



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Edile

**CARATTERIZZAZIONE SPERIMENTALE DI UN
ESSICCATORE SOLARE**

**EXPERIMENTAL CHARACTERIZATION
OF A SOLAR DRYER**

Relatore:

Dott. Giovanni Di Nicola

Tesi di Laurea di:

Elena Tomaselli

A.A 2021/2022

INTRODUZIONE	3
1. Capitolo 1- L'energia solare nel contesto energetico attuale	4
1.1. Che cos'è l'energia solare.....	4
1.2. Crisi energetica, qual è la situazione attuale.....	5
1.3. Risparmio energetico e sviluppo sostenibile.....	5
1.4. Storia dello sviluppo sostenibile.....	6
2. Capitolo 2- Caratterizzazione di un forno solare – Newton Solar Oven	7
2.1. Elementi riflettenti	8
2.2. Bracci di sostegno e cerniere.....	9
2.3. Sportelli laterali	10
2.4. Base	12
2.5. Isolante, piastra e pentola.....	12
2.6. Camera di cottura.....	14
3. Capitolo 3 – Caratterizzazione di un essiccatore solare Newton Solar Dryer.....	15
3.1. Che cos'è un essiccatore solare.....	15
3.2. Come funziona un essiccatore solare	15
3.3. La radiazione solare	15
3.4. Tipologie di essiccatori	18
3.4.1. Newton Solar Dryer 1.0	18
3.4.2. Newton Solar Dryer 2.0	19
3.5. Differenze tra forno ed essiccatore solare	21
3.6. Requisiti di essiccazione	22
3.7. Progettazione di un essiccatore solare.....	22
3.7.1. Supporto autoportante in legno.....	24
3.7.2. Tavole di legno.....	25
3.7.3. Piastre di assorbimento.....	26
3.7.4. Sportelli isolanti.....	27
3.7.5. Vetri in polimetacrilato.....	28
3.7.6. Camera di essiccazione.....	29
3.7.7. Braccio di supporto degli specchi posteriori	31
3.7.8. Sistema a slitta anteriore per gli specchi anteriori.....	33
3.7.9. Schema di funzionamento generale.....	35
3.8. Setup banco di prova.....	41

3.8.1.	Pireliometro.....	42
3.8.2.	Termocoppie.....	44
3.8.3.	Data logger	45
3.8.4.	Software di acquisizione dati.....	46
4.	Capitolo 4 – Parametri fondamentali.....	48
4.1.	Efficienza termica	48
4.1.1.	Temperatura e velocità del flusso d’aria all’interno della camera.....	48
4.1.2.	Tempo, velocità e tasso di essiccazione	50
4.1.3.	Umidità relativa ambiente e della camera di essiccazione	51
4.2.	Qualità del prodotto essiccato	52
4.2.1.	Parametri sensoriali.....	52
4.2.2.	Dati nutrizionali	52
4.2.3.	Capacità di reidratazione.....	53
4.3.	Indicazioni funzionali all’essiccazione	53
4.3.1.	Operazioni preliminari.....	53
4.4.	Variabili incontrollabili.....	54
4.4.1.	La radiazione solare diretta	54
4.4.2.	Vento	54
4.4.3.	Temperatura ambiente	55
5.	Capitolo 5 – Test sperimentali	55
5.1.	Prova del 16/09/2022.....	56
5.2.	Prova del 03/10/2022.....	60
5.3.	Prova del 06/10/2022.....	66
5.4.	Prova del 12/10/2022.....	71
5.5.	Prova del 17-18-19/10/2022	78
5.6.	Prova del 21/12/2022 e 11/01/2023.....	91
6.	Capitolo 6 – Soltrace.....	95
6.1.	Back e Front degli elementi.....	96
6.2.	Descrizione del Software Soltrace	97
7.	Capitolo 7 – Conclusioni.....	110
	BIBLIOGRAFIA.....	113

INTRODUZIONE

In questo lavoro di tesi sperimentale si studia il comportamento di un essiccatore solare a circolazione naturale. Alla base di questa ricerca vi è l'utilizzo dell'energia solare con particolare riferimento alla riduzione dei consumi energetici e alla possibilità di sfruttare gli apporti gratuiti del sole ed effettuare in maniera più efficiente l'essiccazione di cibi con l'ausilio di uno strumento di facile realizzazione e a basso costo, rispetto alla semplice essiccazione al sole.

L'energia costituisce un elemento importante per lo sviluppo sociale ed economico dell'umanità. La produzione di energia è una problematica sempre più attuale, con una richiesta crescente di anno in anno. Il modello di sviluppo industriale fin qui seguito ha condotto ad un eccessivo impiego delle risorse energetiche fossili. I problemi riscontrati sono molteplici, come la limitatezza delle risorse energetiche sulla terra sinora sfruttate e un aumento dell'inquinamento atmosferico da non sottovalutare.

L'uomo è in grado di procurarsi energia utilizzando le risorse esauribili, cioè tutto ciò che la natura ha immagazzinato, oppure può utilizzare ciò che la natura fornisce liberamente, le risorse rinnovabili di energia, come acqua, sole e vento.

Nei paesi in via di sviluppo, dove rinvenire combustibile può essere molto complicato, con un conseguente dispendio economico, l'impiego di un forno o di un essiccatore solare può essere una valida alternativa per la cottura o l'essiccazione dei cibi, specialmente nei continenti, quali quello africano o sud-asiatico, in cui la radiazione solare è mediamente molto elevata.

In questo elaborato di tesi, sulla base del progetto dell'Ing. Muccioli [1] l'attenzione è stata focalizzata sulla realizzazione e verifica del funzionamento di un essiccatore solare denominato Newton Solar Dryer 2.0 (NSD 2.0), partendo da un forno solare chiamato Newton.

Il suddetto forno solare è uno strumento a geometria variabile in grado di concentrare l'energia del sole in una zona chiamata camera di cottura, con lo scopo di sterilizzare l'acqua e di cuocere il cibo. Con opportune modifiche, come affrontato nello studio di tesi, può essere utilizzato per l'essiccazione dei cibi.

1. Capitolo 1- L'energia solare nel contesto energetico attuale

1.1. Che cos'è l'energia solare

“E' l'energia madre sulla terra, perché, il sole, è il motore primo di quasi tutte le forme di energia sul nostro Pianeta” [2]. Per secoli gli esseri umani hanno sfruttato a proprio vantaggio lo stretto legame che esiste tra vegetali e sole, soprattutto per imparare a gestire il ciclo di vita delle piante necessarie alla propria nutrizione. Con l'avvento del progresso tecnologico, alla fine del XIX secolo, è stato possibile trasformare la potenza del sole in energia elettrica grazie all'invenzione della cella solare, un dispositivo in grado di convertire la radiazione solare in energia elettrica. L'impiego dell'energia solare è vantaggioso in quanto risulta essere una risorsa inesauribile e che si abbina a tecnologie versatili ed efficienti. Tra i punti di forza dell'energia solare non vanno dimenticati l'autoproduzione e la possibilità di sfruttarla ovunque. Alcuni vantaggi dell'energia solare sono comuni a tante altre fonti rinnovabili. Il più importante è di proteggere il nostro pianeta dal cambiamento climatico. La possibilità di raccogliere e sfruttare i raggi del sole, permette, di ridurre l'uso dei combustibili fossili azzerando anche le emissioni di gas serra, e di tendere all'autosufficienza energetica.

Se la terra fosse un disco piatto rivolto verso il sole riceverebbe una potenza irraggiata di ben 1377 watt al metro quadrato. Essendo sferoidale e considerando la presenza dell'atmosfera e le perturbazioni, questo valore viene abbassato di quasi dieci volte alle medie latitudini, in ogni caso basterebbe raccogliere il 6% dell'energia solare per soddisfare l'intero fabbisogno energetico dell'umanità.

L'energia solare ha come caratteristica quella di poter essere sfruttata anche su scala iperlocale, persino da una singola persona per il proprio autoconsumo. Basti pensare ai pannelli fotovoltaici installati sui tetti delle abitazioni. Riflettendoci, la stessa possibilità non c'è per molte altre rinnovabili, o comunque non la si può implementare con la stessa facilità.

1.2. Crisi energetica, qual è la situazione attuale

La crisi energetica attuale, esplosa nei primi mesi del 2022 è in realtà, solo il naturale sviluppo di una situazione che già da mesi lasciava presagire delle serie complicazioni. L'attuale momento storico, con la guerra tra Ucraina e Russia ha dunque solo accelerato un processo che oggi complice particolarmente l'Europa, vero e proprio epicentro della crisi energetica globale. Con la domanda di gas naturale che supera l'offerta e la paura che i gasdotti russi verso l'Europa possano essere presto chiusi in risposta alle sanzioni applicate contro il Cremlino, il prezzo è alle stelle. L'Italia in questo scenario è dipendente per il 40% del proprio fabbisogno di gas dalla Russia. Una chiusura dei gasdotti metterebbe seriamente a rischio lo stivale che potrebbe andare in blackout totale. C'è poi il tema non trascurabile dei costi elevati dell'energia che ricadono sulle bollette dei cittadini. “A gennaio 2022 l'Italia registra il secondo prezzo dell'elettricità per l'industria più alto d'Europa, ben 225 euro a megawattora. A marzo 2021, lo stesso quantitativo di energia in Italia costava all'incirca 60 euro a megawattora, ovvero 3,7 volte di meno” [3].

Si accusa dunque la crisi energetica e si va verso la ricerca di impiego di gas naturale. La motivazione va ricercata nel no al nucleare espresso da anni nel nostro Paese e nella lentezza nel passaggio alle energie rinnovabili. In tal ottica si è mossa anche l'Ue che ha pensato ad “un'azione chiamata Energy compact, che mira ad aumentare gli investimenti nelle rinnovabili” [4].

1.3. Risparmio energetico e sviluppo sostenibile

Il cambiamento climatico è una delle sfide più difficili da affrontare ed è al centro dell'importante trasformazione della politica energetica promossa a livello globale. L'agenda 2030 delle Nazioni unite ha come macro-obiettivi quelli di promuovere l'innovazione in nome di una industrializzazione responsabile e sostenibile, adottare misure per combattere il cambiamento climatico e garantire modelli sostenibili di consumo e produzione di energia. In vista di tali traguardi, lo sviluppo sostenibile è un tema ampio che coinvolge più settori, riguarda infatti l'ambito economico, garantendo lavoro e reddito alla popolazione, l'ambito sociale, per una distribuzione equa delle condizioni di benessere e, ovviamente, l'aspetto ambientale, fondamentale per salvaguardare le risorse naturali a nostra disposizione che sono sempre più a

rischio, a causa di problemi come il cambiamento climatico, del quale l'uomo è il primo responsabile. Al centro delle strategie, sono sempre più presenti modelli di sviluppo che tengono conto delle tematiche sopracitate, ESG (Environmental, Social and Governance), imprescindibili per il futuro del pianeta e per il benessere sociale ed economico della comunità internazionale. Ci sono enormi problemi da affrontare e risolvere. Basti pensare alle condizioni di estrema povertà in cui vive gran parte della popolazione mondiale, all'assenza di posti di lavoro, alle difficoltà di moltissime persone che hanno ad accedere al progresso tecnologico e al riscaldamento globale che minaccia la Terra, l'uomo, e tutti gli altri esseri viventi.

1.4. Storia dello sviluppo sostenibile

I principi alla base del percorso verso l'agenda 2030 erano già noti ad alcuni celebri economisti come "Adam Smith e Thomas Robert Malthus" [5], vissuti tra il 1700 e il 1800. Essi riflettevano già sul fatto che le risorse naturali a disposizione dell'uomo fossero limitate per una popolazione in aumento, nella quale di conseguenza si sarebbero venute a creare delle disuguaglianze. John Stuart Mill, collega di Smith e Malthus, cercò di spiegare come la crescita economica e il miglioramento della vita fossero due obiettivi separati. Nel suo scritto "Principi di Economia politica" anticipò molti dei problemi che avrebbero attanagliato la società moderna, su tutti il sovrasfruttamento e la distribuzione dell'ambiente.

Intorno agli anni '70, venne pubblicato, da parte di un Club di Roma che riuniva uomini influenti da ogni parte del mondo in un'organizzazione non governativa, il "Rapporto sui limiti dello sviluppo" che individuava le risorse limitate del nostro pianeta e una continua emissione di sostanze inquinanti destinate ad oltrepassare le capacità di assorbimento della terra.

Nel 1972, la conferenza ONU di Stoccolma sull'Ambiente Umano, servì a sensibilizzare la comunità internazionale sulla necessità di difendere e migliorare l'ambiente, seguita poi da una Conferenza Sull'Ambiente Umano svoltasi a Rio de Janeiro nel 1992, nel quale venivano definiti i punti per uno sviluppo sostenibile fino al XXI secolo.

Per l'Italia, tutto ciò si traduce nel Piano Nazionale per lo Sviluppo Sostenibile messo a punto dal Ministero dell'Ambiente, al quale seguono una serie di iniziative, come le diverse edizioni della Conferenza Europea sulle Città Sostenibile, svolte ad Aalborg, Lisbona e Hannover, dal 1994 al 2000 per il monitoraggio dei progressi fatti e aggiornare il piano d'azione per raggiungere

la sostenibilità. Sempre in questo periodo, è importante citare la Conferenza di Kyoto del 1997 che getta le basi per il Protocollo di Kyoto, entrato in vigore nel 2005 e fondamentale per la riduzione delle emissioni da gas serra a livello mondiale.

A questo punto, dopo la nascita nel 2011 di una Strategia dell'Unione europea per lo sviluppo sostenibile, nel 2015 i governi dei 193 Paesi membri dell'ONU collaborano per la creazione "dell'Agenda 2030, che attraverso gli obiettivi posti, afferma che la sostenibilità dipenda da tre pilastri; la dimensione ambientale, sociale ed economica" [6].

2. Capitolo 2- Caratterizzazione di un forno solare – Newton Solar Oven

I Forni solari, sono strumenti in grado di sfruttare al massimo l'energia solare in maniera efficiente per la cottura del cibo. Il Newton Solar Oven è stato progettato dall'Ing. Muccioli [1], ed è stato ampiamente studiato [17]. Tale forno garantisce un buon livello di prestazione e una facile immediatezza di realizzazione e di utilizzo.

Una delle potenzialità più importanti del forno solare è quella di fornire questo strumento a quei paesi che, ancora oggi, non hanno la possibilità di accedere all'acqua potabile o utilizzare energie esauribili.

Il Newton Solar Oven è uno strumento in grado di concentrare l'energia del sole in una camera di cottura, con lo scopo di cuocere cibi o sterilizzare l'acqua.

Il forno è composto principalmente da una camera di cottura autoportante e dagli specchi che riflettono i raggi solari all'interno della camera di cottura. La camera di cottura è costituita da due sportelli laterali in legno, rivestiti da uno strato sottile di alluminio e da due lastre di vetro che compongono un prisma a base triangolare, che richiama proprio "il prisma dello scienziato Inglese Newton" [7], con il quale studiò la rifrazione della luce e il relativo spettro luminoso nella regione del visibile. Durante l'utilizzo, il Newton Solar Oven, viene posizionato in modo tale che lo spot luminoso di radiazione riflessa coincida con la camera di cottura. Perché funzioni in maniera efficiente, il prototipo va ruotato ogni 15 minuti, in maniera tale che sia orientato in direzione del piano azimutale solare.

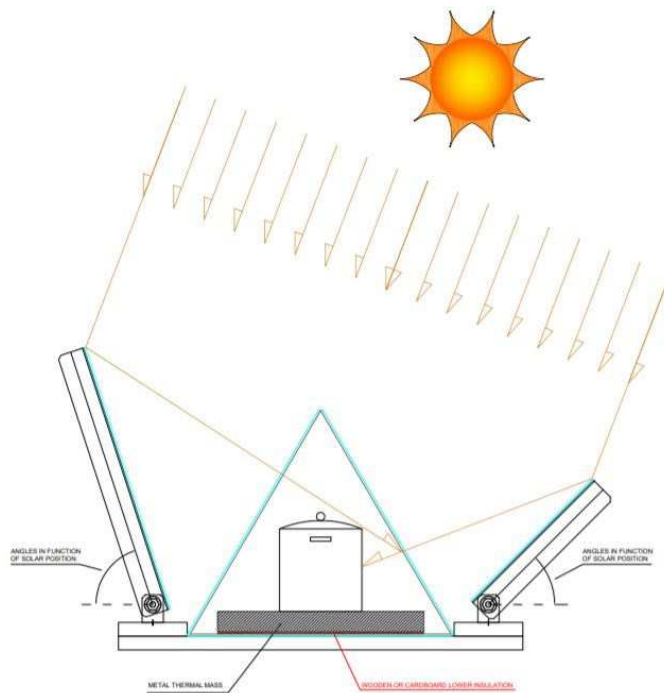


Fig. 1: Schema di funzionamento generale del Newton Solar Oven

2.1. Elementi riflettenti

Il forno presenta due specchi, il primario o specchio posteriore, di dimensioni 60x80 cm, e il minore detto specchio secondario o specchio frontale, di dimensioni 40 x30 cm. Hanno il compito di riflettere i raggi solari all'interno della camera.

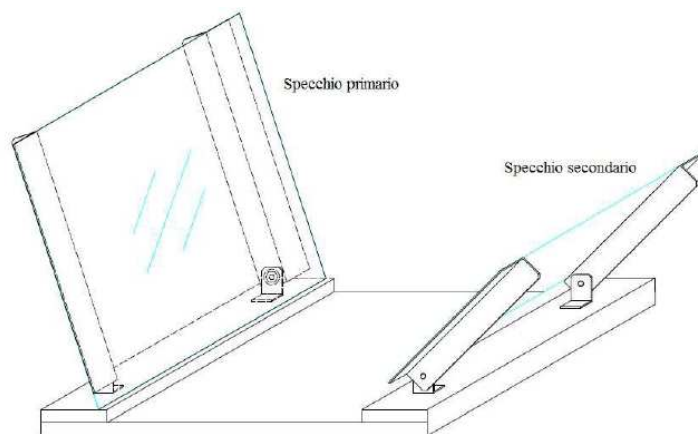


Fig. 2: Specchi nel forno solare

2.2. Bracci di sostegno e cerniere

I bracci di sostegno degli specchi sono realizzati in alluminio, così da garantire allo stesso tempo resistenza meccanica e leggerezza. La possibilità di movimento dei bracci è necessaria ai fini di indirizzare i raggi del sole riflessi dallo specchio all'interno della camera di cottura. Sono fissati a delle staffe mediante viti e bulloni, in questo modo è possibile orientare il braccio in base all'inclinazione necessaria allo specchio per indirizzare i raggi del sole all'interno della camera di cottura. Per rendere più stabile la struttura sono inserite delle manopole che bloccano i bracci di sostegno, così da aumentare l'attrito e facilitare il movimento della corretta posizione di lavoro.

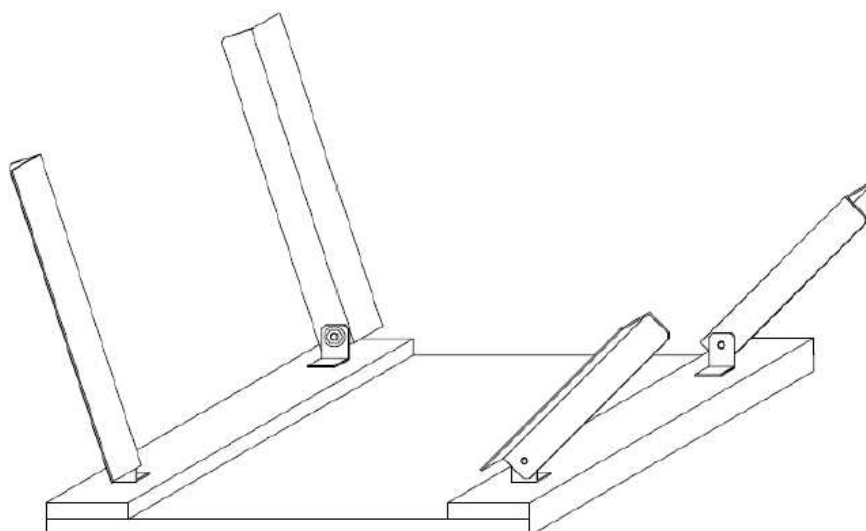


Fig. 3: Bracci di sostegno degli specchi

2.3. Sportelli laterali

Il materiale utilizzato per gli sportelli laterali costituenti il forno è il legno massello di abete. Se si fosse utilizzato del legno multistrato, a causa della sua minore porosità, a contatto con l'umidità di cibi posti all'interno della camera o a contatto con l'acqua, si sarebbe potuto scollare rendendo inutilizzabile l'apparecchiatura.

	<i>Calore Specifico</i>	<i>Unità di misura</i>	<i>Conducibilità</i>	<i>Unità di misura</i>	<i>Densità</i>	<i>Unità di misura</i>
Legno Massello Abete	1600	J/kgK	0,13-0,18	W/mK	490 ±10%	Kg/m ³
Legno Multistrato	1500	J/KgK	0,12	W/mK	35 ±10%	Kg/m ³

Tab. 1: Specifiche del legno massello e legno multistrato (1)

Il legno massello invece, nel suo impiego, lo si riveste con un film di alluminio che risulta avere molteplici funzionalità. La prima è quella di riflettere all'interno della camera di cottura eventuali raggi solari diretti verso gli sportelli laterali, così da diminuire la dispersione di radiazione solare. La seconda funzionalità è quella di evitare che il vapore penetri e condensi all'interno degli sportelli di legno, precludendone le capacità di isolamento.

Inoltre, un'altra funzionalità importante è che, avendo la possibilità di muoversi, è possibile lasciare qualche millimetro di apertura sulla parte superiore della camera di cottura, di modo che, in fase di cottura, il vapore possa fuoriuscire evitando che i vetri si appannino, così da avere un buon afflusso di radiazione all'interno del volume in ogni momento. Questo è un importante fattore che contraddistingue il Newton Solar Oven dagli altri forni solari perché è un sistema che non presenta problematiche di condensa.



Fig.4: Sportelli laterali triangolari rivestiti con film di alluminio

Agli sportelli sono state applicate delle maniglie per facilitare la loro rimozione, in questo modo mentre il forno è funzionante è possibile rimuovere lo sportello per controllare la cottura degli alimenti senza aprire del tutto la camera di cottura, permettendo di mantenere una buona parte di calore all'interno del volume delimitato dai vetri. Una grande potenzialità di questo tipo di chiusura è la possibilità di variare a piacimento il volume della camera di cottura in modo da adattarsi alle esigenze di cottura del singolo prodotto.

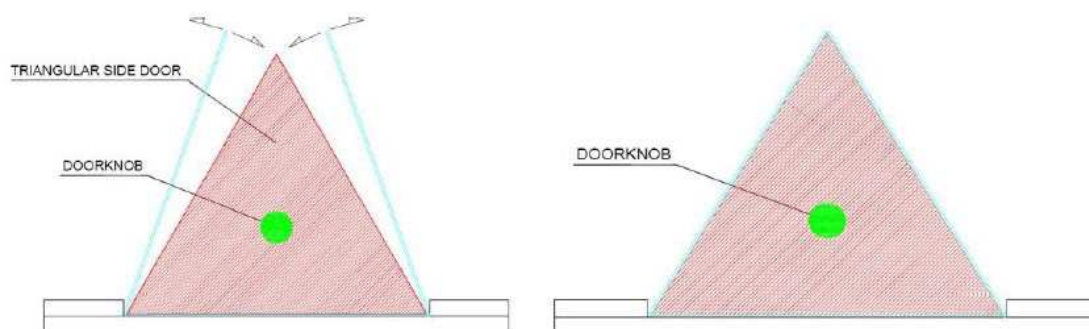


Fig.5: Vista laterale del Newton Solar Over- sportelli con le maniglie

Materiale	Coefficiente di resistenza al passaggio di vapore acqueo
Legno di abete	170
Alluminio	infinito

Tab.2. Coefficiente di resistenza al passaggio di vapore acqueo

2.4. Base

La base del forno solare ha lo scopo di fornire l'appoggio alla camera di cottura. Il Newton Solar Over è infatti un forno solare autoportante, i pezzi non sono fissati alla base ma vengono appoggiati. Ciò lo rende poco ingombrante e di facile trasporto dal momento in cui può essere assemblato sul posto. Alla base sono presenti due gradini, fissati tramite viti, che permettono ai vetri della camera di cottura di reggersi, evitando di scivolare. I vetri arrivano a battuta controllo le piastre di base, creando un volume più stagno possibile.

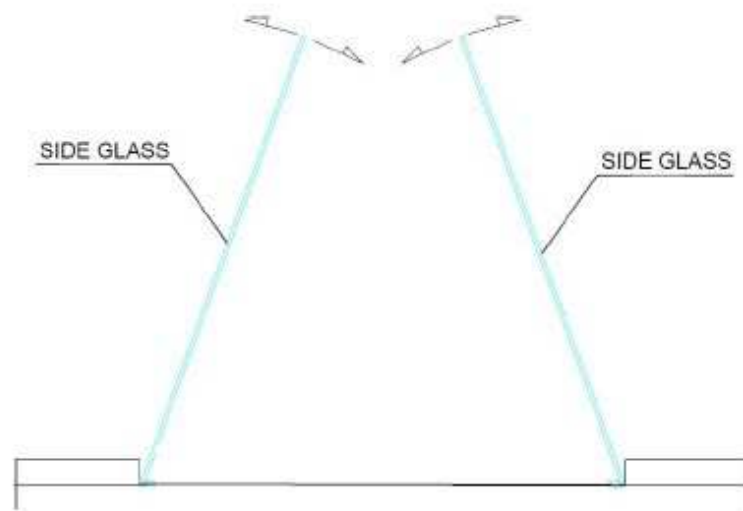


Fig.6: Vista laterale della base

2.5. Isolante, piastra e pentola

L'isolante presente nel forno è composto da un pannello di sughero. È inoltre presente una piastra di acciaio (sul fondo) e una pentola di cottura. L'acciaio presenta un calore specifico molto minore dell'acqua e della glicerina usati durante i test, di conseguenza esso si scalderà con molta più fretta consentendo di avere una fonte di calore sotto la pentola di cottura.

	Calore Specifico	Unità di misura	Conducibilità	Unità di misura	Densità	Unità di misura
Acciaio	502	J/kgK	15	W/mK	7500-8000	Kg/m ³
Pannello di sughero	1600-1800	J/KgK	0,040 – 0,060	W/mK	100 - 160	Kg/m ³
Acqua	4187	J/KgK	0,56	W/mK	997	Kg/m ³

Tab.3: Principali proprietà termiche dell'acciaio, del sughero e dell'acqua

Le piastre, la pentola e i pannelli di sughero, sono stati dipinti di nero, con una vernice ad elevate prestazioni così da aumentare la capacità di assorbire calore dalla radiazione solare.

Dai risultati delle prove sperimentali condotte dai precedenti tesisti, si è visto come la presenza dell'isolante dato dal pannello di sughero, unito all'impiego di una piastra di acciaio, comporta un buon miglioramento dell'efficienza del forno.



Fig.6: Piastra verniciata di nero



Fig.7: Piastra e pentola verniciate di nero

2.6. Camera di cottura

Questo elemento costituisce il volume all'interno del quale vengono riflessi i raggi solari al fine di accumulare calore. È composta da due lastre di vetro che però portano ad avere un'alta dispersione termica, occorre considerare il fatto che i vetri siano appoggiati e facilmente rimovibili, di conseguenza il volume non è perfettamente stagno quindi possono formarsi flussi di calore attraverso le fessure.



Fig.8: Vista generale del Newton Solar Oven

3. Capitolo 3 – Caratterizzazione di un essiccatore solare Newton Solar Dryer

3.1. Che cos'è un essiccatore solare

Un essiccatore solare è essenzialmente un sistema che permette di essiccare senza bruciare legna o derivanti della benzina, quindi sfruttando solo l'energia solare. Questo metodo prevede tre tipi di trasferimento di calore: irraggiamento tramite radiazione solare, convezione dall'aria alla superficie del prodotto e conduzione dalla superficie del prodotto all'interno dello stesso. Di conseguenza, la differenza di temperatura tra l'aria e la superficie del prodotto va a determinare la differenza di pressione superficiale che induce la rimozione di umidità dal prodotto considerato tramite l'evaporazione superficiale. In virtù dei processi sopra descritti, è opportuno che l'essiccatore vada a sfruttare il più possibile la radiazione diretta del sole.

3.2. Come funziona un essiccatore solare

Per sfruttare al massimo l'energia solare è importante che l'essiccatore venga spesso ri-orientato (circa ogni 15-20 minuti) per compensare l'effetto della rotazione terrestre e far sì che le facce siano perpendicolari al piano zenitale.

Un limite degli essiccatori solari è quello di funzionare solo in presenza della loro fonte di energia, ovvero il sole; per ovviare a questo problema, si possono studiare delle soluzioni per sfruttare un materiale a cambiamento di fase (PCM, dall'inglese "Phase Changing Material"). Si sfrutta in tal caso il rilascio di calore ceduto dal materiale nella trasformazione di fase. Nello studio di tesi è stato utilizzato soltanto l'apporto della radiazione solare.

3.3. La radiazione solare

La radiazione solare che raggiunge la terra è composta da raggi UV (circa il 3% della radiazione totale), da raggi infrarossi (circa il 55% della radiazione totale) e da luce nella lunghezza d'onda del visibile (circa il 42% della radiazione totale). Ognuna delle tre componenti appartiene ad un intervallo di lunghezza d'onda: L'UV tra 0,28 e 0,38 μm , il visibile tra 0,38 e 0,78 μm e l'infrarosso tra 0,78 e 2,5 μm . Nella curva rappresentata nella Figura 20, viene illustrata la distribuzione

energetica della radiazione solare in funzione della lunghezza d'onda per una superficie perpendicolare a tale radiazione [8].

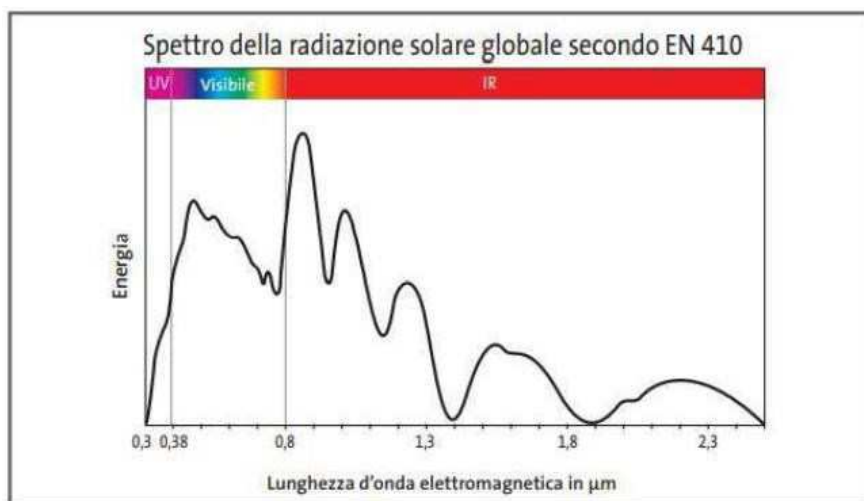


Fig. 9: Andamento della radiazione solare in funzione della lunghezza d'onda

La quasi totalità di energia si trova a una lunghezza d'onda superiore a quella dell'UV. Il vetro comune alla lunghezza d'onda dell'UV si comporta come un corpo opaco:

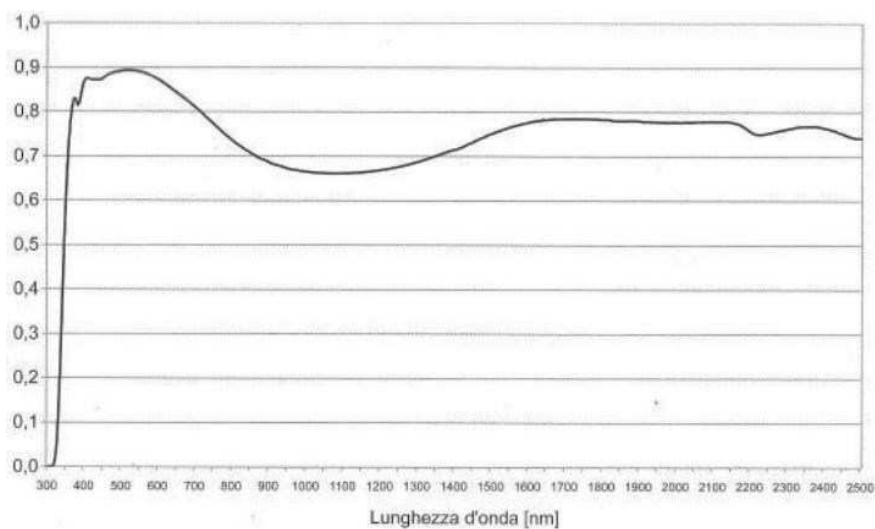


Fig. 10: Trasmittanza spettrale di una lastra vetrata

La radiazione che colpisce un vetro viene in parte riflessa, in parte assorbita e in parte trasmessa; i rapporti di queste componenti rispetto alla radiazione totale incidente vengono definiti

rispettivamente come fattore di riflessione (ρ), fattore di assorbimento (α) e fattore di trasmissione (τ) energetici.

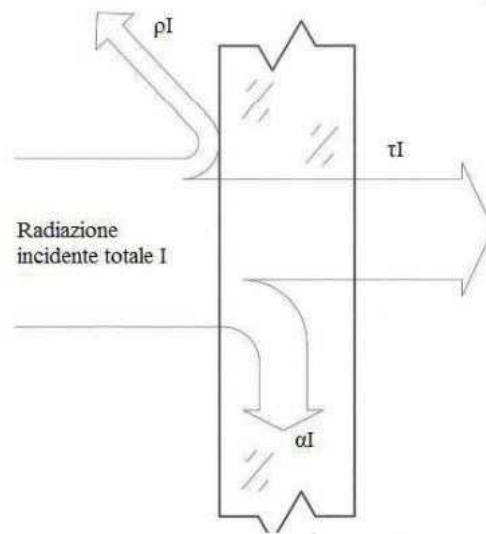


Fig.11: Scomposizione della radiazione solare incidente nelle tre componenti

In realtà l'energia trasmessa attraverso il vetro oltre che dal coefficiente di trasmissione, dipende dal fattore solare. Questo rappresenta il rapporto tra l'energia totale trasmessa attraverso la vetrata e l'energia solare incidente sulla vetrata stessa: l'energia totale è costituita dalla somma dell'energia immessa per trasmissione diretta e quella caduta per irraggiamento da parte del vetro stesso che, assorbendo energia solare, si è riscaldato.

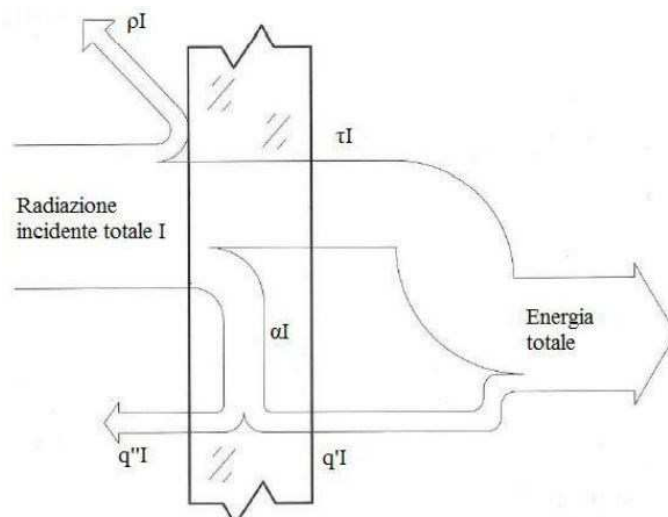


Fig. 12: Energia totale in ingresso attraverso il vetro

L'angolo di incidenza assume una grande importanza nella valutazione dei coefficienti di trasmissione e riflessione. La maggior trasmissione si ha con una radiazione incidente in direzione normale al vetro, perciò più l'angolo di incidenza della radiazione si allontana dalla normale, più il coefficiente di riflessione aumenterà, a spese del coefficiente di trasmissione.

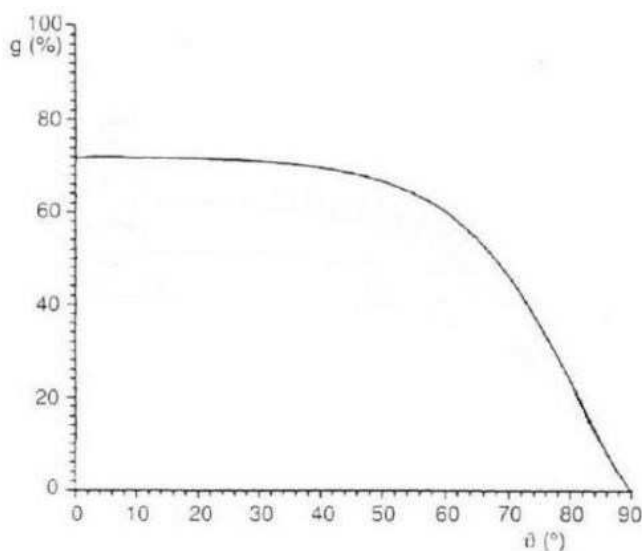


Fig. 13: variazione del fattore solare in funzione dell'angolo di incidenza della radiazione

3.4. Tipologie di essiccatori

Entrambi gli essiccatori sono stati realizzati presso l'università Politecnica delle Marche nel dipartimento di Ingegneria Industriale di Scienze Matematiche (DIISM) con sede Ancona, sono stati progettati dall'Ing. Muccioli [1], garantendo una facile immediatezza di realizzazione e di utilizzo.

3.4.1. Newton Solar Dryer 1.0

Il primo modello di essiccatore Newton Solar Dryer 1.0, è composto sostanzialmente da un assemblaggio di una struttura di sostegno di legno, due diversi sistemi di regolazione a sostegno di due coppie di specchi riflettenti, una coppia di piastre collettrici nere appoggiate l'una sull'altra atte a costruire la camera di essiccazione assieme a due sportelli isolanti in legno ai lati, una coppia di verti extrachiarri in polimetacrilato, per trasmettere la radiazione sulle piastre ed isolare la camera dall'esterno e due basi intercambiabili in legno di conformazione differente atte a sostenere i prodotti da essiccare e, al contempo, delimitare il flusso d'aria in entrata nella zona desiderata [9].



Fig.14: Vista generale del Newton Solar Dryer 1.0

3.4.2. Newton Solar Dryer 2.0

A seguito dei risultati ottenuti nel precedente lavoro si è deciso di ottimizzare le prestazioni richieste con una serie di interventi e modifiche, mantenendo comunque inalterata la natura originale del prototipo.

Questo secondo modello di essiccatore, Newton Solar Dryer 2.0 si differenzia dal primo perché inizialmente, si aveva una sola camera di essiccazione e il cibo era più lontano dalle piastre, ora si hanno due camere di essiccazione e il cibo è più vicino alle piastre e si avrà una maggiore capienza dell'essiccatore.



Fig.15: Vista generale del Newton Solar Dryer 2.0

Alcune delle prove analizzate sono state effettuate utilizzando i due essiccatori in parallelo, nelle stesse condizioni ambientali, l'unica differenza sostanziale l'abbiamo riguardo la posizione del cibo rispetto alle piastre.



Fig.16: Vista generale dei due prototipi di NDS

3.5. Differenze tra forno ed essiccatore solare

Definendo come prima cosa i requisiti di funzionamento che entrambi i modelli devono presentare possiamo analizzare le differenze riscontrate tra i due.

- Una prima differenza riguarda la temperatura che deve essere raggiunta all'interno della camera di essiccazione. Il forno solare raggiunge temperature più elevate possibili nella camera di cottura, per velocizzare il processo di bollitura di un liquido avendo maggiori trasmissioni di calore in minor tempo. L'essiccatore invece non necessita di temperature elevatissime, perché la cottura del prodotto non ci interessa più, la fase di essiccazione di un cibo la troviamo nell'intervallo di temperatura che varia dai 40 ai 70°Celsius.
- Un'altra differenza riscontrata riguarda i tempi di utilizzo delle due macchine, in quanto i tempi di cottura e essiccazione sono diversi.
- L'essiccatore, invece, non dovendo raggiungere temperature elevate, mira a mantenere un intervallo di temperatura sopra citato per un tempo di gran lunga maggiore, in base al tipo di prodotto considerato e alle sue condizioni, se congelato o meno.
- Un'ulteriore differenza riscontrata è la necessità di avere un flusso d'aria che sia costante (e possibilmente laminare) all'interno della camera di essiccazione. Il forno non ha bisogno di rimuovere il contenuto d'acqua che si crea all'interno durante la cottura di un cibo. Non avendo questa esigenza, non è necessario progettare un percorso adatto per il flusso d'aria che consente l'asportazione di vapore, piuttosto si cercherà di eliminare il più possibile i flussi d'aria che si vengono a creare, perché sarebbero causa di asportazione di calore data dall'aria che si trova ad una temperatura elevata.
- L'essiccatore invece ha come esigenza obbligatoria quella di garantire la rimozione del contenuto d'acqua all'interno della camera, proveniente dall'evaporazione superficiale. Il vapore interno alla camera viene asportato tramite il flusso d'aria, il quale si miscela al valore e fuoriesce per effetto camino dall'apertura soprastante.

3.6. Requisiti di essiccazione

Un essiccatore deve essere in grado di poter soddisfare una serie di requisiti che lo rendono performante nell'utilizzo di essiccazione di cibi.

- Deve essere adatto ad essiccare frutta, carne, pesce, ortaggi facendo in modo di garantire un ambiente pulito e di facile utilizzo, abbastanza capiente ma non troppo ingombrante.
- Deve essere progettato garantendo il rispetto dell'ambiente e dei consumi energetici, quindi è assemblato con materiali naturali come legno e materiali riciclati. Al tempo stesso deve garantire sicurezza nell'utilizzo sia dell'apparecchiatura che del cibo essiccato, garantendo un certo grado di pulizia e resistenza dei materiali impiegati alle alte temperature.
- Deve essere robusto, ma di facile trasporto per poterlo installare anche in zone poco agevoli.
- Proprio per l'impatto energetico e per rendere possibile il suo utilizzo in paesi che non hanno possibilità di accedere alle fonti di corrente elettrica, questo deve essere in grado di funzionare senza l'ausilio di energia, utilizzando fonti energetiche alternative ai combustibili fossili

In seguito ai requisiti richiesti sopra riportati, sono state apportate una serie di modifiche ai modelli precedentemente realizzati.

3.7. Progettazione di un essiccatore solare

L'obiettivo di progettazione di essiccatori solari è quello di realizzare uno strumento che sia in grado di raggiungere opportune temperature con ridotti tempi utilizzando materiali economici e riciclati per l'assemblaggio della macchina.

In questo lavoro di tesi si parte dallo studio del "Newton Solar Oven " realizzato in precedenza dal dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche (DIISM) dell'università Politecnica

delle Marche, da tecnici e studenti laureandi. Il forno solare si basa su un progetto dell'ing. Muccioli [1].

Partendo dal forno solare, già sperimentato, sono state apportate una serie di modifiche e interventi che hanno permesso di ottenere una conversione da forno a essiccatore solare, realizzando così il "Newton Solar Dryer 1.0" e successivamente, modificando la configurazione della camera di essiccazione, posizionando i cibi più vicini alle piastre, il "Newton Solar Dryer 2.0".

Il progetto del Newton Solar Dryer 2.0 consiste sostanzialmente nell'assemblaggio di una struttura di sostegno in legno autoportante, con due diversi sistemi di regolazione a sostegno di due coppie di specchi riflettenti, che riflettono in maniera opportuna la radiazione solare all'interno della camera di essiccazione. Sono presenti due piastre collettrici nere, appoggiate l'una sull'altra a costituire la camera insieme a due sportelli isolanti in legno posti ai lati che bloccano la fuoriuscita di calore che si crea all'interno, e, una coppia di vetri extrachiaro in polimetacrilato per consentire il passaggio della radiazione verso la camera di essiccazione ed isolare parzialmente la camera dall'esterno e due basi in legno atte a sostenere i prodotti da essiccare e, al contempo, delimitare il flusso d'aria in entrata nella zona desiderata.



Fig. 17: Modello tridimensionale del prototipo realizzato

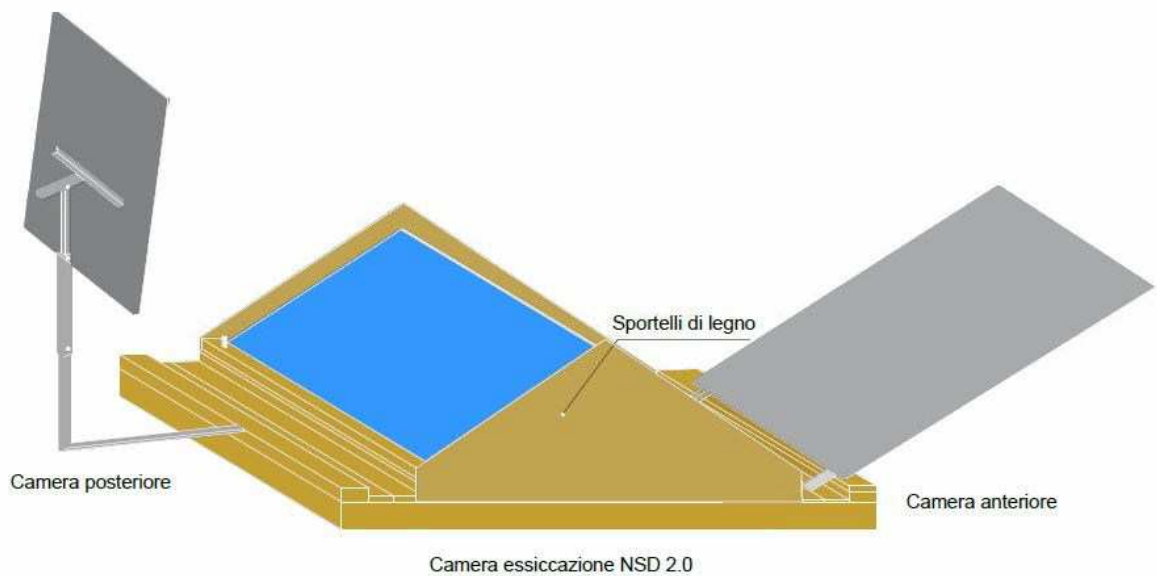


Fig. 18: Modello tridimensionale del prototipo realizzato

3.7.1. Supporto autoportante in legno

Come nel modello precedente del NSD 1.0, il supporto di legno è sollevato da terra in modo da garantire un flusso d'aria controllato ma in modo tale che non risente eccessivamente delle condizioni fluidodinamiche esterne alla camera. Un'altra esigenza è quella di garantire un supporto stabile al fine di consentire un corretto spostamento dell'apparecchiatura, senza che nessun componente venga danneggiato, dato dalla necessità di effettuare i test sperimentali all'esterno per sfruttare la radiazione solare, o comunque prevedere il suo utilizzo in qualsiasi zona differente da quella in cui viene assemblato e preparato. Il supporto è composto una base in legno massello che funge da base alla camera di essiccazione.



Fig.19: Sistema di supporto in legno

3.7.2. Tavole di legno

È la differenza principale che riscontriamo nel nuovo prototipo del NSD 2.0, rispetto al NSD 1.0 dove si aveva una sola camera di essiccazione con il cibo posizionato più lontano dalle piastre. In questo nuovo modello il cibo è posizionato più vicino alle piastre. Le tavole di legno fungono da supporto alla griglia sul quale verrà posizionato il cibo.



Fig.19: Tavole di legno a supporto della griglia per il cibo da essiccare

3.7.3. Piastre di assorbimento

È il fulcro del sistema di assorbimento della radiazione solare. Si chiamano piastre collettrici, sono di metallo e di colore nero, giuntate sull'estremità superiore attraverso una cerniera per impedire lo scorrimento. Le piastre collettrici, una volta esposte al sole, si riscaldano e tramite irraggiamento trasferiscono calore all'interno della camera di essiccazione. In fase di funzionamento, una delle piastre è esposta al sole in modo diretto e riceve anche la radiazione riflessa dallo specchio, l'altra piastra riceve soltanto la frazione riflessa della radiazione solare mediante gli specchi ad essa dedicati. Risulta dunque inevitabile lo stabilirsi di un gradiente termico tra le due piastre, sebbene dalle rilevazioni sperimentali sia emerso che, nel periodo in cui sono state effettuate le misurazioni, che in condizioni di regime questo non superi i 15° di differenza. Inoltre, per permettere l'instaurarsi dell'effetto camino all'interno della camera di essiccazione, lungo le estremità a contatto delle piastre è presente un'apertura di spessore circa 0,4mm che consente l'asportazione dell'umidità.

La radiazione solare che va sulle piastre è regolabile attraverso un gioco di specchi che permettono di indirizzare i raggi in modo da ottimizzare la quantità di radiazione incidente sulle piastre collettrici. Facciamo in modo che la radiazione solare vada a coprire l'intera superficie della piastra, per far sì che ciò avvenga in modo preciso si è lavorato sulla scelta dell'inclinazione migliore degli specchi, studiando attraverso un programma "SolTrace" [10] il flusso e la radiazione che incide su ogni elemento caratterizzante la camera di essiccazione.



Fig.20: Piastre collettrici

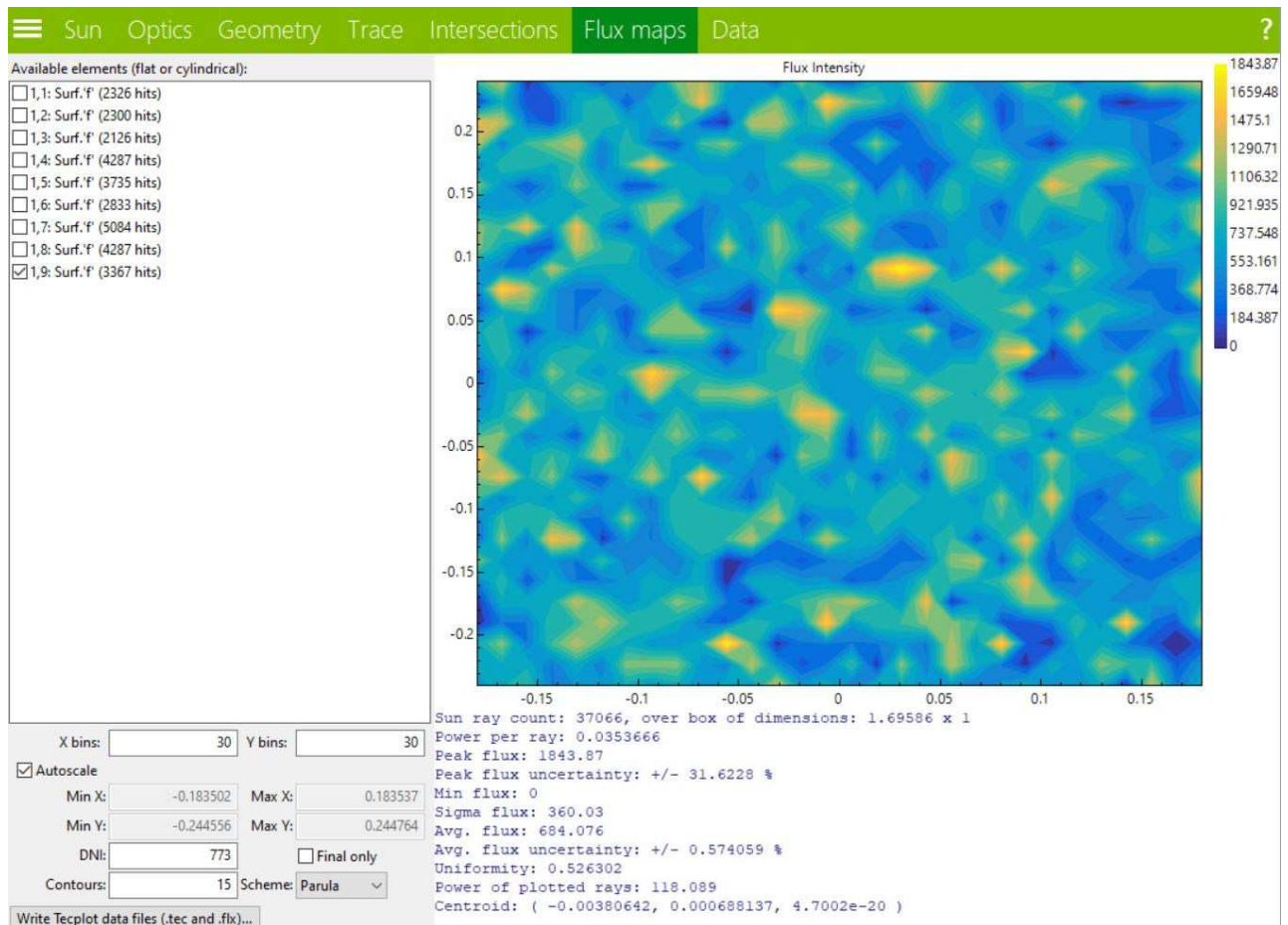


Fig. 21: Soltrace –es: Mappa del flusso della radiazione incidente sulla piastra anteriore

3.7.4. Sportelli isolanti

Per indirizzare il flusso d'aria verso l'uscita superiore ed impedire la fuoriuscita di calore dalla camera, sono utilizzati degli sportelli isolanti in legno. Sono sportelli posizionati lateralmente alla camera di essiccazione e alle piastre collettrici per evitare la fuoriuscita di. Determinano un isolamento laterale del volume d'aria compreso tra le piastre e i vetri. Sono sportelli triangolari in legno di abete. La tenuta è garantita da un sistema realizzato con corde passanti da uno sportello all'altro tramite fori, mettendo in tiro le corde e fissandole con i bottoni.



Fig.22: Sportelli isolanti in legno di abete

3.7.5. Vetri in polimetacrilato

Sono tipologie di vetro con un'elevata rigidità, resistenza meccanica e durezza. Garantiscono una buona resistenza a trazione, compressione e flessione, ottime resistenze alle intemperie e elevata stabilità ai raggi UV, sono vetri extrachiarati con elevate proprietà ottiche.

Avendo inoltre una buona resistenza ad alte temperature è possibile impiegare questa tipologia di vetro per temperature fino a 70°C-100°C. Oltre alle alte temperature, tale tipo di vetro, è in grado di resistere a sbalzi termici nell'intervallo di temperature basse.

Tale vetro ha una densità di 1,18 -1,19 gr/cm³, ed è un materiale difficilmente riciclabile [11].

Il ruolo di questi vetri nella camera di essiccazione è quello di consentire il passaggio della radiazione attraverso le piastre, consentendo al contempo di evitare un'eccessiva dispersione del calore verso l'esterno.

Alle estremità inferiori dei vetri, proprio come nelle piastre, questi fanno perno sul blocco di supporto in legno e sulla base, mentre alle estremità superiori i vetri sono appoggiati l'un l'altro inserendo dei distanziatori in cartone che garantiscono una apertura minima necessaria all'instaurarsi dell'effetto camino.

Questa tipologia di vetri, essendo extrachiarati, a discapito dei comuni vetri "Float" garantisce un maggior passaggio di radiazione solare attraverso di essi.

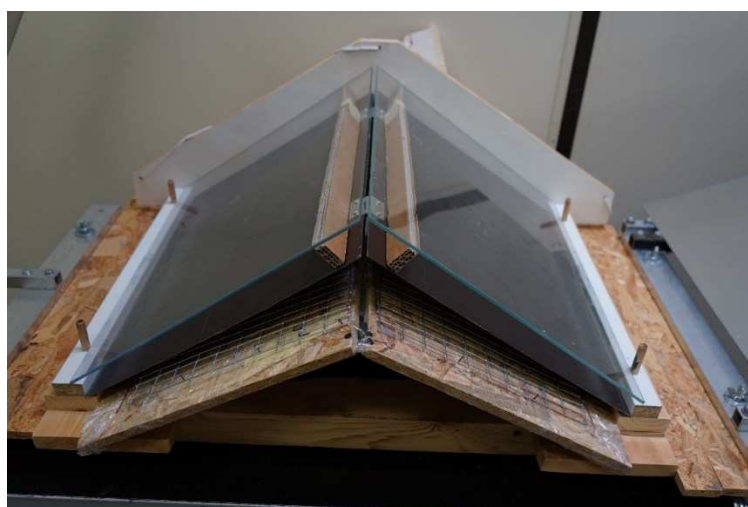


Fig. 23: Vetri in polimetacrilato

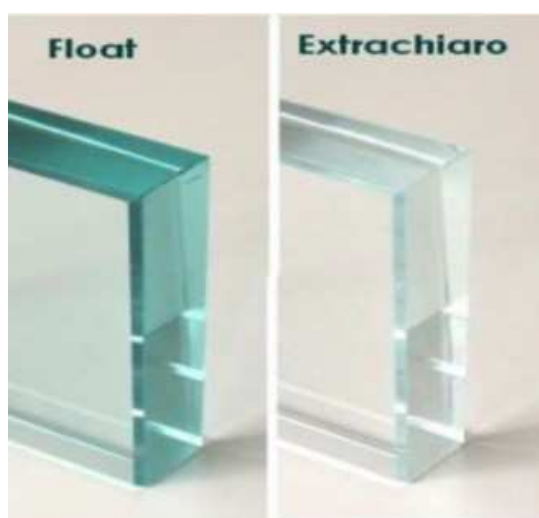


Fig. 24: Vetro float e vetro extrachiaro

	τ [%]	ρ [%]	α [%]	Fattore solare [%]	Trasmittanza [W/mK]
Float comune	86	8	6	91	5,8
Extrachiaro	90	8	2	87	5,8

Tab. 4 Coefficienti energetici del vetro float comune e del vetro extrachiaro con uno spessore di 4 mm (valori in percentuale)

3.7.6. Camera di essiccazione

La camera di essiccazione ha una configurazione a prisma di sezione triangolare (triangolo isoscele). Viene definita camera di essiccazione il volume compreso tra le piastre collettrici, gli sportelli laterali e la base.

La camera non permette l'esposizione al sole dei prodotti da essiccare perché è racchiusa da piastre opache, questo permette di evitare reazioni chimico-fisiche indesiderate sul cibo dovute alla radiazione solare diretta.

La camera costituisce il fulcro dell'essiccatore, in quanto contiene i prodotti da essiccare. Viene definito il centro del processo di trasferimento di calore ed è attraversata da un flusso d'aria che scaldandosi asporta il contenuto di umidità dei prodotti per poi defluire verso l'apertura superiore.



Fig.25: Camera di essiccazione



Fig.26: Camera di essiccazione

3.7.7. Braccio di supporto degli specchi posteriori

Come già accennato, la piastra frontale è esposta alla radiazione del sole, l'altra, riceve la radiazione riflessa attraverso gli specchi. Il braccio di supporto degli specchi permette di regolarli al fine di garantire un efficace convogliamento dei raggi solari e ridurre i tempi di essiccazione.

Gli specchi hanno entrambi una dimensione di 40x30cm. L'inclinazione, sia degli specchi che dei bracci viene analizzata attraverso il software SolTrace [10] che studia i flussi della radiazione solare incidenti sulla camera di essiccazione.



Fig.27: Braccio regolabile a supporto degli specchi posteriori con sistema di fissaggio alla base



Fig.28: Vista specchi (retro)

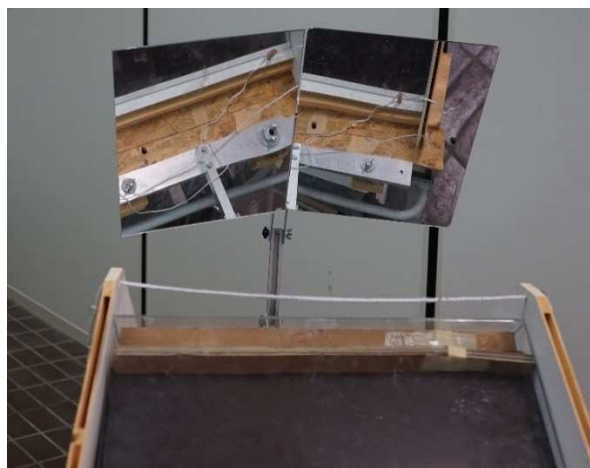


Fig.29: Vista specchi (frontale)

3.7.8. Sistema a slitta anteriore per gli specchi anteriori

Per ottenere il massimo irraggiamento sulla piastra anteriore è sufficiente ruotare l'essiccatore seguendo la radiazione dei raggi solari e ruotare la posizione degli specchi al fine di reindirizzare i raggi solari verso la piastra.

La regolazione degli specchi, è effettuata mediante un sistema a slitta su due bracci mobili in profilato di alluminio, i quali possono essere ruotati oppure rimossi con relativa facilità durante le fasi di trasporto dell'essiccatore. Dobbiamo quindi posizionare in modo corretto il braccio in base all'inclinazione necessaria dello specchio per indirizzare i raggi del sole verso la camera di essiccazione.

Gli specchi anteriori hanno una dimensione maggiore rispetto ai posteriori, sono 80x60cm.



Fig.30: Braccio regolabile a supporto degli specchi anteriori con sistema di fissaggio alla base



Fig.31: Braccio regolabile a supporto degli specchi anteriori con sistema di fissaggio alla base



Fig.32: Sistema di ancoraggio degli specchi anteriori

3.7.9. Schema di funzionamento generale

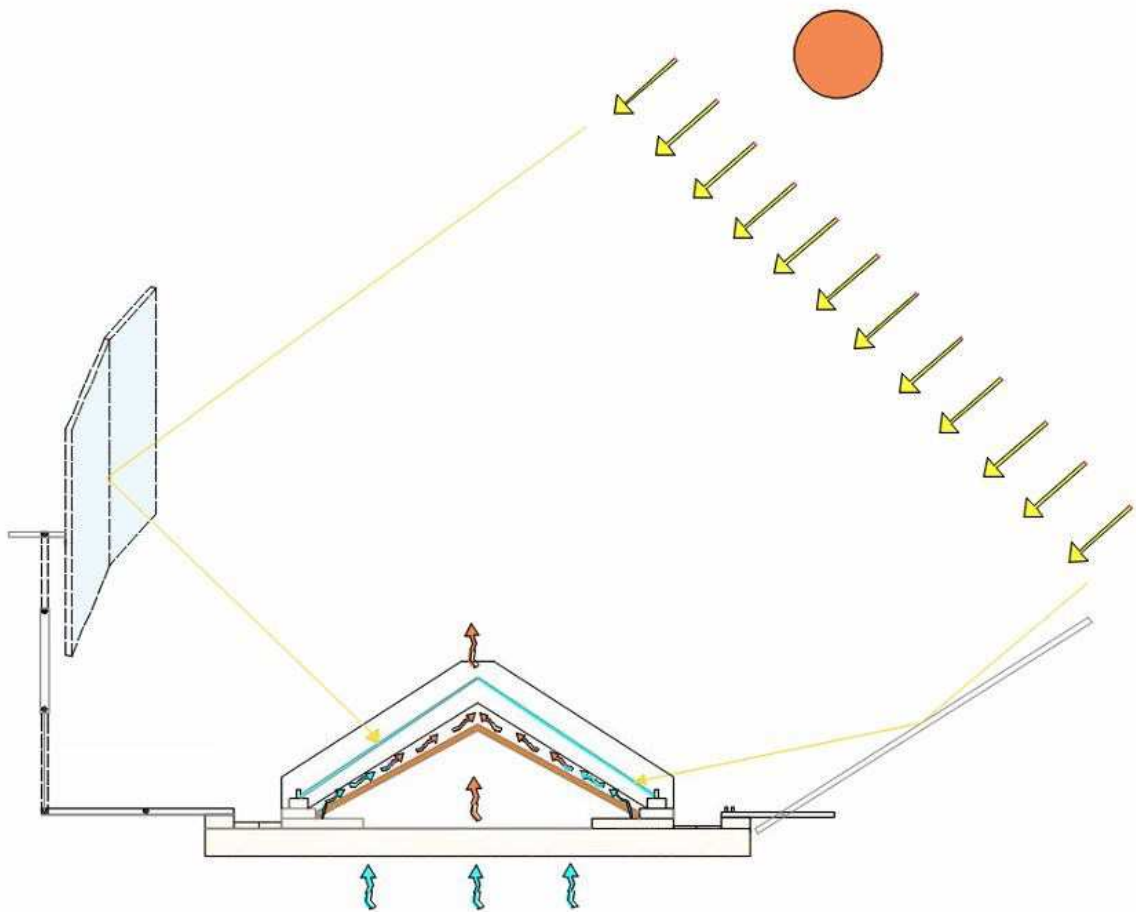


Fig.33: Schema di funzionamento generale

Come riportato dalla figura 50, lo specchio primario si trova esattamente di fronte al sole e viene posizionato in modo tale che lo spot luminoso di radiazione riflessa coincida con la camera di cottura; lo stesso avviene con lo specchio secondario, che avrà però il sole dietro di sé.

La differenza tra i due specchi è che il primario si trova ad una inclinazione più vicina alla normale del terreno, di conseguenza la radiazione che questo riflette attraverserà due lastre di vetro;

- 1- La prima lastra che i raggi riflessi incontrano viene irradiata con un'angolazione vicina alla direzione normale al vetro, di conseguenza la quasi totalità della radiazione viene trasmessa all'interno della camera di cottura;
- 2- Alcuni raggi impatteranno la seconda lastra di vetro, questo avviene con un'angolazione molto maggiore rispetto alla normale al vetro, di conseguenza la quasi totalità della radiazione viene riflessa, da parte della lastra di vetro, all'interno della camera di cottura.

Lo specchio secondario si trova in una posizione più vicina a quella del terreno: i suoi raggi impatteranno solo la lastra di vetro più vicina e con una direzione quasi normale alla superficie, di conseguenza la quasi totalità della radiazione viene trasmessa all'interno della camera di cottura.

Si può notare quindi come l'inclinazione dei vetri che compongono la camera di cottura sia studiata nel dettaglio per rendere il forno più efficiente.

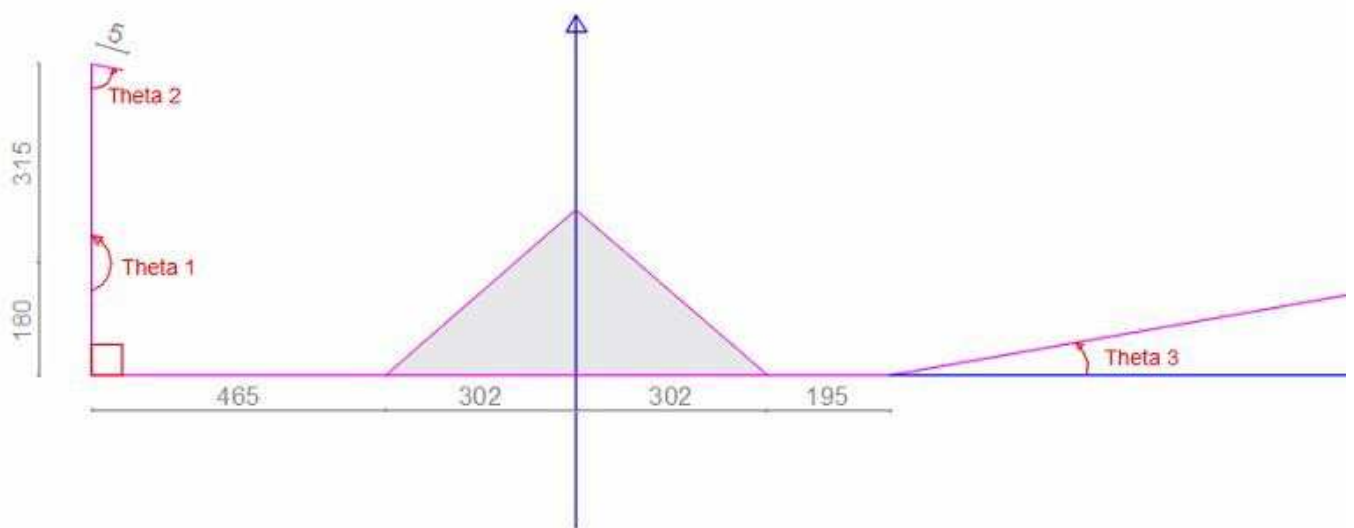


Fig. 34: Indicazione angoli specchi

altezza sole	theta1	theta2	theta3
10	156.2	90.0	190.1
11	139.9	90.1	206.3
12	131.4	91.0	215.7
13	160.0	92.0	187.9
14	124.8	92.8	223.7
15	153.7	93.0	104.7
16	148.7	93.9	200.3
17	164.2	94.9	186.1
18	151.1	95.1	198.4
19	130.3	96.2	220.1
20	153.0	97.1	198.2
21	122.9	98.0	229.3
22	140.7	98.3	211.3
23	148.7	98.7	202.7
24	149.9	99.6	202.8
25	132.7	100.6	221.1
26	123.0	101.7	231.4
27	122.6	102.7	232.7
28	122.0	103.1	232.8
29	126.9	103.4	228.4
30	124.9	104.6	231.3
31	123.1	105.5	233.6
32	124.8	105.9	233.0
33	124.4	106.4	232.5
34	122.5	107.6	235.4
35	122.9	108.0	235.6
36	129.9	108.1	227.3
37	123.5	109.6	236.9
38	130.1	109.4	227.1
39	125.9	111.1	234.4
40	129.7	111.1	229.0
41	125.6	112.6	236.4
42	122.8	113.7	240.4
43	125.0	113.9	236.9
44	122.0	114.8	241.7
45	122.8	115.0	239.7

46	123.1	116.1	241.9
47	194.4	117.5	173.6
48	203.5	118.5	166.2
49	118.5	117.8	245.3
50	199.9	120.0	170.3
51	164.1	120.5	203.7
52	202.2	121.4	169.2
53	205.5	122.1	167.0
54	196.3	122.9	174.8
55	197.0	124.0	174.9
56	206.9	124.5	167.2
57	208.6	124.0	166.7
58	208.6	125.7	166.6
59	209.4	126.6	166.5
60	210.4	127.6	166.4
61	210.0	127.8	166.6
62	208.7	128.7	168.7
63	210.0	129.1	168.3
64	194.7	129.7	182.4
65	211.9	131.1	167.6
66	214.6	131.4	166.0
67	212.2	132.4	168.1
68	195.7	132.6	183.1
69	215.9	133.7	166.1
70	215.8	134.0	166.9
71	216.5	134.1	167.0
72	216.2	136.0	167.9
73	214.1	136.8	169.7
74	215.2	137.2	169.6
75	219.8	137.2	166.2

Tab.5: Altezza sole e angoli Teta 1 -Theta 2- Theta 3- rif. Dott. Ing. Alessia Aquilanti

Tutto ciò è reso possibile studiando un sistema di inclinazione degli specchi ottimale a seconda della posizione del sole. In base all'altezza solare occorre variare l'inclinazione degli specchi per fare in modo che la radiazione solare che arrivi ai vetri abbia un'angolazione vicina alla normale ad essi. A seconda del periodo dell'anno, dell'orario di programmazione delle prove e della latitudine e

longitudine del luogo di lavoro, è possibile ottenere il dato dell'altezza del sole in ogni preciso istante (come riportato nella Tab.13), e, grazie all'impiego di un programma di calcolo sviluppato dall'Ing. Nicola Olivieri [12].

Foglio di calcolo

Lat [°] 43.587	Long [°] 13.5149	<input checked="" type="radio"/> Dec. <input type="radio"/> Sessag.
Giorno 22	Mese December	<input type="checkbox"/> Ora Legale
Ora [h] 12:00:00	Mer del Fuso [°] 15	<input type="button" value="ORA"/> <input type="button" value="QUI"/> <input type="button" value="QUI&ORA"/>
<input type="button" value="CALCOLA"/>		
Azimuth [°] -1.10	Altezza [°] 22.98	Tempo Vero [h] 11:55:35
Alba [h] 07:41:51	Mezz. Vero [h] 12:04:24	Tramonto [h] 16:26:57
Az Alba [°] -56.70	Alt Mezz.Vero [°] 22.98	Az Tram. [°] 56.70
Durata Di [h] 08:45:06	Corr. Fuso [h] 00:05:56	EqT Locale [h] 00:04:24

Fig. 35: Programma di calcolo per ricavare l'altezza del sole

Imposto come latitudine: 43.05871 e longitudine 13.5149 (le coordinate del terrazzo del dipartimento “DIIMS”), utilizzando l’ora solare, imposto il giorno, il mese e l’ora e, il programma calcolerà l’esatta altezza del sole, necessaria per entrare nella tabella sopra riportata che mi darà i valori di Theta 1, Theta 2 e Theta 3.

Di seguito vengono mostrati gli schemi di funzionamento a confronto, dei due prototipi di Newton Sola Dryer.

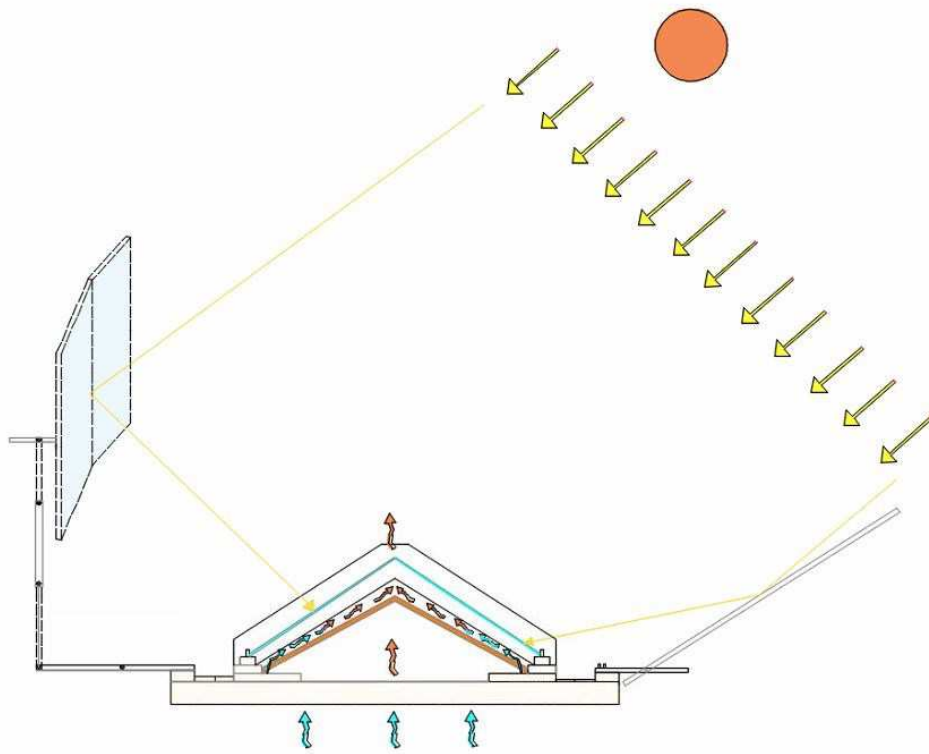


Fig. 36: Schema di funzionamento del Newton Solar Dryer 2.0

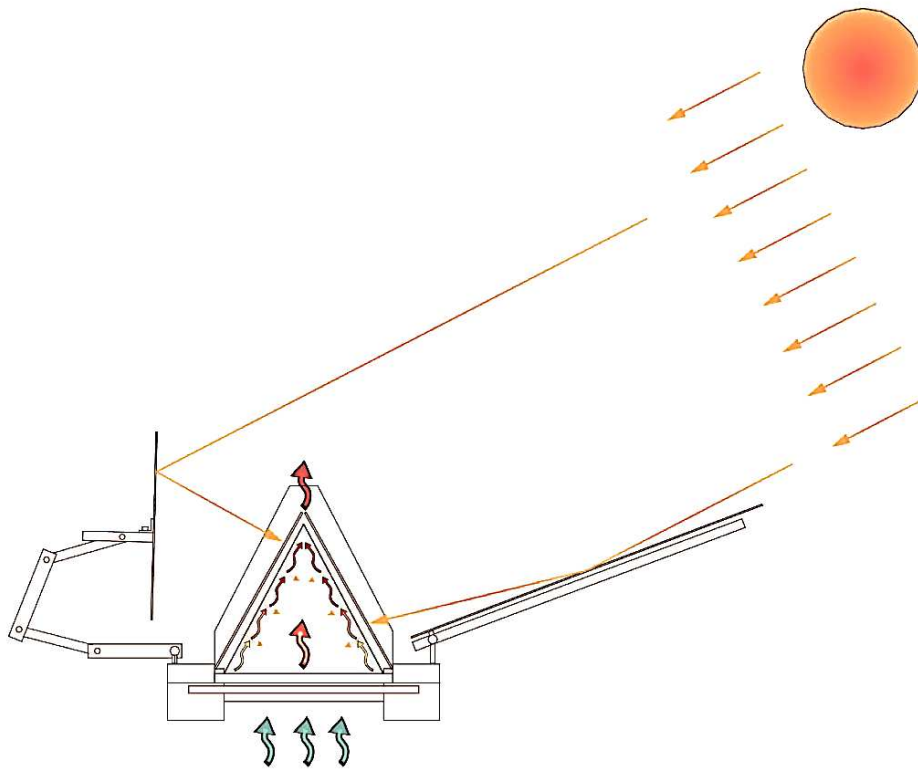


Fig. 37: Schema di funzionamento del Newton Solar Dryer 1.0

3.8. Setup banco di prova

Durante le fasi sperimentali, avvenute sul terrazzo del dipartimento “DIIMS dell’Università Politecnica delle Marche”, si è reso possibile effettuare i test per misurare tutti i parametri necessari al fine di caratterizzare la camera di essiccazione in presenza di condizioni meteo favorevoli.

Il banco di prova ideato per questa campagna sperimentale è così composto:

- Un pireliometro;
- Un computer per acquisizione e elaborazione dei dati
- Termocoppie per misurare le temperature dei vari elementi che compongono la camera di essiccazione;
- Un data logger per acquisizione dati;
- Goniometri per misurare le angolazioni degli specchi riflettenti la radiazione solare.

L’intervallo di acquisizione di registrazione dati è fissato ad ogni secondo e ogni singola prova ha una durata minima di 4 ore.

Grazie all’utilizzo delle termocoppie, il data logger e il programma di acquisizione dati PicoLog, Si riporta la configurazione, per la misurazione della temperatura sulle piastre, effettuata il 16/09/2022, si misurano:

Nel primo data logger, chiamato Asse 1 abbiamo:

Posizione 1- DNI: radiazione solare diretta (W/m^2) termocoppia da collegare al pireliometro

Posizione 2- Tamb: temperatura ambiente ($^{\circ}C$)

Posizione 3- Tpac: temperatura sulla piastra anteriore nella regione centrale superiore ($^{\circ}C$)

Posizione 4- Tpacc: temperatura sulla piastra anteriore nella regione centrale centrale ($^{\circ}C$)

Posizione 5- T paci: temperatura sulla piastra anteriore nella regione centrale inferiore ($^{\circ}C$)

Posizione 6- Tpals: temperatura sulla piastra anteriore nella regione laterale superiore ($^{\circ}C$)

Posizione 7- Tpalc: temperatura sulla piastra anteriore nella regione laterale centrale ($^{\circ}C$)

Posizione 8- Tpali: temperatura sulla piastra anteriore nella regione laterale inferiore ($^{\circ}C$)

Nel secondo data logger, chiamato Asse 2 abbiamo:

Posizione 1- Tppcs: temperatura sulla piastra posteriore nella regione centrale superiore (°C)

Posizione 2- Tppcc: temperatura sulla piastra posteriore nella regione centrale centrale (°C)

Posizione 3- Tppci: temperatura sulla piastra posteriore nella regione centrale inferiore (°C)

Posizione 4- Tppls; temperatura sulla piastra posteriore nella regione laterale superiore (°C)

Posizione 5- Tpplc: temperatura sulla piastra posteriore nella regione laterale centrale (°C)

Posizione 6- Tppli: temperatura sulla piastra posteriore nella regione laterale inferiore (°C)

Posizione 7- Ti: temperatura interna (all'interno delle piastre) (°C)

Posizione 8: Tu: temperatura di uscita (in prossimità del vetro) (°C)

Una volta collegate tutte le termocoppie ai data logger e chiusa la camera di essiccazione con le opportune protezioni (sportelli di legno per bloccare la fuoriuscita di calore), siamo pronti per acquisire i dati. Una volta effettuato il test, il programma esporterà i risultati nel formato CSV di excel, pronti per la rielaborazione e confronto attraverso tabelle numeriche e grafici che riportano l'andamento delle temperature misurate durante la prova sperimentale.

Di seguito vengono presentati più nel dettaglio i vari elementi.

3.8.1. Pireliometro

Il pireliometro PIR è uno strumento per la misurazione della radiazione solare diretta espressa in Watt/m², mediante la termopila. La superficie ricevente è posizionata tramite un inseguitore solare, perpendicolare ai raggi solari. Nel corso delle analisi trattate nell'elaborato di tesi, è stato utilizzato un pireliometro di un'azienda americana fornitrice di attrezzature per l'energia solare chiamata “Eppley Laboratory Inc” e il modello è il “NIP” (Normal Incidence Pyrheliometer). Il pireliometro è sostanzialmente composto da un corpo nero che assorbe la radiazione solare, riscaldandosi; un sensore misura la temperatura di questo corpo nero, dalla quale si può risalire alla radiazione incidente. Lo strumento presenta un piccolo foro attraverso il quale può passare la radiazione solare. Questa viene proiettata sulla flangia inferiore dello strumento, sulla quale è presente il corpo nero. Allineando la proiezione con il corpo nero, lo strumento entra in funzione, fornendo il valore corretto della radiazione solare diretta. Il pireliometro è montato su un inseguitore solare, che permette allo

strumento di inseguire il sole durante l'arco della giornata. Di seguito vengono illustrate le caratteristiche tecniche dello strumento fornite dal costruttore.

Sensibilità	Impedenza	Dipendenza dalla temperatura	Linearità	Tempo di risposta	Lunghezza	Peso
$\mu\text{V}/\text{Wm}^{-2}$	Ω	$^{\circ}\text{C}$ e $^{\circ}\text{C}$	Wm^{-2}	s	cm	kg
8	200	$\pm 1\%$ tra -20°C e 40°C (T_{amb})	$\pm 0.5\%$ da 0 a 1400	1	28	2,3

Tab.6: Caratteristiche tecniche del Pireliometro

Il pireliometro misura la radiazione delle “onde corte”, nella quale ricade approssimativamente il 99% dell'energia solare. Il pireliometro “NIP” incorpora una termopila a filo avvolto alla base del tubo. L'intero del pireliometro è costituito da un tubo di ottone, nero per permettergli di assorbire quanta più energia possibile. Il tubo è riempito di aria secca a pressione atmosferica e sigillato alle estremità.



Fig.38: Pireliometro

3.8.2. Termocoppie

È un sensore in grado di misurare la temperatura, costituita da due metalli diversi, uniti ad una estremità. Quando la giunzione dei due metalli viene riscaldata o raffreddata, viene prodotta una tensione che può essere legata alla temperatura con l'utilizzo di un termometro adatto allo scopo. Utilizziamo prevalentemente termocoppie di tipo T, ma anche di tipo T, permettono un ampio intervallo di temperature di misura, hanno un conduttore positivo Nichel-Cromo e un conduttore negativo Nichel-Alluminio [13].

Le termocoppie di tipo T, il nome era Rame-Costantina. Queste termocoppie possono lavorare nell'intervallo di temperature -250°C e 400°C , ma il loro funzionamento è eccellente nel range compreso tra -200°C e 200°C .

La temperatura viene misurata basandosi sull'effetto Seebeck, principio per cui una barra metallica sottoposta a un gradiente di temperatura comporta una differenza di potenziale ai capi della barra stessa, la cui entità è di alcuni μV per Kelvin, a seconda dei metalli utilizzati. Attraverso il sistema di acquisizione avviene una conversione della differenza di potenziale in temperatura, che potrà essere letta nel computer. Non sono classificati come strumenti precisissimi, ma si può arrivare ad un livello di accuratezza minore di un grado Celsius, la loro non perfetta linearità costituisce un altro svantaggio.

Nei test effettuati, le termocoppie sono state utilizzate per misurare la temperatura ambiente, la temperatura della piastra diretta e di quella indiretta e varie temperature interne alla camera di essiccazione. Per misurare queste ultime temperature è stato allestito un sostegno in legno da poter inserire a contatto con le piastre durante i test. Il sostegno è composto da un telaio in cui sono fissate delle differenti posizioni



Fig.39: Sostegno in legno per posizionare le termocoppie sulle piastre

3.8.3. Data logger

È un dispositivo utilizzato per memorizzare i dati acquisiti di misurazione delle temperature attraverso le termocoppie, in tempo reale. Il data logger è considerato uno strumento completo (stand alone), in grado di leggere diversi tipi di segnali elettrici e memorizzare i dati nella memoria interna, per renderli scaricabili sul computer. Su questo dispositivo vengono collegate le varie termocoppie e il cavo di uscita dal pireliometro (per misurare la DNI). L'acquisitore utilizzato è un prodotto della "Pico Technology", azienda britannica che produce sensori per la diagnostica delle strumentazioni delle automobili, il prezzo è intorno ai 500 euro e la risoluzione è decisamente buona.



Fig. 40: Data logger utilizzato nei test sperimentali

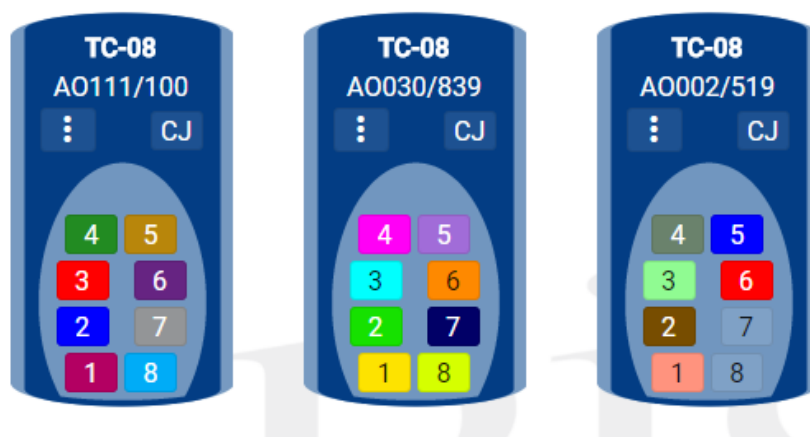


Fig. 41: Esempio di visualizzazione da software su pc di tre Picolog funzionanti in contemporanea

Numero di canali	8
Incertezza sulla temperatura	$\pm 0,02\%$ e $\pm 0,05\text{ }^{\circ}\text{C}$
Incertezza sul voltaggio	$\pm 0,2$ e $\pm 10\text{ }\mu\text{V}$
Protezione sul sovraccarico	$\pm 30\text{ V}$
Voltaggio in ingresso	$\pm 70\text{ mV}$
Frequenza in lettura	Fino a 10 al secondo
Connettori in ingresso	Termocoppia in miniatura
Connessione al PC	USB
Dimensioni	201*104*34 mm

Tab.7: Scheda tecnica acquisitore

3.8.4. Software di acquisizione dati

L'acquisitore dati viene fornito dal suo costruttore insieme ad uno specifico software per l'utilizzo dello strumento chiamato "PicoLog", mediante questo programma è possibile configurare ogni canale del data logger utilizzato, inserendo per ognuno di essi il nome, il tipo di termocoppia utilizzato e la frequenza di campionamento. Avviata la misurazione si può osservare nell'interfaccia grafica del programma attraverso il Computer, l'andamento delle temperature in funzione del tempo reale, il valore della DNI misurata dal pireliometro e dei dati in ingresso dei vari canali utilizzati. Una

volta acquisita la registrazione dei dati del test sperimentale, questi vengono esportati dal programma e studiati su un foglio Excel, per essere rielaborati, e dove necessario, corretti.

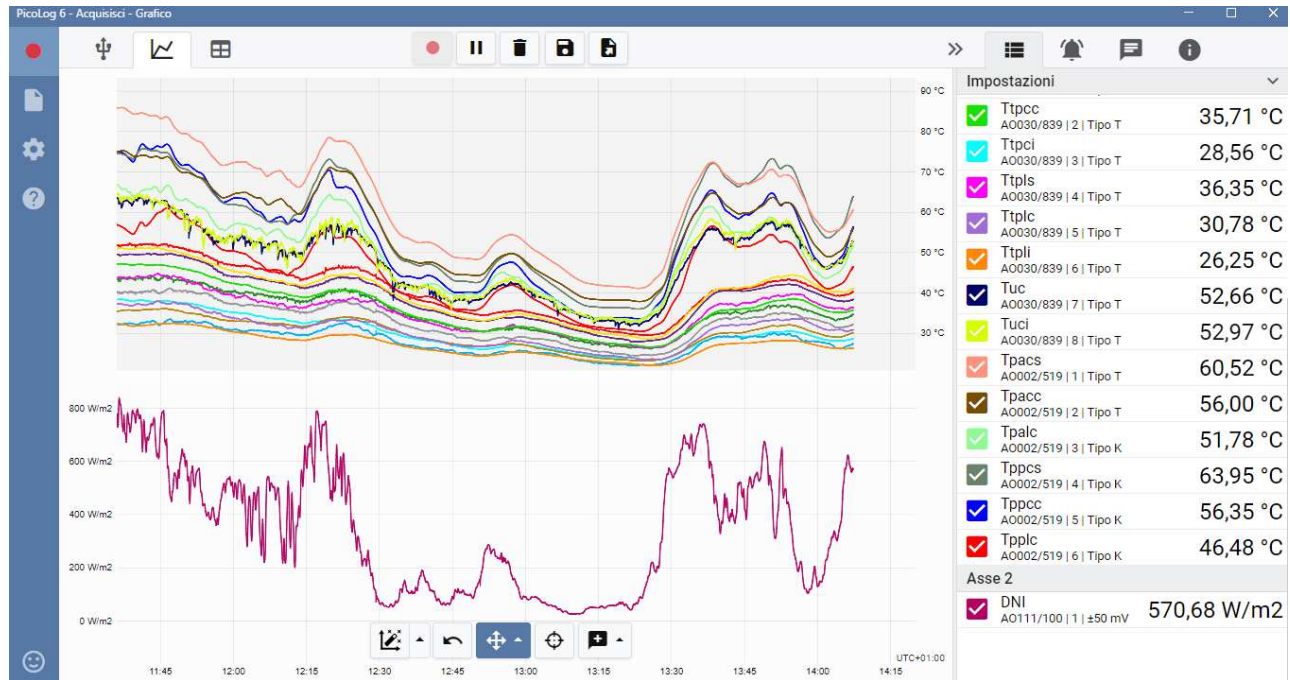


Fig.42 : esempio di grafico di acquisizione di temperatura (sopra) e DNI (sotto) elaborato dal software PicoLog

	DNI (W/m2)	Tamb (°C)	Ttacs (°C)	Ttacc (°C)	Ttaci (°C)	Ttals (°C)	Ttalc (°C)	Ttali (°C)	Ttpcs (°C)
	Media	Media	Media	Media	Media	Media	Media	Media	Media
2023-01-11T10:23:03+01:00	808,08	11,32	39,70	33,92	27,57	38,58	31,30	26,53	40,88
2023-01-11T10:23:04+01:00	808,08	11,32	39,70	33,92	27,57	38,58	31,30	26,53	40,86
2023-01-11T10:23:05+01:00	808,01	11,23	39,70	33,94	27,55	38,59	31,31	26,54	40,86
2023-01-11T10:23:06+01:00	807,54	11,13	39,71	33,95	27,57	38,62	31,33	26,57	40,87
2023-01-11T10:23:07+01:00	807,80	11,04	39,70	33,91	27,58	38,63	31,34	26,58	40,88
2023-01-11T10:23:08+01:00	807,93	10,94	39,72	33,88	27,58	38,64	31,35	26,61	40,88
2023-01-11T10:23:09+01:00	808,01	10,85	39,71	33,86	27,61	38,66	31,36	26,59	40,90
2023-01-11T10:23:10+01:00	808,27	10,79	39,68	33,87	27,62	38,66	31,37	26,59	40,92
2023-01-11T10:23:11+01:00	808,24	10,75	39,70	33,90	27,62	38,68	31,38	26,59	40,95
2023-01-11T10:23:12+01:00	808,29	10,71	39,75	33,91	27,62	38,67	31,39	26,59	41,00
2023-01-11T10:23:13+01:00	808,35	10,66	39,77	33,94	27,62	38,69	31,40	26,59	41,05
2023-01-11T10:23:14+01:00	808,50	10,59	39,79	33,94	27,62	38,70	31,42	26,59	41,07
2023-01-11T10:23:15+01:00	808,31	10,54	39,81	33,97	27,61	38,72	31,44	26,62	41,08
2023-01-11T10:23:16+01:00	808,14	10,52	39,85	33,98	27,64	38,73	31,44	26,63	41,09
2023-01-11T10:23:17+01:00	808,20	10,48	39,87	33,99	27,64	38,74	31,46	26,64	41,09
2023-01-11T10:23:18+01:00	808,03	10,45	39,88	33,99	27,65	38,74	31,45	26,64	41,08
2023-01-11T10:23:19+01:00	807,82	10,44	39,89	33,98	27,66	38,74	31,46	26,65	41,08
2023-01-11T10:23:20+01:00	808,29	10,42	39,89	33,99	27,66	38,75	31,48	26,66	41,07
2023-01-11T10:23:21+01:00	808,29	10,40	39,87	33,98	27,66	38,77	31,50	26,67	41,06
2023-01-11T10:23:22+01:00	808,71	10,37	39,86	33,97	27,66	38,77	31,51	26,69	41,07
2023-01-11T10:23:23+01:00	808,32	10,33	39,88	33,99	27,68	38,79	31,52	26,69	41,06
2023-01-11T10:23:24+01:00	807,56	10,31	39,89	33,99	27,69	38,80	31,54	26,70	41,08
2023-01-11T10:23:25+01:00	807,37	10,29	39,88	34,00	27,70	38,81	31,54	26,69	41,10
2023-01-11T10:23:26+01:00	807,44	10,28	39,89	33,99	27,70	38,82	31,56	26,72	41,11
2023-01-11T10:23:27+01:00	807,47	10,26	39,89	33,97	27,69	38,83	31,56	26,72	41,11
2023-01-11T10:23:28+01:00	807,37	10,26	39,88	33,97	27,70	38,83	31,56	26,73	41,11
2023-01-11T10:23:29+01:00	807,52	10,24	39,86	33,99	27,71	38,83	31,57	26,74	41,12
2023-01-11T10:23:30+01:00	807,87	10,23	39,86	34,00	27,73	38,84	31,59	26,74	41,12

Fig. 43: Esempio di tabella di acquisizione di temperature e DNI elaborate dal software PicoLog

4. Capitolo 4 – Parametri fondamentali

Per valutare le prestazioni di un essiccatore solare, occorre prendere in considerazione diversi parametri-

L'efficienza termica dell'essiccatore può essere valutata analizzando i seguenti parametri:

- Temperature e velocità del flusso d'aria nella camera e
- Tempo, velocità e tasso di essiccazione
- Umidità relativa ambiente e nella camera di essiccazione

La qualità del prodotto essiccato può essere valutata analizzando:

- Parametri sensoriali, come visivo, gusto, olfatto e tatto.
- Dati nutrizionali
- Capacità di reidratazione

Altri parametri da prendere in considerazioni potrebbero essere le caratteristiche fisiche dell'essiccatore e il tempo di ritorno di investimento dell'essiccatore. Le prime legate alle dimensioni, alla forma, alla capacità di carico e superficie di essiccazione, la seconda strettamente legato ai costi dei materiali, il che risulta essere irrisorio perché i nostri prototipi sono realizzati principalmente con materiali naturali e di riciclo.

4.1. Efficienza termica

4.1.1. Temperatura e velocità del flusso d'aria all'interno della camera

La regolazione della temperatura all'interno della camera fa aumentare o diminuire la velocità di essiccazione. Nel momento in cui incrementiamo la temperatura, aumenta la capacità del flusso d'aria di accumulare vapore acqueo (essenzialmente il titolo di vapore), inoltre, permette al prodotto di scaldarsi maggiormente, incrementando la sua pressione di vapore (quindi, la differenza di pressione tra superficie, prodotto e aria, accelerando l'asportazione di umidità).

Incrementando la temperatura, però, dobbiamo tener conto che la temperatura all'interno dell'essiccatore non può superare un centro limite. Tale limite è dato dalla sensibilità termica del prodotto e dal meccanismo di scambio di calore adottato. Temperature troppo elevate all'interno

della camera di essiccazione possono causare danni ai prodotti da essiccare (come bruciature o perdite di elasticità cellulare), o, impedimenti al processo di essiccazione (nel caso di frutta e vegetali, si potrebbe sviluppare una scorza dura sulla superficie che trattiene all'interno del prodotto il contenuto di umidità. [14].

Eccessive temperature aumentano le perdite di calore per conduzione e radiazione attraverso le aperture o le zone meno isolate della camera, riducendo l'efficienza del processo.

In generale, il range ideale di essiccazione per quanto riguarda la temperatura, varia tra un intervallo di 40 e 70°C a ridosso dei prodotti da essiccare, in modo da coprire le esigenze di gran parte dei prodotti da immettere nella camera di essiccazione.

La velocità del flusso d'aria invece, se insufficiente, implicherebbe una stagnazione del flusso che rallenterebbe il processo di rimozione dell'umidità, ma al contempo una velocità eccessiva impedirebbe un sufficiente tempo di contatto con i prodotti per assorbirne l'umidità oltre a causare un eccessivo deflusso di calore dall'apertura superiore della camera [14]. Un buon compromesso per gli essiccatori solari è rappresentato da un flusso d'aria in ingresso di 0,75 m/s per metro quadrato di superficie di essiccazione (Fig.51).

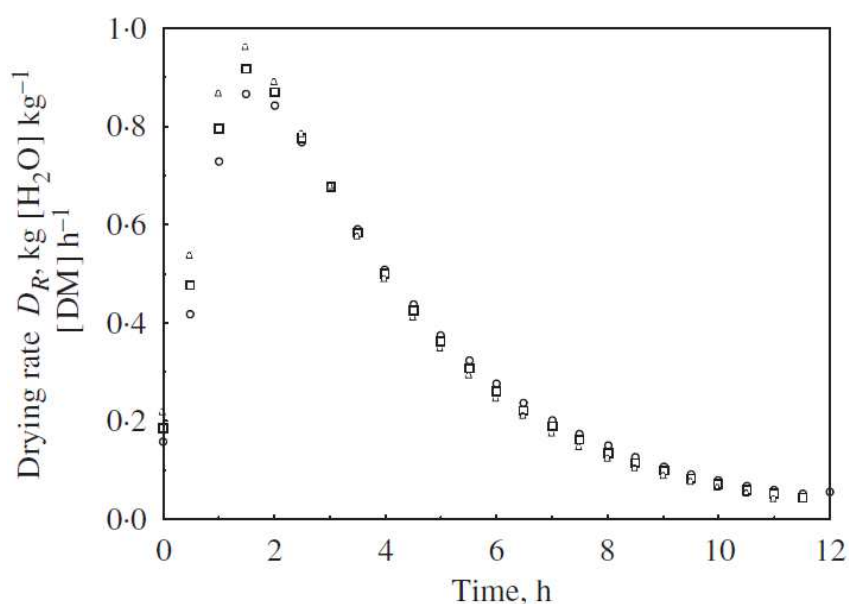


Fig.44. *Influenza della velocità del flusso d'aria (U) sulla velocità di essiccazione nel tempo a valori fissati di temperatura $T = 45^{\circ}\text{C}$ e umidità relativa $\phi = 40\%$: \circ , $U = 0,2 \text{ m/s}$; \square , $U = 0,4 \text{ m/s}$; \diamond , $U = 0,6 \text{ m/s}$.*

4.1.2. Tempo, velocità e tasso di essiccazione

La durata del processo di essiccazione è il parametro principale da considerare per valutare l'efficienza di un essiccatore. La finestra di tempo considerata comincia quando l'essiccatore viene caricato con i prodotti freschi e termina quando i prodotti raggiungono il livello di umidità richiesto, generalmente è un intervallo di tempo che varia da alcune ore o giorni, include anche il tempo in cui non è disponibile la radiazione solare (tramonto o meteo nuvoloso).

Raggiungere temperature elevate all'interno della camera, come precedentemente si è visto nei lavori di tesi svolti nel periodo estivo, velocizza il processo di essiccazione, ma si rischia di danneggiare il prodotto in termini di colorazione, sapore, aroma o addirittura se superiori ai 70°C, anche dati nutrizionali.

Un metodo funzionale invece, per accorciare i tempi di essiccazione, è la possibilità di introdurre i prodotti da essiccare in pezzi di dimensioni ridotte (esempio delle mele tagliate a spicchi o rondelle) oppure aggiungere piccole quantità di reagenti nei prodotti per incrementare le temperature di essiccazione sulla superficie [15].

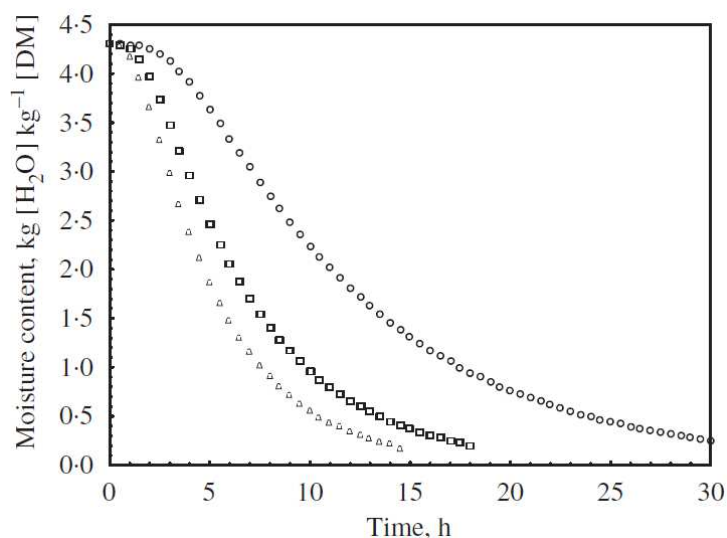


Fig. 45: *Variazione del contenuto di umidità nel tempo in funzione di diverse umidità relative $[\varphi]$ a fissate velocità di flusso $U = 0,2 \text{ m/s}$ e temperatura $T = 35^\circ \text{C}$: \circ , $\varphi = 70\%$; \square , $\varphi = 55\%$; \diamond , $\varphi = 40\%$.*

La figura sopra riportata, è una rappresentazione grafica del processo con il contenuto di umidità del prodotto e la durata come coordinate, permette di visualizzare la velocità di essiccazione, utile per comparare le performance di diversi essiccatori.

4.1.3. Umidità relativa ambiente e della camera di essiccazione

L'umidità relativa del flusso d'aria in ingresso è un parametro importante da tenere in considerazione durante il processo di essiccazione. La capacità dell'aria di trattenere più vapore possibile può essere incrementata deumidificando il flusso o scaldandolo (per ridurre l'umidità relativa oppure incrementare il titolo di vapore acqueo), prima che entri in camera oppure alzando le temperature nella camera stessa [14].

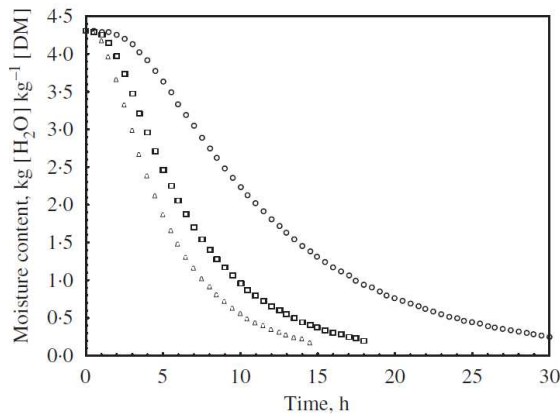


Fig. 46: Influenza della temperatura sulla velocità di essiccazione nel tempo a fissate velocità del flusso $U = 0,2 \text{ m/s}$ e umidità relativa $\varphi = 40\%$: \circ , $T = 35^\circ\text{C}$; \square , $T = 45^\circ\text{C}$; \diamond , $T = 55^\circ\text{C}$.

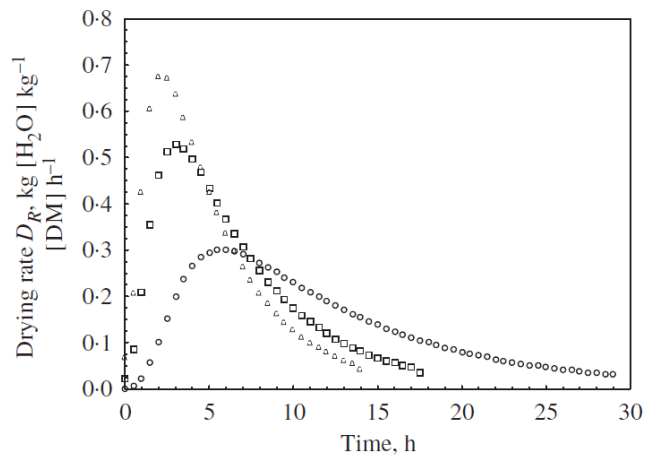


Fig.47: Influenza dell'umidità relativa sulla velocità di essiccazione nel tempo a fissate velocità del flusso d'aria $U = 0,2 \text{ m/s}$ e temperatura $T=35^\circ\text{C}$: \circ , $\varphi = 70\%$; \square , $\varphi = 55\%$; \diamond , $\varphi = 40\%$.

Nella figura sopra riportata, possiamo notare come, in generale, minore è l'umidità relativa ambiente, minore è la durata del processo di essiccazione.

4.2. Qualità del prodotto essiccato

L'essiccazione va ad influenzare le proprietà fisiche del prodotto a causa di cambiamenti di dimensioni, forma, colore e consistenza, e proprietà nutrizionali a seguito di reazioni chimiche ed enzimatiche che possono avvenire durante la reidratazione. Queste reazioni potrebbero rendere il prodotto immangiabile, se non tossico.

Una verifica qualitativa del prodotto essiccato nella camera solitamente include verifiche dei parametri sensoriali, dei dati nutrizionali e della capacità di reidratazione.

4.2.1. Parametri sensoriali

La qualità sensoriale del prodotto essiccato la si valuta attraverso il sensore visivo, le sembianze che assume, analizzando il colore, le dimensioni, la forma o assenza di difetti. Attraverso il gusto analizziamo il sapore per quanto riguarda la dolcezza, asprezza o amarezza, o l'aroma attraverso il tatto e l'odore. In generale, le reazioni chimiche del calibro di ossidazione ed imbrunimento (solite nel processo di essiccazione) contribuiscono considerevolmente al deterioramento dell'aroma [15].

4.2.2. Dati nutrizionali

Per quanto riguarda i dati nutrizionali è importante valutare il contenuto di zuccheri, di vitamina C, beta-carotene o acidità, prima e dopo l'essiccazione. Si è visto come un basso contenuto di zuccheri sta a significare che le temperature di essiccazioni erano troppo elevate, un basso contenuto di vitamina C invece, indica una perdita eccessiva di nutrienti per periodi troppo lunghi di essiccazione. Quando troviamo elevate acidità, vuol dire che è in atto un deterioramento qualitativo per fermentazione [15].

4.2.3. Capacità di reidratazione

A seguito del processo di essiccazione, alcune tipologie di frutta, vengono consumate soltanto dopo una successiva reidratazione. Avviene aggiungendo acqua così da far riacquistare al prodotto essiccato il sapore, l'aroma, consistenza e sembianze originali.

Ogni prodotto, ha una sua capacità di reidratazione [15], non possono tornare perfettamente al loro stato originario precedente all'essiccazione, perché si creano danni a livelli cellulari che influenzano negativamente la capacità di reidratazione.

4.3. Indicazioni funzionali all'essiccazione

Il processo di essiccazione, come appena riportato, è influenzato da tanti fattori intrinseci legati alla natura del materiale e da fattori estrinseci come il contesto nel quale avviene la produzione. Il prodotto, prima del processo di essiccazione, può essere pretrattato, al fine di ottimizzare le condizioni per poter applicare le tecniche di essiccamento, permettendo quindi alle materie prime di sottoporsi in modo meno traumatico al trattamento, con risvolti positivi sulla qualità del prodotto finale.

4.3.1. Operazioni preliminari

I prodotti prima della fase di essiccazione, richiedono una preparazione idonea, ad esempio, i prodotti ricchi di acqua possono richiedere un'eliminazione preventiva della stessa prima del processo di trasformazione. La presenza di acqua nei prodotti crea un ambiente ideale alla proliferazione dei batteri, per questo è importante effettuare questo tipo di pretrattamento, con la quale andiamo a preparare il prodotto all'essiccazione, o vengono modificate direttamente delle caratteristiche iniziali del prodotto. I pretrattamenti più comuni sono la scottatura, l'osmodisidratazione e l'immersione in soluzioni protettive [16].

- **Scottatura:** è un tipo di pretrattamento che permette di inattivare la maggior parte degli enzimi immergendo le materie prime da essiccare in acqua bollente per un tempo variabile che dipende principalmente dalla pezzatura del prodotto. I tempi variano dai 30 secondi ai 3

minuti, successivamente alla bollitura, il prodotto viene immerso in un bagno di ghiaccio fondente.

- **L'osmodisidratazione:** è un tipo di pretrattamento che consiste nell'immergere un prodotto in una soluzione concentrata di zuccheri o sale (cloruro di sodio) per provocare una parziale disidratazione ed un arricchimento in solidi solubili per differenza di pressione osmotica. Presentando un'alta concentrazione di sale e zuccheri, permette di ottenere un essiccato con un colore molto simile a quello di partenza.
- **L'immersione in soluzioni acidificate:** è un tipo di pretrattamento utile per rallentare le reazioni di imbrunimento per le varietà sensibili. L'immersione dura pochi minuti ed avviene nell'aceto o nel succo di limone diluito.

4.4. Variabili incontrollabili

Durante la sperimentazione è emerso che il contesto di prova non può essere mai controllato del tutto perché permangono delle variabili che non possono essere previste con certezza oppure approssimate con un buon grado di precisione.

Di seguito vengono riportate le linee guida stabilite per condurre test sia sui forni solari che sugli essiccatori, che permettono di garantire un sufficiente grado di validità per la sperimentazione.

4.4.1. La radiazione solare diretta

Avere grandi sbalzi di radiazione può provocare un effetto termico inerziale con elevate oscillazioni nelle temperature rilevate dagli acquisitori, allungando di molto i tempi di essiccazione.

4.4.2. Vento

La velocità del vento durante la prova è una variabile totalmente incontrollabile. La norma stabilisce un range entro il quale il test è considerato valido. Se la velocità del vento è maggiore o uguale a 2.5 m/s per più di 10 minuti, il test non viene considerato valido. Bisogna mantenere una velocità al di sotto di 1 m/s.

4.4.3. Temperatura ambiente

L'efficienza della camera di essiccazione è legata alla temperatura ambiente, al di fuori di questo intervallo di temperature, il test non risulterebbe valido per via dell'eccessiva temperatura del flusso d'aria in ingresso oppure per insufficiente riscaldamento della camera di essiccazione.

5. Capitolo 5 – Test sperimentali

I test sperimentali con la camera di essiccazione di Tipo Newton Solar Dryer 2.0, precedentemente illustrato, sono stati effettuati presso il terrazzo del dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche “DIISM”, nei mesi di ottobre, novembre, dicembre 2022 e gennaio 2023. Sono state svolte diverse prove, variando i parametri del sistema, posizionando le termocoppie che rilevano la temperatura in diverse posizioni all'interno della camera o all'esterno delle piastre collettrici, ma anche, sottoponendo il prototipo a contesti di prova di volta in volta diversi per temperature e ambiente, intensità di radiazione solare o velocità del vento.

I test iniziali mirano a fornire dei risultati preliminari per quanto riguarda il comportamento termodinamico e determinare la geometria più efficace delle due differenti configurazioni dei prototipi NSD 1.0 e NSD 2.0, mettendo a confronto le prestazioni termiche. Le analisi si sono focalizzate sulle temperature raggiungibili sulle piastre e nella camera di essiccazione, in funzione delle condizioni ambientali.

Successivamente, sono stati effettuati dei test per verificare l'efficacia del processo di essiccazione vero e proprio in termini di tempo e velocità di essiccazione con capacità di carico costante.

I risultati dei test sono stati di volta in volta registrati su apposite tabelle Excel riportanti i valori massimi e medi di temperatura e radiazione raggiunti in funzione della configurazione e delle condizioni di prova adottate.

5.1. Prova del 16/09/2022

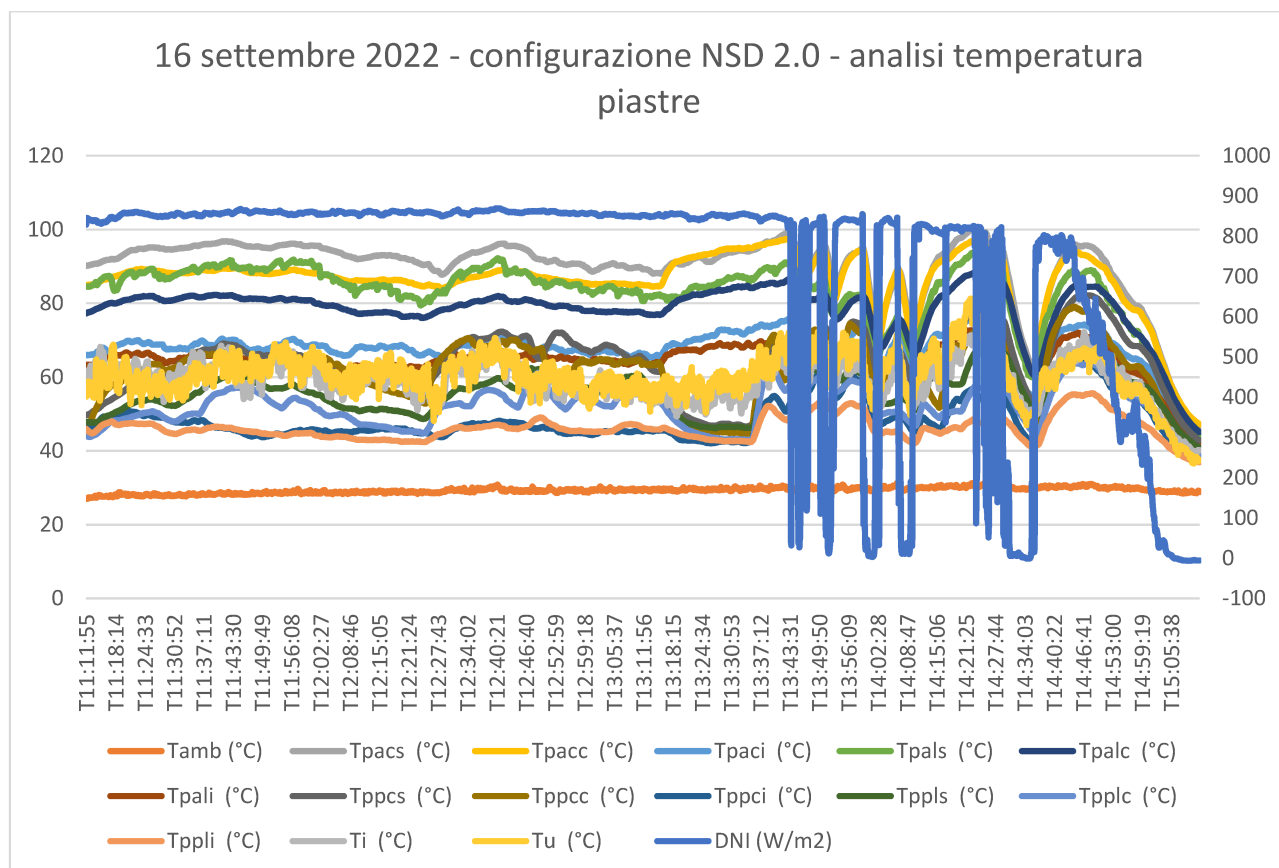


Fig. 48: Grafico configurazione NSD 2.0 – analisi temperatura piastre

Nella seconda parte della prova, si evidenzia la presenza di una forte oscillazione dei valori della radiazione solare, dovuta alla presenza intermittente di nuvole.

Temperatura			Media temperatura °C	Massima temperatura °C
Temperature piastra anteriore	Zona centrale	Tpacs	89.75	100.69
		Tpacc	86.12	97.72
		Tpaci	67.95	76.5
	Zona laterale	Tpals	82.89	93.93
		Tpalc	78.47	88.56
		Tpali	64.75	72.9
Temperature piastra posteriore	Zona centrale	Tppcs	64.27	82.2
		Tppcc	61.62	79.04
		Tppci	48.52	64.71
	Zona laterale	Tppls	56.31	68.22
		Tpplc	52.18	63.78
		Tppli	46.18	55.64
Ti			59.25	72.65
Tu			60.72	81.27
Tamb			29.3	31.28

DNI	Media (W/m ²)	Massima (W/m ²)
	721.21	869.52

Tab. 8: Valori configurazione NSD 2.0 – analisi temperatura piastre

La distribuzione delle temperature sulle piastre non è uniforme. Le temperature risultano superiori nella zona centrale rispetto alla zona laterale, e nella parte superiore della piastra rispetto la parte inferiore.

Confronto sulle piastre anteriori

Tra la parte a 6 cm e a 19cm dal bordo superiore delle piastre anteriori, abbiamo un gradiente di 4 °C sia nella zona centrale che nella zona laterale, e un gradiente di 18°C e di 14°C nella zona laterale. La differenza di temperature, tra la zona centrale (più calda) e la zona laterale (più fredda) è di circa 8°C nella metà superiore, e di circa 4°C nella metà inferiore.

T medie piastra anteriore	°C	T massime piastra anteriore	°C
<i>T ambiente</i>	29.3	<i>T ambiente</i>	31.28
<i>T 6,5 cm</i>	86.32	<i>T 6,5 cm</i>	97.31
<i>T 19,50 cm</i>	82.29	<i>T 19,50 cm</i>	93.14
<i>T 32,50 cm</i>	66.35	<i>T 32,50 cm</i>	74.7
<i>T piastra anteriore</i>	78.32	<i>T piastra anteriore</i>	88.38

Tab. 9: Valori configurazione NSD 2.0 – analisi temperature medie e massime sulle piastre anteriori

Temperature piastra anteriore °C	
Tpacs - Tpacc	4
Tpacc - Tpaci	18
Tpals - Tpalc	4
Tpalc - Tpali	14
Tpacs - Tpals	7
Tpacc - Tpalc	8
Tpaci - Tpali	3

Tab. 10: Valori configurazione NSD 2.0 – calcolo gradienti di temperatura

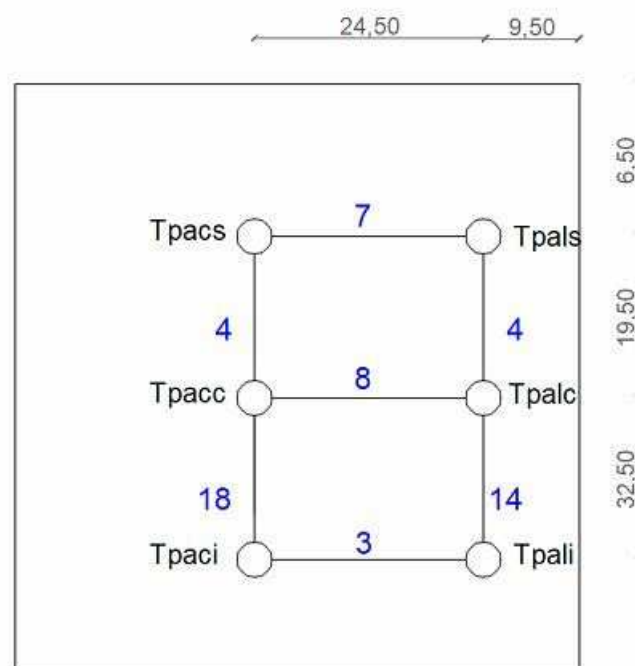


Fig. 49: Piastra anteriore

Confronto sulle piastre posteriori

Tra la parte a 6 cm e a 19cm della posizione delle piastre anteriori, abbiamo un gradiente di 4 °C sia nella zona centrale che nella zona laterale, e un gradiente di 13°C e di 6°C nella zona laterale. La differenza di temperature, tra la zona centrale (più calda) e la zona laterale (più fredda) è di circa 8°C nella metà superiore, e di circa 2°C nella metà inferiore.

T medie piastra posteriore	°C	T massime piastra posteriore	°C
<i>T ambiente</i>	29.3	<i>T ambiente</i>	31.28
<i>T 6,5 cm</i>	60.29	<i>T 6,5 cm</i>	75.21
<i>T 19,50 cm</i>	56.9	<i>T 19,50 cm</i>	71.41
<i>T 32,50 cm</i>	47.35	<i>T 32,50 cm</i>	60.17
<i>T piastra anteriore</i>	54.84	<i>T piastra anteriore</i>	68.93

Tab. 11: Valori configurazione NSD 2.0 – analisi temperature medie e massime sulle piastre posteriori

Temperature piastra posteriore °C	
Tppcs - Tppcc	3
Tpcc - Tppci	13
Tppls - Tpple	4
Tpple - Tppli	6
Tppcs- Tppls	8
Tppcc - Tpple	9
Tppci - Tppli	2

Tab. 12: Valori configurazione NSD 2.0 – calcolo gradienti di temperatura

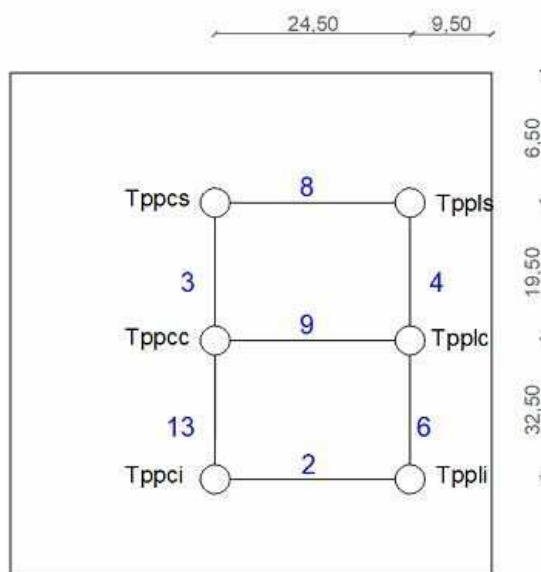


Fig. 50: Piastra posteriore

La temperatura della piastra anteriore risulta mediamente più calda di circa 23°C rispetto alla temperatura della piastra posteriore.

5.2. Prova del 03/10/2022

Nella misurazione sopra citata, le termocoppie sono state posizionate all'interno della camera di essiccazione, per misurare la temperatura dell'aria interna.

Si è riscontrato che con la presenza del sole la temperatura interna raggiungeva valori intorno ai 50-70°C, con assenza di sole e presenza di nuvole, la temperatura interna si aggirava intorno ai 25 -30 °C. La temperatura in uscita rimaneva circa uguale sia in presenza di sole che in assenza, con le nuvole.

L'intervallo di misure ottimale considerato è dalle ore 11:10 alle ore 13:30

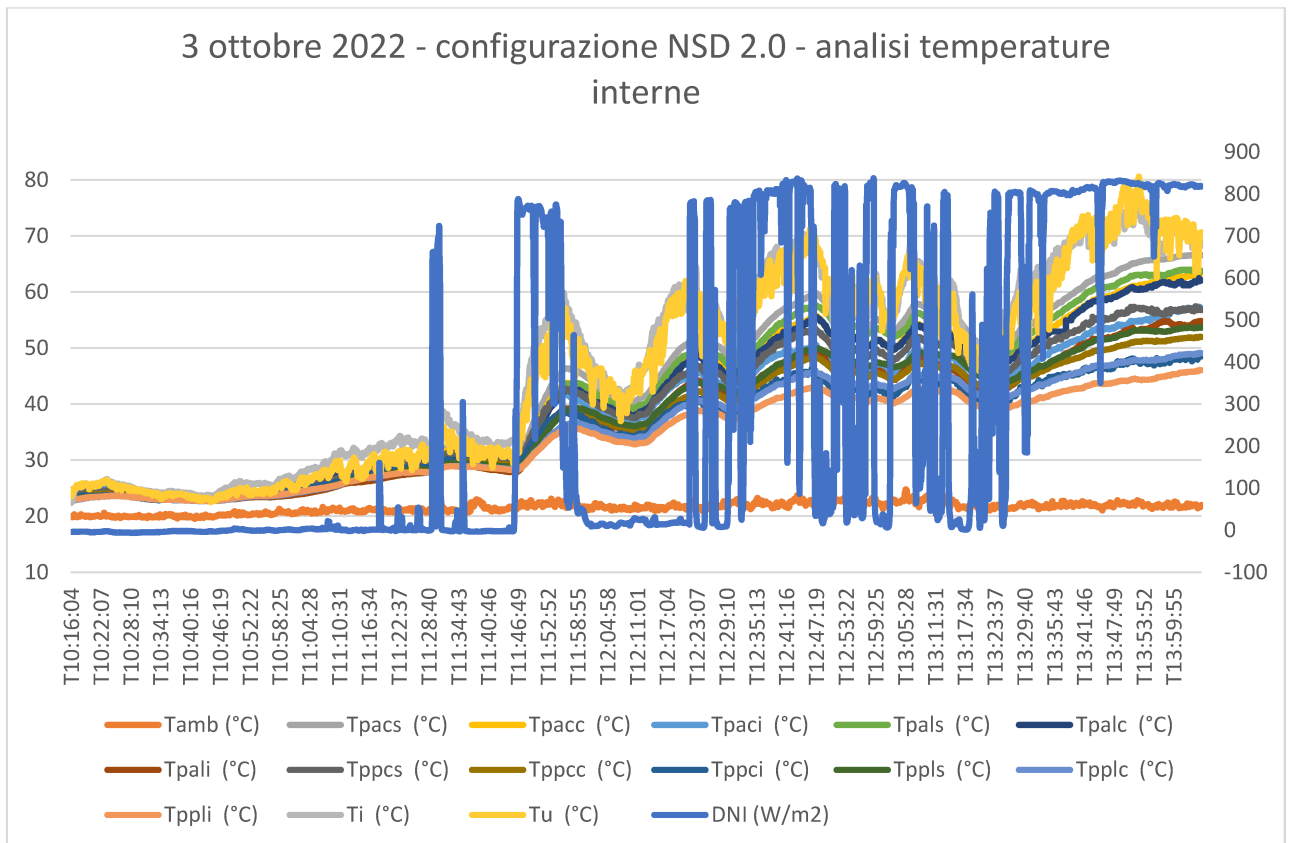


Fig.51: Grafico configurazione NSD 2.0 – analisi temperature interne

Nella prova sopra riportata, si evidenzia la presenza di una forte oscillazione riguardante la radiazione solare, dovuta alla presenza intermittente di nuvole.

Temperatura			Media temperatura °C	Massima temperatura °C
Temperature tavola anteriore	Zona centrale	Ttacs	42.9	66.65
		Ttacc	40.83	63.42
		Ttaci	38.24	57.4
	Zona laterale	Ttals	41.46	64.02
		Ttalc	40.43	62.52
		Ttali	37.05	54.83
Temperature tavola posteriore	Zona centrale	Ttpcs	39.45	57.47
		Ttpcc	36.79	52.03
		Ttpci	35.49	49.01
	Zona laterale	Ttpls	34.44	53.7
		Ttplc	35.28	49.15
		Ttpli	34.01	46.09
Ti			47.44	75.54
Tu			46.34	80.6
Tamb			21.5	24.82

DNI	Media (W/m2)	Massima (W/m2)
	286.41	837.66

Tab. 13: Valori configurazione NSD 2.0 – analisi temperature interne

Confronto sulle tavole anteriori

Riguardo la distribuzione di temperatura sulle tavole, tra la parte a 2,5 cm e a 13 cm della posizione delle tavole anteriori, abbiamo un gradiente di circa 1 °C sia nella zona centrale che nella zona laterale, e un gradiente di circa 3°C tra la parte a 13 cm e a 23.5 cm. La differenza di temperature, tra la zona centrale (più calda) e la zona laterale (più fredda) è di circa 1°C .

T medie tavola anteriore	°C	T massime tavola anteriore	°C
<i>T ambiente</i>	21.5	<i>T ambiente</i>	24.82
<i>T 3 cm</i>	42.18	<i>T 3 cm</i>	65.33
<i>T 13 cm</i>	40.63	<i>T 13 cm</i>	62.97
<i>T 20,50 cm</i>	37.65	<i>T 20,50 cm</i>	56.11
<i>T tavola anteriore</i>	40.15	<i>T tavola anteriore</i>	61.47

Tab. 14: Valori configurazione NSD 2.0 – analisi temperature medie e massime sulla tavola anteriore

Temperature tavola anteriore °C	
Ttacs - Ttacc	1
Ttacc - Ttaci	3
Ttals - Ttalc	1
Ttalc - Ttali	3
Ttacs - Ttals	1
Ttacc - Ttalc	1
Ttaci - Ttali	1

Tab. 15: Valori configurazione NSD 2.0 – calcolo gradienti di temperatura

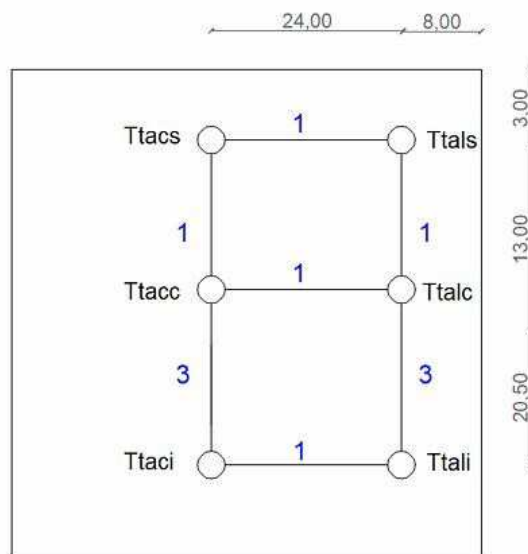


Fig. 52: Tavola anteriore

Confronto sulle tavole posteriori

Riguardo la distribuzione di temperatura sulle tavole, tra la parte a 2,5 cm e a 13 cm della posizione delle tavole posteriori, abbiamo un gradiente di circa 2 °C sia nella zona centrale che nella zona laterale, e un gradiente di circa 1°C tra la parte a 13 cm e a 23.5 cm. La differenza di temperature, tra la zona centrale (più calda) e la zona laterale (più fredda) è di circa 2°C .

La temperatura della camera di essiccazione anteriore risulta mediamente più calda di circa 10 °C rispetto alla temperatura della camera posteriore.

T medie tavola posteriore	°C	T massime tavola posteriore	°C
<i>T ambiente</i>	21.5	<i>T ambiente</i>	24.82
<i>T 3 cm</i>	36.94	<i>T 3 cm</i>	55.58
<i>T 13 cm</i>	36.03	<i>T 13 cm</i>	50.59
<i>T 20,50 cm</i>	34.75	<i>T 20,50 cm</i>	47.55
<i>T tavola anteriore</i>	35.91	<i>T tavola anteriore</i>	51.24

Tab. 16: Valori configurazione NSD 2.0 – analisi temperature medie e massime sulla tavola posteriore

Temperature tavola posteriore °C	
Ttpcs - Ttpcc	2
Ttcc - Ttpci	1
Ttpis - Ttpic	2
Ttpic - Ttpil	1
Ttpcs- Ttpis	2
Ttpcc - Ttpic	2
Ttpci - Ttpil	2

Tab. 17: Valori configurazione NSD 2.0 – calcolo gradienti di temperatura

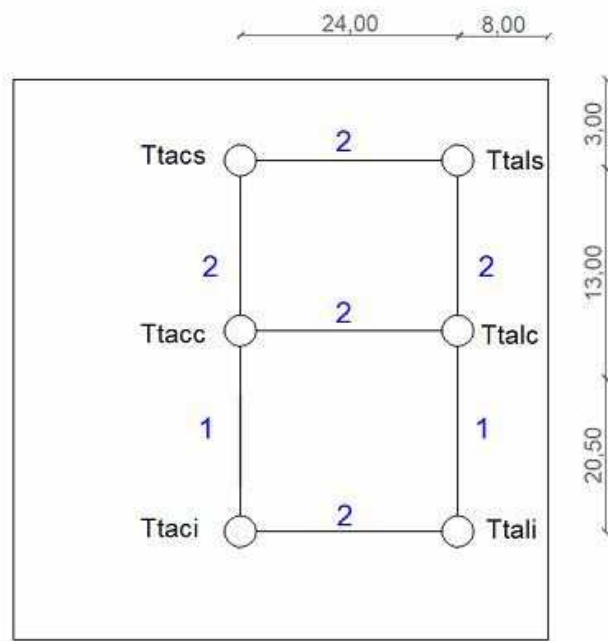


Fig.53: *Tavola posteriore*

5.3. Prova del 06/10/2022

Nella misurazione sopra citata si è utilizzato il vecchio modello di camera di essiccazione, Newton Solar Dryer 1.0, posizionando le termocoppie sulle piastre.

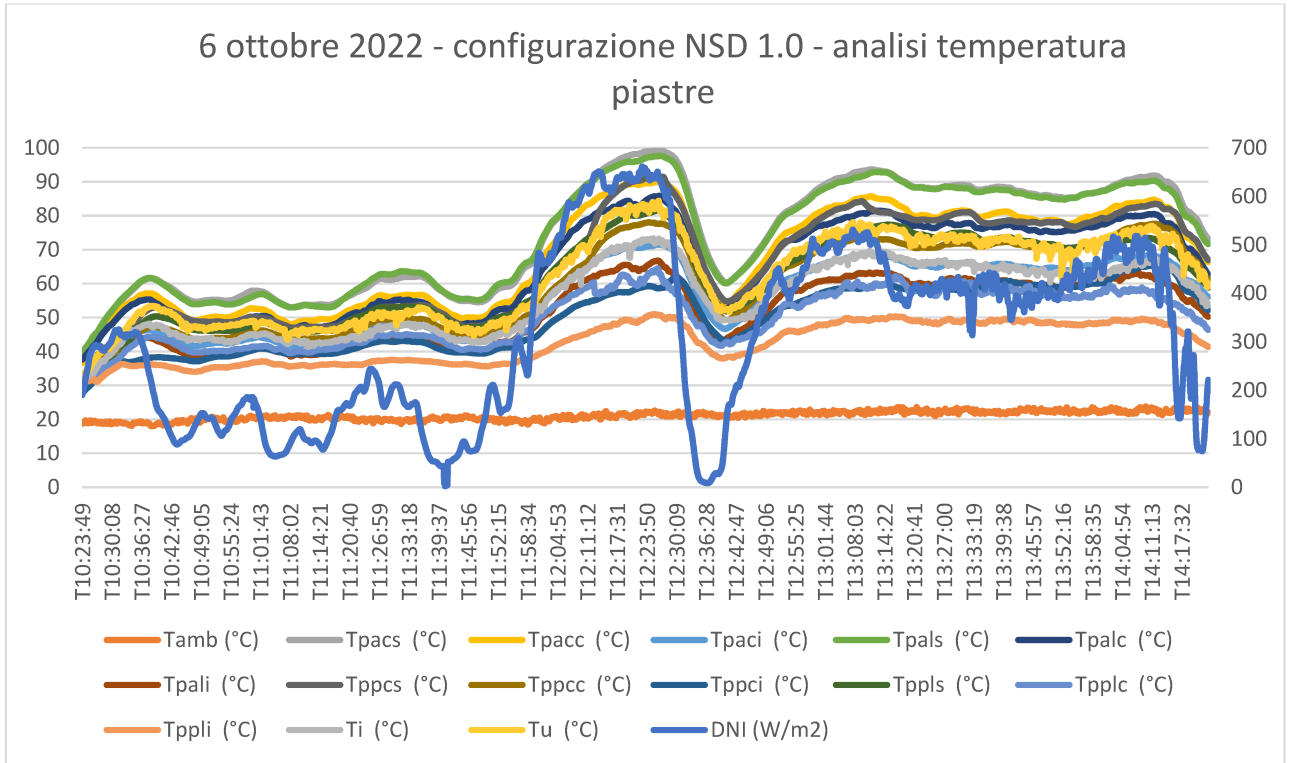


Fig. 54: Grafico configurazione NSD 1.0 – analisi temperatura piastre

Temperatura			Media temperatura °C	Massima temperatura °C
Temperature piastra anteriore	Zona centrale	Tpacs	74.18	99.28
		Tpacc	67.89	90.8
		Tpaci	55.89	71.57
	Zona laterale	Tpals	73.8	97.67
		Tpalc	64.99	85.88
		Tpali	51.62	66.79
Temperature piastra posteriore	Zona centrale	Tppcs	65.6	91.56
		Tppcc	59.5	78.06
		Tppci	49.84	65.41
	Zona laterale	Tppls	61.37	81.78
		Tpplc	49.98	64.47
		Tppli	42.46	50.99
Ti			55.73	73.35
Tu			61.72	84.38
Tamb			21.09	23.82

DNI	Media (W/m2)	Massima (W/m2)
	318.19	661.51

Tab. 18: Valori configurazione NSD 1.0 – analisi temperature interne

Confronto sulle piastre anteriori

Riguardo la distribuzione di temperatura sulle piastre, tra la parte a 2,5 cm e a 13 cm della posizione delle piastre anteriori, abbiamo un gradiente di circa 6°C nella zona centrale, e 9 °C nella zona laterale, e un gradiente di circa 12°C tra la parte a 13 cm e a 23.5 cm sia nella zona centrale che nella zona laterale. La differenza di temperature, tra la zona centrale (più calda) e la zona laterale (più fredda) è di circa 0,5°C nella parte superiore, 3°C nella parte centrale e 4°C nella parte inferiore.

T medie piastra anteriore	°C	T massime piastra anteriore	°C
<i>T ambiente</i>	21.09	<i>T ambiente</i>	23.82
<i>T 6,50 cm</i>	73.99	<i>T 6,50 cm</i>	98.47
<i>T 19,50 cm</i>	66.44	<i>T 19,50 cm</i>	88.34
<i>T 32,50 cm</i>	53.75	<i>T 32,50 cm</i>	69.18
<i>T tavola anteriore</i>	64.73	<i>T tavola anteriore</i>	72.04

Tab. 19: Valori configurazione NSD 1.0 – analisi temperature medie e massime sulla piastra anteriore

Temperature piastra anteriore °C	
Tpacs - Tpacc	6
Tpacc - Tpaci	12
Tpals - Tpalc	9
Tpalc - Tpali	13
Tpacs - Tpals	0.5
Tpacc - Tpalc	3
Tpaci - Tpali	4

Tab. 20: Valori configurazione NSD 1.0 – calcolo gradienti di temperatura

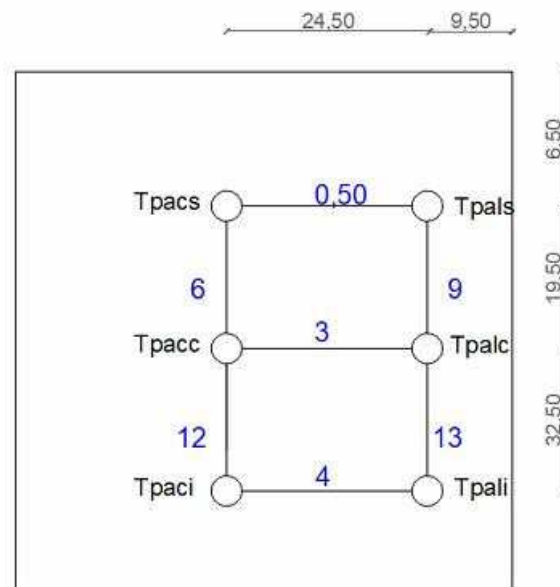


Fig. 55: Piastra anteriore

Confronto sulle piastre posteriori

Riguardo la distribuzione di temperatura sulle piastre, tra la parte a 2,5 cm e a 13 cm della posizione delle piastre posteriori, abbiamo un gradiente di circa 6°C nella zona centrale, e 11 °C nella zona laterale, e un gradiente di circa 10°C tra la parte a 13 cm e a 23.5, nella zona centrale, e di 8 °C nella zona laterale. La differenza di temperature, tra la zona centrale (più calda) e la zona laterale (più fredda) è di circa 4°C nella parte superiore, 10°C nella parte centrale e 7°C nella parte inferiore.

T medie piastra posteriore	°C	T massime piastra posteriore	°C
<i>T ambiente</i>	21.09	<i>T ambiente</i>	23.82
<i>T 6,50 cm</i>	63.48	<i>T 6,50 cm</i>	86.67
<i>T 19,50 cm</i>	54.74	<i>T 19,50 cm</i>	54.74
<i>T 32,50 cm</i>	46.15	<i>T 32,50 cm</i>	46.15
<i>T tavola anteriore</i>	54.79	<i>T tavola anteriore</i>	72.04

Tab. 21: Valori configurazione NSD 1.0 – analisi temperature medie e massime sulla piastra posteriore

Temperature piastra posteriore °C	
Tppcs - Tppcc	6
Tpcc - Tppci	10
Tppls - Tpplc	11
Tpplc - Tppli	8
Tppcs- Tppls	4
Tppcc - Tpplc	10
Tppci - Tppli	7

Tab. 22: Valori configurazione NSD 1.0 – calcolo gradienti di temperatura

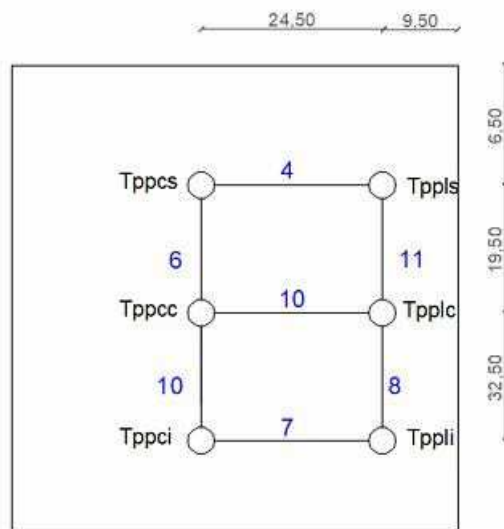


Fig. 56: Piastra posteriore

La temperatura della piastra anteriore risulta mediamente più calda di circa 9°C rispetto alla temperatura della piastra posteriore.

5.4. Prova del 12/10/2022

Nella misurazione sopra citata, le termocoppie sono inserite all'interno della camera di essiccazione, del vecchio modello, NSD 1.0.



Fig.57: Acquisizione dati all'interno della camera del NSD 1.0

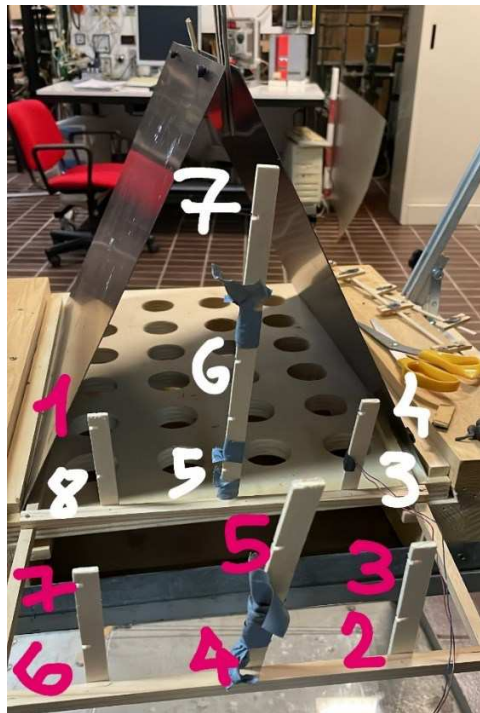


Fig. 58: Schema di distribuzione delle termocoppie

<i>Pico logger primario</i>	<i>Pico logger secondario</i>
3, 4, 5, 6, 7, 8	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7

Tab. 23: *Legenda distribuzione delle termocoppie (colorazione riportata nella figura precedente)*



Fig. 59: *Configurazione di acquisizione dati all'interno della camera del NSD 1.0*

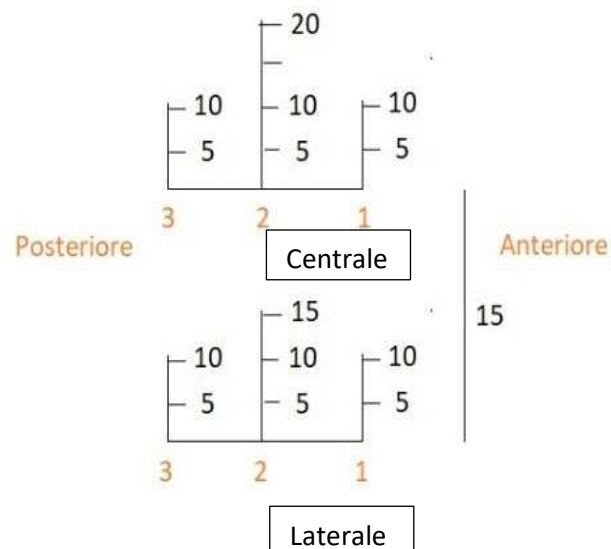


Fig. 60: *Rappresentazione grafica distribuzione delle termocoppie*

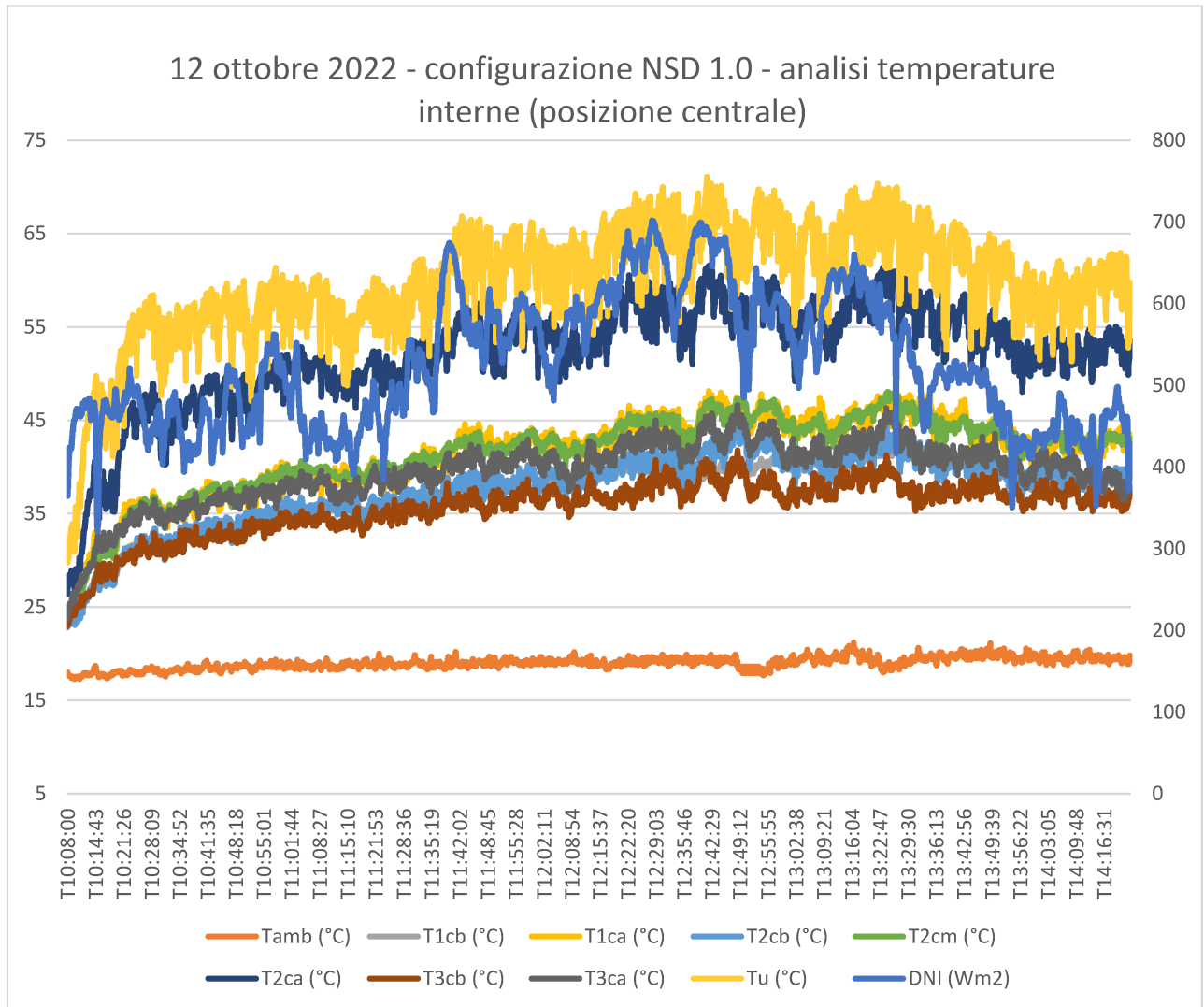


Fig. 61: Grafico configurazione NSD 1.0 – analisi temperature interne (posizione centrale)

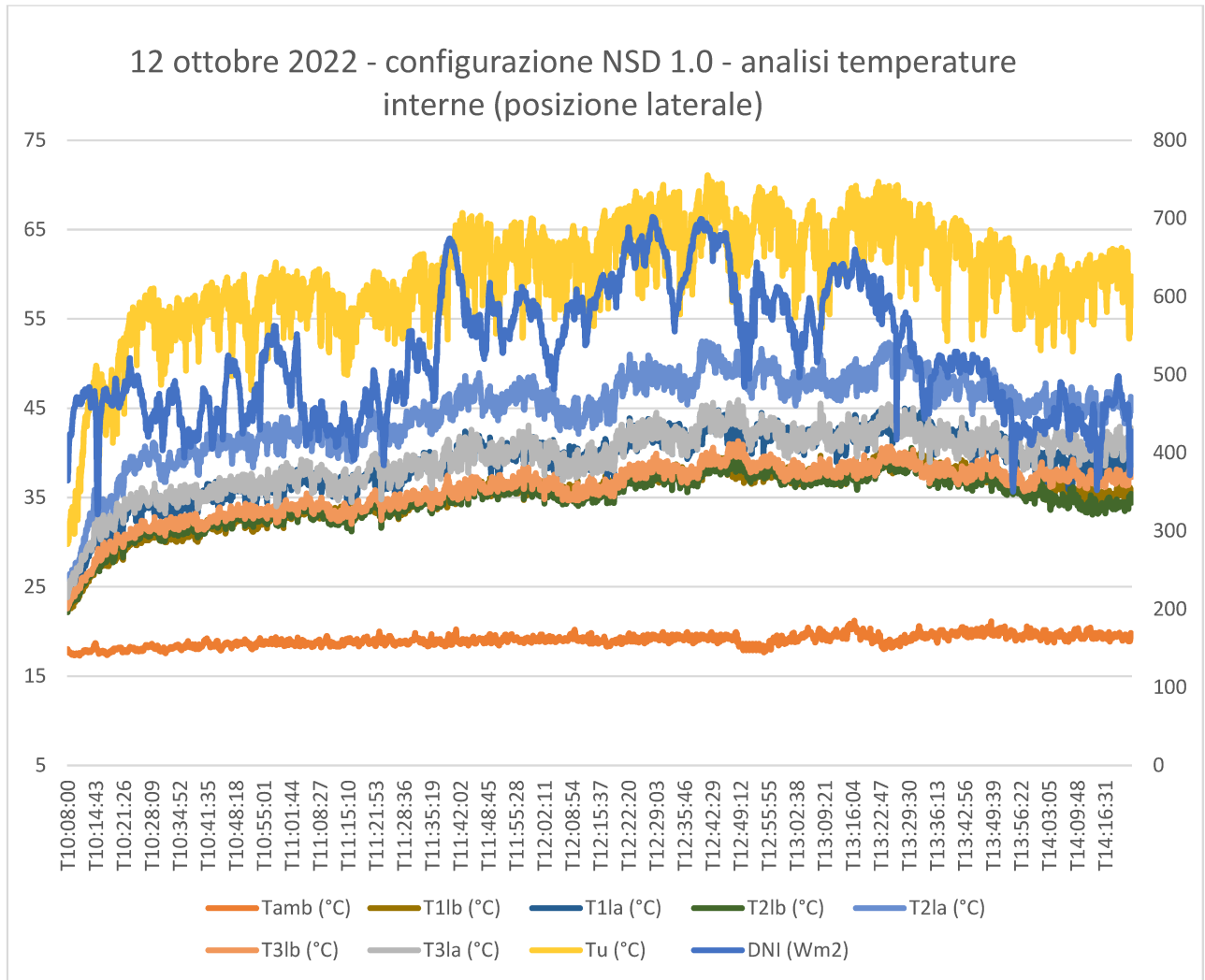


Fig. 62: Grafico configurazione NSD 1.0 – analisi temperature interne (posizione laterale)

Temperatura		Media temperatura °C	Massima temperatura °C
Centrale	T1cb	37.33	42.26
	T1ca	41.53	48.14
	T2cb	37.7	44.88
	T2cm	41.56	48.05
	T2ca	52.37	61.59
	T3cb	35.67	41.81
	T3ca	39.53	46.62
Laterale	T1lb	35.09	40.08
	T1la	38.95	45.12
	T2lb	34.88	40.55
	T2la	44.67	52.47
	T3lb	35.79	41.32
	T3la	39.33	45.93
Tu		59.91	71.1
Tamb		19	21.21

DNI	Media (W/m2)	Massima (W/m2)
	527.20	702.03

Tab. 24: Valori configurazione NSD 1.0 – analisi temperature interne (posizione centrale e laterale)

Analizzando le temperature riportate dalla prova effettuata nella zona centrale della camera di essiccazione del NSD 1.0, osserviamo una differenza di temperatura tra l'altezza di 5cm rispetto alla base e 10cm di circa 4°C, e, di circa 11°C tra 10 e 20 cm dalla base. Con una differenza tra la zona centrale e la zona posteriore di circa 2°C.

La temperatura nella camera di essiccazione non risulta uniforme, si riscontra sia mediamente di 4°C superiore nella zona centrale rispetto alla zona laterale.

T medie centrale	°C	T massime centrale	°C
<i>T ambiente</i>	19	<i>T ambiente</i>	19
<i>T 5 cm</i>	36.9	<i>T 5 cm</i>	42.98
<i>T 10 cm</i>	40.87	<i>T 10 cm</i>	47.6
<i>T 20 cm</i>	52.37	<i>T 20 cm</i>	61.59
<i>T centrale</i>	40.81	<i>T centrale</i>	47.62

Tab. 25: Valori configurazione NSD 1.0 – analisi temperature medie e massime nella zona centrale

Temperature centrale °C	
T3ca - T3cb	4
T2ca - T2cm	11
T2cm - T2cb	4
T1ca - T1cb	4
T3ca - T2cm	2
T3cb - T2cb	2
T2cm - T1ca	0
T2cb - T1cb	0

Tab. 26: Valori configurazione NSD 1.0 – calcolo gradienti di temperatura

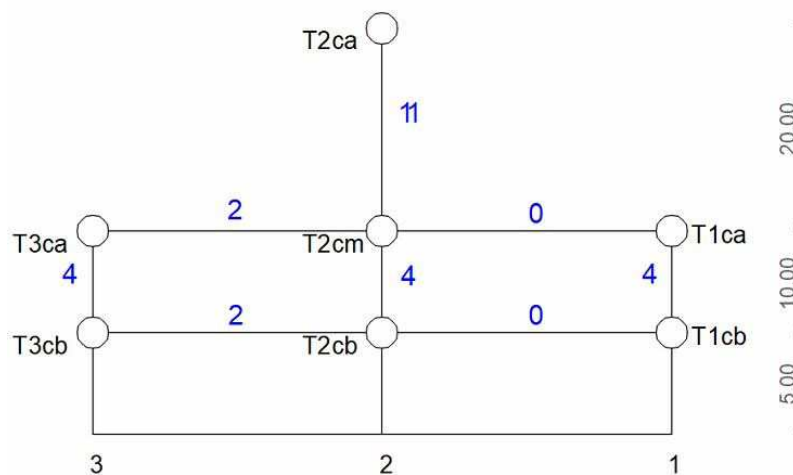


Fig. 63: Griglia di essiccazione centrale

T medie laterale	°C	T massime laterale	°C
<i>T ambiente</i>	19	<i>T ambiente</i>	19
<i>T 5 cm</i>	35.25	<i>T 5 cm</i>	40.65
<i>T 10 cm</i>	39.14	<i>T 10 cm</i>	45.53
<i>T 15 cm</i>	44.67	<i>T 15 cm</i>	52.47
<i>T centrale</i>	38.12	<i>T centrale</i>	44.25

Tab. 27: Valori configurazione NSD 1.0 – analisi temperature medie e massime nella zona laterale

Temperature laterale °C	
T3la - T3lb	4
T2la - T2lb	10
T1la - T1lb	4
T3lb - T2lb	1
T2lb - T1lb	0

Tab. 28: Valori configurazione NSD 1.0 – calcolo gradienti di temperatura

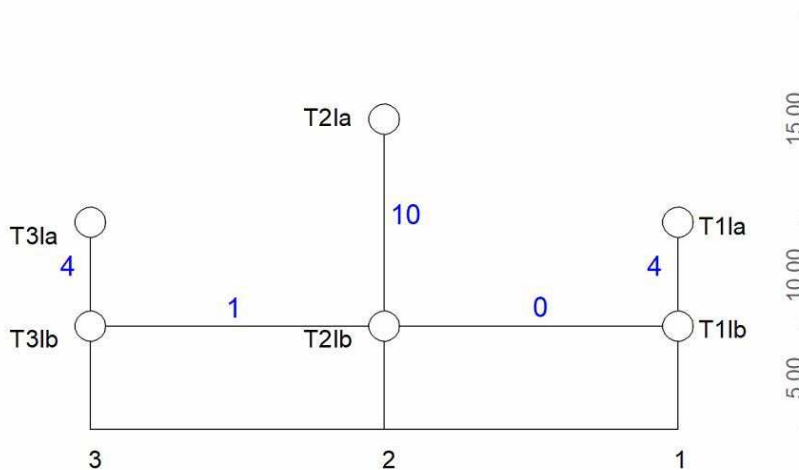


Fig. 64: Griglia di essiccazione laterale

5.5. Prova del 17-18-19/10/2022

Una volta appurata la funzionalità termodinamica dell'essiccatore, intesa come capacità di raggiungere le temperature necessarie all'essiccazione in regimi di funzionamento stazionari al variare del contesto di prova, si è deciso di verificare l'efficacia dei prototipi sopra analizzati per realizzare un vero e proprio processo di essiccazione con delle mele. Per fare questo, nelle date di misurazione sopra citate, sono state utilizzate entrambe le configurazioni, messe in parallelo, con all'interno fettine di mela posizionate ad altezze prefissate, il cui peso è stato registrato mediante una bilancia di precisione, prima e dopo ogni singola prova.

Insieme all'essiccazione delle mele attraverso le due camere di essiccazione, NSD 1.0 e NSD 2.0 si è provveduto a valutare anche i tempi di essiccazione delle mele a diretto contatto con la radiazione solare.

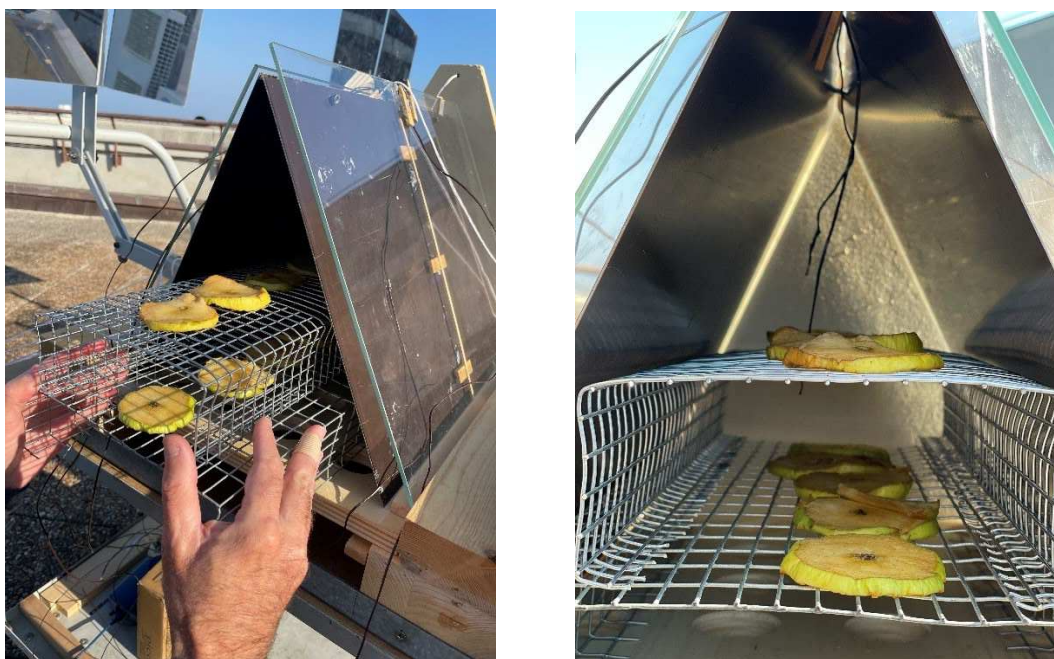


Fig.65: Sistema di supporto per le mele nella configurazione NSD 1.0

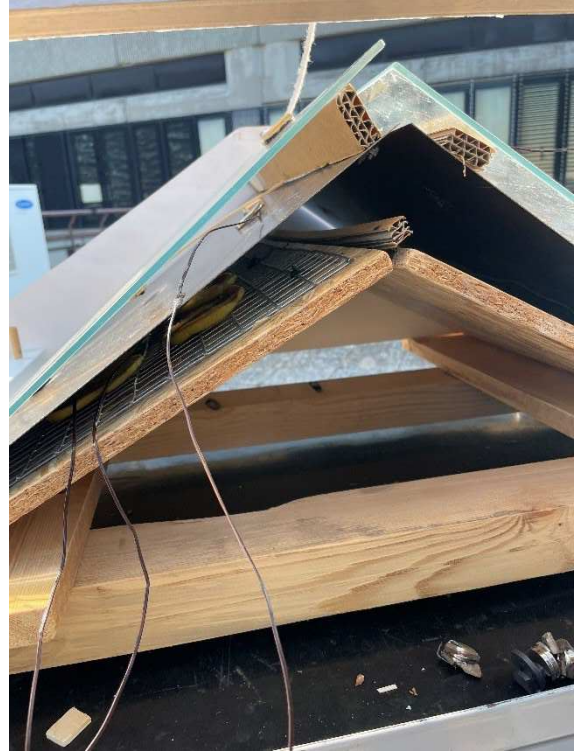


Fig. 66: Sistema di supporto per le mele nella configurazione NSD 2.0



Fig.67: Essiccazione al sole delle mele

I test sono stati svolti misurando le prestazioni di entrambe le configurazioni proposte del prototipo in parallelo, al fine di confrontare le rispettive funzionalità di essiccazione ed evidenziare eventuali discrepanze nelle misurazioni.

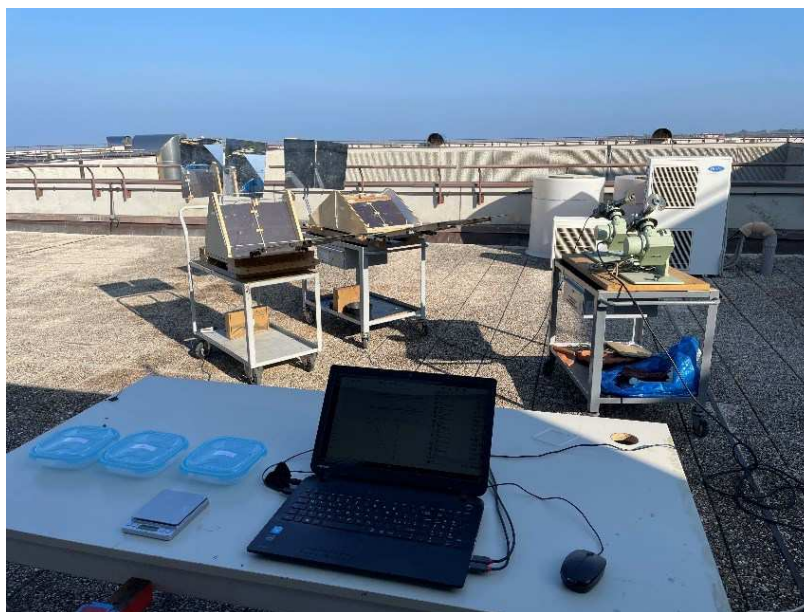


Fig.68: Banco di prova essiccazione mele con configurazioni in parallelo



Fig.69: Bilancia di precisione per misurare il peso delle mele

- Risultati della prova in parallelo

La prova di essiccazione ha dato risultati tutto sommato soddisfacenti: considerata la relativamente breve durata della prova (per un processo di essiccazione completo sono richieste 7-8 ore consecutive, i nostri intervalli di prova sono divisi in 4 ore ripetuti per 3 giorni consecutivi) e l'alta umidità relativa esterna per il periodo preso in considerazione (mese di ottobre), gli spicchi di mela hanno perso in media l'80 % del loro contenuto di umidità, lasciando buone aspettative nel caso in cui il processo fosse continuato per un intervallo di tempo più adatto.

Prova del 17 ottobre 2022 (4 ore)

DNI media: 732 W/m ²	DNI max: 829 W/m ²
Tamb media: 20 (°C)	Tamb max: 22 (°C)

			T media (°C)	T max (°C)	Misura iniziale (g)	Misura finale (g)	Riduzione
NSD 1.0	Anteriore	Piastra (alto)	96	104			
	Posteriore	Piastra (alto)	83	90			
	Interno	Alto	71	83	255.0	144.3	43%
		Medio	48	53			
		Uscita	73	82			

			T media (°C)	T max (°C)	Misura iniziale (g)	Misura finale (g)	Riduzione
NSD 2.0	Anteriore	Piastra (alto)	87	92			
	Posteriore	Piastra (alto)	68	79			
	Anteriore	Tavola (alto)	54	60	288.4	179.7	38%
		Tavola (medio)	48	51			
	Posteriore	Tavola (alto)	45	51			
		Tavola (medio)	38	42			
		Uscita	64	73			

	Misura iniziale (g)	Misura finale (g)	Riduzione
Al sole	265.9	184.0	31 %

Tab. 29: Valori configurazione NSD 1.0- NSD 2.0 – Essiccazione mele 17 ottobre 2022

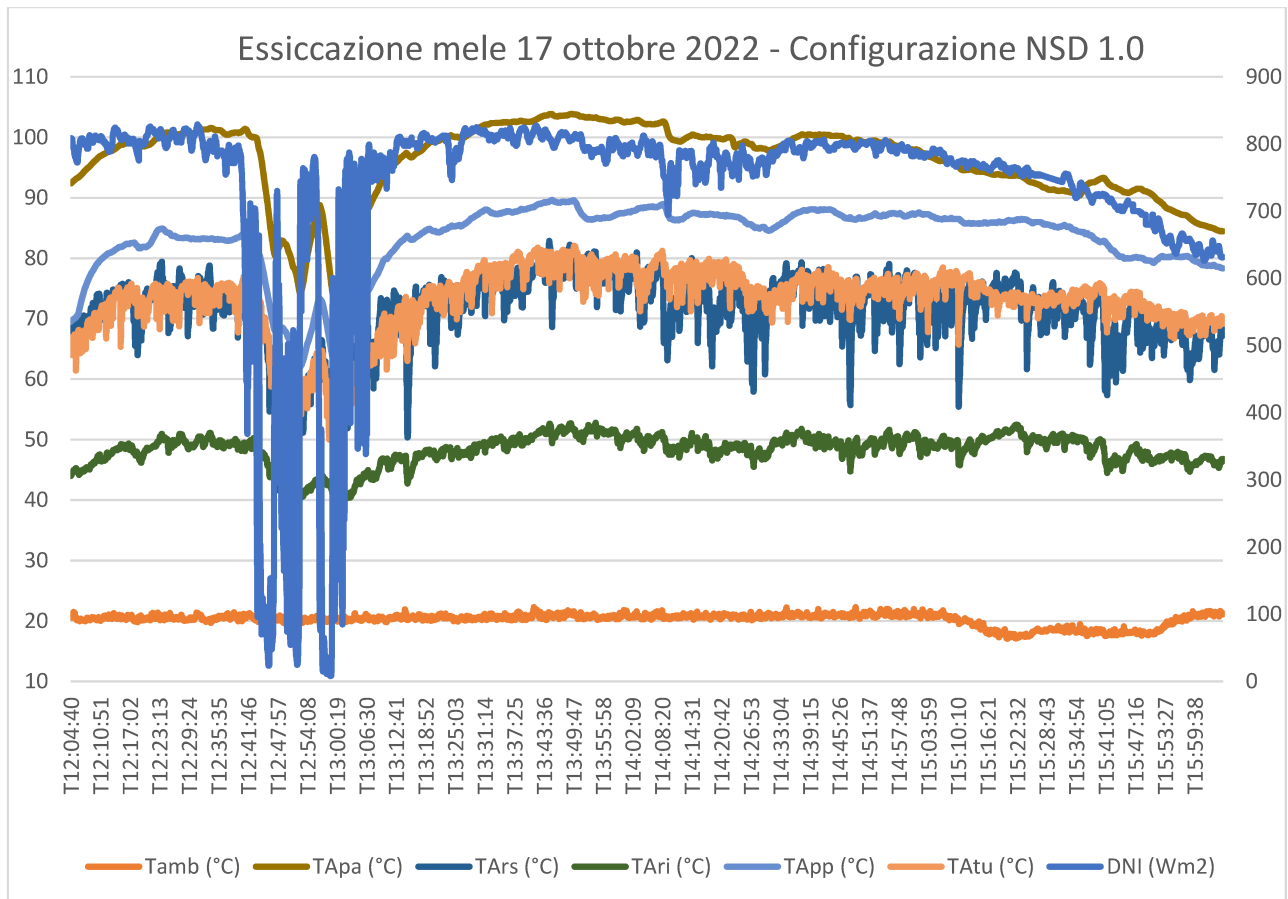


Fig. 70: Grafico configurazione NSD 1.0 – Essiccazione mele 17 ottobre 2022

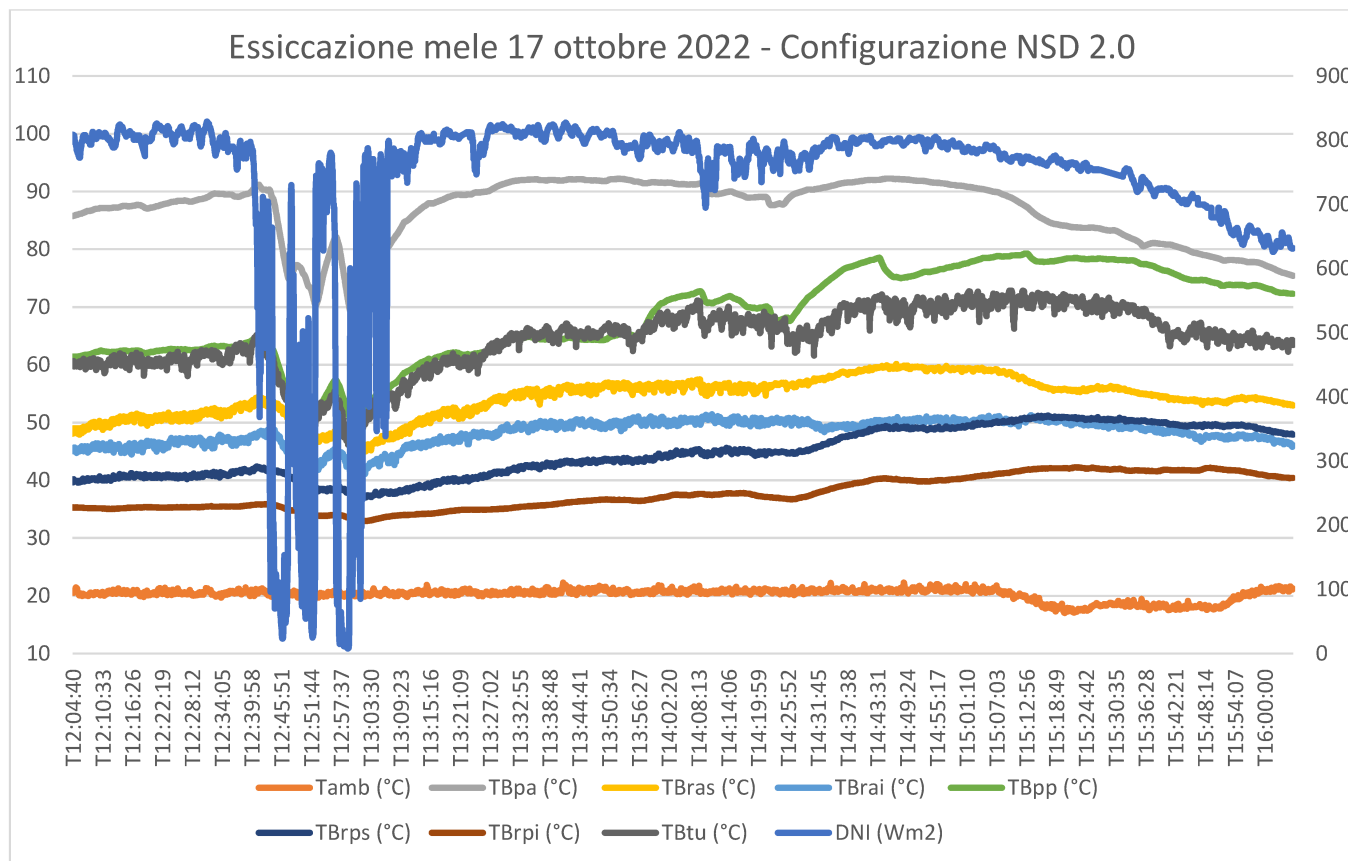


Fig. 71: Grafico configurazione NSD 2.0 – Essiccazione mele 17 ottobre 2022

Utilizzando i due essiccatori in parallelo nelle stesse condizioni ambientali, l'essiccatore NSD 1.0 ha mostrato una capacità essiccativa maggiore del 5% rispetto al NSD 2.0. Al contempo sono state raggiunte in esso temperature superiori al range ideale di essiccazione (compreso tra 40°C e 70°C), superando anche gli 80°C, temperatura alla quale iniziano fenomeni di cottura.

Inoltre, si riscontra che in entrambi gli essiccatori, la temperatura misurata sulla piastra anteriore risulta maggiore rispetto a quella sulla piastra posteriore, in quanto la piastra anteriore riceve la radiazione solare diretta e la radiazione indiretta proveniente dallo specchio, invece, quella posteriore riceve solo la radiazione proveniente dagli specchi. Le temperature delle piastre dell'essiccatore NSD 1.0 sono risultate più alte di circa il 15% rispetto a quelle dell'essiccatore NSD 2.0, questo è dovuto al fatto che nel periodo di misura, con il sole relativamente basso, è favorita la geometria della configurazione NSD 2.0 che ha un'inclinazione delle piastre rispetto al terreno maggiore. Alla fine della prova, la riduzione del contenuto di umidità su base umida è stata del 43% per il NSD 1.0, 38% per il NSD 2.0 e solo del 31% per l'essiccazione al sole diretto.

Prova del 18 ottobre 2022 (4 ore)

DNI media: 748 W/m ²	DNI max: 789 W/m ²
Tamb media: 20 (°C)	Tamb max: 21 (°C)

			T media (°C)	T max (°C)	Misura iniziale (g)	Misura finale (g)	Riduzione
NSD 1.0	Anteriore	Piastra (alto)	92	96			
	Posteriore	Piastra (alto)	82	90			
	Interno	Alto	65	75	144.1	75.4	48 %
		Medio	51	59			
		Uscita	73	79			

			T media (°C)	T max (°C)	Misura iniziale (g)	Misura finale (g)	Riduzione
NSD 2.0	Anteriore	Piastra (alto)	85	92			
	Posteriore	Piastra (alto)	71	79			
	Anteriore	Tavola (alto)	55	60	179.5	97.2	46 %
		Tavola (medio)	47	52			
	Posteriore	Tavola (alto)	47	51			
		Tavola (medio)	39	42			
		Uscita	63	68			

	Misura iniziale (g)	Misura finale (g)	Riduzione
Al sole	183.9	128.9	30 %

Tab. 30: Valori configurazione NSD 1.0- NSD 2.0 – Essiccazione mele 18 ottobre 2022

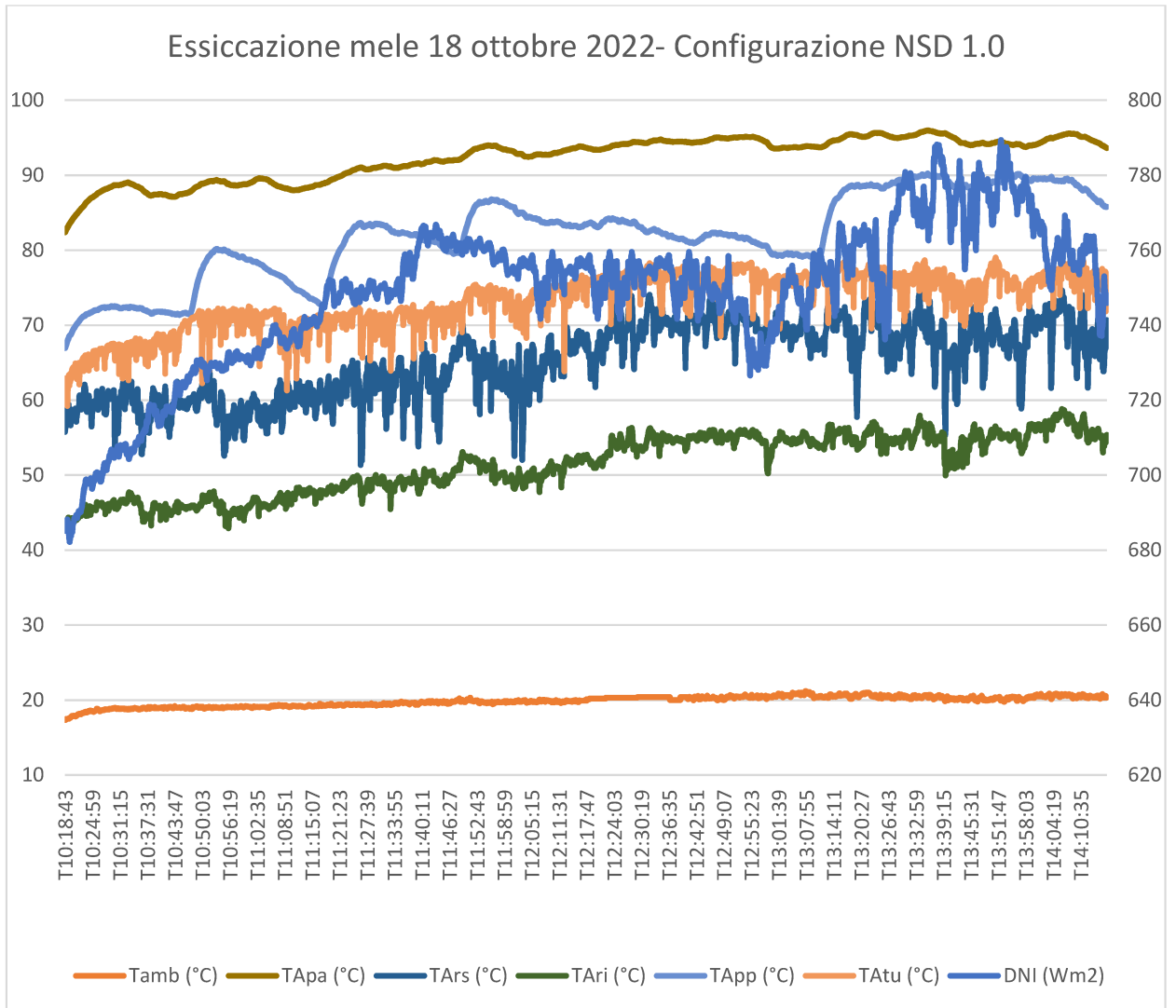


Fig. 72: Grafico configurazione NSD 1.0 – Essiccazione mele 18 ottobre 2022

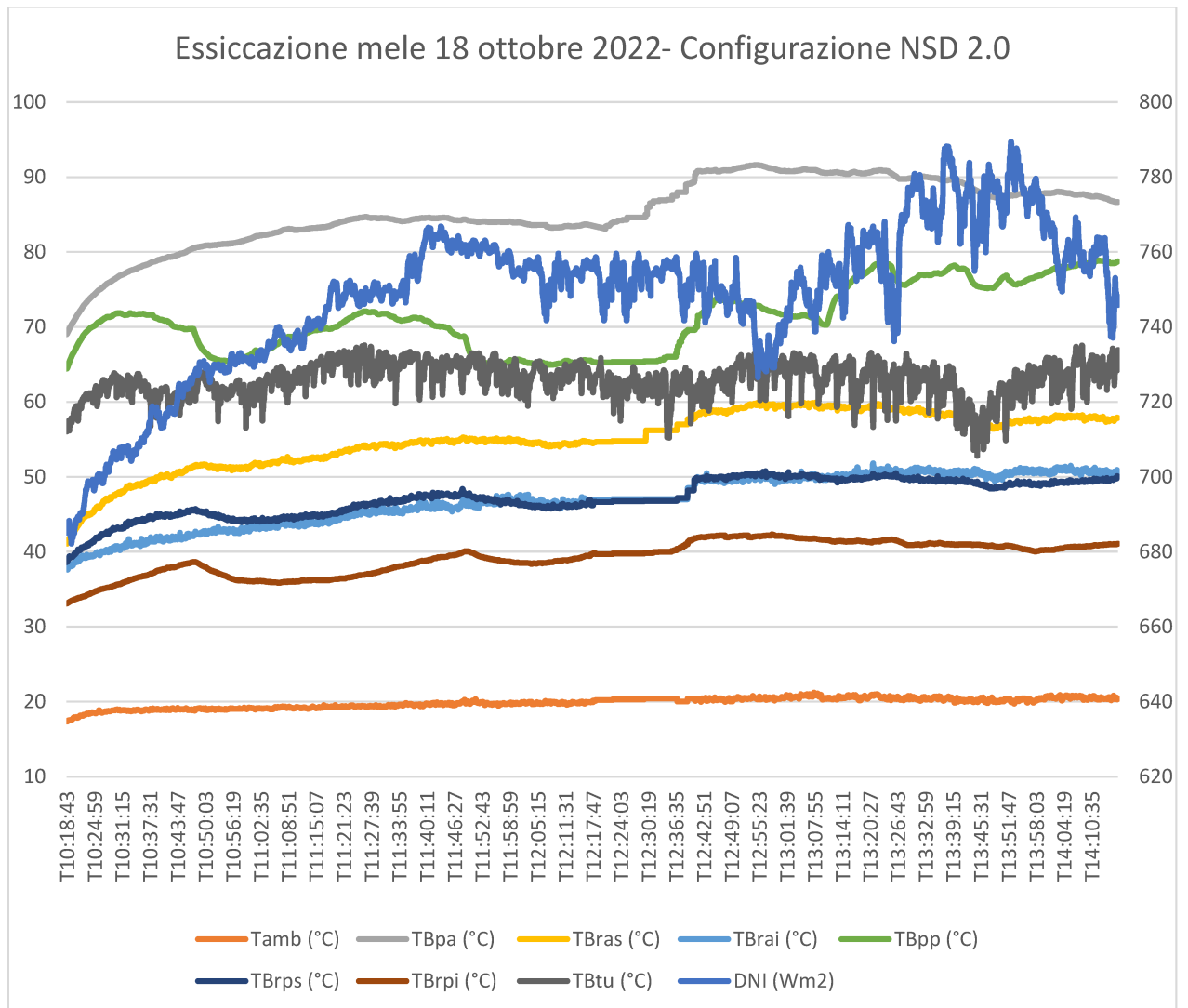


Fig. 73: Grafico configurazione NSD 2.0 – Essiccazione mele 18 ottobre 2022

La situazione è risultata molto simile a quanto verificato nel giorno precedente (17 ottobre 2022). In questo caso la riduzione del contenuto di umidità su base umida delle mele già parzialmente essiccate nel giorno precedente, è stata del 48% per il NSD 1.0, 46% per il NSD 2.0 e solo del 30% per l'essiccazione al sole diretto.

Prova del 19 ottobre 2022 (4 ore)

DNI media: 612 W/m ²	DNI max: 680 W/m ²
Tamb media: 20 (°C)	Tamb max: 21 (°C)

			T media (°C)	T max (°C)	Misura iniziale (g)	Misura finale (g)	Riduzione
NSD 1.0	Anteriore	Piastra (alto)	84	94			
	Posteriore	Piastra (alto)	71	83			
	Interno	Alto	51	65	75.3	45.1	40 %
		Medio	43	52			
		Uscita	59	70			

			T media (°C)	T max (°C)	Misura iniziale (g)	Misura finale (g)	Riduzione
NSD 2.0	Anteriore	Piastra (alto)	79	86			
	Posteriore	Piastra (alto)	64	70			
	Anteriore	Tavola (alto)	50	55	96.9	55.4	43 %
		Tavola (medio)	44	50			
	Posteriore	Tavola (alto)	42	46			
		Tavola (medio)	37	41			
		Uscita	52	59			

	Misura iniziale (g)	Misura finale (g)	Riduzione
Al sole	128.6	84.5	34 %

Tab. 31: Valori configurazione NSD 1.0- NSD 2.0 – Essiccazione mele 19 ottobre 2022

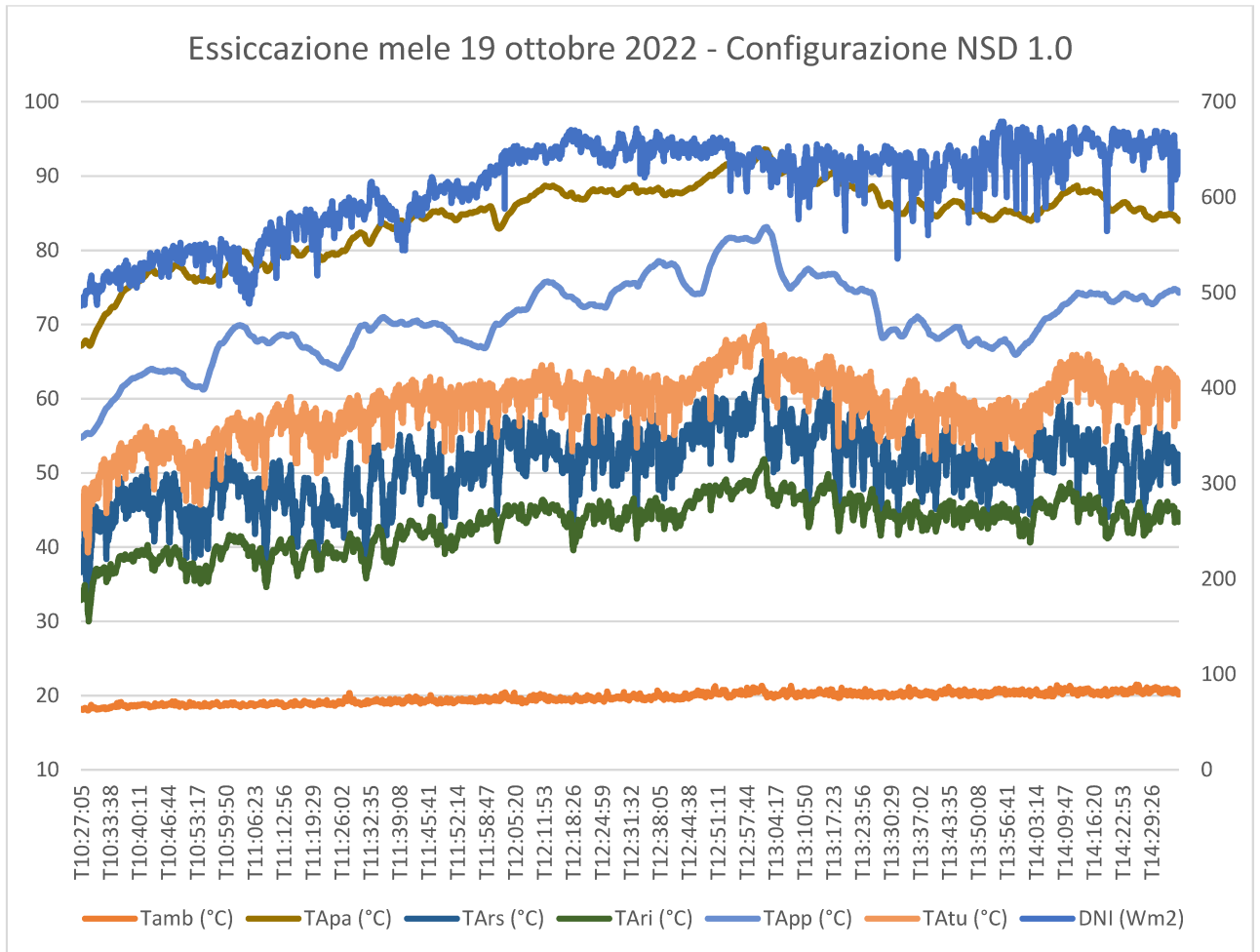


Fig. 74: Grafico configurazione NSD 1.0 – Essiccazione mele 19 ottobre 2022

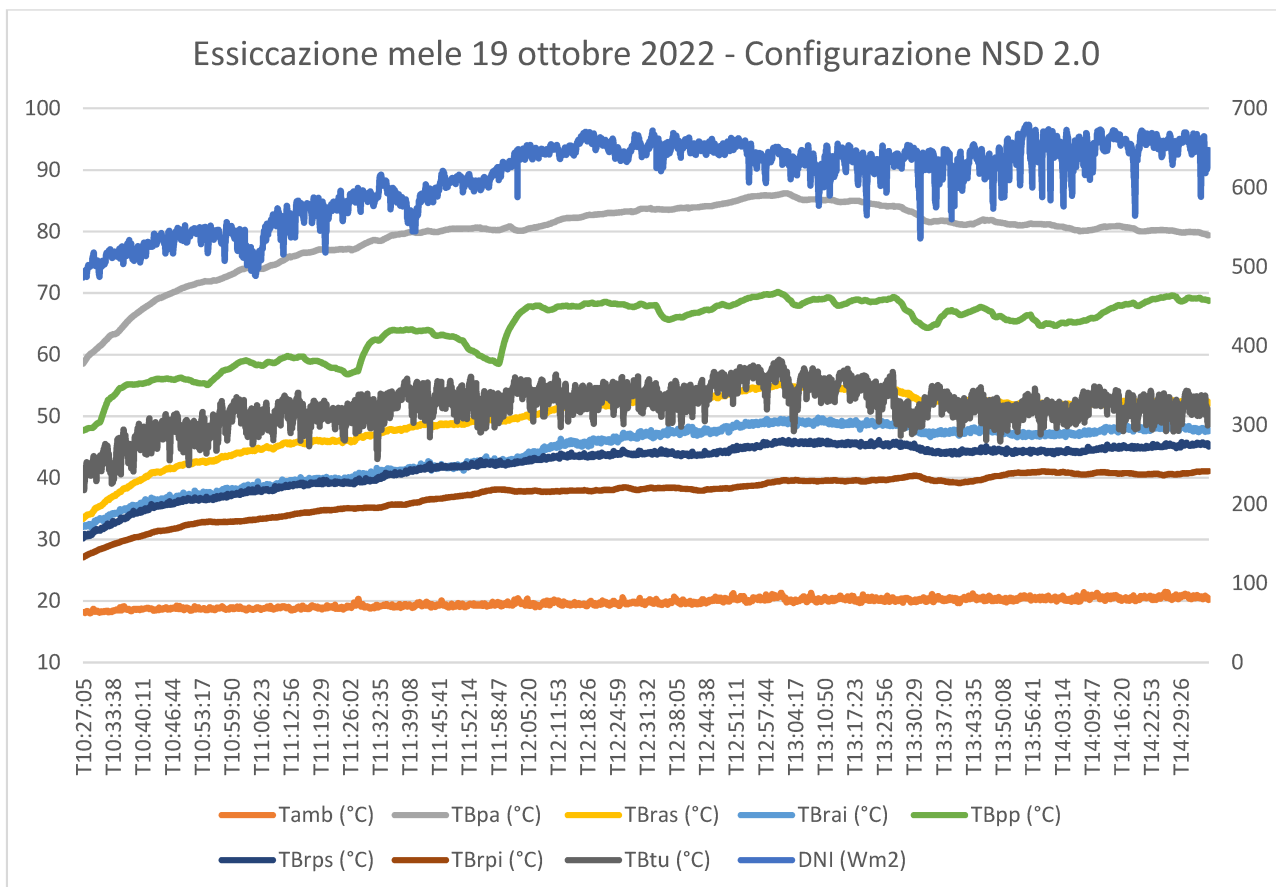


Fig. 75: Grafico configurazione NSD 2.0 – Essiccazione mele 19 ottobre 2022

La situazione è risultata simile a quanto verificato nei giorni precedenti (17 e 18 ottobre 2022), ma con un contributo complessivo della radiazione solare inferiore, conseguentemente le temperature delle piastre dell’essiccatore NSD 1.0 sono risultate più alte solo dell’8 % rispetto a quelle dell’essiccatore NSD 2.0. In entrambi gli essiccatori la temperatura è risultata entro il range ottimale. In questo caso la riduzione del contenuto di umidità su base umida delle mele già parzialmente essiccate nei giorni precedenti, è stata del 40% per il NSD 1.0, 40% per il NSD 2.0 e solo del 34% per l’essiccazione al sole diretto.

	Misura iniziale (g)	Misura finale (g)	Riduzione
NSD 1.0	255.0	45.1	82 %
NSD 2.0	288.4	55.4	81 %
Al sole	265.9	84.5	68 %

Tab. 32: Sintesi dei risultati ottenuti nei giorni di prova 17-18-19 ottobre 2022 (Essiccazione mele)

Ciò che maggiormente influenza le temperature che si raggiungono sulla piastra diretta e sulla piastra indiretta è la radiazione solare. Si nota infatti che in tutte le prove la piastra esposta direttamente alla radiazione solare ha una temperatura maggiore rispetto alla piastra non esposta direttamente, questo a causa del fatto che la piastra diretta trovandosi di fronte al sole, riceve, oltre la radiazione riflessa dagli specchi, anche la radiazione solare diretta. Nei tre giorni di essiccazione la differenza di temperature tra le parti superiori delle piastre è variata tra i 10°C e i 13°C nella configurazione NSD 1.0 e tra i 14°C e 19°C nella configurazione NSD 2.0.

Come ci si aspettava in tutte le prove si osserva che nella camera di essiccazione si ha un gradiente verticale di temperatura.

Alla fine dei tre giorni di test sperimentali, è stata osservata una riduzione del contenuto di umidità su base umida complessiva dell'82% nel caso della configurazione NSD 1.0, dell'81% nel NSD 2.0 e del 68% a sole diretto.

5.6. Prova del 21/12/2022 e 11/01/2023

Nei test effettuati in data 21/12/2022 e 11/01/2023 con il modello di essiccazione NSD 2.0, sono state effettuate delle misure riportate nei grafici seguenti, che potranno essere usate per lo sviluppo successivo di un modello termo-fluido dinamico. Sulla base di queste misure sono state effettuate delle simulazioni con il software SolTrace che tengono conto della posizione effettiva del sole e dell'inclinazione degli specchi posteriori e anteriori.

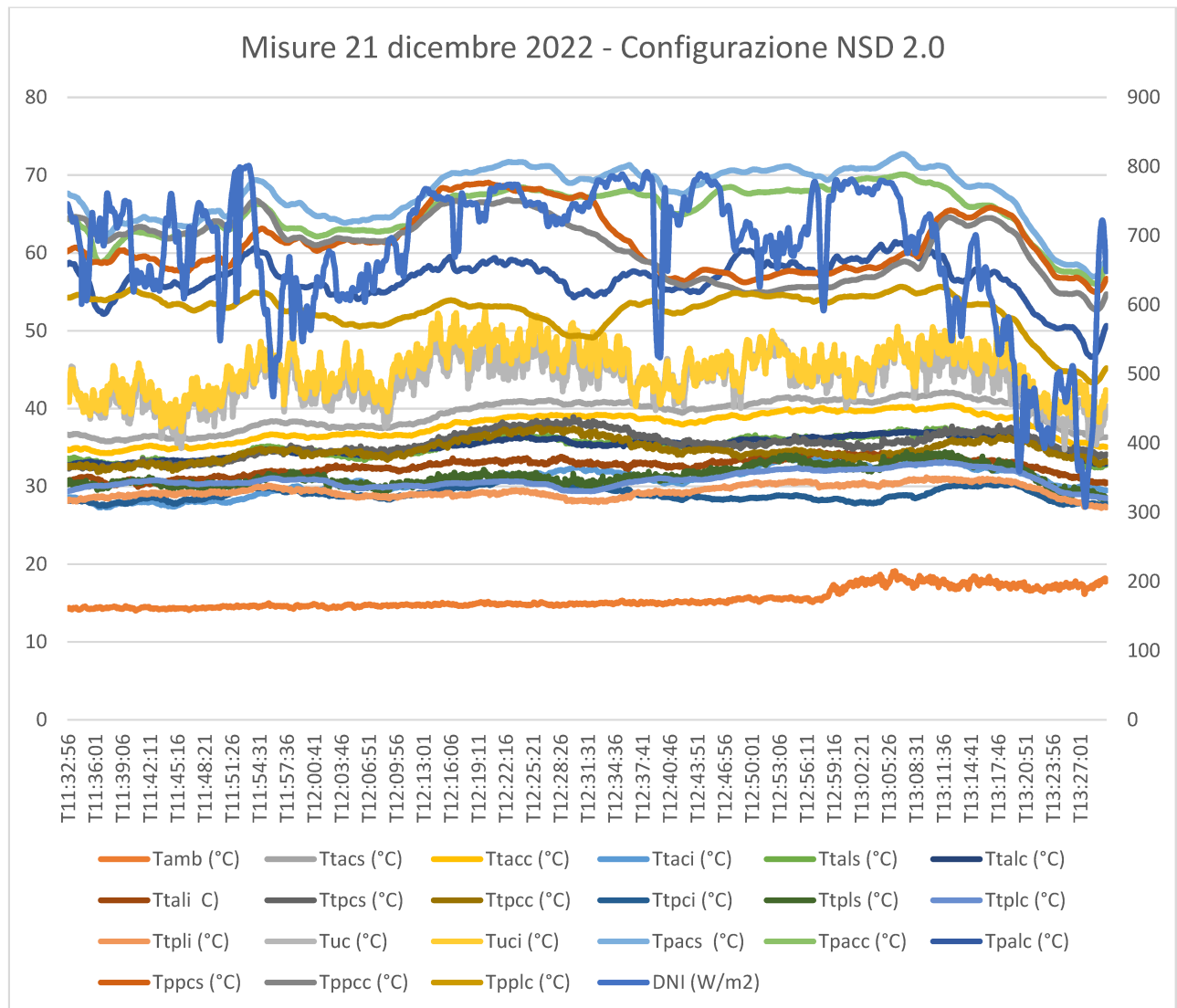


Fig. 76: Grafico configurazione NSD 2.0 – misure 21 dicembre 2022

Temperatura	Media temperatura °C	Massima temperatura °C
Tamb	15.52	19.13
Ttacs	39.25	42.12
Ttacc	37.72	40.41
Ttaci	30.83	33.74
Ttals	35.16	37.52
Ttalc	35.12	37.06
Ttali	32.54	34.51
Ttpcs	35.4	38.92
Ttpcc	34.65	37.59
Ttpci	28.99	31.11
Ttpls	31.34	34.42
Ttplc	30.87	33.11
Ttpli	29.4	31.18
Tuc	43.62	50.14
Tuci	44.99	52.61
Tpacs	67.54	72.73
Tpacc	65.24	70.1
Tpalc	56.63	61.44
Tppcs	61.24	69.04
Tppcc	60.91	66.84
Tpplc	52.58	55.68

DNI	Media (W/m2)	Massima (W/m2)
	680.08	801.19

Tab. 33: Valori configurazione NSD 2.0 – misure 21 dicembre 2022

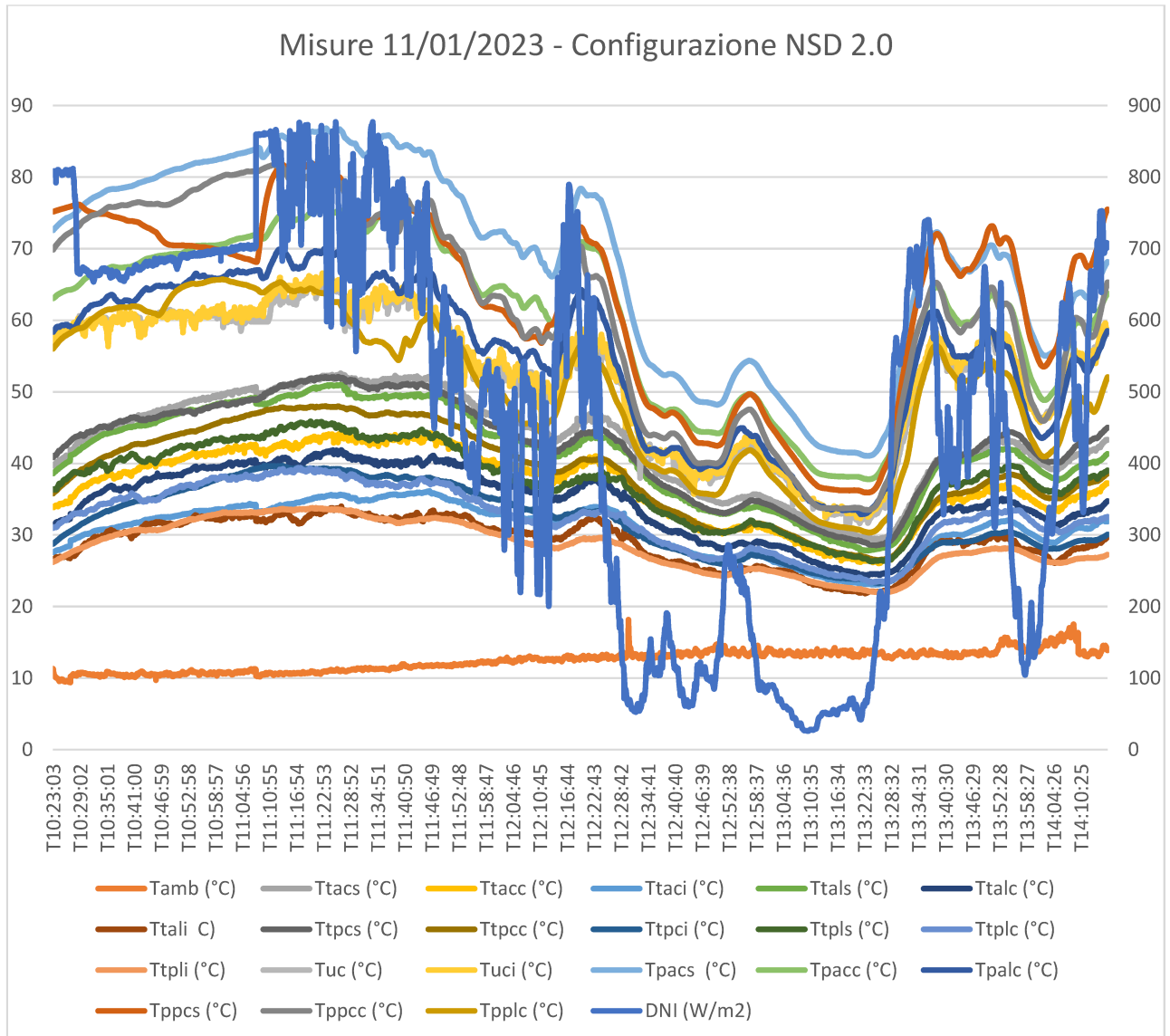


Fig. 77: Grafico configurazione NSD 2.0 – misure 11 gennaio 2023

Temperatura	Media temperatura °C	Massima temperatura °C
Tamb	12.43	18.18
Ttacs	42.99	52.62
Ttacc	36.82	44.26
Ttaci	30.82	36.5
Ttals	41.36	50.98
Ttalc	34.54	41.85
Ttali	29.01	34.01
Ttpcs	42.4	52.13
Ttpcc	38.75	48.01
Ttpci	31.96	39.7
Ttpls	37.54	45.88
Ttplc	32.43	39.39
Ttpli	28.5	33.79
Tuc	52.3	65.13
Tuci	52.65	66.57
Tpacs	68.27	86.82
Tpacc	60.53	75.61
Tpalc	54.84	69.98
Tppcs	62.82	81.96
Tppcc	6.24	81.68
Tpplc	50.62	877.2

DNI	Media (W/m2)	Massima (W/m2)
	471.96	801.19

Tab. 34: Valori configurazione NSD 2.0 – misure 11 gennaio 2023

6. Capitolo 6 – Soltrace

Ai fini della simulazione ottimale per valutare l'intensità della radiazione che investe l'essiccatore nel prototipo, si utilizza il software di ray-tracing "SolTrace". Consente di ottenere i flussi solari sul ricevitore (le piastre collettrici del nostro essiccatore) per descrivere il comportamento del sistema in varie condizioni potendo variare vari parametri, come ad esempio il valore della DNI (Direct Normal Irradiance) e l'angolo di incidenza degli specchi per la radiazione solare. Questo software del National Renewable Energy Laboratory (NREL) sviluppato nel 2003, e aggiornato nel 2013 con modifiche e cambiamenti significativi, permette di realizzare un modello ottico del ricevitore e di risolverlo con algoritmo Monte Carlo [10]. SolTrace può modellare qualsiasi sistema ottico utilizzando il sole come sorgente. È stato reso disponibile gratuitamente e come tale è in uso in tutto il mondo dell'industria, università e laboratori di ricerca.

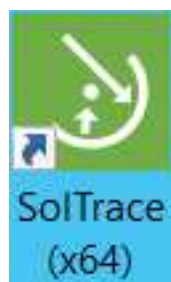


Fig. 78: Logo Software SolTrace

I parametri necessari per implementare il modello sono:

- Geometria del modello
- Proprietà ottiche
- Sun-shape (posizione e intensità dei raggi solari)
- Errore ottico globale

6.1. Back e Front degli elementi

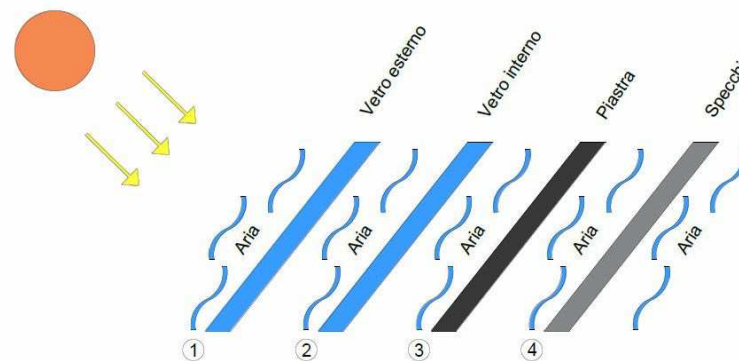


Fig.79: Rappresentazione grafica degli elementi

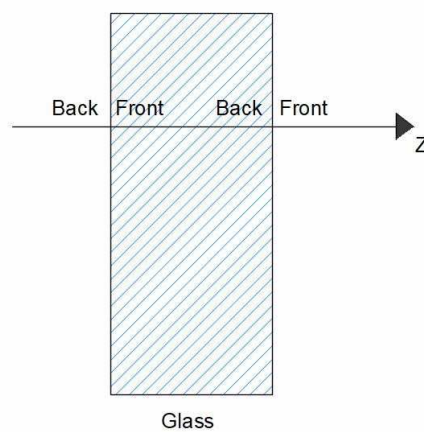


Fig.80: Back e Front dell'elemento

Nelle simulazioni è stato utilizzato come indice di rifrazione dell'aria il valore 1.00029 e come indice di rifrazione del vetro il valore 1.5000.

6.2. Descrizione del Software Soltrace

Il software soltrace ha un'interfaccia che si suddivide in sette sottosezioni:

Interfaccia Sun: in questa sezione è possibile definire la posizione del Sole nello spazio mediante l'uso del sistema di riferimento assoluto con gli assi (x,y,z), inserendo le coordinate desiderate, come nella figura riportata per esempio, utilizzando il sistema in coordinate globali, mettendo $z=100$ otteniamo la posizione del sole verticale),



Fig. 81: Soltrace – utilizzo delle coordinate globali

Inserendo come dati la latitudine, il giorno e l'ora esatta, se necessario, ci permette di avere la posizione del sole in quel determinato istante e luogo inerente alla misurazione.

Soltrace, calcola la posizione del sole in azimut e la sua elevazione determinando un vettore unitario data la latitudine, il giorno e l'ora del giorno locale.

Si riportano una delle nostre misurazioni effettuate il giorno 21-12-2022.

Il giorno 21 dicembre viene indicato come il 355esimo giorno dell'anno. La latitudine 43.5871 è l'esatta coordinata del terrazzo del dipartimento DIISM, e l'ora viene calcolata come : $360^\circ/24 = 15^\circ$ l'ora (correzione da applicare rispetto le ore 12:00)

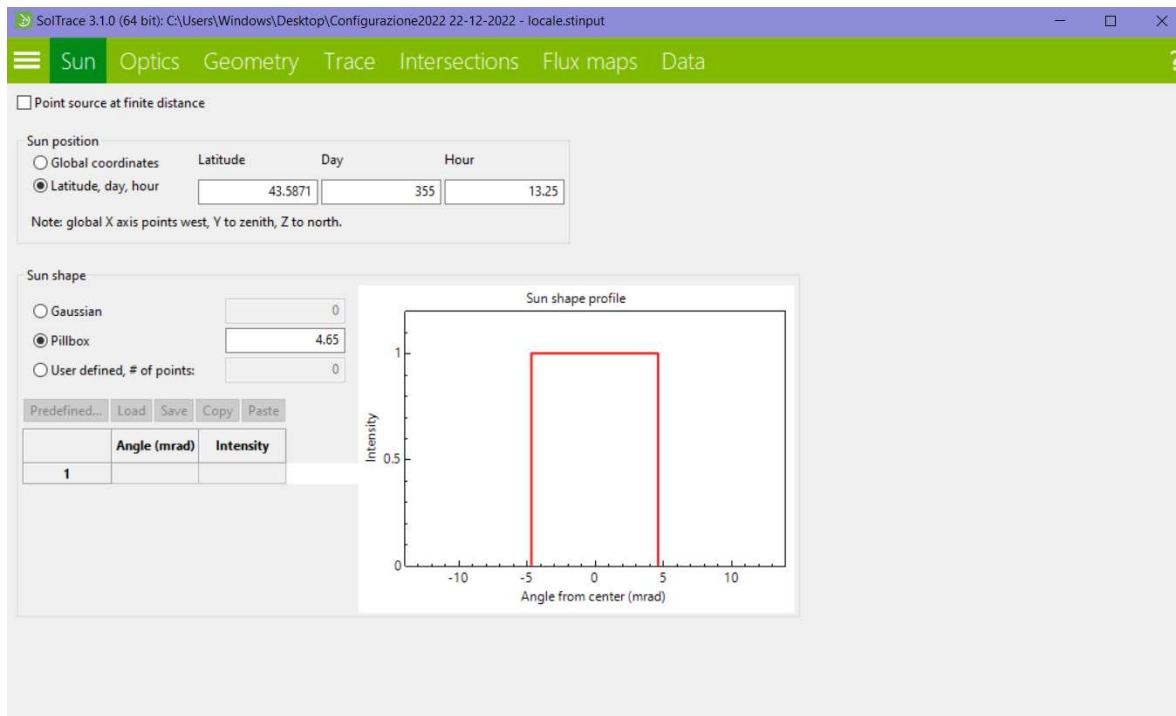


Fig. 82: Soltrace – utilizzo delle coordinate locali

L'interfaccia Optics: Definiamo le proprietà ottiche degli elementi. Possiamo inserire la riflessività, la trasmittività, l'indice di rifrazione ed eventuali errori. Possiamo anche inserire proprietà differenti tra la superficie frontale e il suo retro.

Ci permette di creare varie ottiche ognuna con le rispettive caratteristiche dei materiali.

Di nostro interesse abbiamo definito gli elementi caratterizzanti la camera di essiccazione, come il metallo, i vetri extrachiarissimi e gli specchi.

Per ogni ottica si definisce "Front Side" e "Back Side", inserendo i valori relativi alla riflessività, trasmittività, errore di pendenza, errore di specularità e rifrazione incidente.

Per il metallo, la riflessività è di 0,075, la trasmittività di 0,075, l'errore di pendenza considerato pari a 0,95, l'errore di specularità pari a 0,2 e l'indice di rifrazione incidente di 1,1.

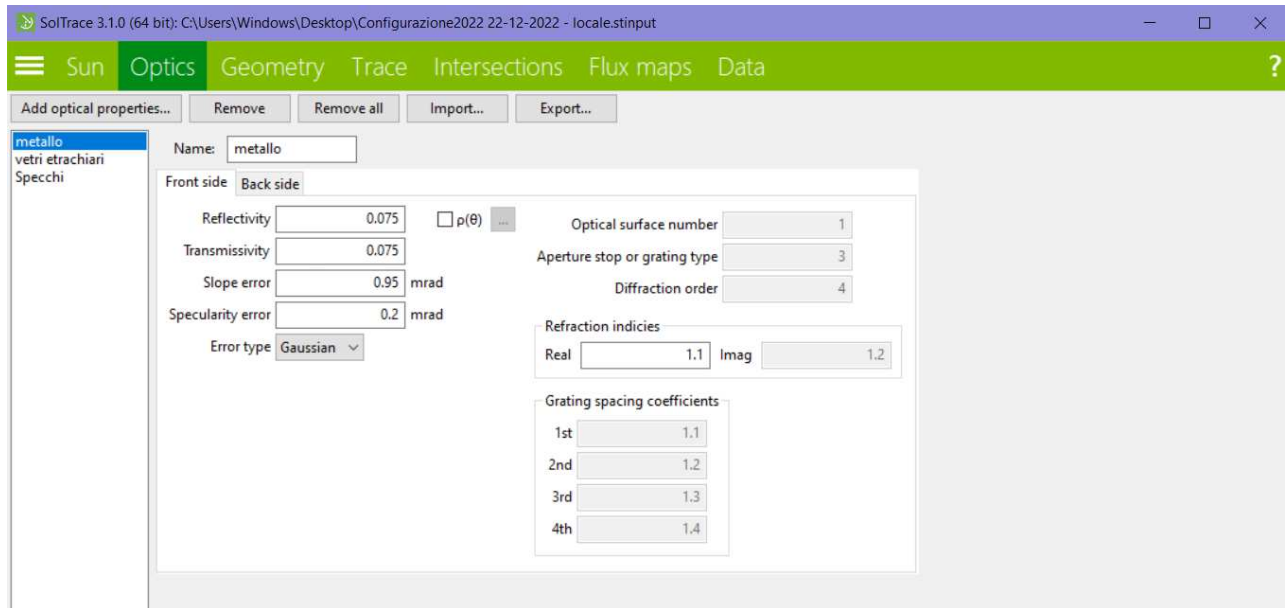


Fig. 83: Soltrace – interfaccia Optics, Metalli

Il metallo ha gli stessi valori per il Front Side e Back Side.

Per i vetri extrachiarati, nella “Front Side”, la riflessività è di 0,96, la trasmittività di 0,9, l’errore di pendenza considerato pari a 0,95 , l’errore di specularità pari a 0,2 e l’indice di rifrazione incidente di 1,5.

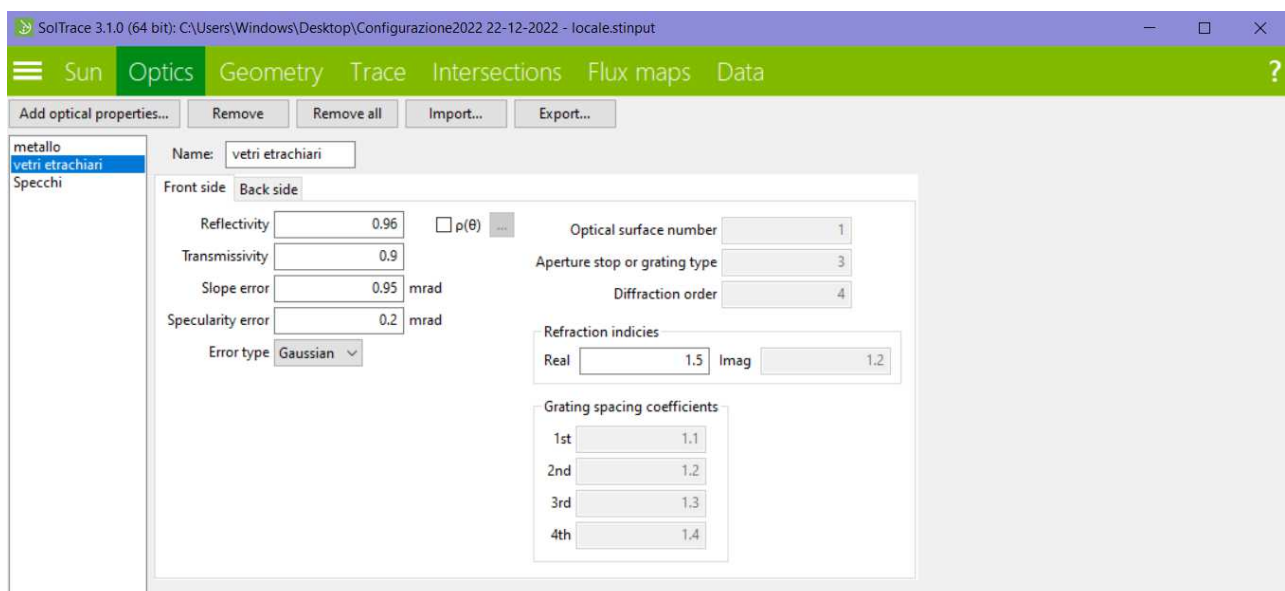


Fig. 84: Soltrace – interfaccia Optics, vetri extrachiarati “Front Side”

Nella “Back Side”, l’indice di rifrazione incidente è pari a 1,00029.

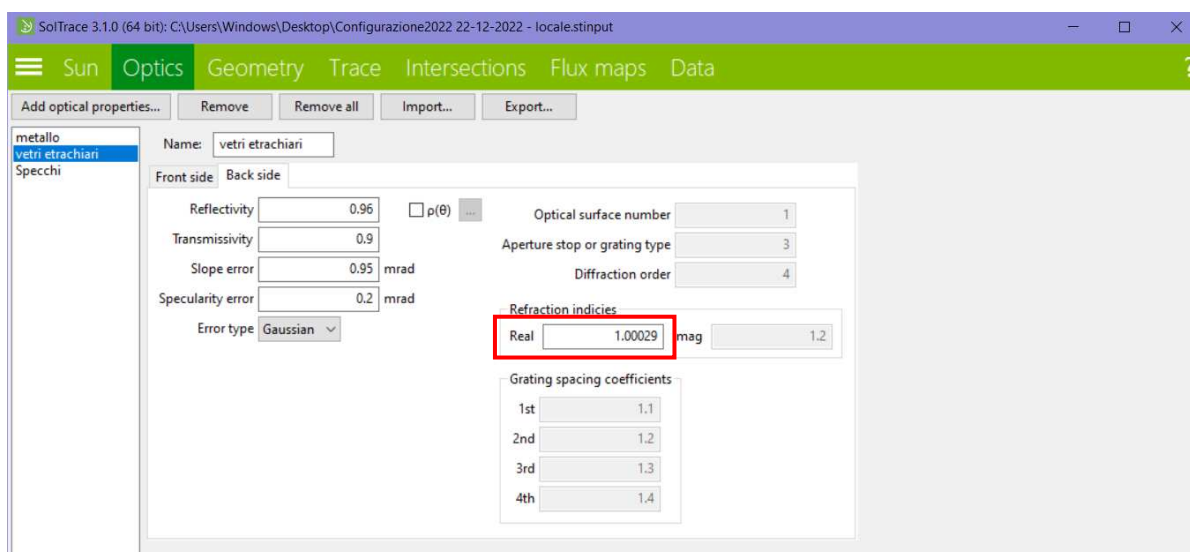


Fig. 85: Soltrace – interfaccia Optics, vetri extrachiani “Back Side”

Per gli specchi, nella “Front Side”, la riflessività è di 0,85, la trasmissività di 0, l’errore di pendenza considerato pari a 0,95 , l’errore di specularità pari a 0,2 e l’indice di rifrazione incidente di 1,1.

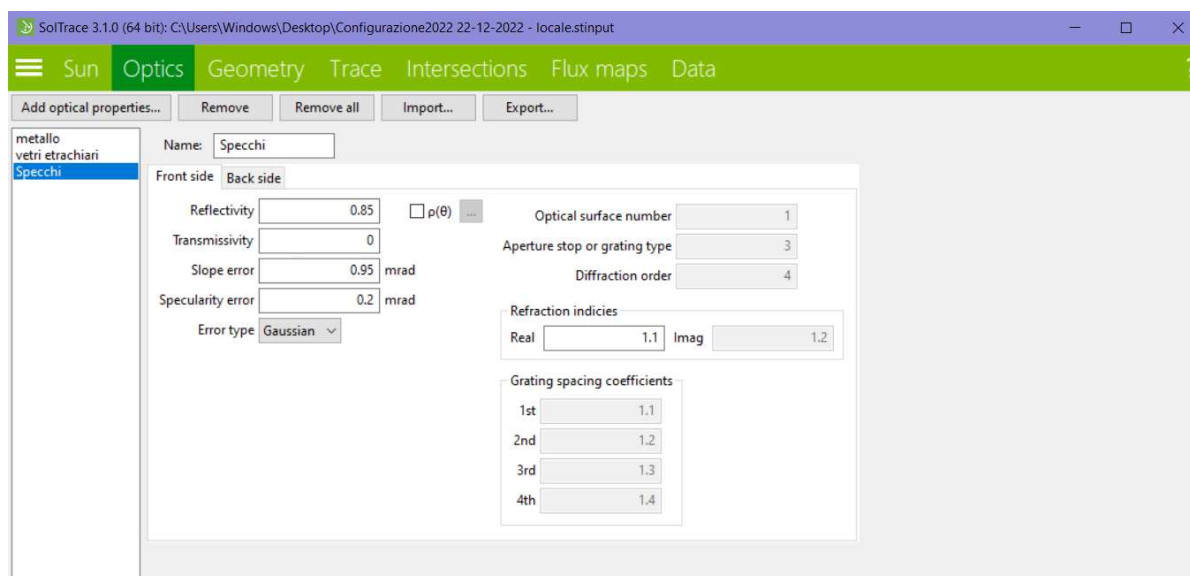


Fig. 86: Soltrace – interfaccia Optics, specchi

Il metallo ha gli stessi valori per il Front Side e Back Side.

L'interfaccia Geometry: Definito il sole e le caratteristiche ottiche di ogni materiale presente nel prototipo di essiccazione, si può definire l'ottica di ogni componente geometrico da analizzare.

Il profilo geometrico è organizzato in "stages" all'interno di un sistema di coordinate globali. Lo stage viene definito come una sezione della geometria ottica dove una volta che il raggio del sole esce dallo stage, non potrà interagire di nuovo nello stesso stage.

La geometria si definisce da tanti stage, quanti sono gli elementi costituenti il prototipo di essiccazione. Ogni elemento quindi, è rappresentato da una superficie, un tipo di interazione ottica, una forma e da un insieme di proprietà ottiche definite dalla sezione "optical properties" definite precedentemente nella sezione Optics.

Definiamo le coordinate x, y, z, la x-aim point, la y-aim point e la z-aim point.

Per ogni elemento è stato individuato il punto medio con le relative proiezioni sugli assi x e z, e la direzione della perpendicolare passante per il punto medio, utilizzando i coseni direttori.

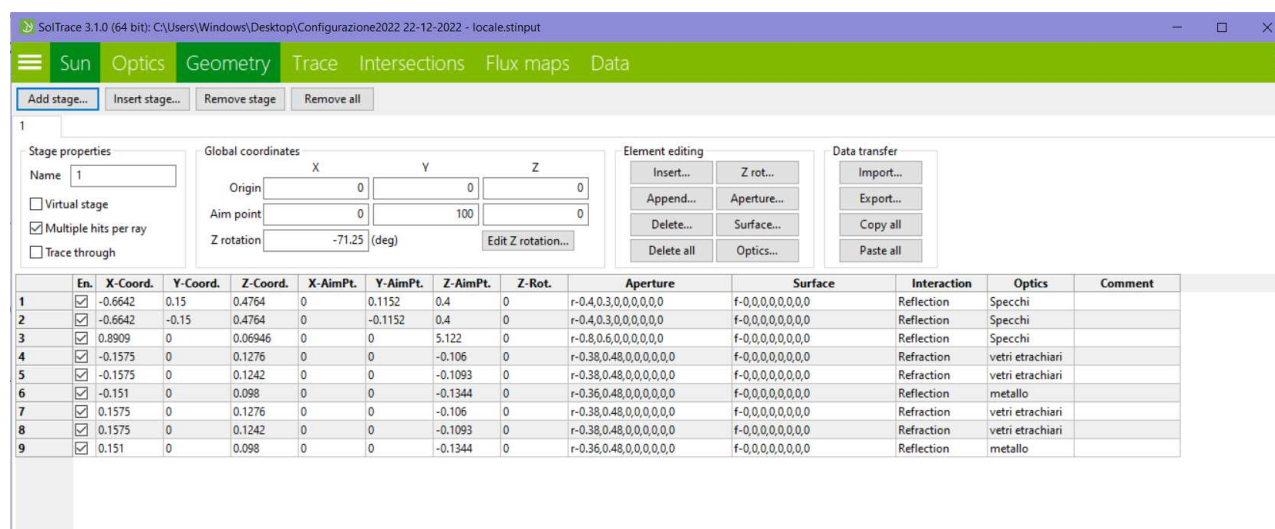


Fig. 87: Soltrace – interfaccia Geometry

Nella sezione di editing per gli elementi definiamo le aperture, gli specchi hanno come dimensione 40x30 (specchi posteriori), e 80x60 (specchi anteriori). I vetri extrachari hanno come dimensione 38x48. Le piastre hanno come dimensione 36x48.

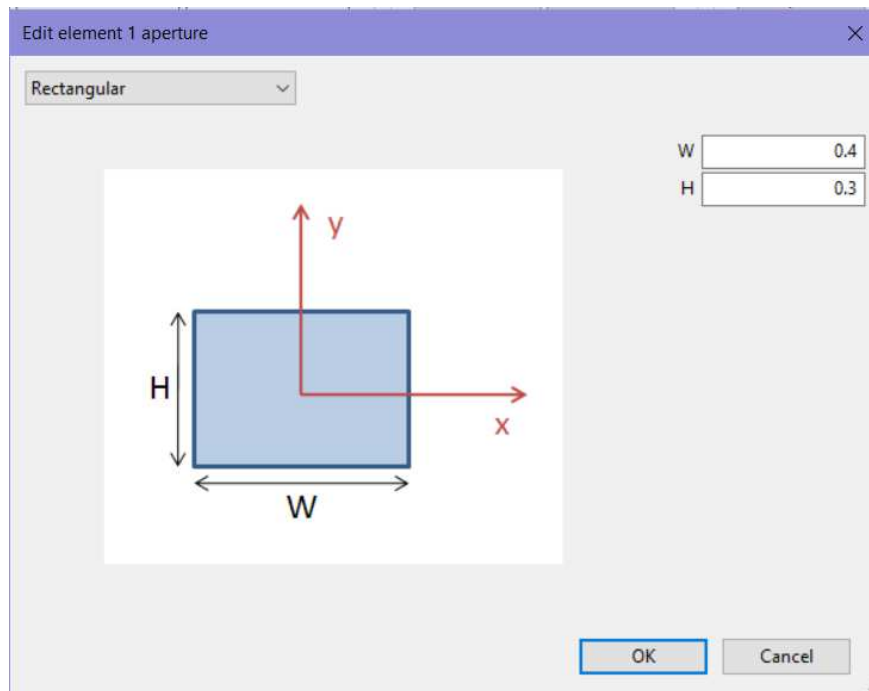


Fig. 88: Soltrace – Dimensioni specchi posteriori

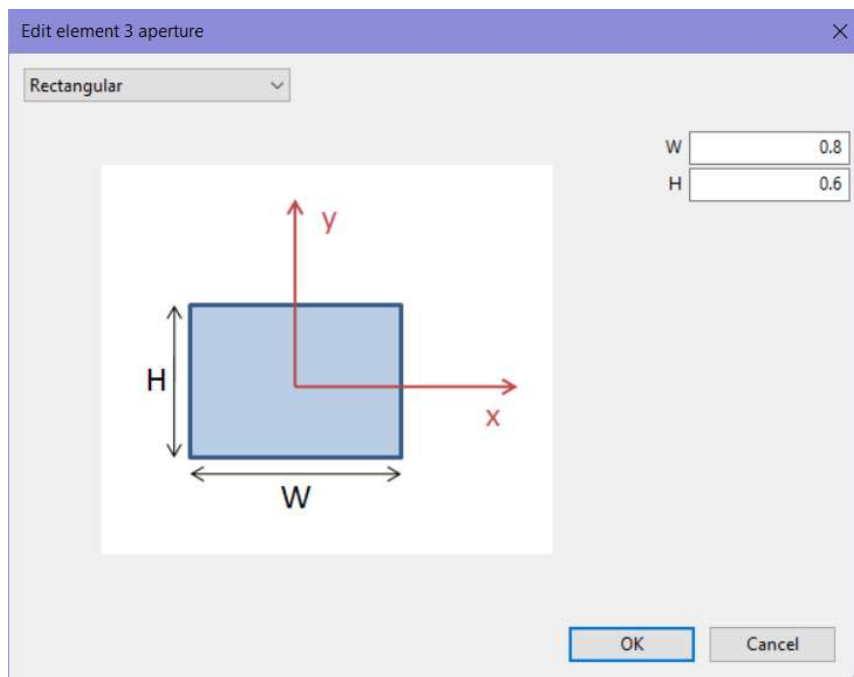


Fig. 89: Soltrace – Dimensioni specchi anteriori

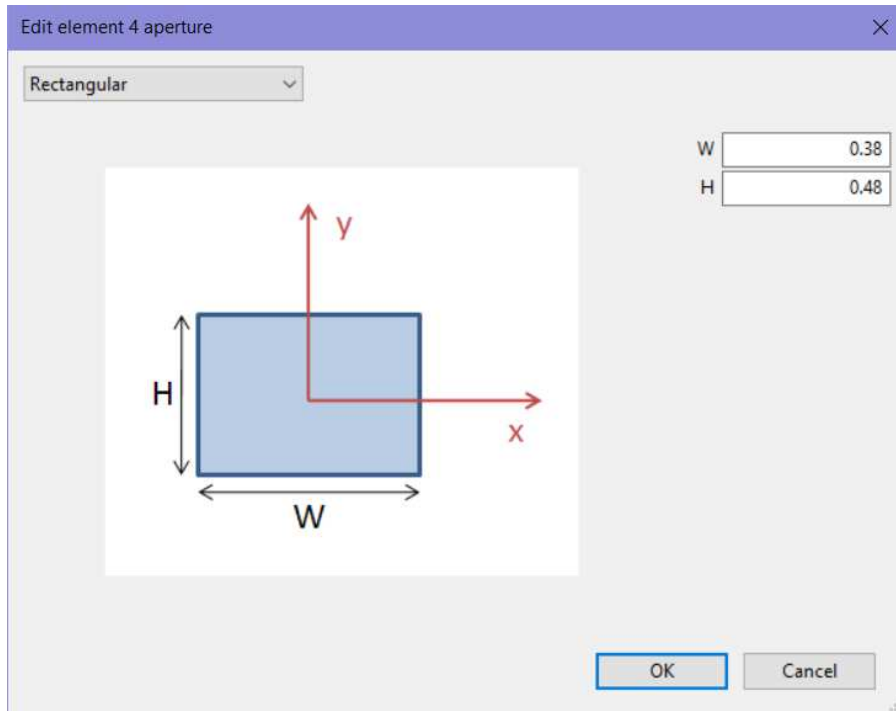


Fig. 90: Soltrace – Dimensioni vetri extrachiari

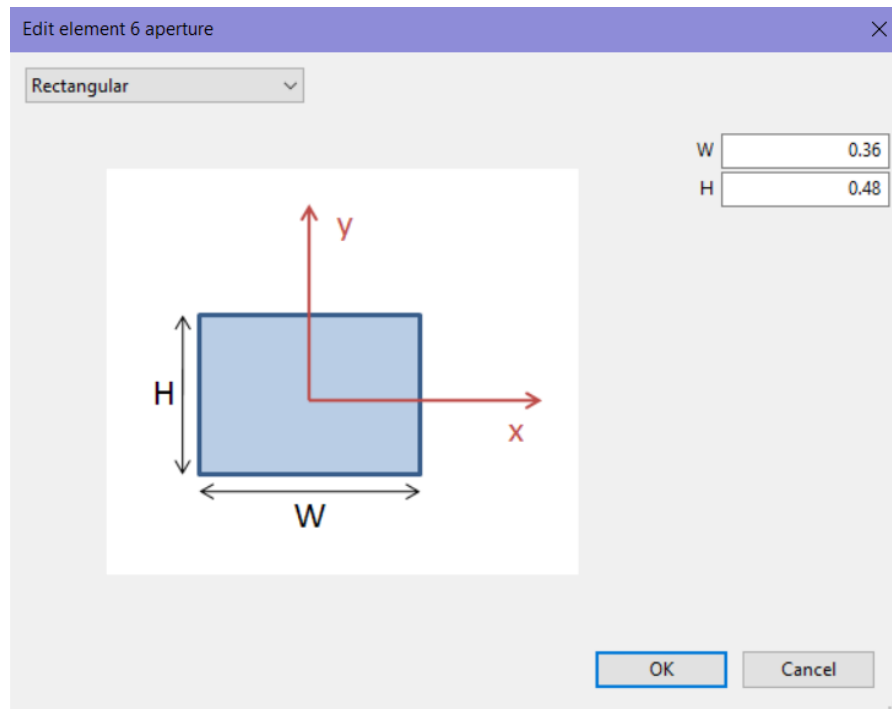


Fig. 91: Soltrace – Dimensioni piastre

L'interfaccia Trace: una volta definito il sistema con tutti gli elementi che compongono il prototipo è possibile far partire il tracciamento dei raggi. L'utente può selezionare il numero dei raggi da tracciare attraverso il sistema. Questo valore dipende dal livello di dettaglio richiesto nei risultati. Un numero di raggi maggiori implicherà più tempo per elaborare i risultati. Una volta che il tracciamento è avvenuto possiamo visualizzare i risultati attraverso dei grafici o file CSV di Excel.

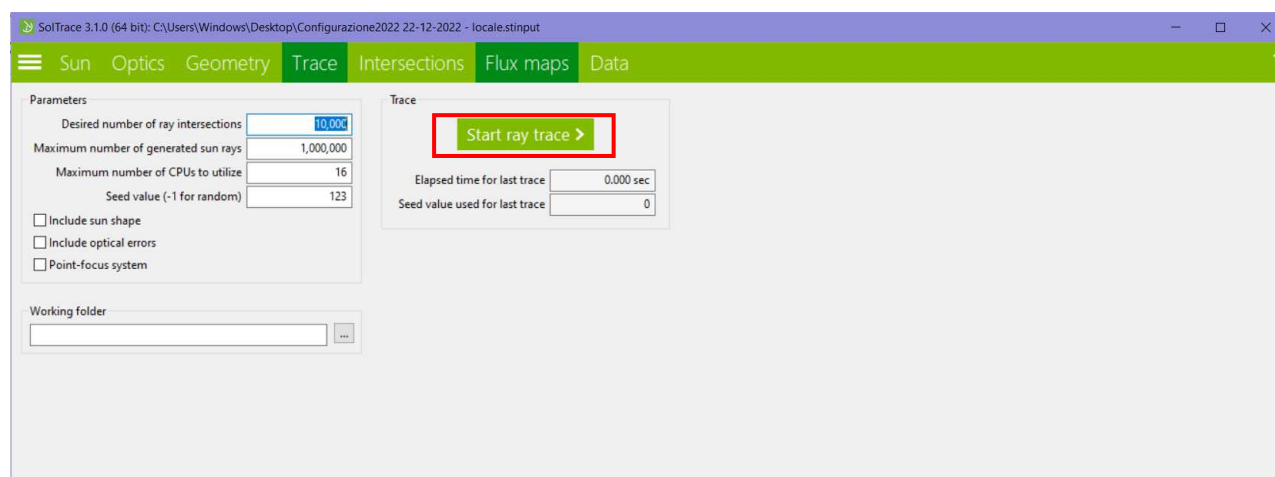


Fig. 92: Soltrace – Trace

Premendo il tasto Start Ray trace evidenziato in rosso è possibile avviare l'elaborazione dei risultati che visualizzeremo attraverso la voce Intersections.

L'interfaccia Intersection: Ci consente di visualizzare i risultati tramite l'intersezione 3D dei raggi (il percorso da loro compiuto finché intercettano lo stage) e tramite un diagramma piano “D della distribuzione del flusso. In questa sezione è possibile impostare i valori della DNI (Direct Normal Insolation) ed eventualmente anche attivare/disattivare la visualizzazione di alcuni elementi.

Nella figura seguente viene riportato un esempio di visualizzazione.

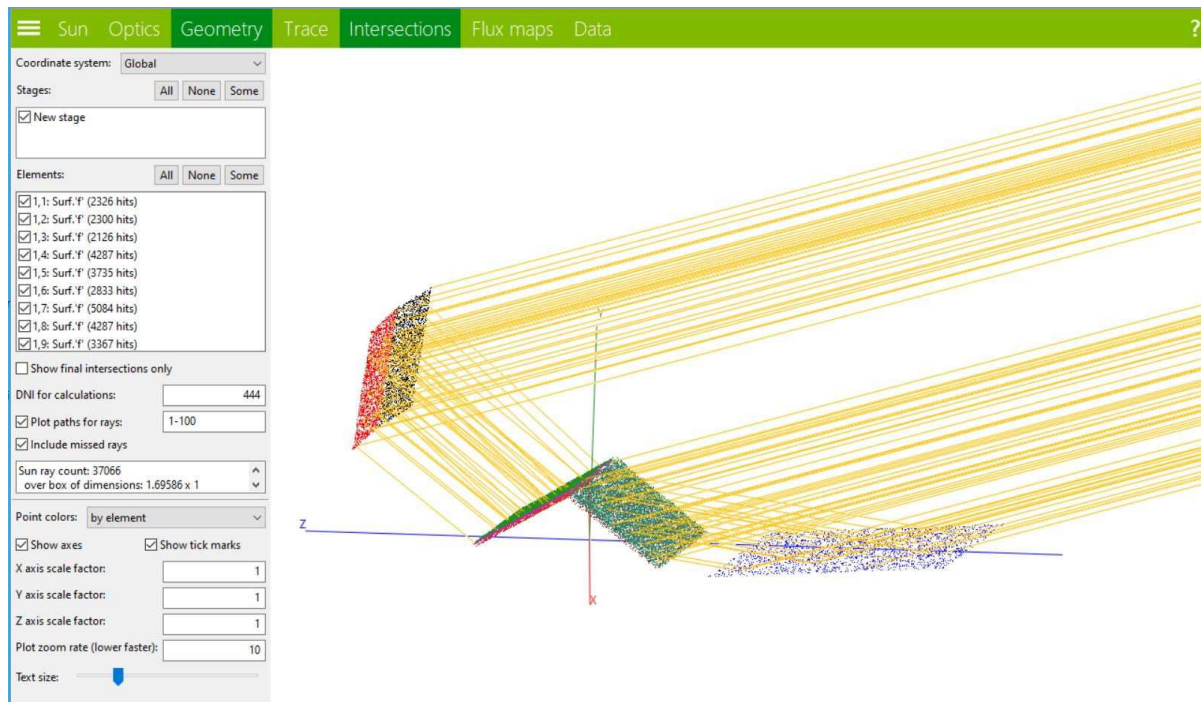


Fig. 93: Soltrace – Intersections

Attraverso la voce Plot paths for rays è possibile visualizzare i raggi che arrivano sugli elementi attraverso la radiazione solare

L'interfaccia Flux maps: in questa interfaccia è possibile visualizzare un piano 2D l'intensità e la distribuzione ricevuta dal flusso per ciascun elemento dello stage selezionandolo, espressa in w/m^2 . Verranno forniti in output dati quali il numero di raggi che si intersecano con l'elemento, il valore massimo del flusso, il valore medio del flusso ed è possibile anche in questa interfaccia inserire la DNI desiderata così da visionare in diretta come varia la potenza radiativa variando l'efficacia della radiazione. La distribuzione della radiazione sull'elemento può essere esportata in file con formato .tec o .flx.

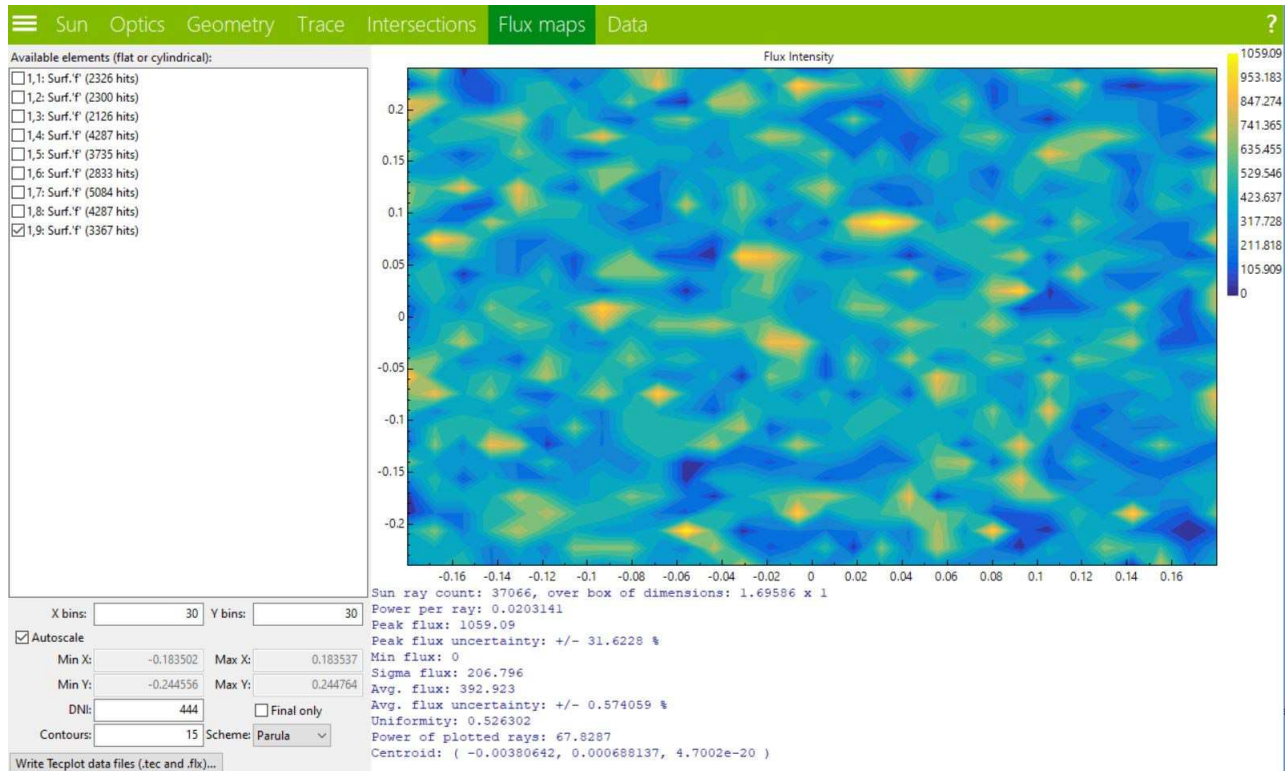


Fig. 94: Soltrace – Flux maps degli elementi- radiazione solare sulla piastra anteriore

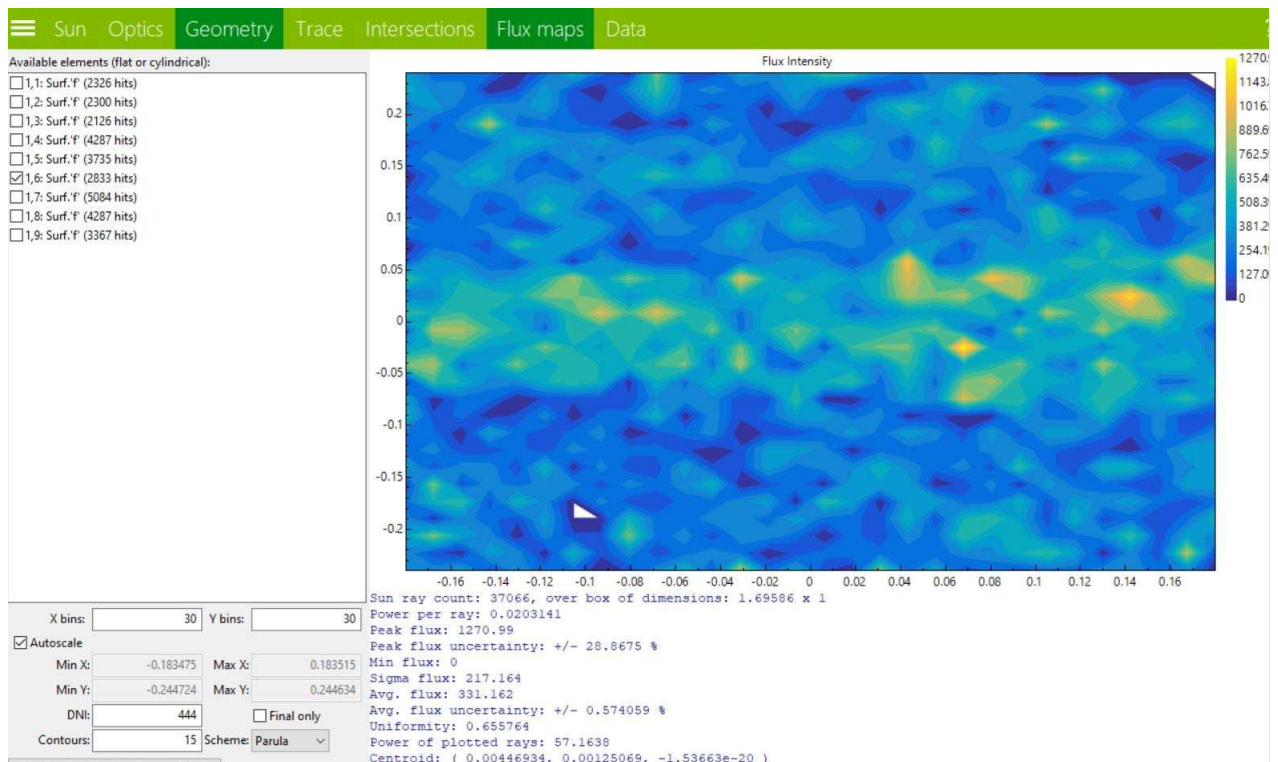


Fig. 95: Soltrace – Flux maps degli elementi- radiazione solare sulla piastra posteriore

Si riporta di seguito la simulazione relativa alle misure effettuate in data 11/01/2023 relativa alla radiazione solare riscontrata tra le ore 11:00 e le ore 11:20.

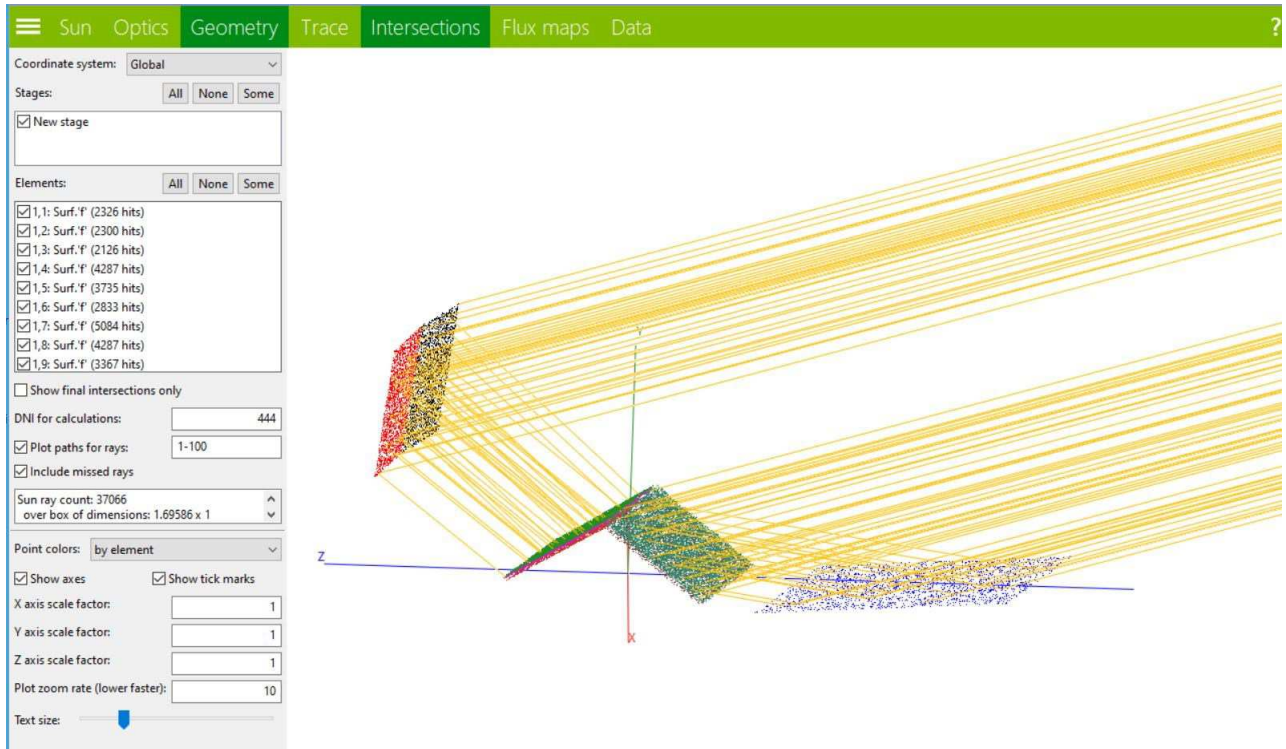


Fig. 96: Soltrace – Intersections

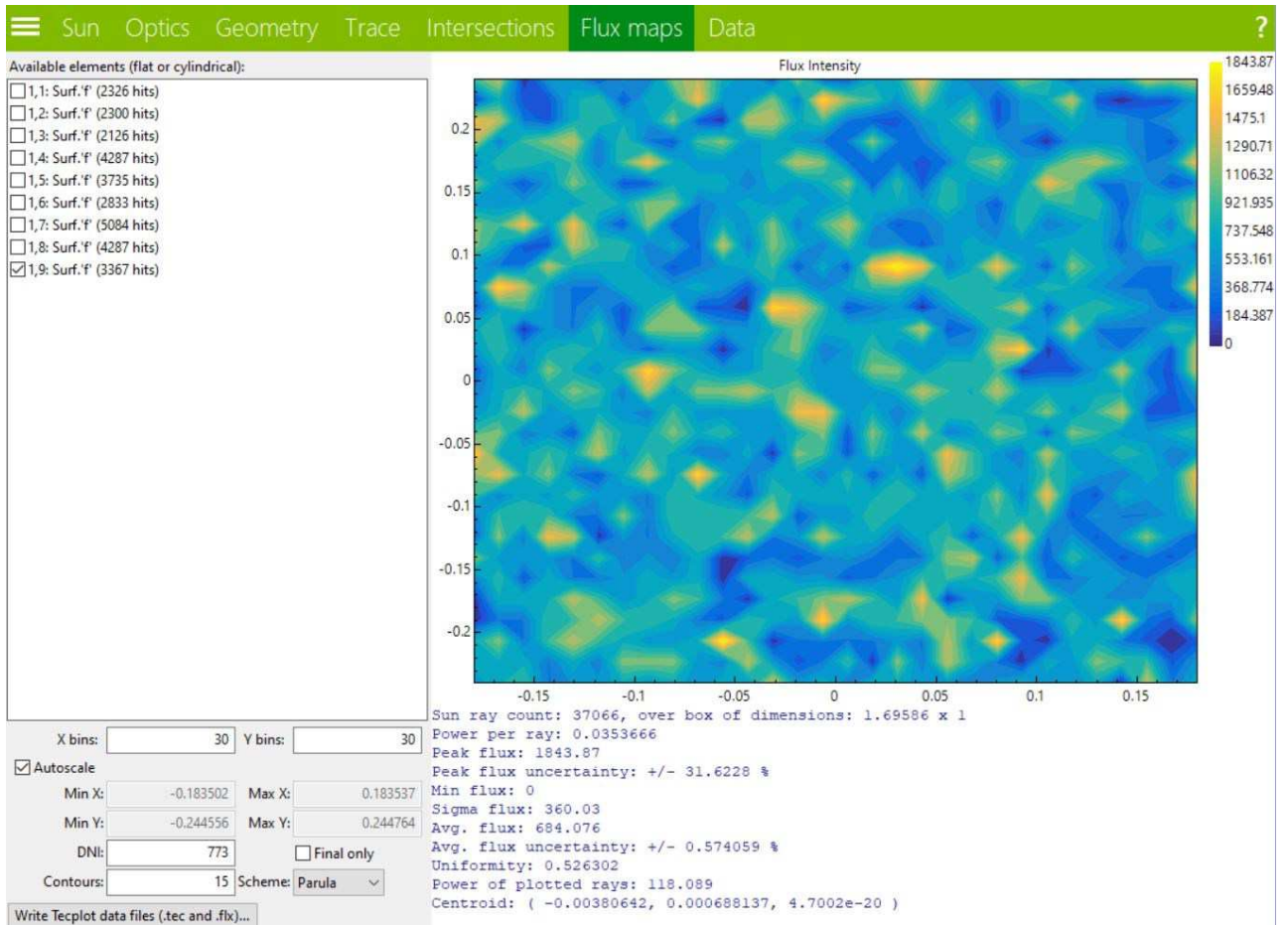


Fig. 97: Soltrace – Flux maps degli elementi- radiazione solare sulla piastra anteriore

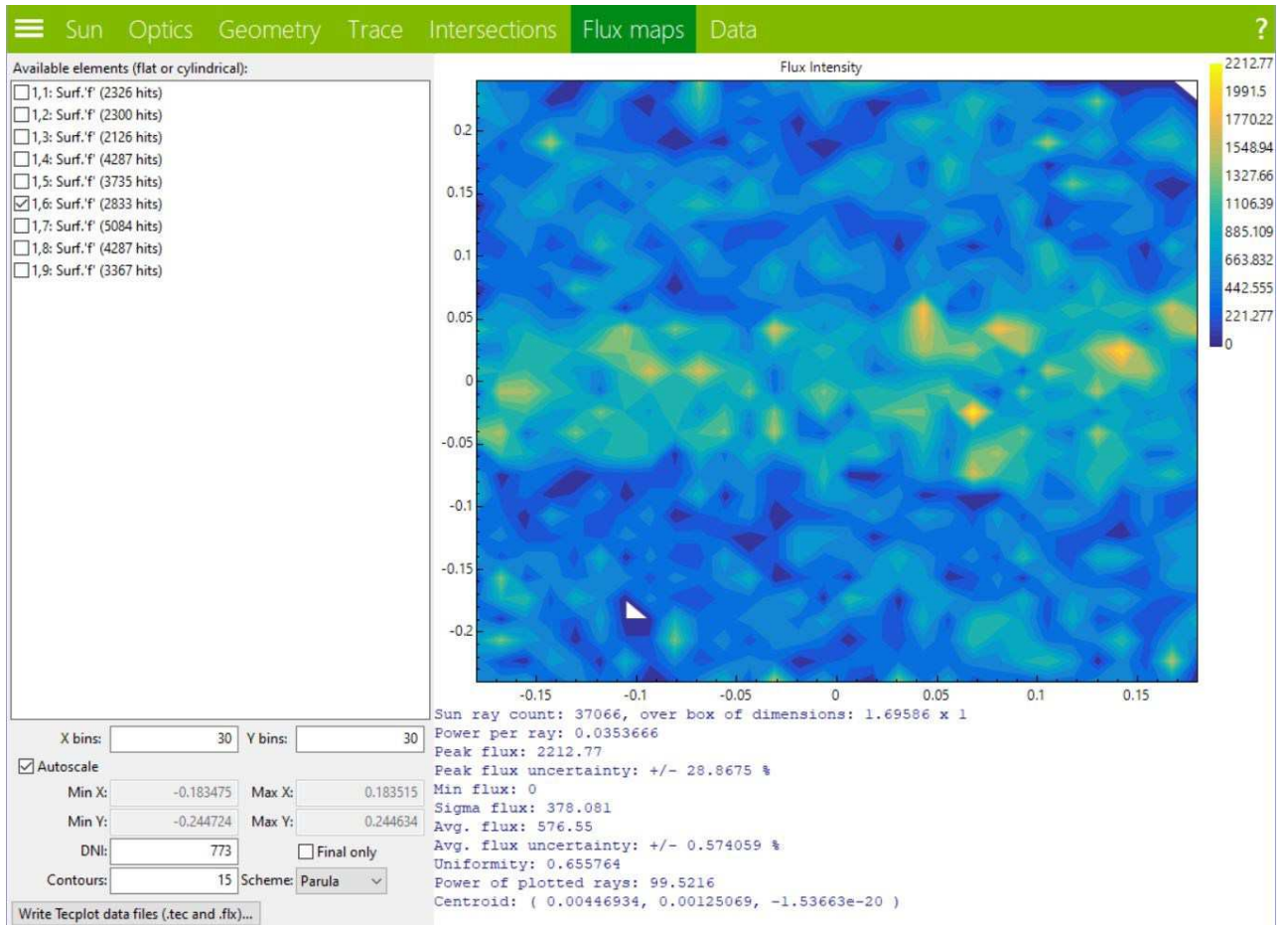


Fig. 98: Soltrace – Flux maps degli elementi- radiazione solare sulla piastra posteriore

7. Capitolo 7 – Conclusioni

In questo studio di tesi si è cercato di approfondire le opportunità derivanti dall'utilizzo di essiccatori solari a circolazione naturale per l'essiccazione dei cibi e miglioramenti che si possono ottenere attraverso un loro sviluppo tecnologico. Alla base di questa ricerca vi è l'utilizzo dell'energia solare con particolare riferimento alla riduzione dei consumi energetici e alla possibilità di sfruttare gli apporti gratuiti del sole ed effettuare in maniera più efficiente l'essiccazione di cibi con l'ausilio di uno strumento di facile realizzazione e a basso costo, rispetto alla semplice essiccazione al sole. Partendo dai requisiti richiesti per un essiccatore solare e dallo studio degli elementi del funzionamento del forno solare Newton Solar Oven, precedentemente studiato [17], con opportune modifiche è stato possibile realizzare un essiccatore solare denominato Newton Solar Dryer 2.0, in modo da ottenere uno strumento che possa essere facilmente trasformato da forno solare a essiccatore, in base alle esigenze richieste dall'utilizzatore finale. A partire dal Newton Solar Oven, in precedenza, era stato già realizzato e studiato un primo prototipo di essiccatore solare denominato Newton Solar Dryer 1.0. Il nuovo modello differisce dal precedente per la configurazione delle camere di essiccazione. Nel primo modello la camera di essiccazione ha la forma di un prisma a base triangolare, due piastre collettrici metalliche, riscaldate dalla radiazione solare diretta e indiretta, che a loro volta riscaldano il cibo all'interno della camera e l'aria in essa contenuta, che scaldandosi asporta il contenuto di umidità dei prodotti essiccati per poi defluire attraverso l'apertura superiore. Nel secondo modello, sono state realizzate due camere di essiccazione sfruttano due tavole di legno poste al di sotto delle piastre collettrici, che fungono da supporto alla griglia di essiccazione sul quale vengono posizionati i cibi da essiccare. In questo modo il cibo è posto più vicino alle piastre e si ottiene una superficie di carico maggiore, divisa in due camere di essiccazione, posteriore e anteriore. Cambia anche la geometria del prototipo, in quanto gli elementi, nel secondo modello, hanno un'inclinazione rispetto al piano di base differente dal primo.

In entrambe le configurazioni si è evidenziato la presenza di gradienti di temperatura interni alle camere di essiccazione, di cui si deve tener conto per evitare l'insorgere di un'essiccazione non uniforme del cibo, ad esempio spostandolo da una parte all'altra dell'essiccatore. È stata rilevata inoltre, una differenza di temperatura media tra le due piastre, anteriori e posteriori, dovuta alla differente esposizione delle due facce rispetto alla radiazione solare. La temperatura sulla faccia

anteriore risulta maggiore rispetto alla faccia posteriore, in quanto l'anteriore riceve la radiazione solare diretta e la radiazione indiretta proveniente dallo specchio, invece quella posteriore riceve solo la radiazione proveniente dagli specchi.

È stata effettuata una prima fase sperimentale di essiccazione, in tre giorni consecutivi nel mese di ottobre, utilizzando entrambe le configurazioni poste in parallelo, con le stesse condizioni ambientali. L'elaborazione dei risultati ha evidenziato che il modello NSD 1.0, nel periodo considerato, riporta una capacità di essiccazione leggermente superiore rispetto al modello NSD 2.0, ma, in esso sono raggiunte temperature al di sopra del range di temperatura ottimale per l'essiccazione della maggior parte dei cibi (compresa tra 40°C e 70°C).

Le due configurazioni sopra analizzate, risultano avere una geometria variabile, sia come posizione degli elementi costituenti la camera, che inclinazione degli specchi. Alla luce di quanto osservato risulta necessario effettuare delle simulazioni fluido-termodinamiche che tengano conto dei vari fattori in gioco.

A tal fine sono state effettuate delle misure della radiazione solare incidente (DNI) e della distribuzione di temperature, sulle piastre collettrici e nelle camere di essiccazione, il tutto misurato con il prototipo NSD 2.0 (prova 21/12/2022 e prova 11/01/2023).

In seguito ai risultati ottenuti dalle due misurazioni, è stato utilizzato il Software SolTrace, per tener conto della radiazione solare incidente sulle piastre collettrici in funzione dell'inclinazione degli specchi anteriori e posteriori alla camera.

7.1. Sviluppi futuri

Alla luce di quanto osservato occorrerebbe continuare lo studio realizzando un modello fluido-termodinamico da validare sperimentalmente, che sia in grado di valutare le condizioni ottimali di utilizzo di entrambe le configurazioni. Inoltre occorre effettuare delle misurazioni anche in fase primavera-estate, con entrambi gli essiccatori posti in parallelo, con le stesse condizioni ambientali, al fine di poter valutare e confrontare il funzionamento di entrambi i prototipi in altre stagioni dell'anno.

Sarebbe opportuno anche applicare un accumulo termico, con l'impiego di opportuni materiali a cambiamento di fase (PCM- phase change materials) per sopperire all'intermittenza della

radiazione solare, e prolungare il tempo di utilizzo dell'essiccatore anche in ore serali. Tali materiali permettono di rilasciare il calore accumulato nella trasformazione di fase ad una data temperatura che dovrebbe essere compresa nell'intervallo di temperatura ottimale per l'essiccazione.

BIBLIOGRAFIA

Ing. Matteo Muccioli [1]

SCI – Solar Cooker International, Newton Solar Oven, Matteo Muccioli

Enel Green Power [2]

Cos'è l'energia solare – La madre di tutte le energie

<https://www.enelgreenpower.com/it/learning-hub/energie-rinnovabili/energia-solare/vantaggi-energia-solare>

Economy Magazine [3]

Crisi energetica 2022 in Italia e Europa, qual è la situazione attuale

<https://www.economymagazine.it/crisi-energetica-2022-in-italia-e-europa-qual-e-la-situazione-attuale/>

Economy Magazine [4]

Energy compact Ue, cos'è e in cosa consiste il piano europeo di indipendenza dalla Russia

<https://www.economymagazine.it/energy-compact-ue-cose-e-in-cosa-consiste-il-piano-europeo-di-indipendenza-dalla-russia/>

La Repubblica [5]

Sviluppo sostenibile: risparmio energetico

https://www.repubblica.it/green-and-blue/native/2020/11/30/news/sviluppo_sostenibile_risparmio_energetico-276059644/

Ohga [6]

Sviluppo sostenibile: cos'è, obiettivi ed esempi

<https://www.ohga.it/sviluppo-sostenibile/>

Idee Green [7]

Prisma di Newton

<https://www.ideegreen.it/prisma-di-newton-109308.html>

Esinglass [8]

Design glass solution

<https://esinglass.it>

Tesi di laurea di Matteo Carminucci [9]

Analisi sperimentale e numerica di collettori solari per essiccazione di alimenti

SolTrace [10]

Programma di calcolo

«NREL,»

Sviluppatori programma di calcolo SolTrace

<https://www.nrel.gov/csp/soltrace.html>

Plast Magazine [11]

<https://www.plastmagazine.it>

Nicola Ulivieri, Engineer [12]

PhD

<https://www.nicolaulivieri.com/sundata.html>

Omega [13]

Termocoppie

<https://it.omega.com/prodinfo/termocoppie.html>

M. Augustus Leon, S. Kumar *, S.C. Bhattacharya; A comprehensive procedure for performance evaluation of solar food dryers; Energy Program, School of Environment, Resources and Development, Asian Institute of Technology, P.O. Box 4, Klong Luang, Pathumthani 12120, Thailand. [14]

Jayaraman, Gupta Das. In: Mujumdar AS, editor. Handbook of industrial drying. New York: Marcel Decker Inc.; 1995. [15]

Entecra [16]

“Linee Guida per l’essiccamento su piccola scala. L’impiego degli essiccatori solari per piccole produzioni vegetali” Marcello della Campa, Roberto Lo Scalzo, Tiziana M.P. Cattaneo, Giovanni Marino, Claudio Menegatti.

<https://www.entecra.it>

Desing and experimental characterization of a solar cooker with a prismatic cooking chamber and adjustable panel reflectors. A.Aquilanti – S.Tomassetti – M.Muccioli – G.Di Nicola (2023). [17]

<https://sciencedirect.com>

FIGURE

Fig. 1: Schema di funzionamento generale del Newton Solar Oven

Fig. 2: Specchi nel forno solare

Fig. 3: Bracci di sostegno degli specchi

Fig.4: Sportelli laterali triangolari rivestiti con film di alluminio

Fig.5: Vista laterale del Newton Solar Over- sportelli con le maniglie

Fig.6: Vista laterale della base

Fig.6: Piastra verniciata di nero

Fig.7: Piastra e pentola verniciate di nero

Fig.8: Vista generale del Newton Solar Oven

Fig. 9: Andamento della radiazione solare in funzione della lunghezza d'onda

Fig. 10: Trasmissione spettrale di una lastra vetrata

Fig.11: Scomposizione della radiazione solare incidente nelle tre componenti

Fig. 12: Energia totale in ingresso attraverso il vetro

Fig. 13: variazione del fattore solare in funzione dell'angolo di incidenza della radiazione

Fig.14: Vista generale del Newton Solar Dryer 1.0

Fig.15: Vista generale del Newton Solar Dryer 2.0

Fig.16: Vista generale dei due prototipi di NDS

Fig. 17: Modello tridimensionale del prototipo realizzato

Fig. 18: Modello tridimensionale del prototipo realizzato

Fig.19: Sistema di supporto in legno

Fig.19: Tavole di legno a supporto della griglia per il cibo da essiccare

Fig.20: Piastre collettrici

Fig. 21: Soltrace –es: Mappa del flusso della radiazione incidente sulla piastra anteriore

Fig.22: Sportelli isolanti in legno massello di abete

Fig. 23: Vetri in polimetacrilato

Fig.25: Camera di essiccazione

Fig.26: Camera di essiccazione

Fig.27: Braccio regolabile a supporto degli specchi posteriori con sistema di fissaggio alla base

Fig.28: Vista specchi (retro)

Fig.29: Vista specchi (frontale)

Fig.30: Braccio regolabile a supporto degli specchi anteriori con sistema di fissaggio alla base

Fig.31: Braccio regolabile a supporto degli specchi anteriori con sistema di fissaggio alla base

Fig.32: Sistema di ancoraggio degli specchi anteriori

Fig.33: Schema di funzionamento generale

Fig. 34: Indicazione angoli specchi

Fig. 35: Programma di calcolo per ricavare l'altezza del sole

Fig. 36: Schema di funzionamento del Newton Solar Dryer 2.0

Fig. 37: Schema di funzionamento del Newton Solar Dryer 1.0

Fig.38: Pireliometro

Fig.39: Supporto in legno per posizionare le termocoppie sulle piastre

Fig. 40: Data logger utilizzato nei test sperimentali

Fig. 41: Esempio di visualizzazione da software su pc di tre Picolog funzionanti in contemporanea

Fig.42 : esempio di grafico di acquisizione di temperatura (sopra) e DNI (sotto) elaborato dal software Picolog

Fig. 43: Esempio di tabella di acquisizione di temperature e DNI elaborate dal software Picolog

Fig.44. Influenza della velocità del flusso d'aria (U) sulla velocità di essiccazione nel tempo a valori fissati di temperatura $T = 45^{\circ}\text{C}$ e umidità relativa $\varphi = 40\%$: \circ , $U = 0,2$ m/s; \square , $U = 0,4$ m/s; \diamond , $U = 0,6$ m/s.

Fig. 45: Variazione del contenuto di umidità nel tempo in funzione di diverse umidità relative [φ] a fissate velocità di flusso $U = 0,2$ m/s e temperatura $T = 35^{\circ}\text{C}$: \circ , $\varphi = 70\%$; \square , $\varphi = 55\%$; \diamond , $\varphi = 40\%$.

Fig. 46: Influenza della temperatura sulla velocità di essiccazione nel tempo a fissate velocità del flusso $U = 0,2$ m/s e umidità relativa $\varphi = 40\%$: \circ , $T = 35^{\circ}\text{C}$; \square , $T = 45^{\circ}\text{C}$; \diamond , $T = 55^{\circ}\text{C}$.

Fig.47: Influenza dell'umidità relativa sulla velocità di essiccazione nel tempo a fissate velocità del flusso d'aria $U = 0,2$ m/s e temperatura $T=35^{\circ}\text{C}$: \circ , $\varphi = 70\%$; \square , $\varphi = 55\%$; \diamond , $\varphi = 40\%$.

Fig. 48: Grafico configurazione NSD 2.0 – analisi temperatura piastre

Fig. 49: Piastra anteriore

Fig. 50: Piastra posteriore

Fig.51: Grafico configurazione NSD 2.0 – analisi temperature interne

Fig. 52: Tavola anteriore

Fig.53: Tavola posteriore

Fig. 54: Grafico configurazione NSD 1.0 – analisi temperatura piastre

Fig. 55: Piastra anteriore

Fig. 56: Piastra posteriore

Fig.57: Acquisizione dati all'interno della camera del NSD 1.0

Fig. 58: Schema di distribuzione delle termocoppie

Fig. 59: Configurazione di acquisizione dati all'interno della camera del NSD 1.0

Fig. 60: Rappresentazione grafica distribuzione delle termocoppie

Fig. 61: Grafico configurazione NSD 1.0 – analisi temperature interne (posizione centrale)

Fig. 62: Grafico configurazione NSD 1.0 – analisi temperature interne (posizione laterale)

Fig. 63: Griglia di essiccazione centrale

Fig. 64: Griglia di essiccazione laterale

Fig.65: Sistema di supporto per le mele nella configurazione NSD 1.0

Fig. 66: Sistema di supporto per le mele nella configurazione NSD 2.0

Fig.67: Essiccazione al sole delle mele

Fig.68: Banco di prova essiccazione mele con configurazioni in parallelo

Fig.69: Bilancia di precisione per misurare il peso delle mele

Fig. 70: Grafico configurazione NSD 1.0 – Essiccazione mele 17 ottobre 2022

Fig. 71: Grafico configurazione NSD 2.0 – Essiccazione mele 17 ottobre 2022

Fig. 72: Grafico configurazione NSD 1.0 – Essiccazione mele 18 ottobre 2022

Fig. 73: Grafico configurazione NSD 2.0 – Essiccazione mele 18 ottobre 2022

Fig. 74: Grafico configurazione NSD 1.0 – Essiccazione mele 19 ottobre 2022

Fig. 75: Grafico configurazione NSD 2.0 – Essiccazione mele 19 ottobre 2022

Fig. 76: Grafico configurazione NSD 2.0 – misure 21 dicembre 2022

Fig. 77: Grafico configurazione NSD 2.0 – misure 11 gennaio 2023

Fig. 78: Logo Software Soltrace

Fig.79: Rappresentazione grafica degli elementi

Fig.80: Back e Front dell'elemento

Fig. 81: Soltrace – utilizzo delle coordinate globali

Fig. 82: Soltrace – utilizzo delle coordinate locali

Fig. 83: Soltrace – interfaccia Optics, Metalli

Fig. 84: Soltrace – interfaccia Optics, vetri extrachiarati “Front Side”

Fig. 85: Soltrace – interfaccia Optics, vetri extrachiarati “Back Side”

Fig. 86: Soltrace – interfaccia Optics, specchi

Fig. 87: Soltrace – interfaccia Geometry

Fig. 88: Soltrace – Dimensioni specchi posteriori

Fig. 89: Soltrace – Dimensioni specchi anteriori

Fig. 90: Soltrace – Dimensioni vetri extrachiarati

Fig. 91: Soltrace – Dimensioni piastre

Fig. 92: Soltrace – Trace

Fig. 93: Soltrace – Intersections

Fig. 94: Soltrace – Flux maps degli elementi- radiazione solare sulla piastra anteriore

Fig. 95: Soltrace – Flux maps degli elementi- radiazione solare sulla piastra posteriore

Fig. 96: Soltrace – Intersections

Fig. 97: Soltrace – Flux maps degli elementi- radiazione solare sulla piastra anteriore

Fig. 98: Soltrace – Flux maps degli elementi- radiazione solare sulla piastra posteriore

TABELLE

Tab. 1: Specifiche del legno massello e legno multistrato (1)

<https://www.isolmar.it> <https://www.fratelli-carli.com>

Tab.2. Coefficiente di resistenza al passaggio di vapore acqueo

<https://www.anit.it> <https://www.promolegno.com>

Tab.3: Principali proprietà termiche dell'acciaio, del sughero e dell'acqua

<https://www.mariobon.com>

<https://www.casaenergetica.it>

<https://www.meccanicatmg.it> <https://www.infobuildenergia.it>

Tab. 4 Coefficienti energetici del vetro float comune e del vetro extrachiaro con uno spessore di 4 mm (valori in percentuale)

<https://saintgobain.it>

Tab.5: Altezza sole e angoli Teta 1 -Theta 2- Theta 3- rif. Dott. Ing. Alessia Aquilanti

Tab.6: Caratteristiche tecniche del Pireliometro

Tab.7: Scheda tecnica acquirente

Tab. 8: Valori configurazione NSD 2.0 – analisi temperatura piastre

Tab. 9: Valori configurazione NSD 2.0 – analisi temperature medie e massime sulle piastre anteriori

Tab. 10: Valori configurazione NSD 2.0 – calcolo gradienti di temperatura

Tab. 11: Valori configurazione NSD 2.0 – analisi temperature medie e massime sulle piastre posteriori

Tab. 12: Valori configurazione NSD 2.0 – calcolo gradienti di temperatura

Tab. 13: Valori configurazione NSD 2.0 – analisi temperature interne

Tab. 14: Valori configurazione NSD 2.0 – analisi temperature medie e massime sulla tavola anteriore

Tab. 15: Valori configurazione NSD 2.0 – calcolo gradienti di temperatura

Tab. 16: Valori configurazione NSD 2.0 – analisi temperature medie e massime sulla tavola posteriore

Tab. 17: Valori configurazione NSD 2.0 – calcolo gradienti di temperatura

Tab. 18: Valori configurazione NSD 1.0 – analisi temperature interne

Tab. 19: Valori configurazione NSD 1.0 – analisi temperature medie e massime sulla piastra anteriore

Tab. 20: Valori configurazione NSD 1.0 – calcolo gradienti di temperatura

Tab. 21: Valori configurazione NSD 1.0 – analisi temperature medie e massime sulla piastra posteriore

- Tab. 22:** Valori configurazione NSD 1.0 – calcolo gradienti di temperatura
- Tab. 23:** Legenda distribuzione delle termocoppie (colorazione riportata nella figura precedente)
- Tab. 24:** Valori configurazione NSD 1.0 – analisi temperature interne (posizione centrale e laterale)
- Tab. 25:** Valori configurazione NSD 1.0 – analisi temperature medie e massime nella zona centrale
- Tab. 26:** Valori configurazione NSD 1.0 – calcolo gradienti di temperatura
- Tab. 27:** Valori configurazione NSD 1.0 – analisi temperature medie e massime nella zona laterale
- Tab. 28:** Valori configurazione NSD 1.0 – calcolo gradienti di temperatura
- Tab. 29:** Valori configurazione NSD 1.0- NSD 2.0 – Essiccazione mele 17 ottobre 2022
- Tab. 30:** Valori configurazione NSD 1.0- NSD 2.0 – Essiccazione mele 18 ottobre 2022
- Tab. 31:** Valori configurazione NSD 1.0- NSD 2.0 – Essiccazione mele 19 ottobre 2022
- Tab. 32:** Sintesi dei risultati ottenuti nei giorni di prova 17-18-19 ottobre 2022 (Essiccazione mele)
- Tab. 33:** Valori configurazione NSD 2.0 – misure 21 dicembre 2022
- Tab. 34:** Valori configurazione NSD 2.0 – misure 1 gennaio 2023