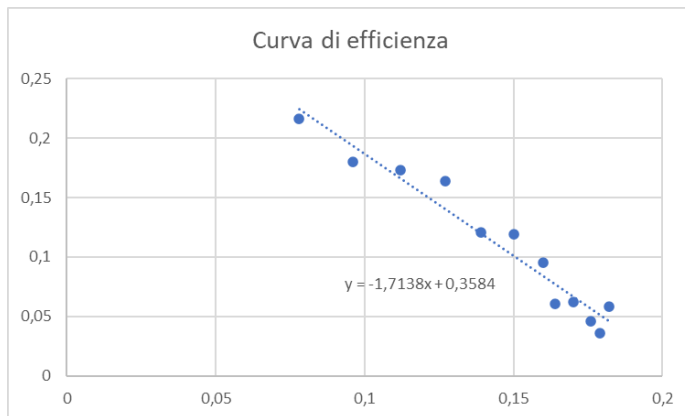


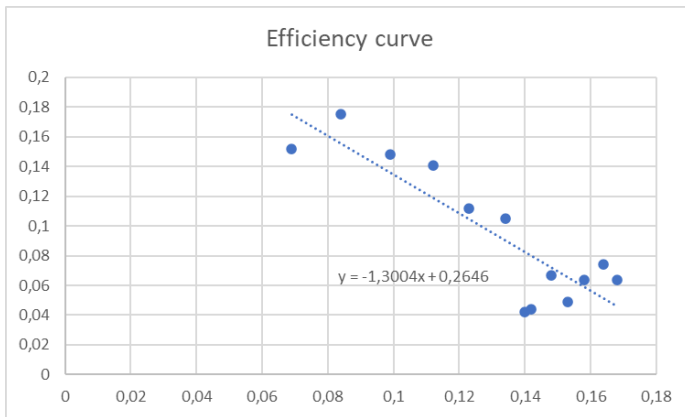
grafico 29

Curva di efficienza prova n.1 (0) 24/06/2020

Prova #	1	2
$T_{f,0}$ (°C)	26.3	35.6
$T_{f,1}$ (°C)	182.4	167.3
$T_{amb, media}$ (°C)	27.0	29.8
DNI_{media} (W/m^2)	812	752
Δt (h)	0.99	-
ts ($h m^2/kg$)	0.51	-
tc ($h m^2/kg$)	0.47	-
η	0.11	-
COR	0.209	-

Durante la seconda prova effettuata in questa data, l'olio siliconico è arrivato ad una temperatura massima di **167.3 °C**. Per il calcolo dei parametri si è scelto un range di temperatura del fluido (comune a tutte le prove) compreso tra 80 e 180 °C. Quindi i risultati ottenuti da questa prova sono stati esclusi per la stima del COR, in quanto non rientra nel range di temperatura scelto.

Prove del 09/07/2020



Prova #	1	2
$T_{f,0}$ (°C)	27.8	33.3
$T_{f,1}$ (°C)	197.5	206.3
$T_{amb, media}$ (°C)	26.6	28.9
DNI_{media} (W/m ²)	905	917
Δt (h)	1.04	0.92
t_s (h m ² /kg)	0.54	0.48
t_c (h m ² /kg)	0.54	0.49
η	0.10	0.11
COR	0.203	0.235

grafico 30
Curva di efficienza prova n.1 (O) 09/07/2020

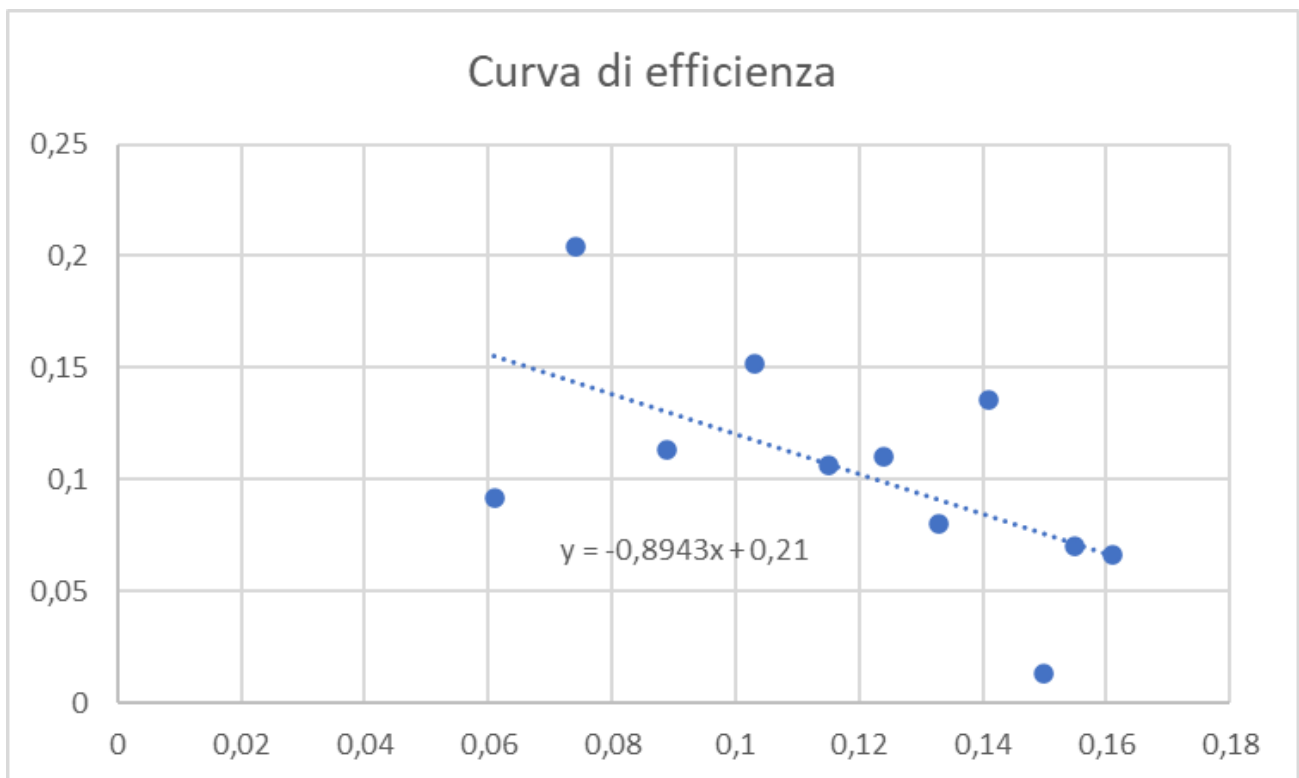


grafico 31 - Curva di efficienza prova n2 (O) 09/07/2020

CAPITOLO 6: CONCLUSIONI

Il prototipo di forno solare a concentrazione realizzato presso il Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche dell'Università Politecnica delle Marche, su cui sono stati eseguiti i test per la valutazione del COR, ha ottenuto dei risultati notevoli in ambito di prestazioni energetiche. Infatti, come si evince dalle prove, il prototipo è in grado di portare alla temperatura di ebollizione una massa d'acqua pari a 3 kg in circa 50 minuti e di far raggiungere ad una massa di 3 kg di olio temperature superiori ai 200°C in circa 100 minuti, sfruttando esclusivamente l'energia derivante dalla radiazione solare.

Le uniche problematiche riscontrate nel prototipo, ma di facile risoluzione, sono il dimensionamento della superficie riflettente e la mobilità lente/superficie riflettente. Durante le numerose prove è stato possibile constatare che una volta superata una determinata posizione del sole rispetto allo zenit, (da noi registrata durante il periodo delle prove, tra i mesi di giugno e luglio, intorno alle ore 16:00) il punto di fuoco proveniente dalla lente, ricadeva al di fuori dell'area della superficie riflettente. Quest'ultimo infrangendosi sul terreno d'appoggio, e a volte anche sulle componenti dello strumento, ne ha reso impossibile l'utilizzo, rischiando anche di causare danni da combustione alla struttura portante del forno.

Il dispositivo a primo impatto potrebbe non risultare particolarmente efficiente se si pensa che mediamente una massa di 3 kg di acqua posizionata sul fornello di casa impiega circa una ventina di minuti a raggiungere la temperatura di ebollizione, ma in realtà, considerando che la potenza erogata dal prototipo proviene solo ed esclusivamente dal sole, e che quindi è possibile utilizzarlo all'infinito, senza limiti, con zero impatto ambientale e nessun tipo di costo, i vantaggi permettono di rivalutarne l'efficienza. Senza dubbio il potere di questa tipologia di forno solare a concentrazione può essere ulteriormente migliorato con dei piccoli accorgimenti.

Ad esempio creare una camera coibentata intorno alla zona di posizionamento del supporto farebbe incrementare notevolmente le prestazioni, non solo contribuendo nella fase di accumulo termico, ma isolando il supporto dall'azione del vento.

Si potrebbe inoltre migliorare l'efficacia della superficie riflettente utilizzando dei materiali con delle prestazioni più elevate o addirittura sviluppare un sistema di accumulo termico in modo da poter utilizzare il forno anche durante le ore notturne o le giornate nuvolose.

Non bisogna dimenticare che l'obiettivo principale della ricerca legata a questo tipo di forni solari è quello di sfruttarli come risorse nei paesi in via di sviluppo, dove non esistono ancora delle vere e proprie reti di distribuzione di energia, né proveniente da fonti energetiche non rinnovabili, né tanto meno da fonti rinnovabili. Come possiamo immaginare, in queste zone del mondo la fonte primaria di

energia utilizzata per la cottura dei cibi è la combustione derivante da materiale ligneo. Ovviamente l'obiettivo secondario mira anche ad educare la popolazione ad usufruire di energia più pulita, non inquinante e meno pericolosa, ma resta necessario mantenere tendenti allo zero i costi di realizzazione del forno e delle sue componenti.

La ricerca e lo sviluppo tecnologico per l'applicazione dell'energia solare, in particolare quella legata al convogliamento e concentrazione dei raggi solari, ha permesso di sfruttare questo sistema di produzione non solo in ambito domestico, ma anche in quello industriale. Ad oggi si registrano numerosi esempi di impianti che sfruttano delle particolari tipologie di forni solari di rilevanti dimensioni ad elevate prestazioni in vari ambiti. Ne sono un esempio:

- Il “forno solare” creato da Heliogen, nel deserto del Mojave in California, formato da 400 specchi solari (eliostati), ciascuno dotato di un conduttore algoritmico che direziona i raggi solari verso una torre specifica. L'impianto è in grado di accumulare energia solare a temperature di 1.800° C, (circa un quarto della temperatura della superficie del sole). Questo calore estremo può poi essere applicato a processi industriali pesanti, fornendo l'energia necessaria per produrre cemento, acciaio o vetro. Sostituendo i combustibili fossili e le alte emissioni dell'attuale settore dell'industria pesante con energia pulita, questa tecnologia si rivelerebbe un potenziale punto di svolta, non solo per i paesi in via di sviluppo, ma anche per i paesi occidentali che hanno tra i propri obiettivi quello di eliminare la dipendenza da fonti energetiche di natura fossile e abbattendo al minimo le emissioni e l'inquinamento; [39]
- La centrale solare a concentrazione più grande del mondo, la “Ivanpah solar electric generating system”, costruita sempre nel deserto del Mojave, in California è operativa dal 2014. L'impianto si estende su circa 14 km², si compone di 175 mila specchi solari eliostati, che vengono orientati rispettivamente su 3 distinte torri alte 140 metri, all'interno delle quali il vapore viene trasformato in energia elettrica. La centrale solare ha una capacità di 392 megawatt (MW), e a regime è in grado di fornire energia a 140mila famiglie permettendo di evitare l'emissione in atmosfera di 400mila tonnellate di CO₂ all'anno. [40]

Il forno solare può quindi essere considerata una valida alternativa ecosostenibile ai tradizionali sistemi di produzione di energia, non solo a livello individuale e domestico, ma anche, come appena descritto, per la sua impiegabilità nei settori industriali; notoriamente considerati come principali fonti di inquinamento.

Se il futuro dell'energia è sempre più rivolto a trovare nuove fonti alternative agli idrocarburi, in grado di soddisfare il fabbisogno globale, questo strumento si pone come valido mezzo per una loro migliore applicabilità e per il raggiungimento degli obiettivi di sostenibilità.

BIBLIOGRAFIA

- [1] «IAE - International Energy Agency,» [Online]. Available: [https://www.iea.org/data-and-statistics?country=WORLD&fuel=Energy%20supply&indicator=Total%20energy%20supply%20\(TES\)%20by%20source](https://www.iea.org/data-and-statistics?country=WORLD&fuel=Energy%20supply&indicator=Total%20energy%20supply%20(TES)%20by%20source).
- [2] «Bloomberg,» [Online]. Available: <https://about.bnef.com/new-energy-outlook/>.
- [3] R. Feynman, «La fisica di Feynman, Vol I, p 4-1».
- [4] «Energia-Blog,» [Online]. Available: <https://energia-blog.it/energia-meccanica/>.
- [5] «chimica-online,» [Online]. Available: <https://www.chimica-online.it/download/energia-chimica.htm>.
- [6] «wikipedia,» [Online]. Available: https://it.wikipedia.org/wiki/Energia_del_campo_elettromagnetico.
- [7] «wikipedia,» [Online]. Available: https://it.wikipedia.org/wiki/Energia_potenziale_gravitazionale.
- [8] «chimica-online,» [Online]. Available: <https://www.chimica-online.it/download/energia-nucleare.htm>.
- [9] «EIA - U.S. Energy Information Administration,» http://www.eia.doe.gov/basics/renewalt_basics.html. [Online].
- [10] «Geocities - Energia Nucleare in Italia,» 2 Gennaio 2008. [Online].
- [11] «Orizzonte Energia,» 28 Settembre 2017. [Online]. Available: www.orizzonteenergia.it.
- [12] «Sorgenia,» [Online]. Available: <https://www.sorgenia.it/>.
- [13] «Energit,» [Online]. Available: <https://energit.it/che-cosa-e-l-energia-eolica/>.
- [14] «Rinnovabili,» [Online]. Available: <https://www.rinnovabili.it/energia/geotermia/definizione-geotermia/>.
- [15] «Sorgenia,» [Online]. Available: <https://www.sorgenia.it/>.
- [16] «wekiwi,» [Online]. Available: <https://www.wekiwi.it/main/energia-da-biomasse/#:~:text=L'energia%20da%20biomasse%20%C3%A8,residui%20delle%20attivit%C3%A0%20agricole%20o>.
- [17] «Wikipedia,» [Online]. Available: <https://it.wikipedia.org/wiki/Sole>.
- [18] U. Farinelli, «Treccani,» 1995. [Online]. Available: http://www.treccani.it/enciclopedia/energia-solare_%28Enciclopedia-Italiana%29/.
- [19] «nrel.gov,» [Online]. Available: <https://www.nrel.gov/grid/solar-resource/renewable-resource-data.html>.
- [20] «Energie Alternative,» [Online]. Available: <http://energiealternative.soswiki.com/energia-solare-fotovoltaico.php>.

- [21] B. Kerr, «The Expanding World of Solar Box Cookers,» 1991.
- [22] C. S. & D. Amelin, «Solar Cookers,» in *Construction of solar cookers and driers*, 2014, p. 39.
- [23] C. Gianluca, D. N. Giovanni, P. Mariano, T. Sebastiano e A. Alessia, «Design, manufacturing, and test of a high concentration ratio solar box cooker with multiple reflectors,» *SOLAR ENERGY*, vol. 155, 2017.
- [24] F. Cavallaro, «Storia e Scienza sull'impiego dell'energia solare,» in *Scritti raccolti per il 70 anni di Ennio Badolati*, a cura di Sandra Ciccone, 2014.
- [25] P. M. Cuce, «A comprehensive review on solar cookers,» *Applied Energy*, 2013.
- [26] G. D. N. S. T. G. G. M. C. a. M. P. G. Coccia, «Experimental characterization of a solar cooker with thermal energy storage based on solar salt,» *Journal of Physics: Conference Series*, 2017.
- [27] «Wikipedia,» 2012. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Phase-change_material.
- [28] N. D. N. S. T. M. P. G. Coccia, «Experimental validation of a high-temperature solar box cooker with a solar-salt-based thermal storage unit,» *SOLAR ENERGY*, vol. 170, p. 10, 2018.
- [29] «www.heliac.dk,» [Online]. Available: <https://www.heliac.dk/solar-cooker/>.
- [30] «heliac.dk,» [Online]. Available: <https://www.heliac.dk/solar-cooker/>.
- [31] «Treccani.it,» [Online]. Available: <http://www.treccani.it/enciclopedia/pireliometro/>.
- [32] «wikipedia.org,» [Online]. Available: <https://it.wikipedia.org/wiki/Termocoppia>.
- [33] «picotech.com,» [Online]. Available: <https://www.picotech.com/products>.
- [34] «motipdupli,» [Online]. Available: <https://www.motipdupli.com/it/prodotti/presto/vernici-speciali-a-pennello/ipg-1471/tm-1471.html>.
- [35] L. P. M. Schiavello, «I liquidi e i cambiamenti di stato nei sistemi ad un componente,» in *Fondamenti di Chimica*, Edises, 2005.
- [36] «Rhodorsil® Oils 47,» BLUESTAR SILICONES, [Online]. Available: http://www.silitech.ch/upload/complement_info_fournisseur_d/32.pdf.
- [37] J. P. , K. B. S. R. Lahkar, «Enabling inter-cooker thermal performance comparison based on cooker opto-thermal ratio (COR),» in *Energy 99*, Elsevier, 2012, pp. 491- 495.
- [38] M. M. A.M.A.Khalifa, «Solar cookers for outdoors and indoors,» in *Energy*, 1985, pp. 819-829.
- [39] C. Dalby, «eni.com,» [Online]. Available: <https://www.eni.com/it-IT/low-carbon/forno-solare-per-cemento-sostenibile.html>.
- [40] T. Perrone, «lifegate.it,» 17 Febbraio 2014. [Online]. Available: <https://www.lifegate.it/solare-a-concentrazione-in-california>.