



**UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE**

**FACOLTA' DI INGEGNERIA**

---

Corso di Laurea magistrale in Ingegneria Meccanica

**ANALISI SPERIMENTALE E NUMERICA DI COLLETTORI SOLARI PER ESSICCAZIONE DI  
ALIMENTI**

**Experimental and numerical analysis of solar collectors for food drying**

Relatore: Chiar.mo

Prof. Giovanni Di Nicola

Tesi di Laurea di:

Matteo Carminucci

Correlatore:

Sebastiano Tomassetti

A.A. 2020 / 2021

## SOMMARIO

<b>INTRODUZIONE</b>	<b>4</b>
<b>1. L'ENERGIA SOLARE NEL CONTESTO ENERGETICO ATTUALE</b>	<b>5</b>
<b>1.1. La situazione energetica globale</b>	<b>5</b>
<b>1.2. La transizione verso le rinnovabili</b>	<b>6</b>
<b>1.3. Il ruolo dell'energia solare</b>	<b>7</b>
1.3.1. <i>Applicazioni fotovoltaiche e termiche</i>	<b>8</b>
1.3.2. <i>L'utilizzo del solare nella storia</i>	<b>8</b>
<b>1.4. Definizione di essiccatore solare</b>	<b>9</b>
1.4.1. <i>Perché utilizzare un essiccatore solare</i>	<b>10</b>
1.4.2. <i>Limiti e possibilità di sviluppo</i>	<b>10</b>
<b>1.5. Classificazione e categorie</b>	<b>10</b>
1.5.1. <i>Movimento del flusso d'aria interno</i>	<b>11</b>
1.5.2. <i>Esposizione dei prodotti alla radiazione solare</i>	<b>12</b>
<b>2. PROGETTAZIONE DI UN ESSICCATORE SOLARE</b>	<b>15</b>
<b>2.1. Premessa</b>	<b>15</b>
2.1.1. <i>Newton solar oven 2.0</i>	<b>15</b>
<b>2.2. Differenze tra forno ed essiccatore</b>	<b>19</b>
2.2.1. <i>Requisiti di essiccazione</i>	<b>20</b>
<b>2.3. Realizzazione del prototipo</b>	<b>20</b>
2.3.1. <i>Schema funzionale</i>	<b>20</b>
2.3.2. <i>Supporto autoportante in legno</i>	<b>21</b>
2.3.3. <i>Base intercambiabile</i>	<b>22</b>
2.3.4. <i>Piastre di assorbimento</i>	<b>23</b>
2.3.5. <i>Sportelli isolanti</i>	<b>24</b>
2.3.6. <i>Vetri in polimetacrilato</i>	<b>25</b>
2.3.7. <i>Camera di essiccazione</i>	<b>26</b>
2.3.8. <i>Sistema a slitta anteriore</i>	<b>27</b>
2.3.9. <i>Braccio di supporto posteriore</i>	<b>28</b>
<b>3. SETUP DEL BANCO DI PROVA</b>	<b>29</b>
<b>3.1. Pireliometro</b>	<b>30</b>
<b>3.2. Termocoppie</b>	<b>31</b>
3.2.1. <i>Affidabilità delle termocoppie</i>	<b>32</b>
<b>3.3. Computer e acquisitore</b>	<b>33</b>
3.3.1. <i>Software di acquisizione Picolog</i>	<b>34</b>
<b>3.4. Sistema schermatura dal vento</b>	<b>35</b>
<b>4. PARAMETRI DI VALUTAZIONE</b>	<b>35</b>
<b>4.1. Efficienza termica</b>	<b>36</b>
4.1.1. <i>Tempo e velocità di essiccazione</i>	<b>36</b>
4.1.2. <i>Temperatura dell'aria in camera</i>	<b>37</b>
4.1.3. <i>Umidità relativa ambiente</i>	<b>37</b>
4.1.4. <i>Velocità del flusso d'aria</i>	<b>38</b>
<b>4.2. Qualità del prodotto essiccato</b>	<b>39</b>
4.2.1. <i>Qualità sensoriali</i>	<b>39</b>
4.2.2. <i>Dati nutrizionali</i>	<b>39</b>
4.2.3. <i>Capacità di reidratazione</i>	<b>39</b>
<b>5. INDICAZIONI FUNZIONALI ALL'ESSICCAZIONE</b>	<b>39</b>

5.1. Operazioni preliminari	39
5.2. Variabili non controllabili	40
6. MODELLO MATEMATICO PRELIMINARE	41
6.1. Software di elaborazione	41
6.1.1. <i>Condizioni al contorno</i>	42
6.2. Risultati delle analisi	43
6.2.1. <i>Simulazioni a piastre chiuse</i>	44
6.2.2. <i>Simulazioni con apertura di 0,5 mm</i>	47
6.2.3. <i>Comparazione dei risultati</i>	51
7. TEST SPERIMENTALI	51
7.1. Confronti tra le due configurazioni	52
7.1.1. <i>Base e piastre chiuse</i>	52
7.1.2. <i>Base aperta e piastre chiuse</i>	53
7.1.3. <i>Base chiusa e piastre aperte a 4 mm</i>	54
7.1.4. <i>Base e piastre aperte a 4 mm</i>	56
7.1.5. <i>Base e piastre aperte a 0,5 mm</i>	57
7.2. Prove di essiccazione	58
8. CONCLUSIONI	61
9. BIBLIOGRAFIA	62
10. RINGRAZIAMENTI	64

## INTRODUZIONE

Nel seguente elaborato viene presentato il progetto di un essiccatore alimentato esclusivamente ad energia solare con l'intento di proporlo come alternativa economica e "pulita" ad altri macchinari alimentati a combustibili fossili e convalidarne le funzionalità mettendo a confronto due configurazioni della base della camera di essiccazione differenti, una con fori circolari regolari equamente distribuiti su tutta la superficie e l'altra con quattro tagli rettangolari estesi lungo la dimensione preponderante.

Nel primo capitolo viene introdotto il contesto energetico attuale a partire da una panoramica su consumi e risorse energetiche a livello globale, per poi riassumere le applicazioni note e i possibili usi di un essiccatore solare.

Nel secondo capitolo è descritto il forno solare da cui il prototipo di essiccatore proposto in questo elaborato ha tratto ispirazione e si discutono le differenze sostanziali tra un forno solare ed un essiccatore solare. Di seguito è descritto l'essiccatore oggetto di questo studio a partire dalla sua progettazione, per poi analizzare le parti e i materiali da cui è costituito e le motivazioni alla base del loro utilizzo.

Nel terzo capitolo sono mostrati gli strumenti e le attrezzature che costituiscono il banco di prova della sperimentazione presentandone le caratteristiche e le ragioni della loro scelta.

Nel quarto capitolo sono presentati i principali parametri di valutazione delle prestazioni di un essiccatore solare, descrivendo i principali meccanismi fisici del suo funzionamento e le qualità da valutare in un prodotto essiccato.

Nel quinto capitolo sono riassunte alcune indicazioni preliminari da seguire per prevenire possibili inconvenienti durante il processo essiccativo, ponendo particolare attenzione alle variabili imprevedibili in un contesto di prova e a come arginare il loro effetto sulla sperimentazione.

Nel sesto capitolo vengono riportati i risultati di una simulazione numerica effettuata nelle fasi preliminari della progettazione descrivendo il software di simulazione utilizzato e le sue principali peculiarità. A seguire, sono discussi i dati ricavati dalle simulazioni distinguendoli in base alla configurazione considerata e formulando ipotesi in merito ad essi.

Nel settimo capitolo sono presentati i risultati di alcuni test termodinamici di confronto eseguiti nella fase sperimentale del progetto distinguendoli in funzione delle condizioni di prova imposte e comparando di volta in volta le prestazioni delle due configurazioni proposte.

Successivamente si riportano i dati di alcune prove di essiccazione eseguite su entrambe le configurazioni in modo da verificare la validità del progetto in merito alla funzionalità principale dell'essiccatore.

Nell'ottavo capitolo sono riportate le conclusioni di questo lavoro, evidenziando i risultati ottenuti in merito alle condizioni di prova ottimali, alla configurazione del prototipo più efficiente e alla validità del progetto presentato.

# 1. L'ENERGIA SOLARE NEL CONTESTO ENERGETICO ATTUALE

## 1.1. LA SITUAZIONE ENERGETICA GLOBALE

In un mondo in cui il consumo globale di energia cresce di anno in anno e la competizione economica verte sul mercato energetico, nuove fonti di energia risultano essenziali per rispondere alle esigenze di automazione, modernizzazione e sviluppo sociale: in media, il consumo di energia cresce dell'1% nei paesi industrializzati e del 5% nei paesi in via di sviluppo [1].

Inoltre, le previsioni indicano che questo incremento non potrà essere soddisfatto nel lungo termine, in quanto le riserve di combustibili fossili, che costituiscono attualmente la risorsa principale, tenderanno ad esaurirsi nei prossimi anni e il loro prezzo sta perciò aumentando [2].

Tra le cause principali della crescente richiesta energetica troviamo l'incremento della popolazione mondiale, ma soprattutto l'uscita di fasce sempre maggiori di popolazione dalla povertà e la conseguente esigenza di beni e servizi primari a basso costo, come elettricità, riscaldamento, climatizzazione, cibo e prodotti di consumo.

Non è un caso che il consumo globale di energia elettrica, nonostante la diffusione di tecnologie più efficienti in termini di consumi, aumenti stabilmente del 3% l'anno da 10 anni a questa parte (come mostrato in Figura 1) e ci si aspetta che la tendenza continui ad aumentare nei prossimi anni [3].

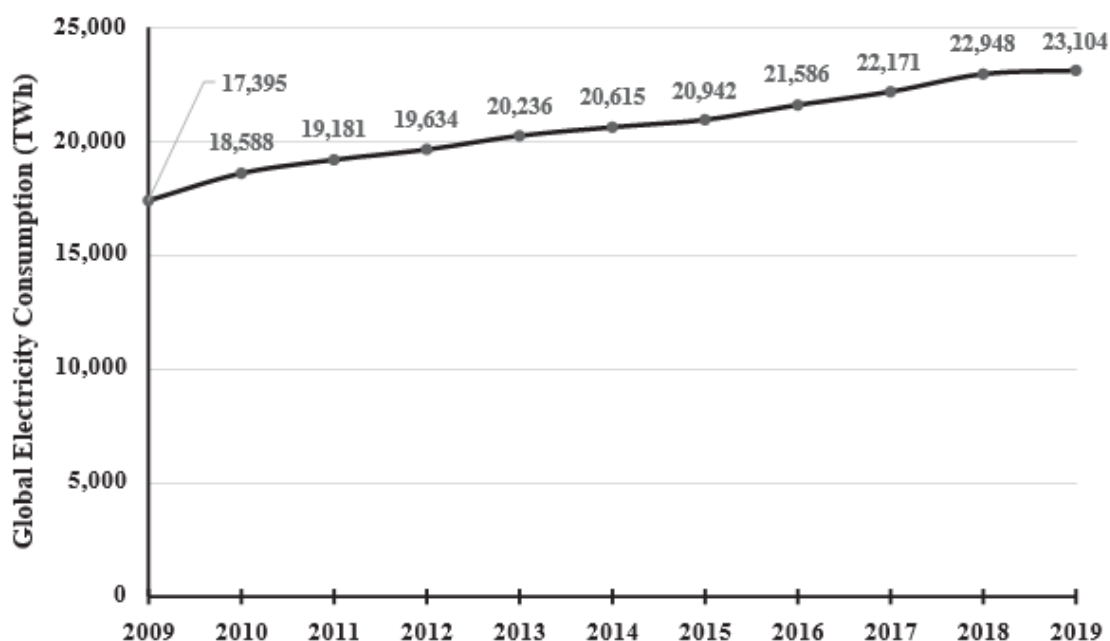


Figura 1. Consumo globale di elettricità dal 2009 al 2019.

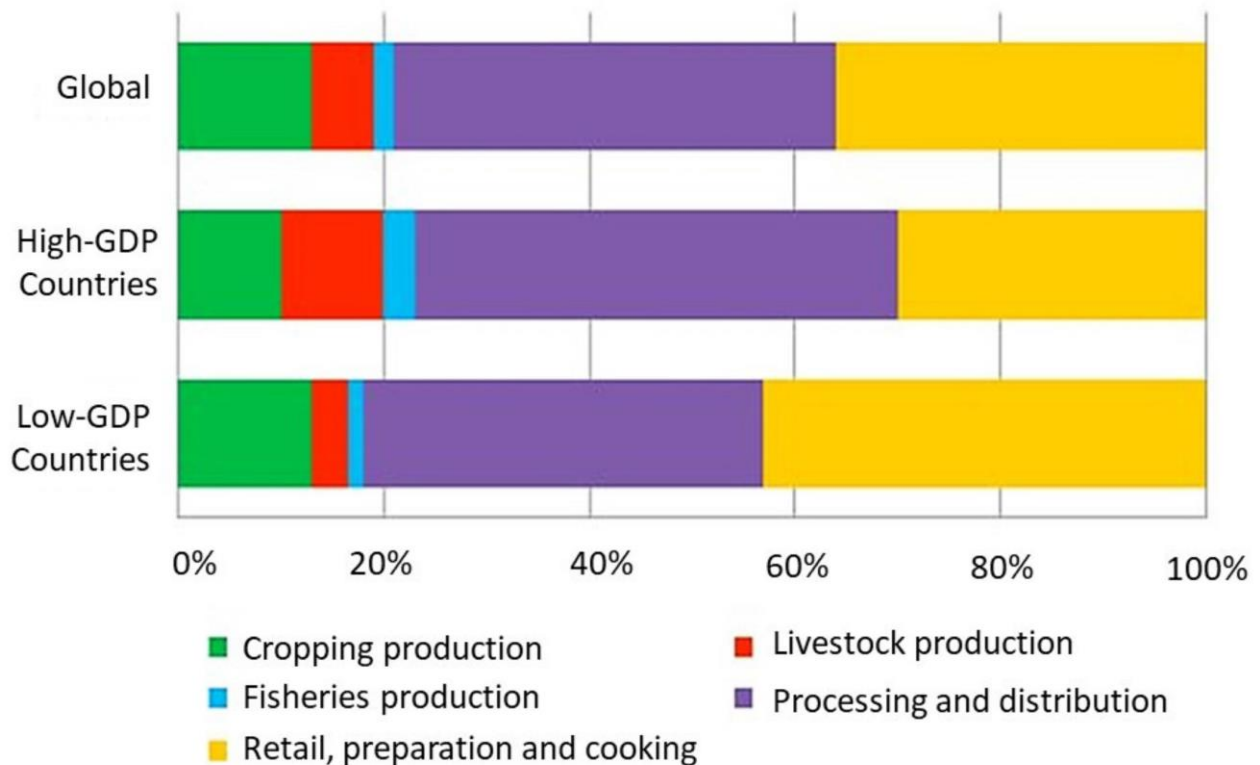
Un ruolo importante nel consumo energetico è giocato dall'energia necessaria alla cottura e preparazione dei cibi.

Ciò risulta particolarmente evidente nei paesi del terzo mondo, ad esempio l'India (dove il 36% dell'energia consumata annualmente è riservata a questo scopo) [4] e le regioni più rurali dell'Africa subsahariana (qui si parla addirittura del 90-95%) [5].

Nel frattempo, un incremento della produzione di cibo è necessario per soddisfare le crescenti esigenze di sostentamento nel mondo.

Assieme all'incremento in produttività, una riduzione dello spreco di cereali alimentari, delle perdite post-raccolta e degli sprechi legati a varie fasi della catena di produzione alimentare permetterebbe di contrastare più efficacemente l'insufficienza di risorse alimentari nel mondo.

Per di più, per soddisfare la richiesta crescente di cibo, un incremento nell'uso di fonti di energia "convenzionali" in fasi diverse della produzione alimentare è inevitabile: si prevede che la richiesta energetica globale aumenterà del 40-50% soltanto per soddisfare la richiesta globale di cibo [6].



**Figura 2.** Impiego energetico percentuale in diverse fasi della produzione alimentare.

Il diagramma sopra (Figura 2) mostra che l'utilizzo energetico nelle lavorazioni post-raccolta comprende una grande percentuale dell'utilizzo totale di energia nell'intero processo di produzione alimentare [7].

Proprio il settore delle lavorazioni post-raccolta presenta una grossa fetta degli sprechi sopra citati, in particolare nei paesi in via di sviluppo, nei quali la percentuale della produzione alimentare sprecata raggiunge il 30-40% proprio in quel frangente [8].

Risulta pertanto chiaro che sia necessario trovare una alternativa per contenere gli effetti devastanti che tale contesto energetico potrebbe avere sull'ambiente e sulle generazioni future.

## 1.2. LA TRANSIZIONE VERSO LE RINNOVABILI

Attualmente i combustibili fossili soddisfano la fetta principale di energia necessaria per trasporti, generazione di potenza elettrica e applicazioni industriali.

Tale massiccio utilizzo ha impatti molto gravi sull'ambiente in termini di cambiamenti climatici a causa delle emissioni di gas serra [9].

Un trattato internazionale conosciuto come "l'accordo di Parigi" ha fissato degli obiettivi per ridurre gli effetti del cambiamento climatico, aiutare i paesi a adattarsi a questi effetti e favorire la riduzione di emissioni di gas serra nei paesi coinvolti.

Tra le iniziative a lungo termine sono inclusi la decarbonizzazione e la transizione verso fonti di energia pulite e rispettose per l'ambiente come il solare, le biomasse, l'idrico e l'eolico.

Per quanto riguarda la produzione di energia elettrica, ad esempio, la produzione europea è passata da 676 GW nel 2005 a 938 GW nel 2017 (Figura 3) [10], con un conseguente aumento dello sfruttamento di energia da fonti di energia rinnovabili (FER):

Fonte di energia	2005	2017
Eolico	41 GW (6%)	169 GW (18%)
Solare	2 GW (0.3%)	107 GW (11.5%)
Gas	138 GW (20.5%)	188 GW (20.1%)
Carbone	167 GW (24.8%)	148 GW (15.8%)
Nucleare	131 GW (19.4%)	118 GW (12.6%)
Petrolio	52 GW (7.7%)	29 GW (3%)
Idroelettrico	120 GW (17.7%)	137 GW (14.6%)
Biomasse	7 GW (1%)	15 GW (1.6%)
Altro	18 GW (2.6%)	27 GW (2.8%)

**Figura 3.** Produzione elettrica europea in funzione del vettore energetico di base.

Nel complesso, tra il 2005 e il 2018 la fetta di richiesta energetica italiana soddisfatta dalle energie rinnovabili è raddoppiata, passando da 10,7 Mtep a 21,6 Mtep (tep = tonnellate equivalenti di petrolio), avvicinandosi fortemente agli obiettivi imposti dall'accordo di Parigi (Figura 4) [11].

	Italia	Europa
Quota FER sui consumi energetici totali	17.8%	18%
Quota FER nel settore trasporti	7.7%	8.1%
Quota FER nel settore termico	33.9%	32.1%

**Figura 4.** Quota energetica coperta dalle rinnovabili in Italia ed in Europa a confronto.

Tra le risorse sopra citate, l'energia solare ha attratto molti interessi di ricerca e sviluppo per la sua naturale abbondanza di risorse e il basso investimento di capitale richiesto, in particolare per applicazioni domestiche e basilari come, ad esempio, la cottura e l'essiccazione dei cibi.

### 1.3. IL RUOLO DELL'ENERGIA SOLARE

La fonte di energia più pulita e abbondante presente attualmente sulla Terra è l'energia solare.

Si stima che la quantità di radiazione solare annuale ricevuta dalla Terra ammonterebbe a 7500 volte l'attuale consumo energetico mondiale in una annata e che la quantità recepita dalla Terra in un singolo giorno possa

coprire i consumi energetici mondiali per i prossimi 20 anni, sebbene non disponiamo ancora dei mezzi in grado di sfruttare pienamente tale quantità di energia [12].

### 1.3.1. Applicazioni fotovoltaiche e termiche

L'energia solare è attualmente impiegata in svariate applicazioni suddivisibili sostanzialmente in 3 macrogruppi in base alla tecnica di accumulo energetico usata e al suo fine:

- Fotovoltaico: mediante delle celle fotovoltaiche, collegate in serie o in parallelo a formare dei pannelli fotovoltaici, la radiazione solare viene convertita in energia elettrica. I costi relativamente bassi e la facilità di utilizzo hanno portato sempre più persone a installare questo tipo di impianto anche nelle proprie abitazioni.
- Impianti a concentrazione di energia solare (CSP): mediante degli specchi si convoglia la radiazione solare in un unico punto al fine di produrre vapore (Figura 5); questo alimenterà poi una o più turbine generando energia elettrica.

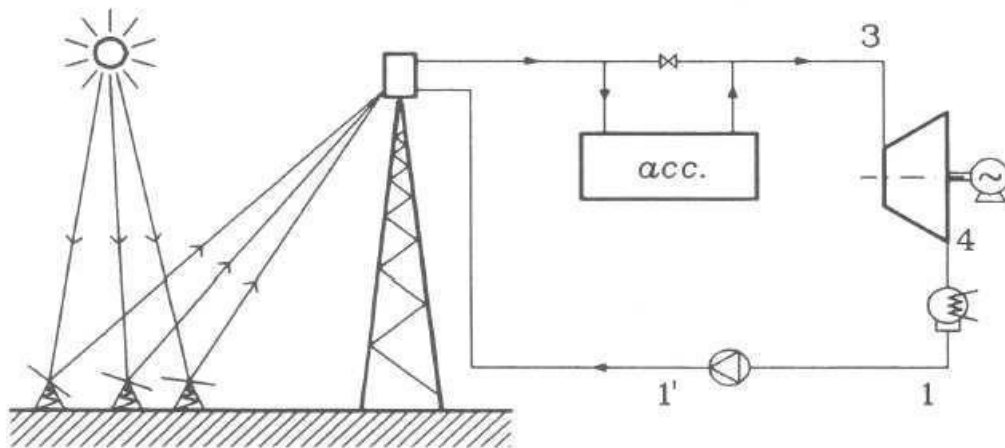


Figura 5. Schema di funzionamento di un CSP.

- Solare termico: non nasce con lo scopo di produrre energia elettrica ma energia termica; può essere sfruttato sia per il riscaldamento che per il raffrescamento. Un tipico esempio è quello di far passare l'acqua all'interno di tubi installati sul tetto dell'abitazione; grazie alla radiazione solare l'acqua si scalderebbe e potrà essere sfruttata immediatamente o conservata in cisterne coibentate, per mantenere il più possibile la sua temperatura.

Una delle tante applicazioni del gruppo sopra citato dove l'energia termica solare è utilizzata come fonte di calore è l'essiccazione di vari prodotti agricoli e industriali.

### 1.3.2. L'utilizzo del solare nella storia

Storicamente l'uomo ha sempre impiegato l'energia solare per usi quotidiani tipo accendere un fuoco, cucinare, essiccare, far bollire l'acqua o asciugare vestiti.

Tra questi, l'essiccazione è una delle tecniche adoperate per preservare i prodotti agricoli, il pescato e le erbe sin dall'alba dei tempi [9].

Tale tecnica presenta numerosi vantaggi tra cui preservare l'aroma, i nutrienti e la qualità del prodotto, migliorarne l'apparenza, estenderne la durata utile per il consumo e ridurre l'ingombro.



La rimozione di umidità tramite essiccazione può inoltre evitare che muffa e batteri di coltivazione rovinino la derrata.

Oltre al settore agricolo, il processo di essiccazione è largamente diffuso nella produzione di legna, dove essiccare assi di legno permette di rimuovere condensa prima di ulteriori lavorazioni.

Per non parlare del settore industriale, dove l'essiccazione è uno dei processi fondamentale nella produzione di prodotti chimici, tessili, farmaceutici, cemento e cibo.

Da questo punto di vista è corretto dire che l'ambito industriale e quello domestico fanno affidamento ai combustibili convenzionali e all'energia solare per i processi di essiccazione.

#### **1.4. DEFINIZIONE DI ESSICCATORE SOLARE**

Al fine di ridurre i costi operativi e contrastare i problemi ambientali relativi all'utilizzo di combustibili fossili, è possibile adoperare sistemi innovativi di cottura ed essiccazione che utilizzano l'energia solare, ossia gli essiccatori solari.

Un essiccatore solare è essenzialmente un sistema che permette di essiccare senza bruciare legna o derivati della benzina.

Questo metodo prevede tre tipi di trasferimento di calore: irraggiamento tramite radiazione solare, convezione dall'aria ambiente alla superficie del prodotto e conduzione dalla superficie del prodotto all'interno dello stesso [9].

Di conseguenza, la differenza di temperatura che si viene a creare tra l'aria ambiente e la superficie del prodotto determina la differenza di pressione superficiale che induce la rimozione di umidità dal prodotto considerato tramite evaporazione superficiale.

In virtù dei processi sopra descritti, è opportuno che l'essiccatore sfrutti il più possibile la radiazione diretta del sole orientandolo spesso (circa ogni dieci minuti) in direzione del sole per bilanciare l'effetto della rotazione terrestre e adoperando sistemi che permettano di accumulare il calore conferito dalle radiazioni solari anche in condizioni atmosferiche non ottimali.

Dei sistemi sopra citati, si ricorre principalmente a due tipologie:

- *Sistema esterno all'essiccatore*: ci sono vari prototipi. Un esempio tipico è quello di inserire all'interno dell'essiccatore delle resistenze elettriche alimentate da pannelli fotovoltaici; un'altra possibilità è, invece, includere nell'essiccatore un sistema composto da una pompa che metta in moto un fluido vettore, il quale, accumulando calore all'interno di collettori solari, lo rilascia all'interno dell'essiccatore.  
Questo tipo di soluzione può servire anche ad aumentare la temperatura interna della camera di essiccazione.
- *Sistema interno all'essiccatore*: viene sfruttato un materiale a cambiamento di fase (PCM, dall'inglese "Phase Changing Material").  
Si inserisce il PCM in un'intercapedine ricavata tra due pentole concentriche; durante la fase di riscaldamento questo materiale accumula calore latente cambiando di fase. In assenza di radiazione il PCM torna al suo stato solido originario rilasciando calore che viene per la maggior parte assorbito dall'alimento posizionato nella camera di essiccazione: in questo modo l'alimento continua a perdere umidità o perlomeno mantiene un'elevata temperatura.

Il metodo di essiccazione tradizionale risulta quindi relativamente semplice e a basso costo dato che non è necessario utilizzare combustibili.

#### **1.4.1. Perché utilizzare un essiccatore solare**

La costruzione o l'acquisto di un essiccatore solare in un paese del primo mondo non ha particolare rilevanza dal punto di vista economico, in quanto:

- Non ci sono problemi nel cuocere cibi con un banale forno elettrico;
- Con la medesima cifra di acquisto di un essiccatore solare si può comprare abbastanza combustibile da cuocere cibi per svariati mesi; ha però un profondo significato se visto nell'ottica di un futuro prossimo dove i combustibili tradizionali potrebbero scarseggiare.

Il discorso varia, invece, se consideriamo paesi in via di sviluppo, specialmente quelli con medie di radiazioni solari molto elevate durante l'anno, nei quali si verificano le condizioni per un uso efficace e conveniente di un essiccatore solare:

- Laddove la reperibilità dei combustibili tradizionali può essere limitata per costo e disponibilità, un essiccatore funzionante rappresenterebbe un investimento a lungo termine sensato in quanto costituirebbe una alternativa valida ed economica ai combustibili fossili.
- L'abbondanza di radiazioni solari dirette per gran parte del giorno durante l'anno, combinata all'uso di sistemi di accumulo del calore come i PCM (reperibili relativamente a basso costo), permetterebbe un uso frequente ed efficiente dell'essiccatore tale da costituire una delle principali risorse di sostentamento in ambito domestico.

#### **1.4.2. Limiti e possibilità di sviluppo:**

A dispetto di quanto detto sopra, il processo stesso è fortemente dipendente dalle condizioni atmosferiche e dal meteo, in particolare dalla intensità di radiazione solare disponibile, dall'umidità relativa esterna e dal vento: non è raro che il processo venga interrotto a causa di pioggia, cielo nuvoloso o altre condizioni avverse. Tali fattori sono incontrollabili e causano una essiccazione inefficiente, la quale a sua volta è alla base di altri problemi come tempistiche di processo molto lunghe, prodotti bruciati o attacchi batterici.

Ulteriori svantaggi, legati principalmente alla cottura/essiccazione a cielo aperto, sono l'esigenza di ampi spazi aperti per sparpagliare i prodotti da essiccare e l'esposizione a varie impurità durante l'essiccazione come polvere, acqua piovana, insetti e animali.

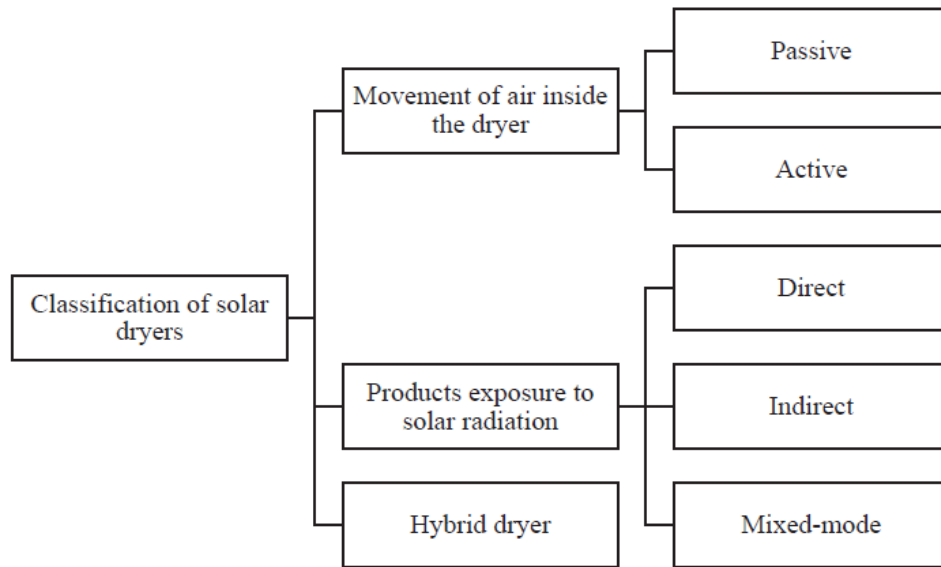
Per rispondere a queste esigenze, nel 1976 Everitt and Stanley svilupparono il primo prototipo di forno solare, una camera di forma cubica con un tettuccio trasparente per risolvere i problemi legati alla cottura a cielo aperto [13].

Da allora numerosi miglioramenti e sviluppi sono stati portati avanti da altri ricercatori sulla base del prototipo di forno solare per giungere alle tipologie di essiccatori oggi conosciute.

### **1.5. CLASSIFICAZIONE E CATEGORIE**

Gli essiccatori solari possono essere essenzialmente classificati in funzione di due aspetti di funzionamento dell'essiccatore, come si può vedere in Figura 6:

- Il tipo di moto del flusso d'aria che si instaura nell'essiccatore.
- L'esposizione dei prodotti alla radiazione solare.



**Figura 6.** *Classificazione degli essiccatori solari.*

### 1.5.1. Movimento del flusso d'aria interno

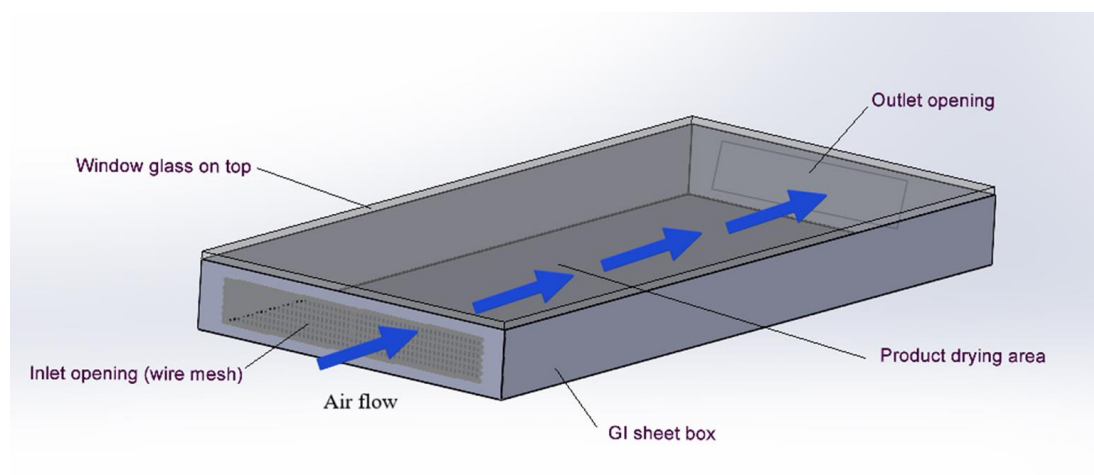
In base al flusso d'aria che si instaura all'interno dell'essiccatore solare, distinguiamo sostanzialmente gli essiccatori in passivi e attivi [9].

- *Essiccatori solari passivi:*

Di semplice realizzazione, l'aria al loro interno si muove naturalmente per effetto camino.

Ne esistono diversi modelli, un esempio indicativo è quello di Figura 7, ossia un forno a scatola aperta utilizzato per essiccare il raccolto agricolo in piccole quantità ad una temperatura compresa tra i 40 e i 50° C.

Il forno è composto da materiali di facile reperibilità, ossia lamiere di metallo galvanizzato, vetro per finestre e lana di vetro.



**Figura 7.** *Forno solare passivo a scatola.*

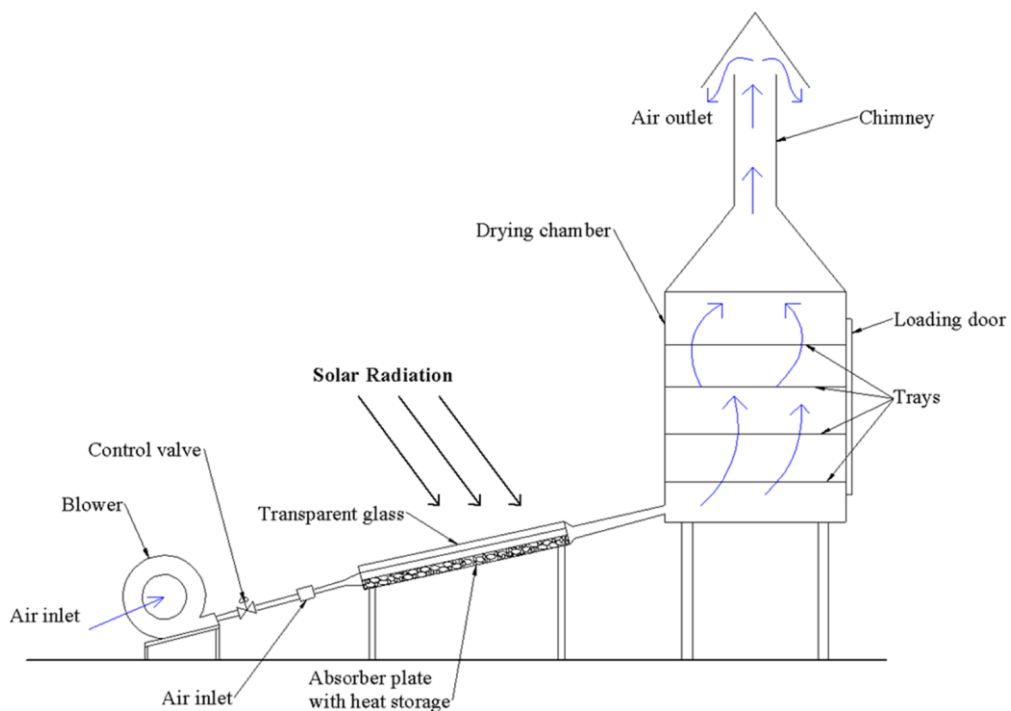
Il vetro funge da copertura per concentrare i raggi solari nella scatola e indirizzarli direttamente sui prodotti da essiccare.

- *Essiccatori solari attivi:*

Diversamente dagli essiccatori passivi, nei quali il flusso d'aria è naturale, negli essiccatori attivi il flusso è agevolato da una o più ventole per incrementare il trasferimento di calore al prodotto. Inoltre, le ventole mantengono costante la portata d'aria nell'essiccatore in modo da stabilizzare la rimozione del contenuto d'acqua dal prodotto, sebbene incrementino i costi operativi richiedendo energia per il loro funzionamento (Figura 8).

### 1.5.2. Esposizione dei prodotti alla radiazione solare

In base al grado di esposizione dei prodotti alla radiazione solare, possiamo distinguere gli essiccatori solari in diretti, indiretti e a modalità combinata [14].



**Figura 8.** Diagramma schematico di un essiccatore solare attivo.

- *Essiccatori solari diretti:*

I prodotti da essiccare sono posti dentro una camera di essiccazione ed esposti direttamente alla radiazione solare come in Figura 9.

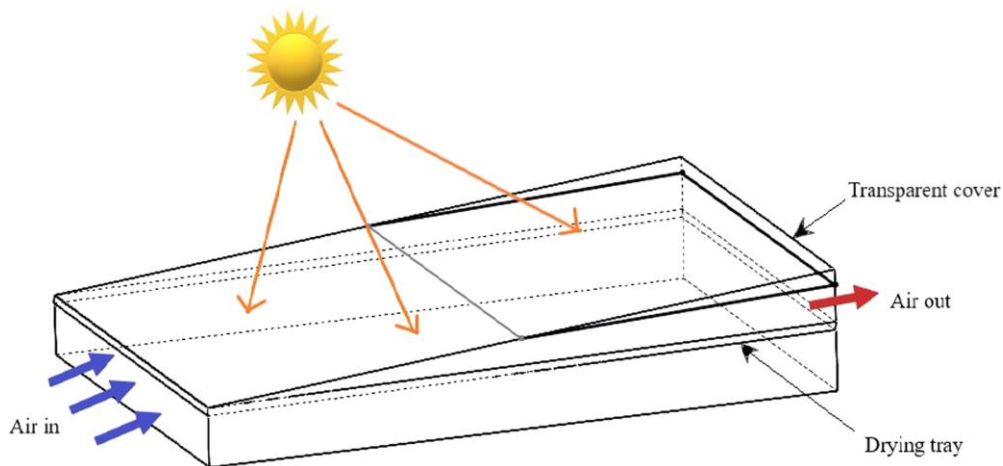
I prodotti essiccati tramite essiccatori solari diretti potrebbero presentare una qualità inferiore a causa di essiccazione insufficiente oppure surriscaldamento dovuto all'esposizione diretta ai raggi solari.

- *Essiccatori solari indiretti:*

La radiazione solare incidente è raccolta da un collettore solare separato il quale a sua volta riscalda l'aria all'interno della camera.

L'aria riscaldata a sua volta attraversa la camera di essiccazione per rimuovere il contenuto d'acqua dai prodotti [15].

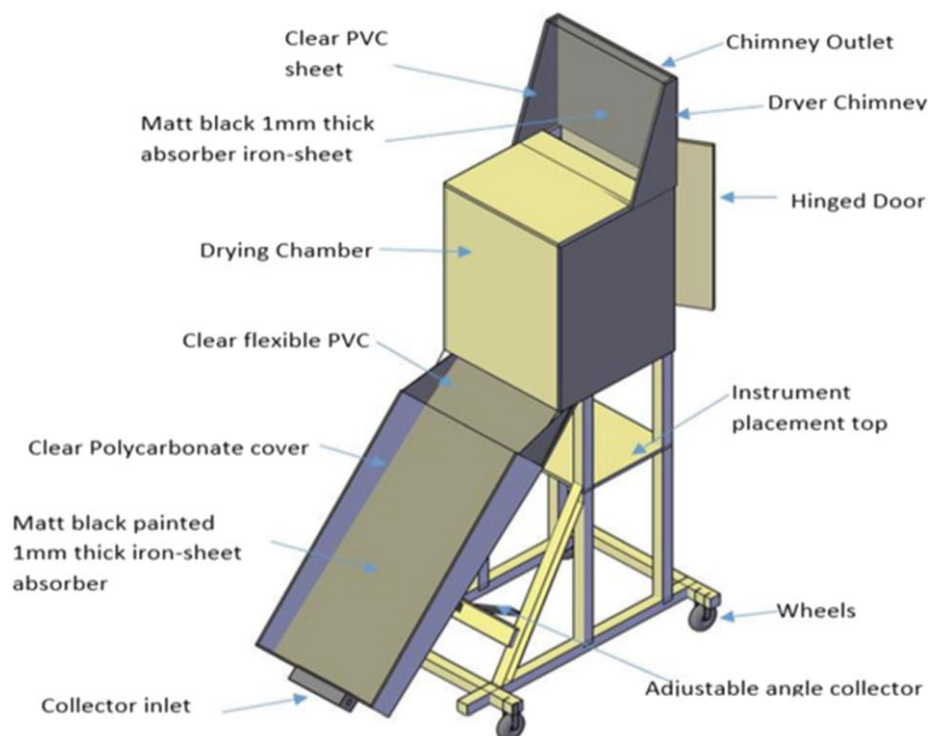
La camera è composta di materiale solido opaco che impedisce l'esposizione diretta ai raggi solari dei prodotti.



**Figura 9.** Essiccatore solare diretto.

Un esempio di essiccatore solare indiretto è riportato in Figura 10, il quale consiste in un collettore solare flessibile composto da una copertura trasparente in policarbonato e da un assorbitore costituito da una lamiera metallica, una camera di essiccazione con molteplici vassoi di appoggio e un camino con una piastra assorbente metallica per essiccare spicchi di mele spessi 2,5 mm.

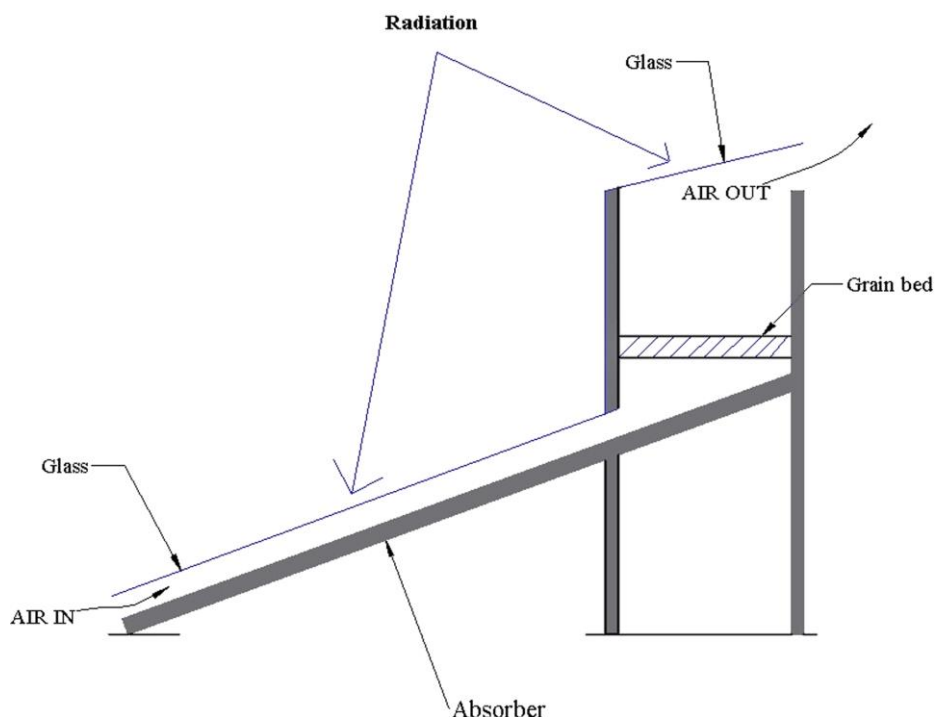
- Essiccatori a modalità combinata:  
A differenza delle modalità precedenti, i prodotti sono esposti sia direttamente sia indirettamente alla radiazione solare.



**Figura 10.** Essiccatore solare indiretto.

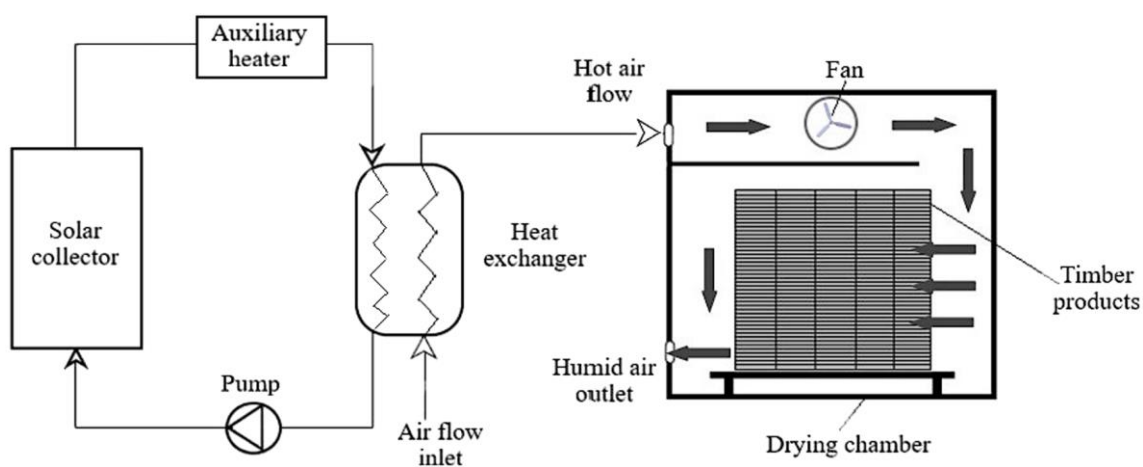
Come mostrato in Figura 11, l'essiccatore comprende un collettore o assorbitore solare e una unità di essiccazione: in questo modo la radiazione solare viene raccolta contemporaneamente sia dal collettore sia dall'unità dove sono posti i prodotti tramite un vetro trasparente che funge da copertura.

L'aria passante nel collettore solare viaggia attraverso l'unità di essiccazione prima di uscire mediante il camino posto sulla sommità della camera per mezzo della circolazione naturale. In questo modo il prodotto scambia calore sia con l'aria calda proveniente dal collettore sia dalla radiazione diretta.



**Figura 11.** Essiccatore solare a modalità combinata.

- Essiccatori solari ibridi per altri fattori:  
I essiccatori possono differire anche in base ad altri fattori come il materiale di costruzione, la progettazione della camera di essiccazione o la presenza di sistemi ausiliari. Per quanto riguarda la progettazione della camera è possibile distinguere tra camera a tunnel, a forma parabolica e altre ancora. Inoltre, gli essiccatori solari ibridi possono incanalare ulteriore energia da altre fonti (ad esempio elettrica, da biomasse etc.) o utilizzare sistemi di accumulo energetico (accumulo termico tramite PCIM per citarne uno) per favorire il processo di essiccazione (Figura 12).



**Figura 12.** Modello schematico di essiccatore solare ibrido per la rimozione di umidità nella legna.

## 2. PROGETTAZIONE DI UN ESSICCATORE SOLARE

A dispetto di quanto il numero di modelli e prototipi di essiccatore in circolazione faccia pensare, non è semplice progettare e realizzare un essiccatore in grado di raggiungere temperature opportune con ridotti tempi di essiccazione utilizzando materiale economico e riciclato.

Detto ciò, in questo elaborato viene proposto un prototipo con buona efficienza termica come dimostrato dai dati sperimentali. Lo sviluppo di tale prototipo è stato supportato in parte da una specifica analisi numerica realizzata tramite un software di modellazione fluidodinamica.

### 2.1. PREMESSA

Il lavoro svolto in questa tesi parte dallo studio del “Newton Solar Oven 2.0”, realizzato in precedenza da tecnici e studenti del Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche dell’Università Politecnica delle Marche.

Il forno solare considerato nel lavoro si basa su un progetto dell’Ing. Muccioli [16], autore di un modello in grado di garantire buone prestazioni termodinamiche e semplice realizzazione ed utilizzo.

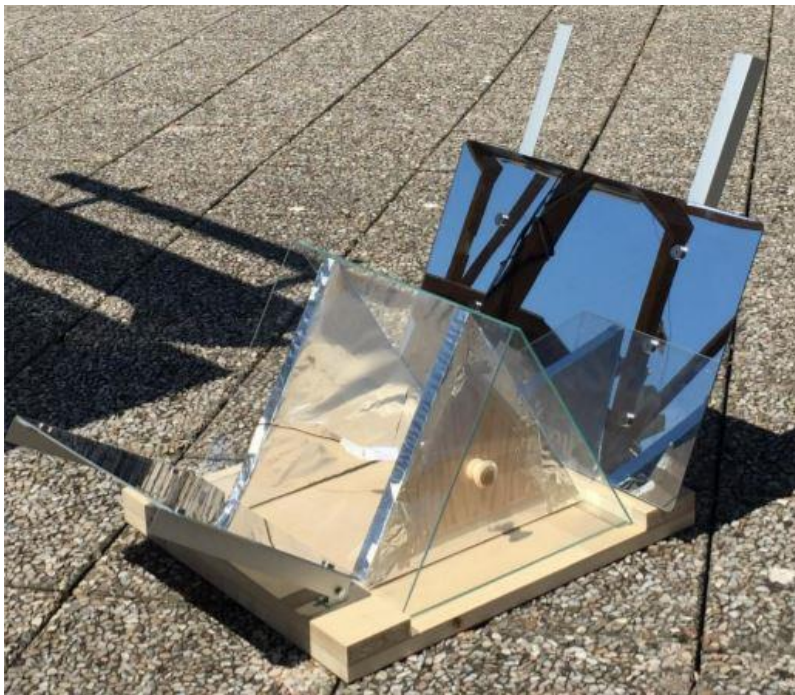
Partendo dal forno sono state apportate una serie di modifiche e interventi con lo scopo di ottenere un essiccatore solare, realizzando così il “Newton Solar Dryer”.

#### 2.1.1. Newton Solar Oven 2.0

Il forno è composto principalmente da una camera di cottura autoportante e degli specchi che riflettono i raggi solari all’interno della camera.

La camera di cottura è isolata da due sportelli laterali in legno, rivestiti con uno strato sottile di alluminio e da due lastre in vetro che compongono un prisma a base triangolare.

Il nome del forno deriva proprio da questa forma, che ricorda il prisma di Newton, con il quale lo scienziato inglese studiò la rifrazione della luce e il relativo spettro luminoso del visibile.

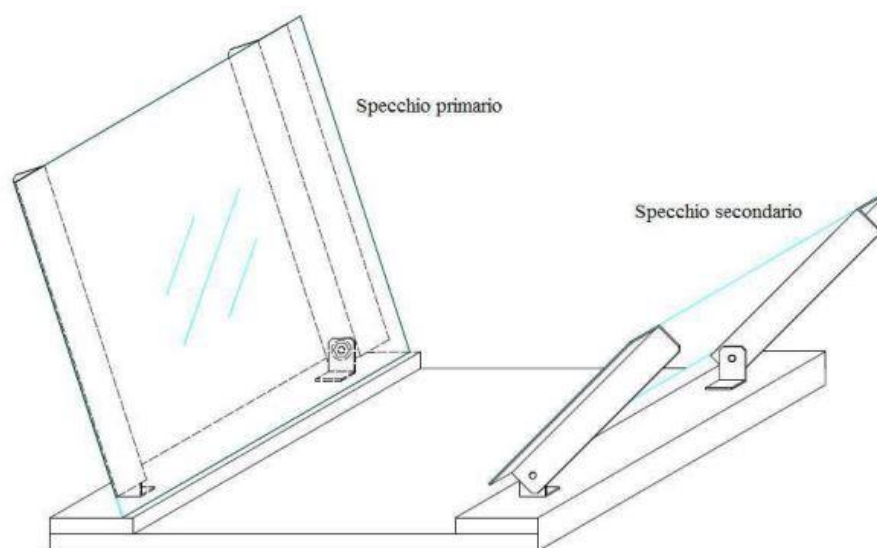


**Figura 13.** Vista generale del Newton Solar Oven 2.0

La particolarità di questo forno è di essere autoportante: i pezzi non sono fissati alla base ma sono appoggiati; in questo modo risulta poco ingombrante e quindi facile da trasportare quando non è assemblato.

Un gradino posto alla base dei vetri impedisce loro di scivolare, permettendo una configurazione stabile a regime.

I vetri utilizzati non sono comuni, sono vetri extrachiaro, scelti in quanto hanno un coefficiente di trasmissione maggiore rispetto agli altri (float), quindi delle prestazioni migliori.



**Figura 14.** Ritratto schematico della posizione degli specchi a regime.

Il fulcro del prototipo è la camera di essiccazione, realizzata in modo tale da far riflettere al suo interno i raggi solari e conseguire uno scambio di calore più efficiente.

Oltre che dalla base e dai vetri, questa è delimitata dagli sportelli laterali che hanno forma di triangolo isoscele e forniscono l'appoggio verticale ai vetri laterali.

Gli sportelli hanno la particolarità di essere in legno rivestito da uno strato sottile di alluminio, il quale riflette all'interno della camera di cottura eventuali raggi solari diretti verso gli sportelli laterali e diminuire la dispersione di radiazione.

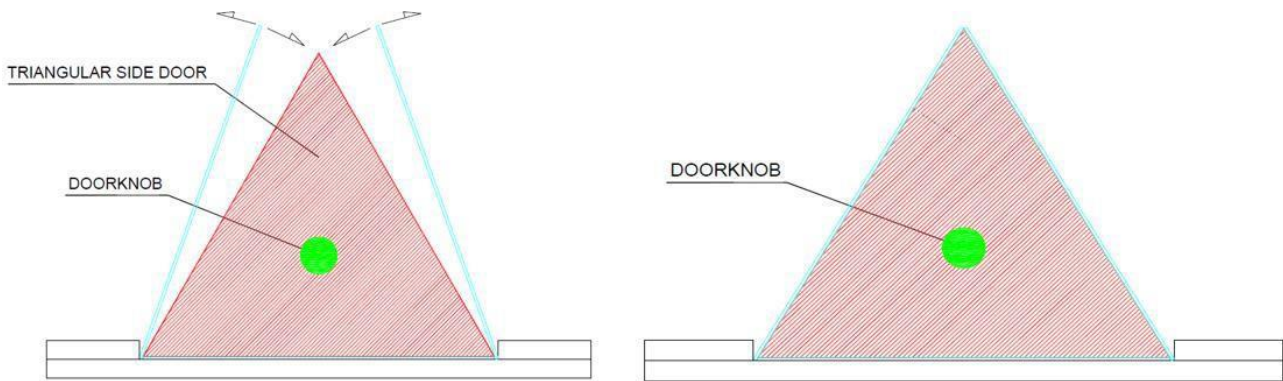


**Figura 15.** Sportelli laterali triangolari rivestiti dallo strato di alluminio.



Il film di alluminio evita anche che il vapore penetri e condensi all'interno degli sportelli di legno, precludendone le capacità di isolamento.

Agli sportelli sono state applicate delle maniglie per facilitare la loro rimozione, in questo modo mentre il forno è in funzione è possibile rimuovere uno sportello per controllare la cottura degli alimenti senza aprire del tutto la camera di cottura, mantenendo buona parte del calore all'interno del volume delimitato dai vetri. Peculiarità di questo sistema di chiusura è la possibilità di variare a piacimento il volume della camera di essiccazione in modo da adattarsi alle esigenze di cottura del prodotto.

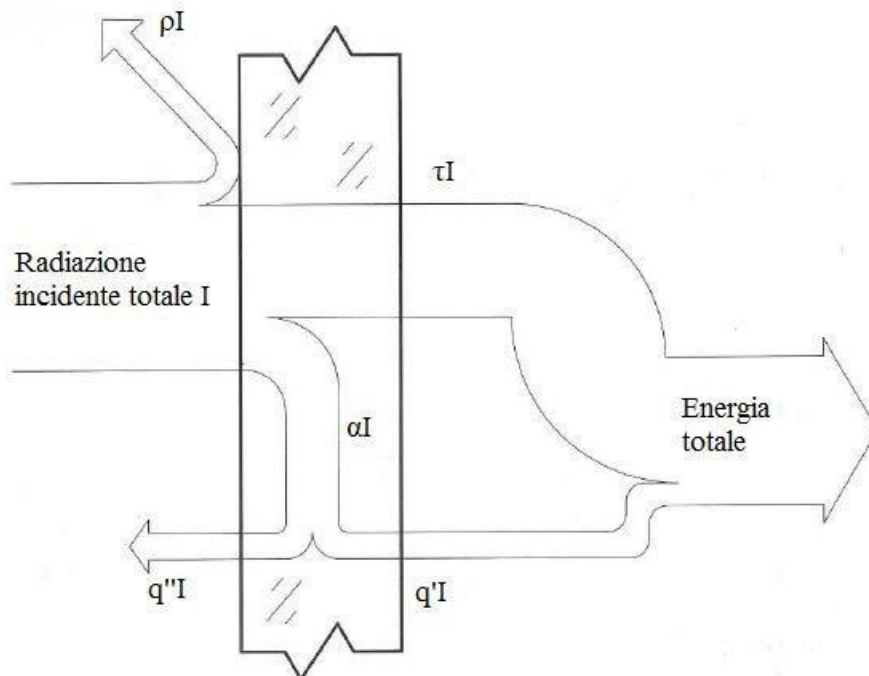


**Figura 16:** Vista laterale del NSO (sportelli con maniglie).

I raggi solari devono essere convogliati all'interno della camera di cottura attraversando i due vetri.

Affinché questo avvenga si utilizzano due specchi primari, posizionati di fronte al sole e due specchi secondari, che hanno il sole alle loro spalle.

In fase di funzionamento gli specchi primari vengono fissati mediante un sistema a slitta sui bracci principali, mentre gli specchi secondari mediante dei magneti, così da poter essere facilmente rimossi in fase di trasporto.



**Figura 17.** Energia totale in ingresso attraverso il vetro.

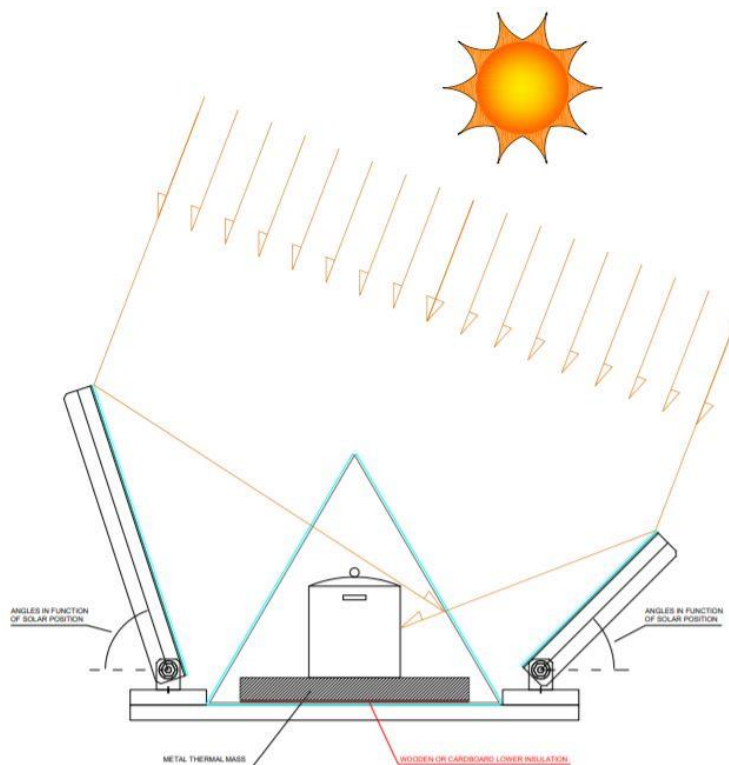
Per massimizzare l'efficienza si sono utilizzati specchi in Polimetilmetacrilato, più comunemente conosciuto come Plexiglass, un materiale molto efficiente, ma soprattutto facilmente reperibile da oggetti rimasti inutilizzati.

Gli specchi in plexiglass sono da preferire non solo per ragioni di costo, ma anche per una questione di sicurezza, in quanto un forno solare viene utilizzato all'aperto e una folata di vento potrebbe rimuovere gli specchi.

L'impiego del plexiglass garantisce un bassissimo rischio di rotture e di infortuni, oltre a proprietà riflettenti migliori dei comuni specchi in vetro (coefficiente di riflessione di circa 90%).

I bracci di sostegno degli specchi sono stati realizzati con un profilo in alluminio, così da garantire allo stesso tempo resistenza meccanica e leggerezza.

I bracci vengono poi fissati a delle staffe mediante delle manopole, in modo da poterli posizionare correttamente nell'inclinazione più adatta per indirizzare i raggi del sole all'interno della camera.



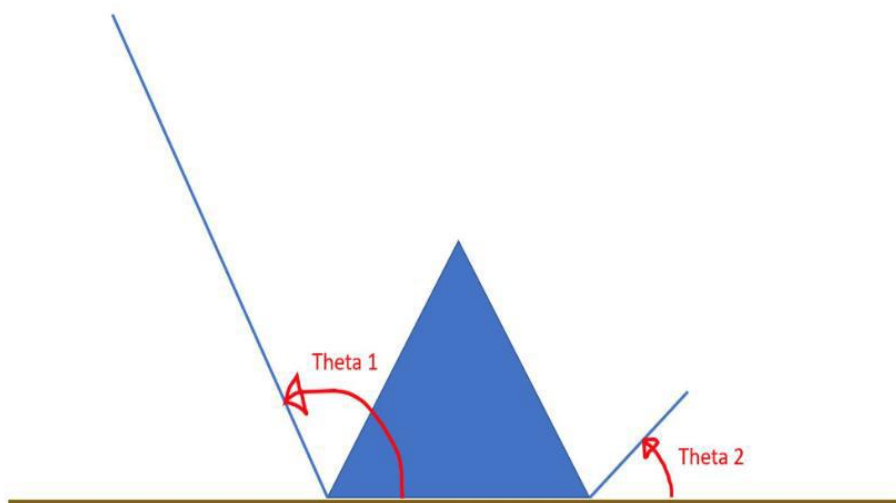
**Figura 18.** Schema generale di funzionamento del NSO.

Lo schema di funzionamento del forno Newton è piuttosto semplice.

Come si può osservare dalla Figura 18 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 al terreno, di conseguenza la radiazione che questo riflette attraverserà due lastre di vetro:

- 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;
- alcuni raggi impatteranno poi una seconda lastra di vetro; questo avviene però 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.



**Figura 19.** Indicazione angoli degli specchi.

Lo specchio secondario si trova invece 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.

### 2.1.2. DIFFERENZE TRA FORNO ED ESSICCATORE

Partendo dall'analisi del prototipo del forno solare sopra presentato, lo step iniziale della progettazione è stato definire i requisiti di funzionamento che un essiccatore deve presentare in confronto a quelle di un classico forno solare.

- Innanzitutto, una differenza nota riguarda la temperatura che deve essere raggiunta all'interno della camera di essiccazione.  
Da una parte un forno punta a raggiungere temperature più elevate possibili nella camera per velocizzare, ad esempio, il processo di bollitura di un liquido trasferendo quantità maggiori di calore allo stesso in minor tempo.  
D'altro canto, un essiccatore non necessita temperature tanto elevate, in quanto la cottura del prodotto non è un fenomeno voluto, piuttosto punta a mantenere un intervallo tra 50° e 60° gradi Celsius nei pressi del prodotto il più a lungo possibile.
- Come accennato sopra, le funzionalità di un forno dovrebbero permettere la cottura di un cibo in tempi molto brevi (per una cottura "naturale"), più o meno un'ora.  
Un essiccatore, invece, non potendo raggiungere temperature più elevate in virtù delle esigenze del processo che si vuole attuare, mira a mantenere l'intervallo sopra citato per un tempo di gran lunga maggiore, compreso tra le 6 e le 8 ore in base al tipo di prodotto considerato.
- Ultima, ma non meno importante differenza è la necessità di un flusso d'aria costante (possibilmente laminare) che attraversi la camera di essiccazione.  
Un essiccatore, a differenza di un forno, deve garantire la rimozione del contenuto d'acqua di un prodotto tramite evaporazione superficiale causata dalla differenza di temperatura tra superficie del prodotto e aria ambiente.  
Il veicolo di espulsione del vapore asportato è proprio il flusso d'aria, il quale si miscela al vapore e fuoriesce per effetto camino dall'apertura soprastante.  
Un forno, non avendo questa esigenza, non ha bisogno di progettare un percorso adatto per il flusso, piuttosto impedisce un flusso d'aria in camera in quanto asporterebbe l'aria riscaldata dalla radiazione solare.

### **2.1.2. Requisiti di essiccazione**

In base alle differenze sopra esposte e alle esigenze precedentemente citate che uno strumento di questo tipo deve poter soddisfare, è possibile stilare un elenco di “requisiti” che un essiccatore deve poter presentare e che sono stati presi in considerazione nella modellazione del prototipo:

- Deve essere adatto per l’essiccazione di ortaggi, frutta, carne e pesce in un ambiente pulito e semplice da utilizzare, quindi abbastanza capiente da contenere modesti volumi di prodotti, ma non ingombrante.
- Deve avere una struttura abbastanza robusta, ma adatta al trasporto per poter essere installato anche nelle zone più marginali o meno agevoli da raggiungere.
- Deve essere stato progettato nell’ottica del rispetto dell’ambiente e dei consumi energetici, garantendo al tempo stesso risultati significativi in termini di qualità dei prodotti ottenuti, sicurezza alimentare e riduzione delle risorse necessarie a tale scopo.
- Utilizzando energia solare per riscaldare l’aria necessaria al processo di essiccazione, deve avere una buona esposizione al sole ed una relativa facilità di calibrazione per mantenere le condizioni più adatte alla concentrazione dei raggi solari.
- Il processo di essiccazione deve avvenire in corrente d’aria calda al riparo dalla radiazione solare, per non degradare le caratteristiche organolettiche dei prodotti trattati.
- La quantità di energia necessaria al suo funzionamento deve essere la più bassa possibile per essere installato in zone senza allacciamento alla rete elettrica.
- Gli essiccatori solari devono funzionare anche in strutture non protette; pertanto, devono poter garantire protezione dei prodotti dall’intervento di animali o insetti attratti da essi.
- Devono essere semplici da utilizzare e avere una ridotta necessità di manutenzione, tali da permettere l’intervento di manutenzione anche a personale non specializzato.
- La camera di essiccazione deve essere dotata di appositi sistemi di sostegno e supporto dei prodotti da essiccare che garantiscano un certo grado di pulizia e resistenza alle alte temperature.
- Gli impianti, nella loro completezza, devono garantire una portata dell’aria idonea all’essiccamento dei prodotti.
- Essendo progettato per rispondere alle esigenze di utilizzo di fonti energetiche alternative ai combustibili fossili e relativa convenienza di costo per l’uso in contesti sensibili, un essiccatore solare deve poter impiegare materiali riciclati, di semplice reperibilità ed economicamente convenienti senza sacrificare la propria efficacia di funzionamento.

Tenendo a mente i requisiti sopra citati, sono state apportate una serie di modifiche ai modelli precedentemente esposti per realizzare il Newton Solar Dryer.

## **2.2. REALIZZAZIONE DEL PROTOTIPO**

Il progetto dell’essiccatore prevede sostanzialmente l’assemblaggio di una struttura di sostegno in legno autoportante, 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 costituire la camera di essiccazione assieme a due sportelli isolanti in legno ai lati, una coppia di vetri extrachiaro in polimetacrilato per concentrare le radiazioni sulle piastre ed isolare parzialmente 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.

Prima della realizzazione finale, il prototipo ha attraversato diverse fasi di modifica tramite un processo di prove ed errori che ha condotto alla sua forma definitiva, comprendente due diverse configurazioni in funzione della base adoperata.

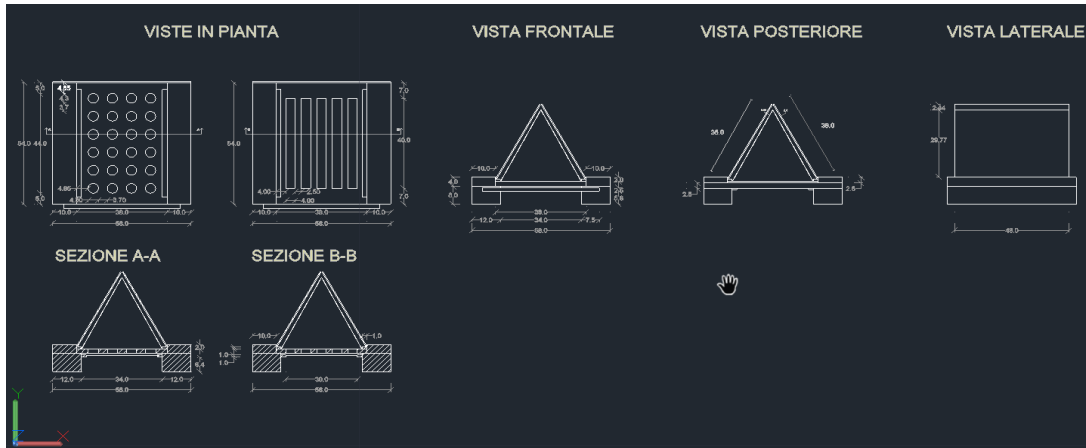
### **2.2.1. Schema funzionale**

Prima della realizzazione tecnica del prototipo, è stato approntato un disegno schematico dei componenti del forno mediante modellazione Autocad comprendente misure delle dimensioni di ciascun pezzo e

orientamenti visivi differenti al fine di convogliare più efficacemente l'idea originale nel prodotto finale (Figura 20).

Il disegno tecnico presenta una visione d'insieme del prototipo in entrambe le configurazioni sopra citate, una con base a fori e una con base a tagli rettangolari.

Tale disegno ha successivamente costituito il punto di partenza per la modellazione virtuale del prototipo nella simulazione fluidodinamica realizzata per convalidare il modello termico emerso dalla sperimentazione.



**Figura 20.** Schema funzionale del prototipo in entrambe le configurazioni.

### 2.2.2. Supporto autoportante in legno

La scelta del sistema di supporto è stata condizionata da due criteri sostanziali:

- La necessità di trovare un compromesso tra resistenza (per resistere alle intemperie e sopportare i carichi combinati di componenti e prodotti di essiccazione) e facilità di trasporto (per spostare agevolmente il prototipo seguendo la radiazione solare).
- L'esigenza di veicolare il flusso d'aria ambiente dalla base dell'essiccatore attraverso la camera di essiccazione (quindi i prodotti da essiccare) fino all'apertura superiore.

Per andare incontro al secondo criterio, si è scelto di progettare un supporto che permettesse una limitata elevazione da terra della base della camera, in modo da garantire un flusso d'aria controllato che non risentisse eccessivamente delle condizioni fluidodinamiche esterne alla camera (Figura 21 e Figura 22).

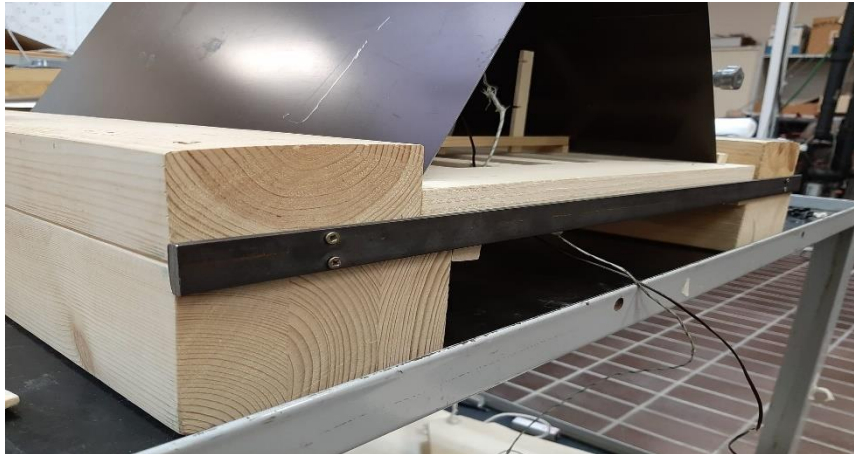


**Figura 21.** Vista frontale dell'essiccatore con trave di supporto in alluminio e lastra di controllo del flusso d'aria.

La scelta è ricaduta quindi su due coppie di blocchi in legno massello scartavetrato accoppiati l'uno sopra l'altro da una serie di viti disposte lungo la dimensione preponderante

Fissando due listelli rettangolari in legno lungo la dimensione preponderante, è stato possibile realizzare un appoggio stabile per la base della camera di essiccazione, a sua volta intercambiabile a seconda del tipo di apertura che si vuole realizzare.

Per garantire stabilità e robustezza alla geometria realizzata, le due coppie sono state bloccate a determinate distanze piane l'una dall'altra da due travi rettangolari in alluminio fissate mediante pomelli e viti ai blocchi in legno.



*Figura 22. Vista posteriore dell'essiccatore con trave di fine corsa della base in alluminio.*

### **2.2.3. Base intercambiabile**

Come già accennato in precedenza, sono state realizzate due versioni distinte della base della camera di essiccazione, una con fori circolari regolari equamente distribuiti su tutta la superficie, l'altra con quattro tagli rettangolari estesi lungo la dimensione preponderante (Figura 23).

La scelta della doppia configurazione è dovuta ad esigenze sperimentali: le due versioni sviluppano due modalità diverse di ingresso del flusso d'aria, per cui hanno permesso un confronto efficace nell'analisi dei moti sviluppati all'interno della camera.

In entrambi i casi la base è costituita da un pannello in legno massello il quale, in fase di funzionamento dell'essiccatore, viene posto sui due listelli rettangolari fissati sui blocchi di supporto. Una delle caratteristiche peculiari del prototipo è di avere un supporto autoportante: i pezzi non sono fissati alla base ma sono appoggiati; in questo modo risulta poco ingombrante e quindi facile da trasportare quando non è assemblato.



*Figura 23. Realizzazione della base nelle sue due versioni.*

Il blocco superiore di ciascuna delle due coppie di supporto ha due funzioni, quella di sorreggere i bracci di sostegno degli specchi e quella di bloccare lo scorrimento dei vetri appoggiati sopra le piastre metalliche. Risulta importante notare che l'altezza da terra della camera di essiccazione è stata studiata per controllare la portata d'aria in ingresso, in quanto una velocità elevata causerebbe un ricambio d'aria eccessivo nella camera con conseguente fuoriuscita del calore dalla camera di essiccazione. Per prevenire l'insorgere di flussi d'aria turbolenti in ingresso nella camera in caso di condizioni climatiche avverse (ad esempio con forti raffiche di vento) è stata applicata una lastra fine scorrevole in legno al di sotto della base sorretta da una coppia di listelli: regolando il suo inserimento, è possibile limitare parzialmente la portata d'aria in ingresso (Figura 24).



*Figura 24. Sistema di supporto munito di lastra regolatrice sotto la base.*

#### **2.2.4. Piastre di assorbimento**

Fulcro del sistema di assorbimento della radiazione solare sono le piastre collettrici, due lastre metalliche nere appoggiate l'una sull'altra caratterizzate da una forte conduzione termica in modo da raggiungere velocemente temperature elevate una volta esposte al sole e trasferire calore all'interno della camera di essiccazione (Figura 25).

Le due piastre sono fissate l'una all'altra all'estremità superiore tramite bulloni e dadi per impedire lo scorrimento.

Un sistema di specchi regolabili permette di concentrare le radiazioni solari sulle piastre, in modo da sfruttare sia la radiazione solare diretta (l'esposizione al sole vera e propria) sia la radiazione solare riflessa ottenuta deviando i raggi solari per mezzo degli specchi (Figura 26).



*Figura 25. Piastre collettrici appoggiate l'una sull'altra.*

In fase di funzionamento, una delle piastre è esposta direttamente al sole, l'altra invece, dovendo sorreggere la prima e fornire una copertura alla camera di essiccazione, riceve soltanto la frazione riflessa della radiazione solare mediante gli specchi dedicati.

Risulta dunque inevitabile lo stabilirsi di un gradiente termico tra le due piastre, sebbene dalle rilevazioni sperimentali sia emerso che in condizioni di regime questo non superi i 15° di differenza.

Dai risultati sperimentali è emersa inoltre la presenza di ulteriori gradienti termici insiti a ciascuna piastra: uno trascurabile (tra i 3 e i 5 gradi) tra l'asse baricentrico verticale della piastra e i lati della stessa ed uno relativamente marcato in direzione verticale tra estremità superiore e inferiore della piastra.

L'entità di quest'ultimo gradiente, che supera i 20 gradi tra estremità superiore e centro della piastra, è in parte giustificata dall'ombra proiettata alla base della piastra dall'ingombro dei vetri anteriori, ma potrebbe suggerire che il flusso d'aria interno alla camera (più caldo alla sommità della camera) contribuisca al riscaldamento delle piastre stesse.

Per permettere l'instaurarsi dell'effetto camino all'interno della camera di essiccazione, lungo le estremità a contatto delle piastre sono posti dei distanziatori in cartoncino in modo da garantire un'apertura minima per l'asportazione dell'umidità (0,4 mm).



**Figura 26.** Vista della piastra anteriore con bracci di supporto specchi.

### 2.2.5. Sportelli isolanti

Per indirizzare il flusso d'aria verso l'uscita superiore ed impedire la fuoriuscita di calore dalla camera di essiccazione, due sportelli triangolari in legno massello di abete sono posti ai lati delle piastre collettrici (Figura 27).



**Figura 27.** Vista degli sportelli con relativo sistema di blocco.



Questi non hanno funzione portante per vetri o piastre, ma determinano un isolamento del volume d'aria compreso tra piastre e vetri per facilitare la concentrazione delle radiazioni sulle piastre e il trasferimento di calore a queste.

La tenuta degli sportelli è garantita da un sistema di bottoni e corde passanti da uno sportello all'altro mediante fori ricavati su di essi: tirando le corde e fissandole con i bottoni, l'attrito tra sportelli e vetri è rafforzato e lo scorrimento bloccato.

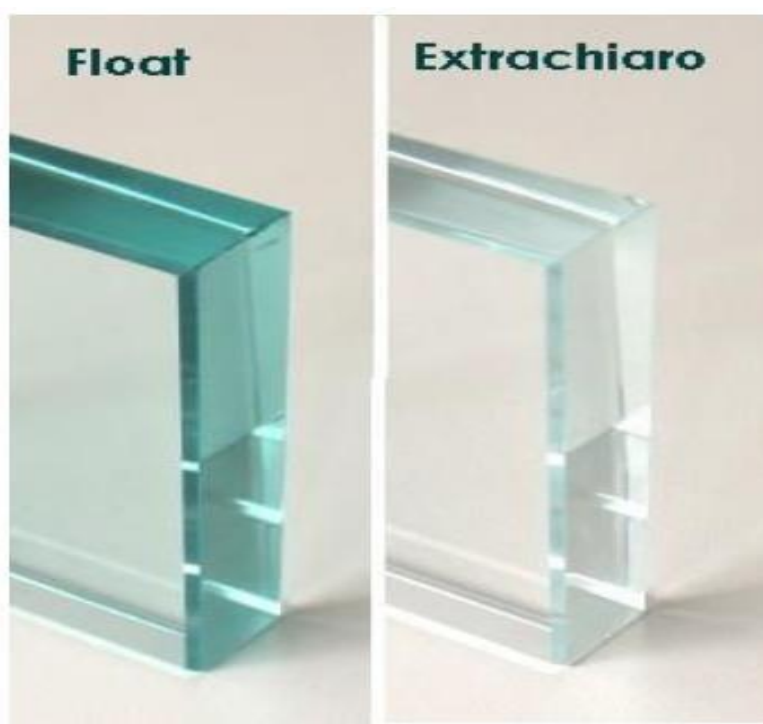
Essendo mobili, gli sportelli danno anche la possibilità di spostare il volume della camera di cottura a piacimento; in questo modo è possibile adattare le dimensioni dell'essiccatore al prodotto che si vuole essiccare.

### 2.2.6. Vetri in polimetacrilato

Il ruolo dei vetri è quello di concentrare la radiazione solare e facilitare il trasferimento di calore alle piastre isolando l'ambiente interno alla camera di essiccazione.

Proprio come le piastre, all'estremità inferiore i vetri fanno perno sul blocco di supporto in legno e sulla base, mentre all'estremità superiore i vetri sono appoggiati l'un l'altro inserendo dei distanziatori in legno che garantiscano una apertura minima necessaria all'instaurarsi dell'effetto camino.

I vetri utilizzati sono una particolare tipologia di vetri in polimetacrilato (plexiglass) scelta per garantire una concentrazione più efficiente della radiazione passante attraverso di essi, ossia i vetri "extrachiaro" (a discapito dei comuni "float").



**Figura 28.** Vetro float comune e vetro extrachiaro a confronto.

Il vetro esiste nella versione trasparente (quella più comune) e nella versione extrachiaro (più costosa) (Figura 28).

La versione trasparente ha una tonalità che tende leggermente al verdastro dovuta alla presenza di ossido di ferro; mediante un particolare procedimento è possibile eliminare il 90% di ossido e ottenere il vetro extrachiaro [17].

La differenza nella colorazione chiaramente si riflette in una differenza di coefficienti di trasmissione, riflessione e assorbimento sia in termini luminosi che energetici (Figura 29).

	$\tau$ [%]	$\rho$ [%]	$\alpha$ [%]	Fattore solare [%]	Trasmittanza [W/mK]
Float comune	86	8	6	91	5,8
Extrachiaro	90	8	2	87	5,8

**Figura 29.** Coefficienti energetici del vetro float comune e del vetro extrachiaro con uno spessore di 4 mm (valori in percentuale) [18].

### 2.2.7. Camera di essiccazione

Il volume compreso tra le piastre collettrici, gli sportelli laterali e la base è definito camera di essiccazione, ossia un prisma a sezione di triangolo equilatero (Figura 30).

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

Essendo racchiusa da piastre opache, la camera non permette l'esposizione al sole dei prodotti da essiccare, evitando reazioni chimico-fisiche indesiderate di questi per eccessivi surriscaldamenti.

L'utilizzo di componenti mobili permette un rapido assemblaggio dell'essiccatore ed un altrettanto rapido spostamento del volume per seguire efficacemente le radiazioni solari nell'arco della giornata.

Una camera di essiccazione composta da componenti mobili comporta però uno svantaggio, ovvero una tenuta stagna imperfetta; occorre considerare il fatto che vetri e piastre sono appoggiati e facilmente rimovibili, di conseguenza il volume non è perfettamente isolato e quindi ci possono essere flussi di calore indesiderati attraverso delle fessure.



**Figura 30.** Vista esterna della camera di essiccazione composta da piastre e sportelli laterali.

Risulta importante notare che la tenuta non è un fattore determinante per l'efficienza dell'essiccatore, in quanto, a differenza di un forno, un flusso d'aria passante nella camera dal basso verso l'alto è necessario al funzionamento.

L'apertura inferiore è determinata dalla configurazione base utilizzata, maggiore nella base a tagli rettangolari rispetto a quella a fori (dimensionalmente tre volte superiore).

L'apertura superiore, invece, deve essere nettamente minore per non disperdere il calore accumulato nella camera, ma non nulla:

dalle prove sperimentali è emerso che una apertura di 0,4 mm permette un riscaldamento più efficiente di una apertura di 4 mm (la configurazione iniziale da noi utilizzata) garantendo comunque l'asportazione del contenuto d'umidità dei prodotti.

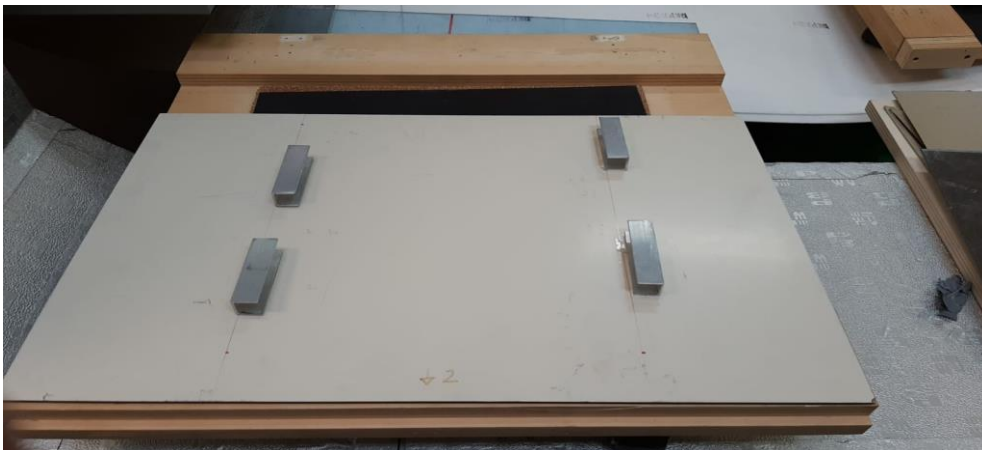
### 2.2.8. Sistema a slitta anteriore

Come già accennato precedentemente, la piastra frontale è esposta alla radiazione diretta del sole, per ottenere la quale è sufficiente ruotare l'essiccatore seguendo la direzione dei raggi solari, ma anche alla radiazione riflessa dagli specchi anteriori, il cui compito è sostanzialmente reindirizzare quei raggi solari che finirebbero a terra verso la piastra (Figura 31).

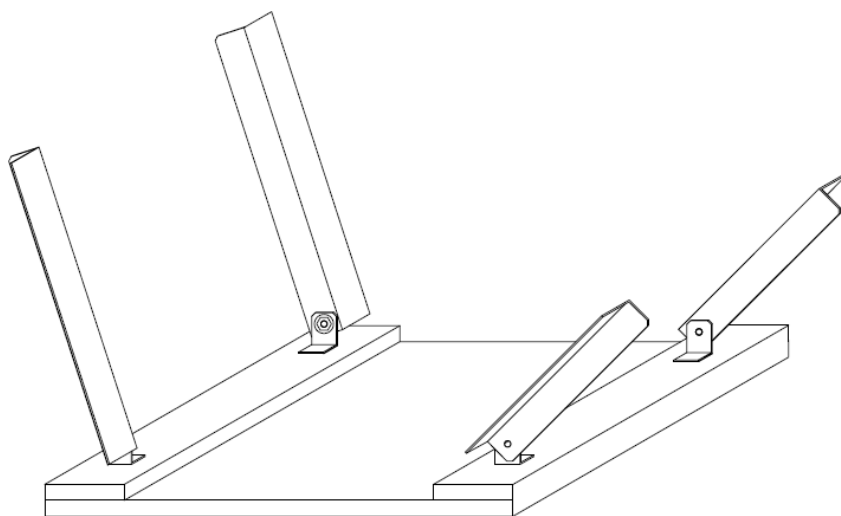
La regolazione degli specchi, necessaria per garantire un efficiente convogliamento dei raggi solari, è effettuata mediante un sistema a slitta su due bracci mobili in profilato di alluminio, i quali possono essere ruotati oppure rimossi con relativa facilità durante le fasi di trasporto dell'essiccatore.

Questi vengono poi fissati a delle staffe mediante viti e bulloni; in questo modo è possibile posizionare correttamente il braccio in base all'inclinazione necessaria allo specchio per indirizzare i raggi del sole all'interno della camera di cottura (Figura 32).

Per favorire il bloccaggio dei bracci di sostegno sono state inserite delle manopole, così da aumentare l'attrito e facilitare il mantenimento della corretta posizione di lavoro.



**Figura 31.** Sistema di aggancio degli specchi anteriori.



**Figura 32.** Sistema di bloccaggio dei bracci di sostegno anteriori (a sinistra); i bracci a destra sono stati rimossi nella configurazione finale.

Questo sistema non è privo di difetti, in quanto le cerniere richiedono un minimo sollevamento rispetto al piano della base tale da proiettare una ombra sulla piastra (con conseguente aggravarsi del gradiente termico verticale sulla piastra stessa).

Il materiale delle lastre fungenti da specchi è lo stesso dei vetri, il polimetacrilato, conosciuto come plexiglass, molto efficiente e facilmente recuperabile da oggetti rimasti inutilizzati.

Gli specchi in plexiglass sono da preferire non solo per ragioni di costo ma anche per una questione di sicurezza: un essiccatore solare viene utilizzato all'aperto e una folata di vento potrebbe rimuovere gli specchi (Figura 33).

L'utilizzo del plexiglass garantisce un bassissimo rischio di rotture e di infortuni, a parità di proprietà riflettenti dei comuni specchi in vetro.



**Figura 33.** Sistema a due specchi anteriori di riflessione.

### **2.2.9. Braccio di supporto posteriore**

A differenza della piastra anteriore, che potrebbe lavorare in condizioni decenti anche in caso di regolazione scorretta degli specchi frontali, il riscaldamento della piastra posteriore dipende interamente dalla radiazione riflessa dai relativi specchi.

Risulta quindi necessario che gli specchi posteriori siano posizionati sempre nella condizione ottimale per convogliare i raggi solari in maniera efficiente, pena l'aggravarsi del gradiente termico tra le due piastre e il dilatarsi dei tempi di essiccazione.



**Figura 34.** Braccio regolabile di supporto con sistema di fissaggio alla base.

Per far fronte a questa esigenza, è stato realizzato un sistema di supporto in profilato di alluminio tale da garantire ampia libertà di regolazione e stabilità in funzionamento (Figura 34).

Particolarità del sistema è la composizione del braccio in più parti, incernierate l'una all'altra tramite viti e bulloni, che permette completa libertà di regolazione in più direzioni degli specchi.

Analogamente ai bracci anteriori, il sistema di fissaggio alla base è costituito da una staffa accoppiata con viti al blocco di legno, in modo da garantire rimozione e montaggio rapidi per il trasporto.

Per conferire maggiore stabilità al sistema, a ciascuna cerniera è stato applicato un anello fine in plexiglass stretto da un dado o una manopola in modo tale da distribuire l'attrito su una superficie del braccio maggiore e permettere la regolazione del momento torcente esercitato dalla vite.

Ulteriore caratteristica del sistema è la modalità di bloccaggio degli specchi: questi, a contatto con due staffe regolabili in profilato di alluminio, sono fissati stabilmente ad esse mediante molteplici coppie di magneti (Figura 35).



*Figura 35. Sistema di bloccaggio degli specchi posteriori.*

### **3. SETUP DEL BANCO DI PROVA**

Impostare un banco di prova è uno step necessario al fine di controllare le condizioni di processo durante l'essiccazione e acquisire i dati sperimentali con cui stilare un modello di funzionamento dell'essiccatore.

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

- un pireliometro;
- un computer munito di software di acquisizione Picolog;
- termocoppie per misurare le temperature dei vari elementi;
- igrometri portatili per la rilevazione dell'umidità ambiente;
- un data logger;
- una bilancia di precisione per la rilevazione del peso dei prodotti da essiccare prima e dopo il processo;
- un sistema di schermatura per il vento.

Gli strumenti di misurazione raccolgono ad intervalli regolari i dati che vengono poi inviati tramite acquisitore al portatile per la visualizzazione grafica in tempo reale. Poiché i test vengono svolti all'aperto, il banco di prova deve ogni volta essere montato e successivamente smontato alla fine delle prove (Figura 36).



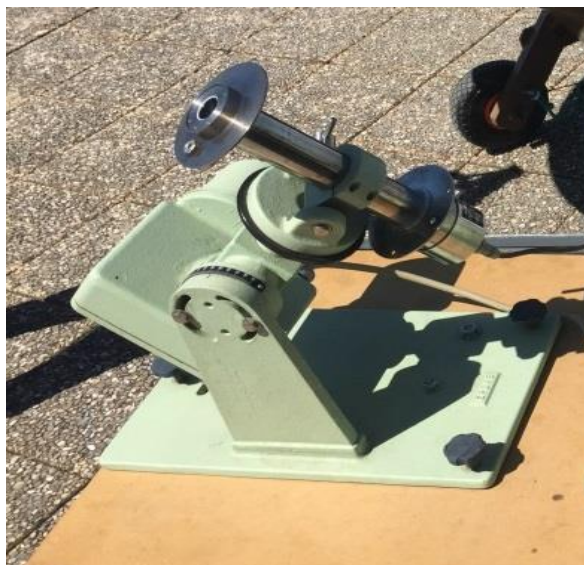
*Figura 36. Assemblaggio del banco di prova standard per le misurazioni.*

### **3.1. PIRELIOMETRO**

Nel corso delle analisi trattate in questo elaborato è stato usato un pireliometro dell'azienda americana fornitrice di attrezzature per l'energia solare chiamata "Eppley Laboratory Inc" e il modello è il "NIP" (Normal Incidence Pyrheliometer).

Sostanzialmente il pireliometro è composto da un corpo nero che, assorbendo la radiazione solare catturata da una lente di precisione, si scalda.

Tramite un sensore si misura in tempo reale la temperatura di questo corpo nero, dalla quale si può risalire alla intensità della radiazione solare incidente, che viene fornita al computer in  $W/m^2$  grazie ad una precisa ed accurata calibrazione dello strumento.



*Figura 37. Pireliometro usato nel corso della sperimentazione.*

Il pireliometro “NIP” incorpora una termopila a filo avvolto alla base del tubo; l’interno 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.

Come si può vedere in Figura 37, la flangia superiore presenta un piccolo foro che consente di allineare lo strumento attraverso la proiezione che si ottiene sulla flangia inferiore.

Il pireliometro è poi montato su un inseguitore solare, che permette allo strumento di inseguire il sole durante l’arco della giornata.

La radiazione atmosferica può essere distinta in due regioni:

- la regione solare, detta anche “delle onde corte”, compresa tra 0.3 e 3  $\mu\text{m}$  di lunghezza d’onda;
- la regione terrestre (detta anche “delle onde lunghe”), compresa tra 4 e 100  $\mu\text{m}$  di lunghezza d’onda.

Il pireliometro si occupa della misura della radiazione ad onde corte, nella quale ricade approssimativamente il 99% dell’energia solare.

Di seguito vengono illustrate le caratteristiche tecniche dello strumento fornite dal costruttore (Figura 38).

Sensibilità	8 $\mu\text{V}/\text{Wm}^{-2}$
Impedenza	200 $\Omega$
Dipendenza dalla temperatura	$\pm 1\%$ tra $-20\text{ }^\circ\text{C}$ e $40\text{ }^\circ\text{C}$ ( $T_{\text{amb}}$ )
Linearità	$\pm 0.5\%$ da 0 a $1400\text{ W}/\text{m}^2$
Tempo di risposta	1 secondo Lunghezza 28 cm
Peso	2.3 kg

**Figura 38.** Caratteristiche tecniche del pireliometro NIP.

### 3.2. TERMOCOPPIE

Una termocoppia è un sensore per la misurazione della temperatura che si basa sull’effetto Seebeck, ossia il 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 nell’ordine dei  $\mu\text{V}$  per Kelvin, a seconda dei materiali usati. Tramite il sistema di acquisizione la differenza di potenziale viene convertita in temperatura ad intervalli regolari di un secondo per la visualizzazione sullo schermo del portatile.

Sono strumenti molto diffusi e utilizzati specialmente nelle misurazioni in laboratorio, in quanto sono economiche, intercambiabili e misurano ampi range di temperatura.

D’altro canto, le termocoppie peccano in precisione, in quanto la loro accuratezza massima non supera il decimo di grado Celsius e sono spesso soggette a fluttuazioni causate da repentine accelerazioni del flusso d’aria.

Le termocoppie usate in quest’analisi sono di tipo T, il cui nome originale era Rame-Costantana. Queste termocoppie possono lavorare nell’intervallo di temperature di  $-250\text{ }^\circ\text{C}$  e  $400\text{ }^\circ\text{C}$  ma il loro funzionamento è eccellente nel range di temperature compreso tra  $-200\text{ }^\circ\text{C}$  e  $200\text{ }^\circ\text{C}$  (Figura 39).

Materiali	Conduttore positivo	Rame
	Conduttore negativo	Rame-Nickel
Temperatura misurata	Uso continuo	Da $-185\text{ }^\circ\text{C}$ a $300\text{ }^\circ\text{C}$
	Breve durata	Da $-250\text{ }^\circ\text{C}$ a $400\text{ }^\circ\text{C}$
Tolleranze	Tra $\pm 0.004$ e $\pm 0.015$ (scostamento in gradi celsius)	

**Figura 39.** Dati tecnici di una termocoppia di tipo T [19].

Dalle nostre misurazioni è emersa la presenza di un gradiente di temperatura verticale molto pronunciato (all’incirca dai 20 ai 40 gradi di differenza) all’interno della camera tra la base e la sommità delle piastre.

Per poter registrare l'instaurarsi del gradiente con un buon grado di affidabilità, è stato realizzato un supporto in legno per posizionare le termocoppie a molteplici altezze o distanze all'interno della camera (Figura 40).



**Figura 40.** Supporto in legno per la misurazione di temperatura a più livelli di altezza.

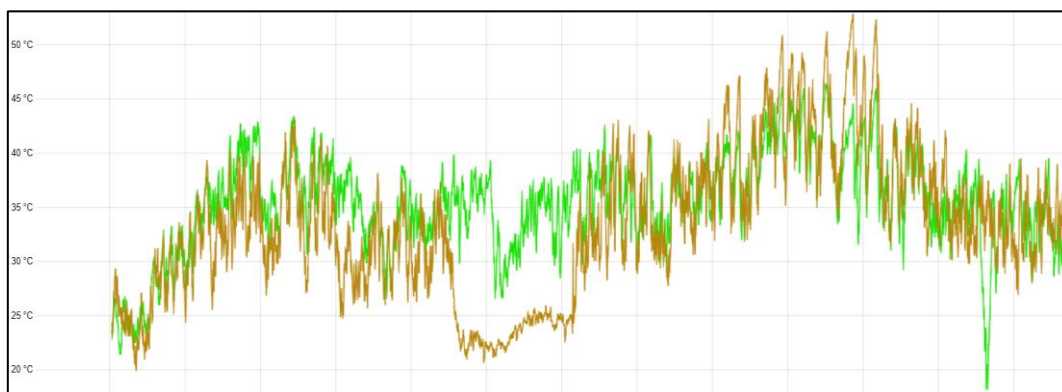
Facendo passare le termocoppie dalle aperture poste alla base dell'essiccatore, queste venivano poi fissate alle dentature realizzate sul supporto mediante del nastro isolante resistente ad alte temperature. Ogni dentatura è posizionata a 5 cm di distanza dalle altre, in modo da poter misurare fino a 20 cm di distanza verticale in linea d'aria (tra 5 cm e 25 cm).

### 3.2.1. Affidabilità delle termocoppie

Se da un lato le termocoppie costituiscono una scelta sensata nel campo di misurazione della temperatura per la loro convenienza e reperibilità, d'altra parte non sono il massimo in termini di affidabilità.

Si potrebbe avere perdita di precisione, ad esempio, se si sottopone la termocoppia a ripetuti sforzi meccanici o se la si espone ad agente corrosivi; per questi motivi è meglio cambiare la termocoppia dopo un certo numero di misurazioni, così da mantenere l'affidabilità sempre ad un buon livello.

Ulteriore causa di incertezza è la fluttuazione della rilevazione causata da repentine folate di vento traducibili in accelerazioni del flusso d'aria in camera: le termocoppie risultano essere fortemente sensibili ai rapidi spostamenti d'aria nella camera, arrivando a registrare oscillazioni di 20 gradi in una manciata di secondi non corrispondenti ad una effettiva variazione di temperatura nella camera stessa (Figura 41).



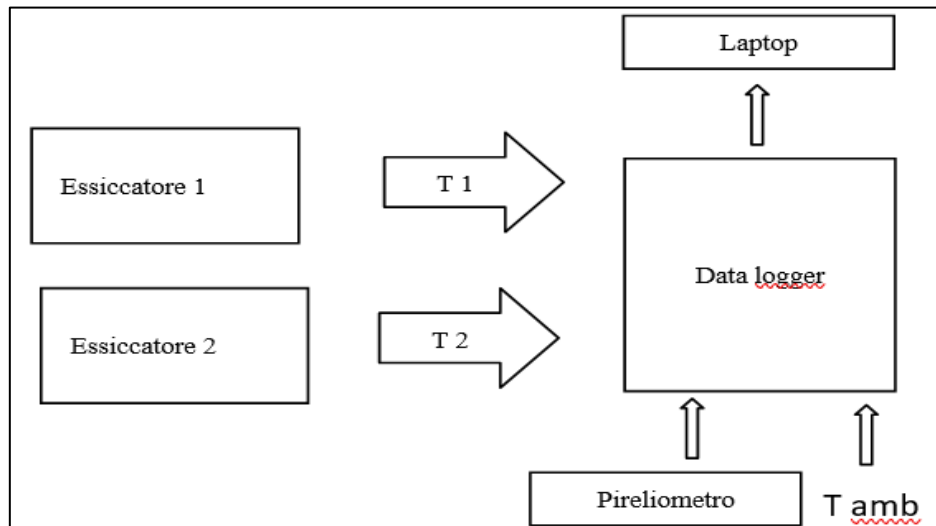
**Figura 41.** Fluttuazioni pronunciate di temperatura rilevate dalle termocoppie in occasione di folate di vento.



### 3.3. COMPUTER E ACQUISITORE

Le termocoppie (con cui si misurano la temperatura ambiente, la temperatura delle piastre, etc.) e il cavo in uscita dal pireliometro (per la misura della radiazione solare diretta) vengono collegate all'acquisitore, il quale traduce campiona i segnali della strumentazione in dati rilevabili dal software di analisi installato sul computer.

La sequenza di funzionamento è riassumibile nello schema visibile in Figura 42.



**Figura 42.** Schema di funzionamento del banco di prova.

Nello schema soprastante sono indicati:

- T1 e T2: Temperature rilevate in ciascun essiccatore (camera di essiccazione e piastre) (°C).
- T amb: Temperatura ambiente (°C).
- DNI: radiazione diretta rilevata dal pireliometro (W/m<sup>2</sup>).

L'acquisitore usato è un prodotto della "Pico Technology", azienda britannica che produce sensori per la diagnostica delle strumentazioni delle automobili; il prezzo è relativamente basso (circa 430 euro) e la risoluzione decisamente buona (Figura 43).



**Figura 43.** Acquisitore con connettori inseriti.

Durante le prove sono stati utilizzati due acquisitori in parallelo, ognuno munito di 8 canali di acquisizione a cui connettere altrettante termocoppie o pireliometri.

Nel caso preso in esame in Figura 43, i canali dell'acquisitore sono stati così configurati:

- CH 1: DNI (radiazione solare);
- CH 2: Tamb (configurato per termocoppia di tipo T);
- CH 3: Temperatura interna camera a 20 cm di altezza;
- CH 4: Temperatura interna camera a 5 cm di altezza;
- CH 5,6,7,8: Non utilizzati.

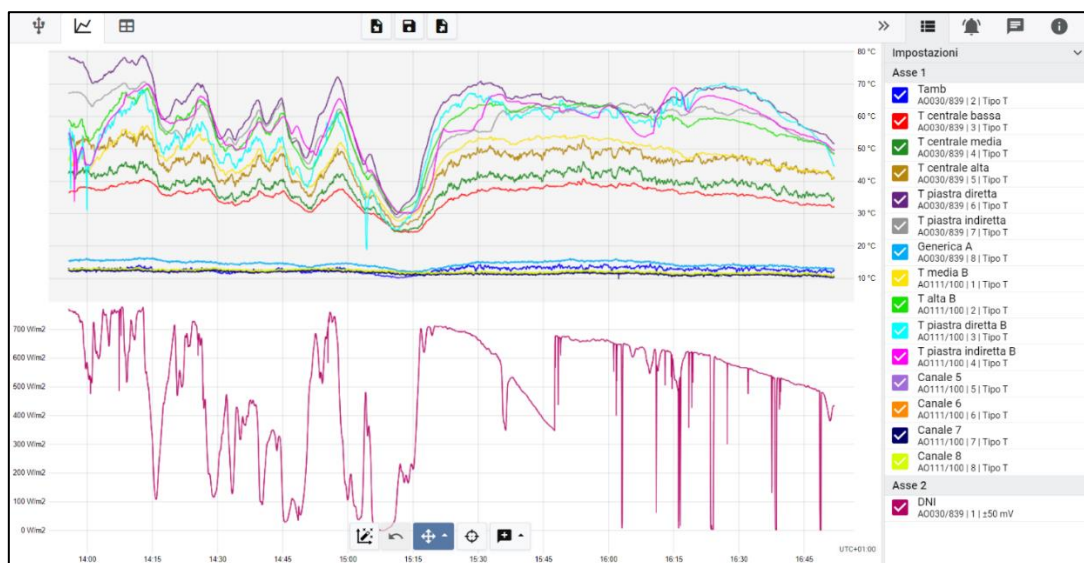
Di seguito vengono riportate le specifiche tecniche degli acquisitori utilizzati forniti dal costruttore (Figura 44).

Numero di canali	8
Incertezza sulla temperatura	$\pm 0.2\%$ e $\pm 0.5\text{ }^\circ\text{C}$
Incertezza sul voltaggio	$\pm 0.2\%$ e $\pm 10\text{ }\mu\text{V}$
Protezione 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

**Figura 44.** Scheda tecnica degli acquisitori utilizzati.

### 3.3.1. Software di acquisizione Picolog

L'acquisitore viene fornito dal suo costruttore (Pico Technology) insieme a uno specifico software per l'utilizzo dello strumento. Tramite questo programma è possibile osservare l'andamento delle temperature in funzione del tempo, il valore della DNI in ogni istante e i vari canali con i rispettivi dati in ingresso in tempo reale con intervalli di acquisizione regolabili (Figura 45) [26].



**Figura 45.** Esempio di grafico di acquisizione di temperatura (sopra) e DNI (sotto) elaborato dal software Picolog.

Terminata la prova, i dati vengono esportati dal programma e studiati su un foglio Excel per essere rielaborati e dove necessario, corretti: nella figura sopra, la DNI presenta evidenti picchi negativi naturali (causati da nuvole passeggero passanti davanti al sole) oppure fuori scala (raggio di sole momentaneamente perso dal pireliometro nel movimento del motore).

Di questi fattori va tenuto conto in fase di analisi selezionando gli intervalli di acquisizione corretti e all'occorrenza trascurando le misure evidentemente fuori scala.

### 3.4. SISTEMA DI SCHERMATURA DEL VENTO

Dato che la maggior parte dei test sperimentali è stata eseguita in una zona notevolmente ventosa (il tetto del dipartimento universitario ad Ancona, Italia), si è reso necessario trovare una soluzione che riducesse l'impatto del vento sulle misurazioni.

Nel caso di un essiccatore, il fattore vento incide notevolmente in quanto causa una repentina accelerazione nel flusso d'aria passante nella camera con conseguente asportazione di calore e riduzione di temperatura all'interno della camera (oltre a far registrare oscillazioni imprevedibili alle termocoppie impiegate).

Per ridurre l'impatto di questa variabile sulle misurazioni, è stato realizzato un sistema di schermatura del vento assemblando dei pannelli in plexiglass su degli appositi sostegni verticali, facili da rimuovere e spostare (Figura 46 e 47).



*Figura 46 e 47. Sistema di schermatura dei forni.*

Un elemento da non sottovalutare è sicuramente la forma dell'essiccatore relativamente alla direzione del vento: in questo caso, il vento viene schermato da due direzioni riducendo l'impatto sulla camera di essiccazione e sugli specchi posteriori (i quali potrebbero perdere stabilità in caso di forti folate dal retro), ma il lato della base non schermato risente comunque di accelerazioni repentine del flusso d'aria.

## 4. PARAMETRI DI VALUTAZIONE

Per valutare le prestazioni dell'essiccatore solare, sono stati presi in considerazione diversi parametri ottenuti dalle rilevazioni analitiche eseguite dal banco di prova sopra impostato.

- Efficienza termica:
  - Tempo e velocità di essiccazione
  - Temperatura del flusso d'aria in camera
  - Umidità relativa ambiente
  - Velocità del flusso d'aria in camera

- Qualità del prodotto essiccato:
  - Qualità sensoriali
  - Dati nutrizionali
  - Capacità di reidratazione

Altri parametri che potrebbero essere presi in considerazione nella valutazione sono le caratteristiche fisiche dell'essiccatore (dimensioni, forma, capacità di carico, superficie di essiccazione, etc.), di cui si è discusso abbastanza in precedenza, e il tempo di ritorno di investimento dell'essiccatore (strettamente legato ai costi dei materiali), il quale nel nostro caso è nettamente irrisorio e quasi nullo (il che rappresenta un grande pregio).

#### 4.1. EFFICIENZA TERMICA

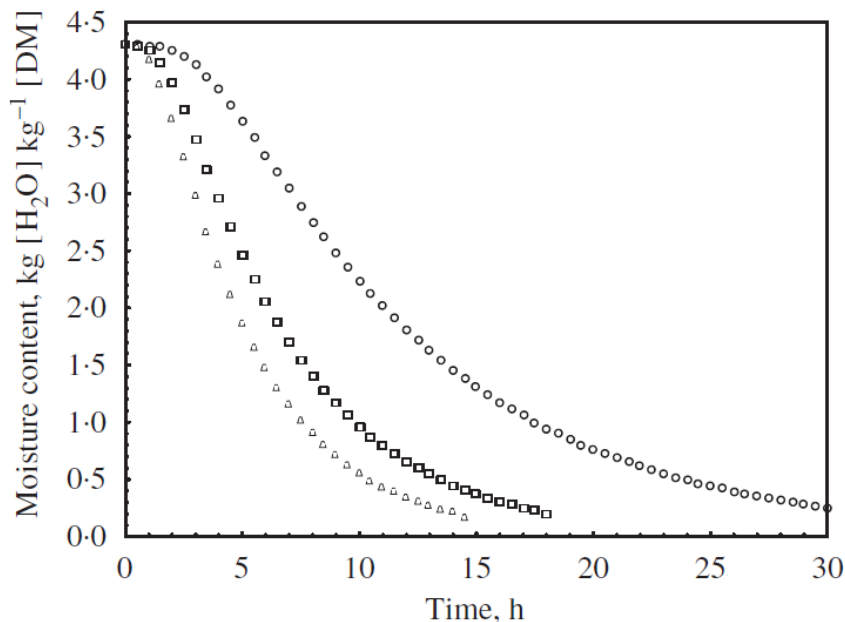
##### 4.1.1. Tempo e velocità di essiccazione

La durata del processo di essiccazione è il parametro più importante da considerare nel valutare 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 in ore o giorni, e include anche il tempo in cui non è disponibile la radiazione solare (tramonto o meteo nuvoloso).

Solitamente temperature più alte in camera velocizzano il processo, ma rischiano di danneggiare il prodotto in colorazione, sapore, aroma o dati nutrizionali se eccessive (sopra i 60 gradi).

Altri modi di accorciare i tempi di processo sono introdurre i prodotti da essiccare in pezzi di dimensioni ridotte (si consideri una banana intera a confronto con pezzi tagliati) oppure aggiungere piccole quantità di reagenti nei prodotti per incrementare le temperature di essiccazione sulla superficie [21].



**Figura 48.** 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  $T = 35^\circ \text{C}$ :  $\circ$ ,  $\varphi = 70\%$ ;  $\square$ ,  $\varphi = 55\%$ ;  $\diamond$ ,  $\varphi = 40\%$  [20].

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 (Figura 48).

#### 4.1.2. Temperatura aria in camera di essiccazione

Incrementare la temperatura nella camera di essiccazione aumenta la velocità di essiccazione in due modi:

- Aumenta la capacità del flusso d'aria di accumulare vapore acqueo (essenzialmente il titolo di vapore).
- Permette al prodotto di scaldarsi maggiormente, incrementando la sua pressione di vapore (quindi la differenza di pressione tra superficie prodotto e aria intorno, accelerando l'asportazione di umidità).

Tuttavia, c'è un limite alla temperatura che si può raggiungere in un essiccatore, dipendente dalla sensibilità termica del prodotto e dal meccanismo di scambio di calore adottato.

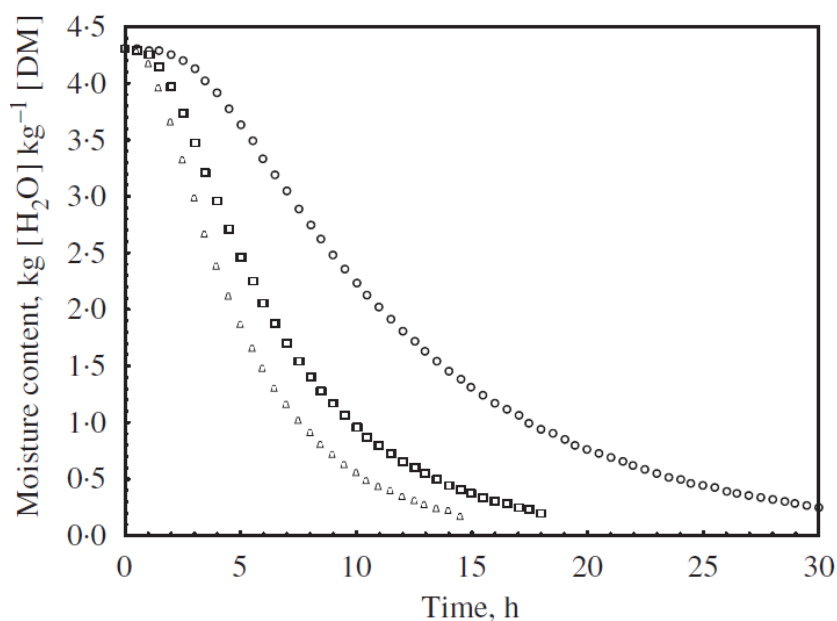
Ad esempio, temperature troppo elevate in camera possono causare danni ai prodotti (bruciature o perdite di elasticità cellulare) o impedimenti al processo di essiccazione (nel caso di frutta e vegetali, si potrebbe sviluppare una scorza dura sulla superficie che trattiene all'interno del prodotto il contenuto di umidità) [21]. 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, un corretto processo di essiccazione richiede temperature in un intervallo tra 45 e 60 gradi a ridosso dei prodotti da essiccare, in modo da coprire le esigenze di gran parte dei prodotti da immettere in camera (Figura 49).

#### 4.1.3. Umidità relativa ambiente

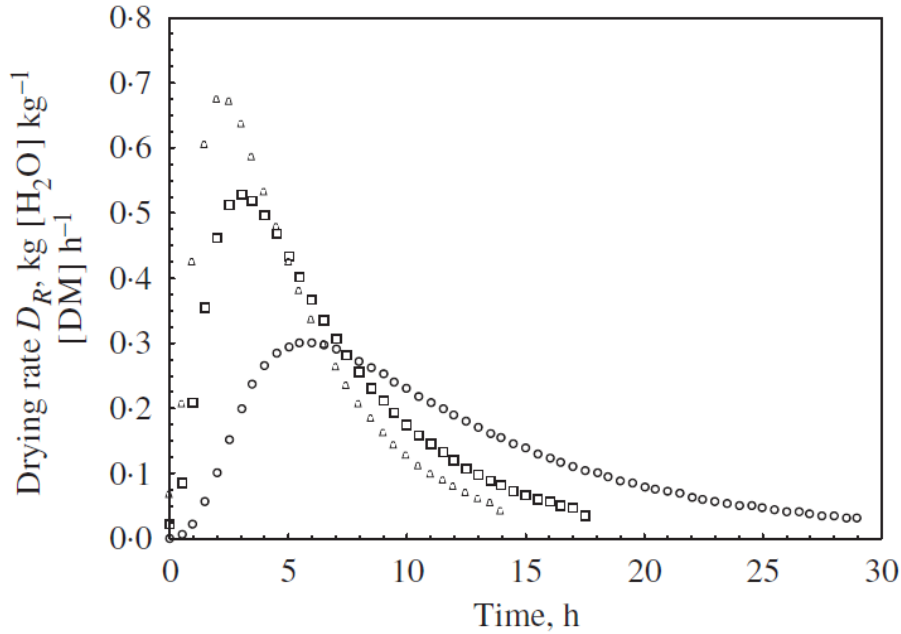
L'umidità relativa del flusso d'aria in ingresso è anch'essa cruciale per il processo di essiccazione.

La capacità dell'aria di trattenere più vapore può essere incrementata sia deumidificando sia scaldando il flusso d'aria (ridurre la sua umidità relativa oppure incrementare il suo titolo di vapore) prima che entri in camera oppure alzando la temperatura nella camera stessa [21].



**Figura 49.** Influenza della temperatura sulla velocità di essiccazione nel tempo a fissate velocità del flusso  $U = 0,2 \text{ m/s}$  e umidità relativa  $\varphi = 40\%$ :  $\circ$ ,  $T = 35^\circ\text{C}$ ;  $\square$ ,  $T = 45^\circ\text{C}$ ;  $\triangle$ ,  $T = 55^\circ\text{C}$  [20].

In generale, minore è l'umidità relativa ambiente, minore è la durata del processo di essiccazione (Figura 50).

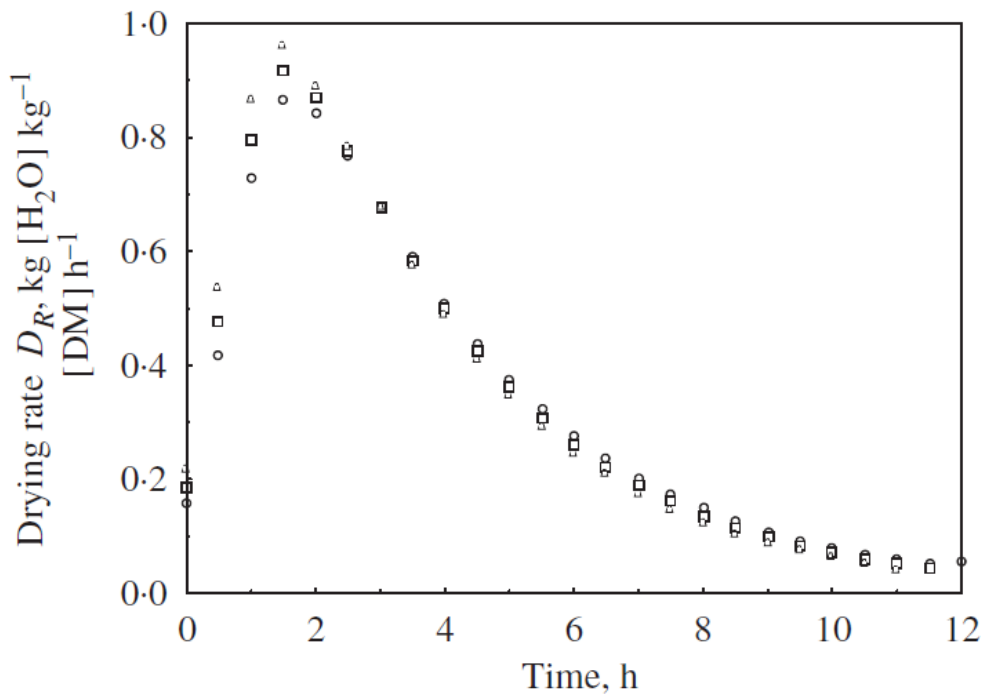


**Figura 50.** Influenza dell'umidità relativa sulla velocità di essiccazione nel tempo a fissate velocità del flusso d'aria  $U = 0,2 \text{ m/s}$  e temperatura  $T = 35^\circ\text{C}$ :  $\circ$ ,  $\phi = 70\%$ ;  $\square$ ,  $\phi = 55\%$ ;  $\diamond$ ,  $\phi = 40\%$  [20].

#### 4.1.4. Velocità del flusso d'aria

La velocità del flusso d'aria è un ulteriore parametro fondamentale che influenza il processo di essiccazione. Una velocità insufficiente implicherebbe una stagnazione del flusso d'aria 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 [21].

Un compromesso ottimale per essiccatori solari è rappresentato da un flusso d'aria in ingresso a  $0,75 \text{ m/s}$  per metro quadro di superficie di essiccazione (Figura 51).



**Figura 51.** 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  $\phi = 40\%$ :  $\circ$ ,  $U = 0,2 \text{ m/s}$ ;  $\square$ ,  $U = 0,4 \text{ m/s}$ ;  $\diamond$ ,  $U = 0,6 \text{ m/s}$  [20].

## **4.2. QUALITA' DEL PRODOTTO ESSICCATO**

L'essiccazione influenza le proprietà fisiche del prodotto e causa cambiamenti di dimensione, forma, colore e consistenza, oltre a molte reazioni chimiche ed enzimatiche che avvengono durante la deidratazione. Sebbene queste reazioni non siano necessariamente indesiderate, alcune potrebbero rendere il prodotto immangiabile.

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

### **4.2.1. Parametri sensoriali**

La qualità sensoriale di un prodotto è la combinazione di differenti sensi di percezione che entrano in gioco nello scegliere e consumare un prodotto.

Le sembianze di un prodotto, ad esempio colore, dimensione, forma o assenza di difetti, sono importanti nel giudicarne la qualità, al pari del sapore (dolcezza, asprezza, amarezza) e dell'aroma (limitato al tatto e all'odore).

Le caratteristiche ottimali potrebbero essere stimate chimicamente in fasi preliminari, ma essenzialmente i canoni di giudizio variano di persona in persona.

In generale, le reazioni chimiche del calibro di ossidazione ed imbrunimento (solite nel processo di essiccazione) contribuiscono considerevolmente al deterioramento dell'aroma [22].

### **4.2.2. Dati nutrizionali**

Questi includono parametri prettamente chimici come il contenuto di zucchero, Vitamina C, beta-carotene o acidità prima e dopo l'essiccazione.

Bassi contenuti di zucchero indicano qualità minore a causa di eccessive temperature di essiccazione; poca Vitamina C indica perdita di nutrienti per eccessivi periodi di essiccazioni; elevata acidità indica un deterioramento qualitativo per fermentazione [22].

### **4.2.3. Capacità di reidratazione**

Alcune tipologie di frutta secca sono consumate soltanto dopo una successiva reidratazione: aggiungendo acqua, il prodotto riacquista sapore, aroma, consistenza e sembianze originali.

Tuttavia, un prodotto reidratato non può tornare perfettamente al suo stato originario precedente all'essiccazione; quanto un prodotto tende ad avvicinarsi al suo stato originale dopo reidratazione è indicato dalla sua capacità di reidratazione [22].

Durante trattamenti preliminari o maneggiamento del prodotto sono soliti verificarsi danni a livelli cellulari nel prodotto (causati da cambiamenti nella struttura e composizione del tessuto) che influenzano negativamente la capacità di reidratazione.

## **5. INDICAZIONI FUNZIONALI ALL'ESSICCAZIONE**

Il processo di essiccazione è influenzato quindi da fattori intrinseci legati alla natura del materiale da trasformare, ma soprattutto da fattori estrinseci, determinati quindi dal contesto nel quale avviene la produzione.

Tale contesto può favorire la conservazione di certi composti ad alto valore nutritivo presenti nelle materie prime i quali, grazie a pretrattamenti o interventi tecnici specifici, possono essere ancora ritrovati nei prodotti finiti, migliorando la qualità nutrizionale del prodotto ed anche il valore commerciale dello stesso.

Tali pretrattamenti servono ad ottimizzare le condizioni per poter applicare le tecniche di essiccamento permettendo quindi alle materie prime di sottoporsi al trattamento in modo meno "traumatico" con risvolti positivi sulla qualità del prodotto finale.

### **5.1. Operazioni preliminari**

La maggior parte dei prodotti richiede una preparazione per essere idonea all'essiccamento; ad esempio, prodotti ricchi d'acqua possono richiedere una ulteriore eliminazione preventiva della stessa prima del

processo di trasformazione, dato che la presenza di acqua nei prodotti crea un ambiente ideale alla proliferazione batterica.

Il pretrattamento ha due scopi principali, la predisposizione all'essiccamento e la modifica delle caratteristiche del prodotto.

I pretrattamenti più comuni sono: la scottatura, l'osmodisidratazione e l'immersione in soluzioni protettive [23].

- **La Scottatura** permette di inattivare la maggior parte degli enzimi immergendo le materie prime in acqua bollente per un tempo variabile che dipende principalmente dalla pezzatura del prodotto. I tempi di scottatura variano dai trenta secondi ai tre minuti, per poi immergere immediatamente il prodotto in un bagno di ghiaccio fondente.
- **L'Osmodisidratazione** è una tecnica che consiste nell'immersione del 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. Il materiale pretrattato in questo modo risulta essere già parzialmente disidratato, presenta solitamente un'alta concentrazione di sale e zucchero e permette di ottenere un essiccato con un colore molto simile a quello di partenza (ad esempio albicocche).
- **L'immersione in soluzioni acidificate** è utile per rallentare le reazioni di imbrunimento per le varietà sensibili. L'immersione dura pochi minuti ed avviene in aceto o succo di limone diluiti.
- Anche se non è considerato un vero e proprio pretrattamento, è possibile essiccare prodotti frutticoli zuccherati in superficie al fine di dolcificarli e di creare sulla superficie uno strato dall'aspetto cristallino.

Bisogna tuttavia considerare che l'utilizzo di quantità più o meno alte di saccarosio distribuite sulla superficie delle materie prime può generare gocciolamenti di succo durante l'essiccamento e rendere il processo più lungo, specialmente nel caso dell'essiccamento solare a causa della forte igroscopicità dello zucchero. Inoltre, la presenza di zucchero può innescare fenomeni di imbrunimento non enzimatico.

## 5.2. Variabili incontrollabili

Per quanto si sia cercato di preparare al meglio le condizioni preliminari di processo ed analisi dei dati, durante la sperimentazione è emerso che il contesto di prova non può essere mai controllato del tutto, in quanto permangono delle variabili che non possono essere previste con certezza o approssimate con un buon grado di precisione.

Di seguito vengono elencate delle linee guida stabilite per condurre test sui forni solari (e, per estensione, sugli essiccatori) che garantiscono un sufficiente grado di validità per la sperimentazione.

### ▪ **Vento:**

La velocità del vento durante la prova dovrebbe essere inferiore a 1 m/s; se è maggiore o uguale a 2.5 m/s per più di 10 minuti il test non è valido.

Tale norma risulta necessaria in quanto un corpo sottoposto a convezione forzata (ossia la convezione dovuta a moti d'aria con velocità elevate, solitamente conferite da un ventilatore) subisce una grande perdita di calore, ergo il prodotto sottoposto a questo processo per lungo tempo non conserverebbe più condizioni ideali per l'essiccazione.

### ▪ **Temperatura ambiente:**

La temperatura ambiente dovrebbe essere compresa tra 5°C e 35 °C.

Questo perché l'efficienza di un forno solare è strettamente legata alla temperatura ambiente, la quale, al di fuori di questo intervallo, invaliderebbe il test a causa di una eccessiva temperatura del flusso d'aria in ingresso oppure per un insufficiente riscaldamento della camera di essiccazione.



▪ **Radiazione solare:**

Il test dovrebbe venire scartato in caso di:

- Una variazione della radiazione solare maggiore di  $100 \text{ W/m}^2$  nell'arco di 10 minuti.
- Radiazione solare non contenuta nell'intervallo di 450 e  $1100 \text{ W/m}^2$ .

Grandi sbalzi nella radiazione potrebbero portare il forno a subire un effetto termico inerziale (con elevate oscillazioni nelle temperature rilevate dagli acquisitori) allungando molto i tempi di essiccazione. La norma sopra ha inoltre lo scopo di fissare delle condizioni replicabili di prova per permettere confronti in altre località.

## 6. MODELLO MATEMATICO PRELIMINARE

Prima di passare alla fase di sperimentazione vera e propria con il contesto e le condizioni definite nei paragrafi precedenti, è buona norma in uno studio scientificamente valido condurre una simulazione preliminare con i dati e le condizioni al contorno considerate.

In questo modo è possibile verificare se l'impostazione conferita al progetto è valida oppure se è necessario intervenire modificando il contesto di prova in caso di risultati fuori scala o eccessivamente al di fuori delle aspettative preliminari.

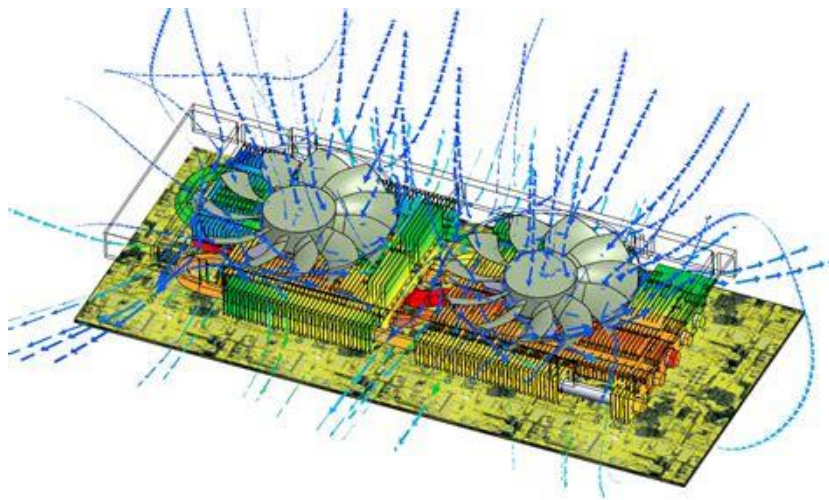
### 6.1. SOFTWARE DI ELABORAZIONE

Per la simulazione preliminare, è stato utilizzato un software che permettesse di combinare l'analisi fluidodinamica con l'analisi termica (convettiva e radiativa) già nelle prime fasi di sviluppo.

La scelta è ricaduta su FloTHERM XT, software CFD ai volumi finiti sviluppato dalla Siemens per facilitare la progettazione di componenti elettronici che permette la realizzazione di una simulazione pertinente partendo dai dati forniti da altri programmi di progettazione meccanica complessa, ad esempio AutoCAD (Figura 52) [24].

Tale operazione è consentita dal sistema di generazione del mesh di calcolo di cui il software è fornito, detto "adaptive mesh", che velocizza e permette la risoluzione di equazioni con elevatissimi numeri di variabili da definire [25].

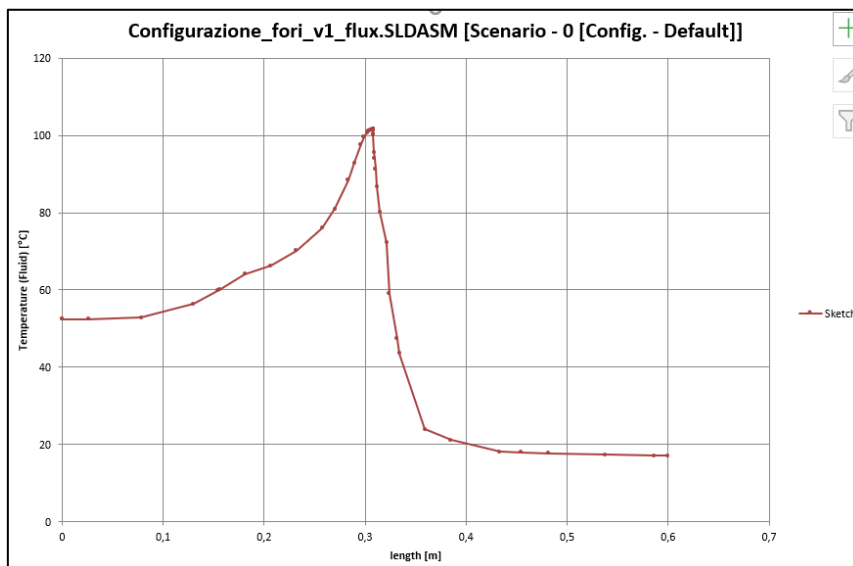
Per la sperimentazione esposta in questo trattato, il software si è occupato di risolvere le equazioni di Navier-Stokes relative al flusso d'aria presente in un volume finito di spazio comprendente l'essiccatore, il cui modello è stato estrapolato dallo schema funzionale precedentemente esposto realizzato con AutoCAD, approssimando la parte radiante con le condizioni al contorno fornite.



**Figura 52.** Esempio di modelli simulativi forniti dal software di elaborazione FloTHERM XT.

Come precedentemente esposto, il software considerato permette l'impostazione di numerosi parametri di simulazione e delle condizioni al contorno ricorrenti durante le prove, tra cui flusso termico imposto, regime e dominio di prova, temperature e materiali del modello.

Una volta impostati questi dati, il FloTHERM XT è stato in grado di fornire un modello grafico tridimensionale dell'andamento termodinamico dell'essiccatore nel suo complesso e uno schema bidimensionale con l'andamento della temperatura lungo la verticale passante al centro della camera in un file Excel apposito (Figura 53).



**Figura 53.** Esempio di grafico rappresentativo dell'andamento della temperatura lungo la verticale passante per la camera di essiccazione.

Una simulazione completa richiede comunque uno sforzo di calcolo notevole per il calcolatore utilizzato: i tempi medi di realizzazione del modello grafico ammontano a circa dieci ore, per cui ogni simulazione è stata realizzata preliminarmente durante lo sviluppo del prototipo di essiccazione dopo aver concordato scrupolosamente il contesto di prova.

#### 6.1.1. Condizioni al contorno

Prima di iniziare le simulazioni, sono state impostate delle condizioni al contorno ricorrenti che fossero in grado di ricreare un contesto di prova pressoché attinente a quello reale.

Inizialmente si è pensato di impostare delle temperature uniformi sulle piastre ipotizzando un funzionamento a regime dell'essiccatore, ma delle prove preliminari hanno poi invalidato tale ipotesi registrando un gradiente superficiale non trascurabile su ciascuna piastra.

- **Flusso termico imposto:**

Non potendo impostare due temperature rappresentative, si è optato per impostare un quantitativo di radiazioni predefinite convogliate su ciascuna piastra in modo tale da rappresentare fedelmente la disuniformità di radiazioni tra piastra diretta e indiretta (in quanto la prima è esposta alla radiazione solare diretta).

Sono stati imposti  $350 \text{ W/m}^2$  per la piastra diretta e  $300 \text{ W/m}^2$  per la piastra indiretta.

- **Temperatura e pressione ambiente:**

Sono state scelte delle condizioni "neutre" replicabili in pressoché qualsiasi altra località per permettere eventuali confronti con altre sperimentazioni o prototipi.

In particolare, è stato scelto un valore di temperatura ambiente pari a  $10^\circ\text{C}$  e un valore di pressione pari alla pressione atmosferica, ossia  $101325 \text{ Pascal}$ .

- **Dominio e regime di prova:**

Una volta disegnata la geometria del modello, si è optato di predisporlo in un volume d'aria rettangolare (2 metri x 1 metro x 1 metro) appoggiandolo su un lato che funge da pavimentazione.

Al suo interno l'aria è stagna, ossia non c'è flusso d'aria entrante o uscente da esso: il software elabora lo sviluppo fluidodinamico del volume interno allo spazio considerato senza influenze esterne in modo da poter imporre plausibilmente la condizione di regime stazionario per la prova (parametri e valori fissi indipendenti dal tempo di sperimentazione).

Tuttavia, il dominio d'aria considerato è periodico, ossia è possibile estendere le condizioni replicate al suo interno per volumi d'aria più grandi senza che queste perdano di validità.

- **Materiali:**

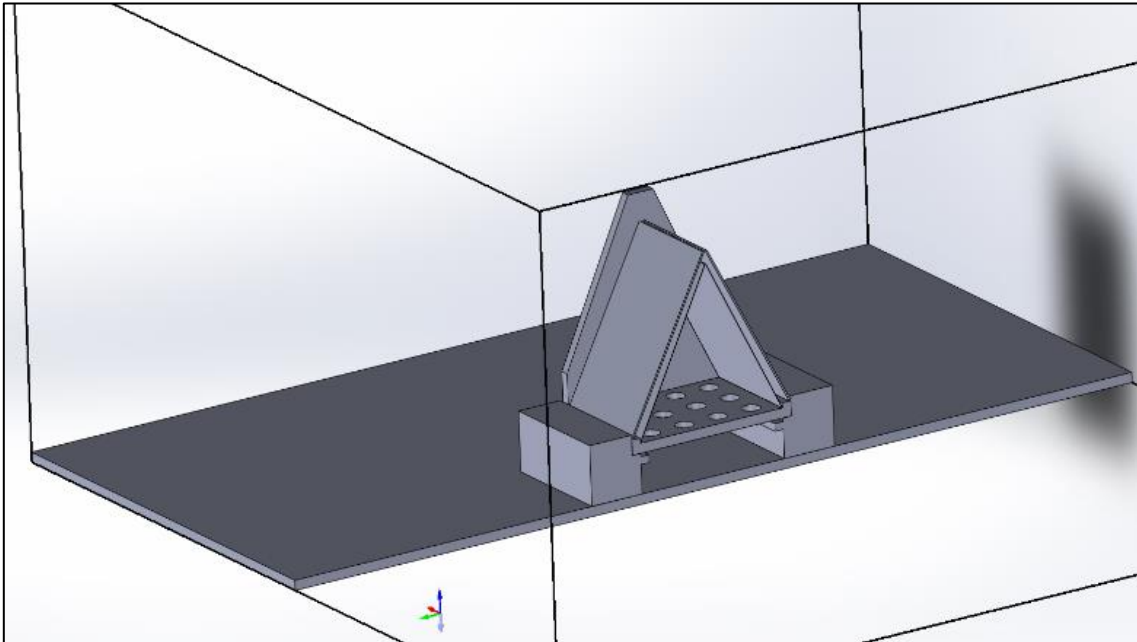
La geometria del modello è composta da materiali preimpostati i cui parametri sono già presenti nella libreria del software: è sufficiente assegnare a ciascun componente il materiale voluto e il software si occuperà di prendere in considerazione le variabili ad esso relative.

Per basi, supporto di appoggio e sportelli è stato preso in considerazione il legno massello; per i vetri si è ipotizzato del comune polimetacrilato; per le piastre è stato considerato del comune acciaio a basso tenore di carbonio.

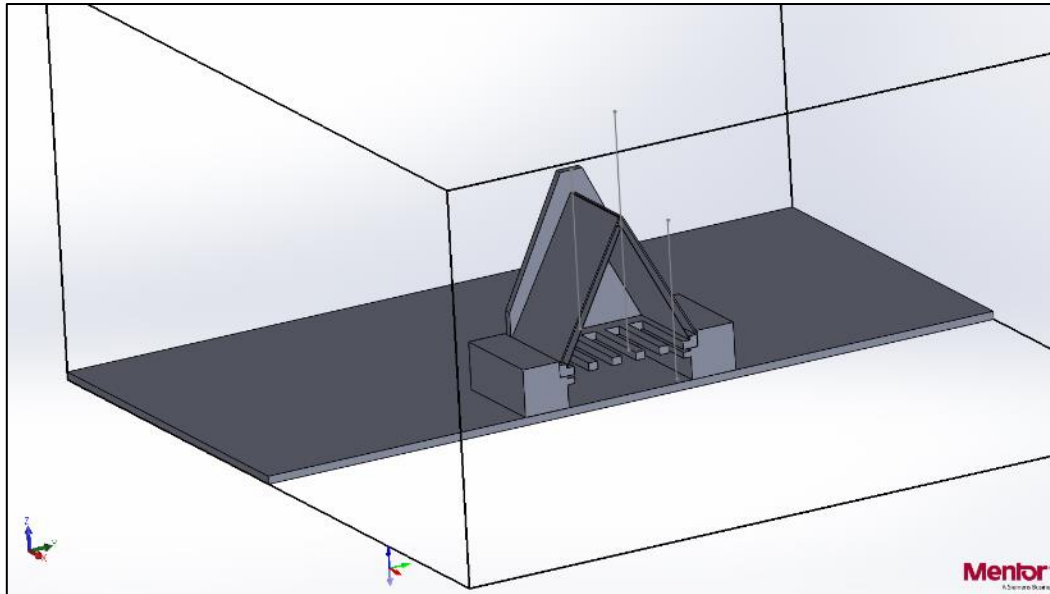
## 6.2. RISULTATI DELLE ANALISI

Al fine di poter confrontare le prestazioni termofluidodinamiche di entrambe le configurazioni del prototipo progettate, sono stati realizzati due modelli geometrici differenti tramite AutoCAD, ognuno contraddistinto da una tipologia di base diversa (Figura 54 e Figura 55).

Utilizzando questi modelli è stato poi possibile far partire due serie di simulazioni distinte in modo da comparare i risultati in funzione dei parametri di prova impostati di volta in volta.



**Figura 54.** Sezione del modello geometrico simulativo con base a fori e volume di prova visibile.



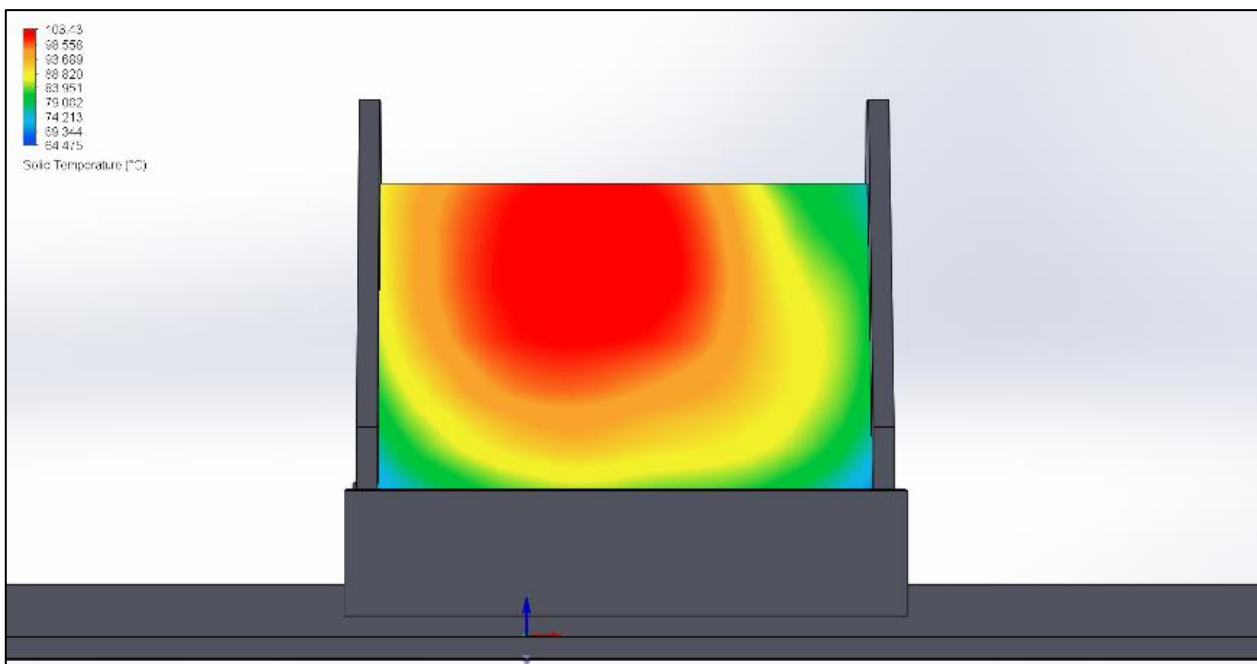
**Figura 55.** Sezione del modello geometrico simulativo con base a tagli rettangolari e volume di prova visibile.

Di seguito verranno riportate due simulazioni distinte per ciascuna configurazione geometrica utilizzata, la cui variabile di distinzione è la misura della distanza tra le due piastre sulla sommità della camera di essiccazione (quindi l'apertura della stessa).

**6.2.1. Simulazioni a piastre chiuse**

Nella prima fase di simulazione, si è deciso di chiudere completamente le piastre per simulare lo sviluppo verticale della temperatura in camera di essiccazione in condizioni di aria stagna e verificare l'entità del gradiente termico sulle piastre.

- **Base a fori:**

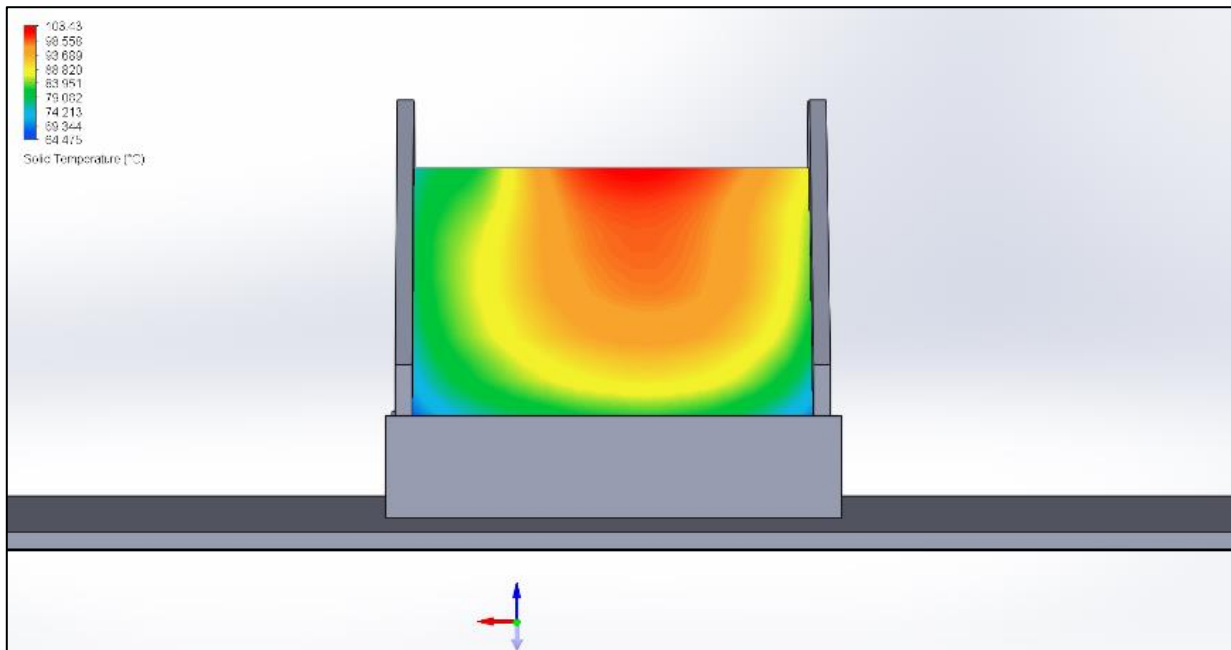


**Figura 56.** Gradiente termico su piastra diretta per prova a piastre chiuse con base a fori.

Come ipotizzato, la temperatura delle piastre non è uniforme e il gradiente termico non è trascurabile tanto da approssimare con una unica misura rappresentativa la temperatura delle piastre.

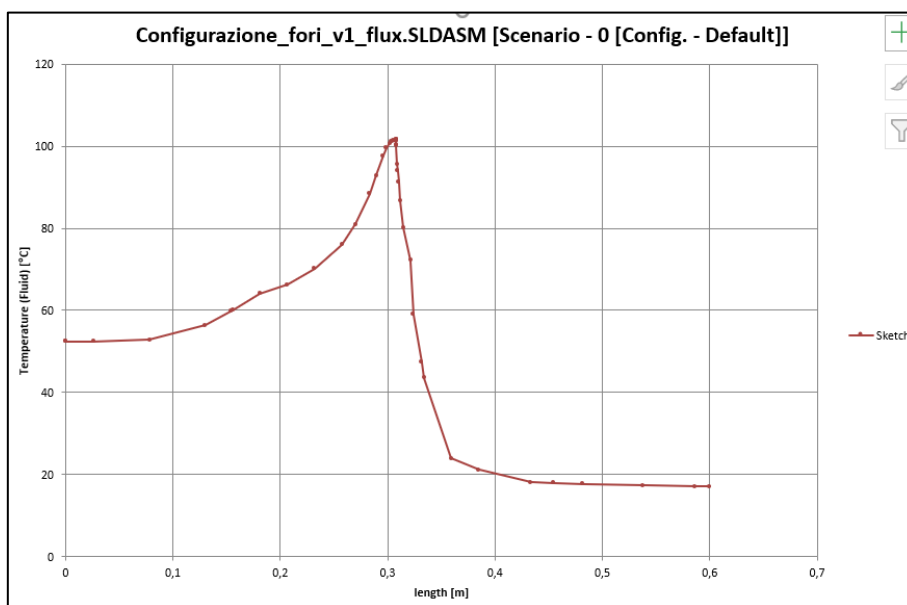
Essenzialmente si registra la presenza di due gradienti distinti, uno verticale più accentuato (con  $\pm 40^\circ\text{C}$  tra massimo e minimo) e uno orizzontale più mite (massimo  $20^\circ\text{C}$ ), il quale genera una asimmetria imprevista nella parte superiore della piastra.

Il dato che salta principalmente all'occhio è la distribuzione quasi "centrifuga" della temperatura: i valori massimi si registrano nelle zone centrali superiori della piastra, mentre i minimi sono rilevati nelle zone sulle quali convergono le somme vettoriali dei gradienti, ossia gli angoli della piastra (escluso l'alto a sinistra).



**Figura 57.** Gradiente termico su piastra indiretta per prova a piastre chiuse con base a fori.

La distribuzione superficiale conferma che il calore si accumula nella parte superiore della camera, ma per effetti fluidodinamici interni questo predilige soltanto un lato della camera.



**Figura 58.** Schema grafico delle temperature registrate sulla verticale in camera di essiccazione in funzione della distanza dal fondo per prova a piastre chiuse con base a fori.

La differenza principale da notare sono le temperature minori rilevate nella parte centrale: sebbene massimo e minimo siano gli stessi, in generale la piastra indiretta risulta più fredda, il che confermerebbe l'ipotesi di un gradiente termico tra le due piastre causato dall'esposizione diretta al sole di una delle due.

I risultati ottenuti in camera di essiccazione sono fin troppo soddisfacenti: la temperatura si mantiene generalmente alta sin dal fondo fino a toccare livelli eccessivi ai fini dell'essiccazione.

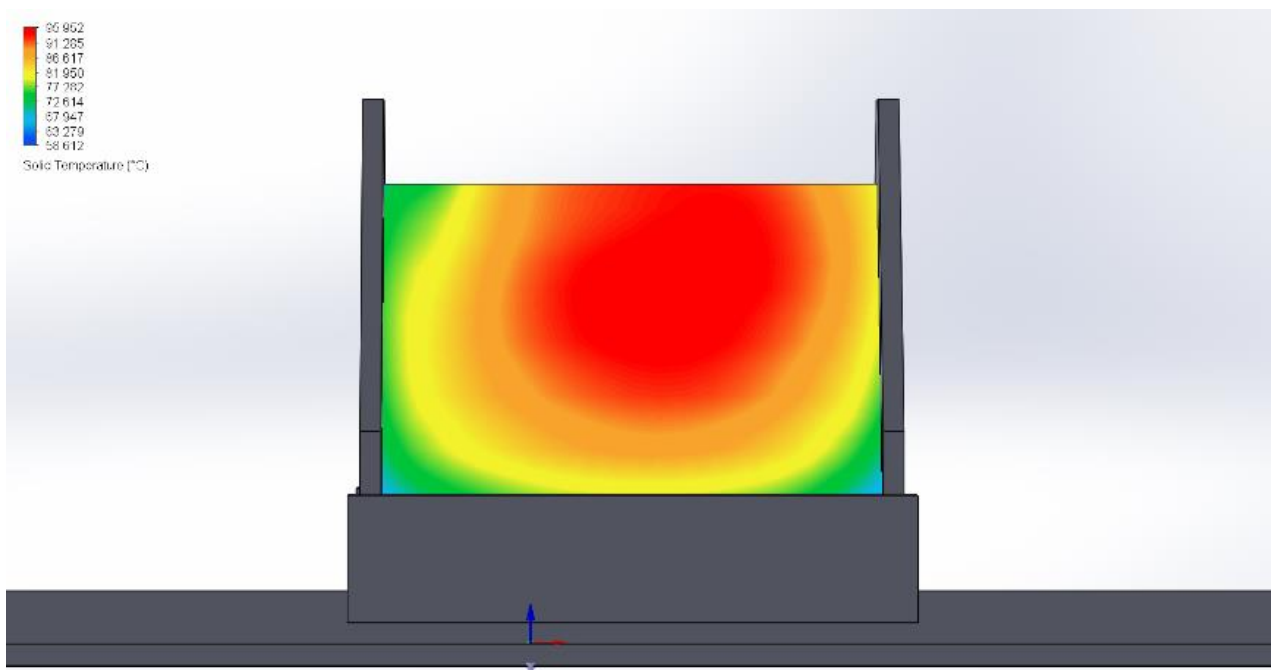
Una simulazione simile suggerirebbe di posizionare i prodotti da essiccare ad una altezza massima inferiore ai 20 cm, in modo tale da mantenere le temperature in un intervallo tra i 45 e i 60 gradi centigradi (spingersi oltre potrebbe far riscontrare diversi problemi nella qualità del prodotto finale).

Occorre ricordare che i risultati delle simulazioni costituiscono delle linee guida per la successiva sperimentazione e devono essere da essa convalidati prima di considerarli scientificamente attendibili.

- **Base a tagli rettangolari:**

In generale, nelle simulazioni effettuate sulla base a tagli rettangolari sono state rilevate distribuzioni superficiali simili con massimi e minimi minori ( $\pm 10^{\circ}\text{C}$ ) (Figure 59 e 60).

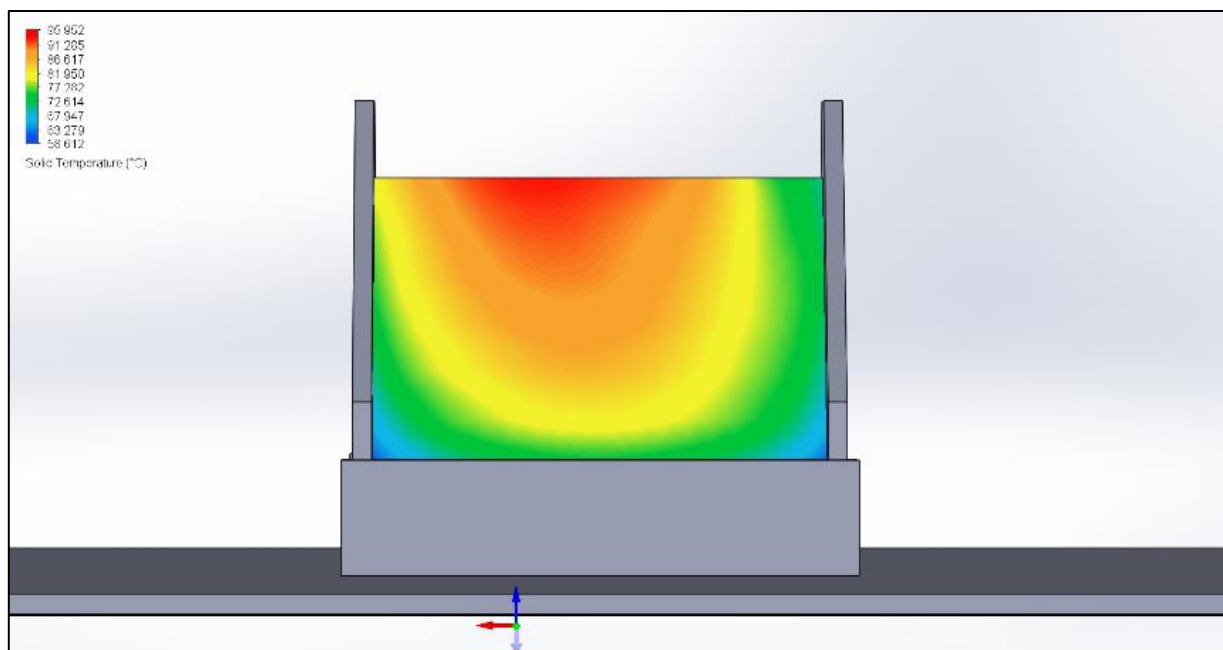
Decade invece l'ipotesi di un lato privilegiato nell'accumulo di calore, dovuto probabilmente a moti fluidodinamici imprevedibili, ma tutto sommato irrilevanti ai fini della sperimentazione.



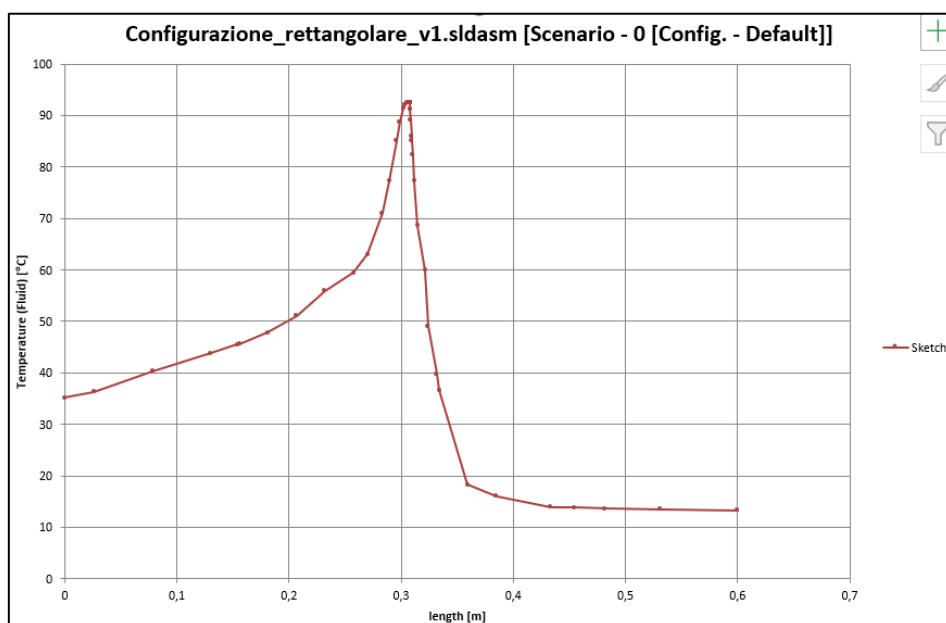
**Figura 59.** Gradiente termico su piastra diretta per prova a piastre chiuse con base a tagli rettangolari.

Una differenza sostanziale è stata invece registrata nel gradiente verticale di temperatura in camera di essiccazione: non solo la temperatura massima raggiunta risulta essere minore di almeno dieci gradi, anche la crescita dal fondo risulta essere meno ripida, con dei valori che in media si mantengono più bassi rispetto alla configurazione con base a fori (Figura 61).

Dal confronto tra le due simulazioni sembrerebbe che la base a fori risulti essere più performante a livello termico; tuttavia, la base a tagli rettangolari consentirebbe maggiore spazio di essiccazione, in quanto l'intervallo di temperatura ottimale si mantiene per un'altezza maggiore in quel caso (fino a 25 cm).



**Figura 60.** Gradiente termico su piastra indiretta per prova a piastre chiuse con base a tagli rettangolari.



**Figura 61.** Schema grafico delle temperature registrate sulla verticale in camera di essiccazione dal fondo per prova a piastre chiuse con base a tagli rettangolari.

Questo fatto potrebbe essere riconducibile alla conformazione geometrica delle basi: la base a tagli rettangolari presenta un'apertura superficiale tre volte maggiore rispetto a quella a fori, ergo la portata d'aria passante risulta essere maggiore, il deflusso di calore dalla camera per perdite più ingente e le temperature rilevate minori.

### 6.2.2. Simulazioni con apertura di 0,5 mm

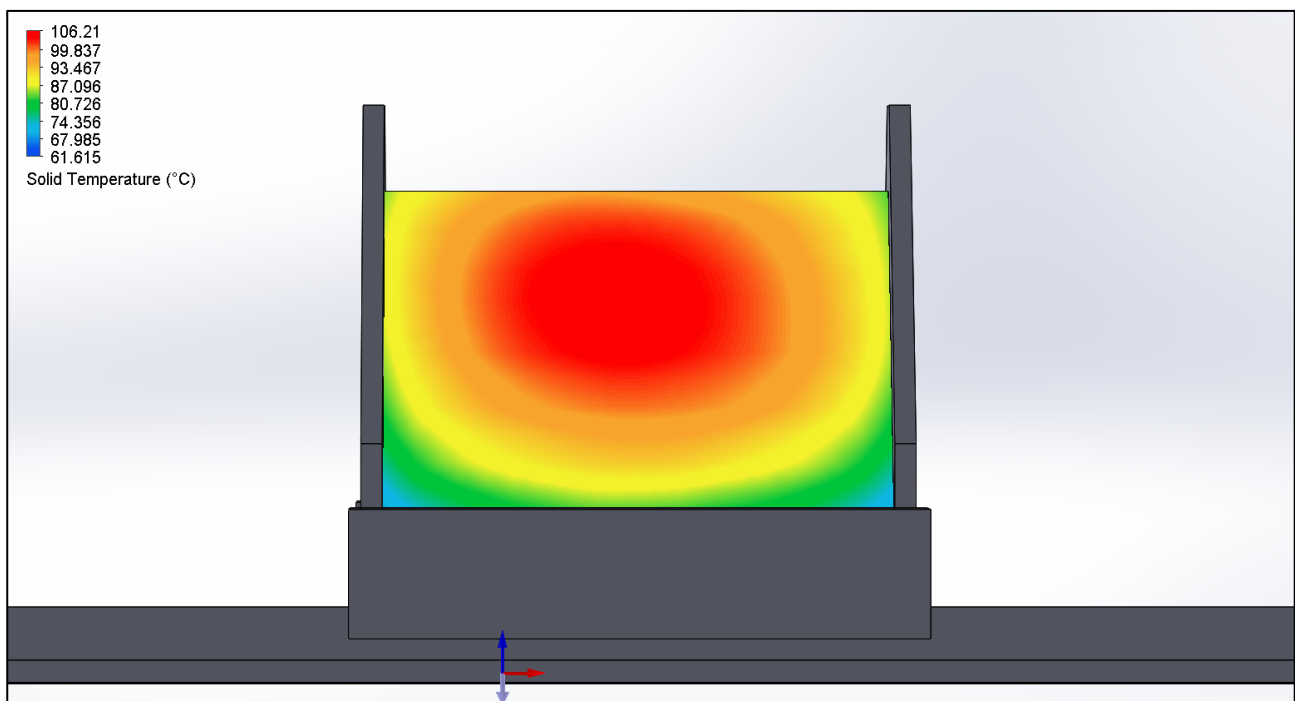
Una volta delineato il comportamento termodinamico generale di piastre e camera di essiccazione, lo scopo delle simulazioni è diventato verificare l'attendibilità dei dati precedentemente rilevati avvicinandosi man a mano alle condizioni di prova reali.

Dato che una camera di essiccazione priva di apertura superiore non sarebbe teoricamente in grado di far defluire il vapore asportato dai prodotti verso l'esterno sconfiggendo il principio stesso dell'essiccazione, la prima nuova condizione da imporre al modello è stata un'apertura minima di 0,5 mm sulla sommità della camera di essiccazione.

- **Base a fori:**

La prima caratteristica che salta all'occhio è l'uniformità distributiva di temperatura delle piastre: sebbene i massimi e minimi rilevati siano essenzialmente gli stessi, la distribuzione "centrifuga" di calore stavolta è regolare e più evidente, con un gradiente termico verticale più marcato e uno orizzontale quasi simmetrico. Risulta inoltre maggiore il gradiente termico tra le due piastre: la piastra indiretta è nettamente più fredda anche nei massimi e minimi rilevati ( $\pm 15^\circ\text{C}$ ) (Figura 62 e 63).

Questi dati risultano più in linea con le ipotesi preliminari rispetto alla simulazione precedente: la sostanziale irregolarità nelle distribuzioni sarebbe stato un fattore difficilmente spiegabile, riconducibile forse a dinamiche del flusso d'aria ignote.

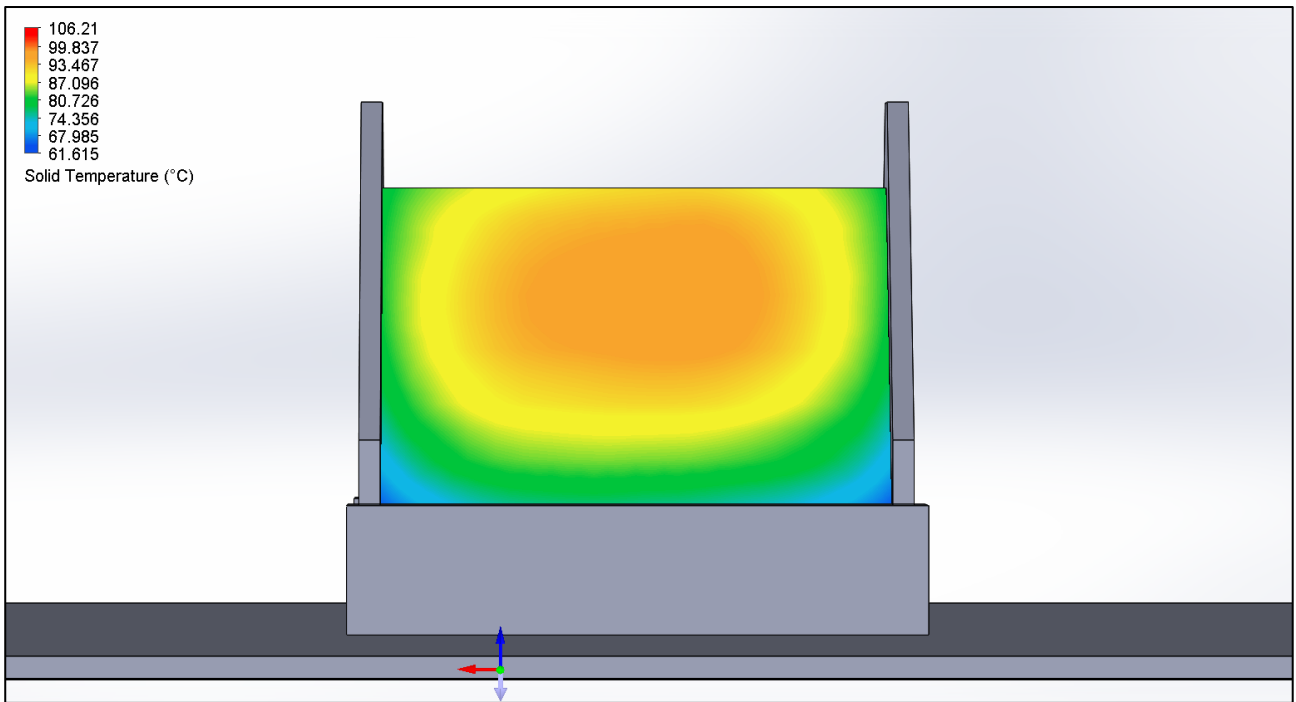


**Figura 62.** Gradiente termico su piastra diretta per prova a piastre aperte con base a fori.

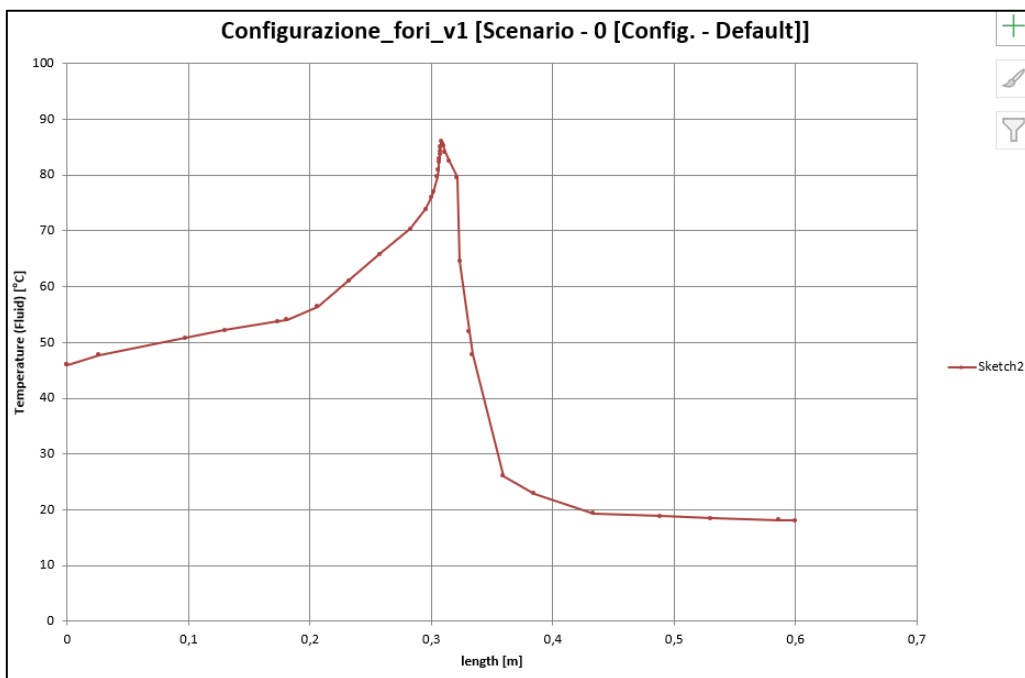
Una ulteriore distinzione rispetto alle prove precedenti si nota invece nel gradiente termico verticale in camera: la temperatura massima rispetto al caso a piastre chiuse è nettamente inferiore (più di  $10^\circ\text{C}$  di differenza) e la crescita dal fondo risulta generalmente più attenuata, indice di medie più basse nella camera di essiccazione (Figura 64).

Il risultato della simulazione è più che soddisfacente: le temperature in camera di essiccazione risultano ottimali per l'essiccazione sin dal fondo e si mantengono tali per gran parte del volume di camera considerato (quasi fino a 30 cm di altezza), permettendo di caricare maggiormente l'essiccatore ed accorciando quindi i tempi di essiccazione per grandi quantità di prodotti.





**Figura 63.** Gradiente termico su piastra indiretta per prova a piastre aperte con base a fori.

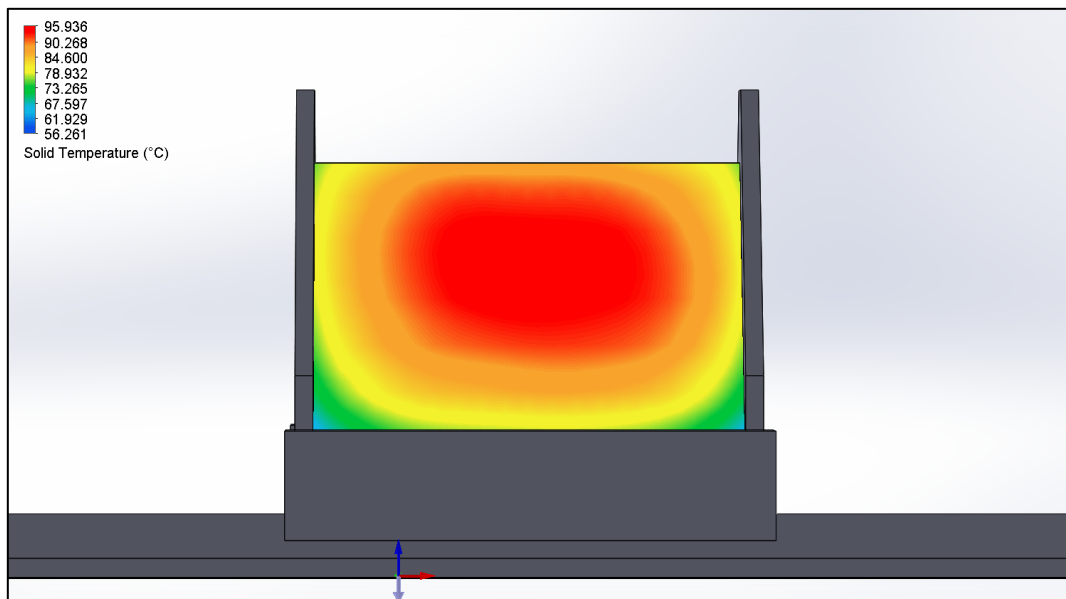


**Figura 64.** Schema grafico delle temperature registrate sulla verticale in camera di essiccazione dal fondo per prova a piastre aperte con base a fori.

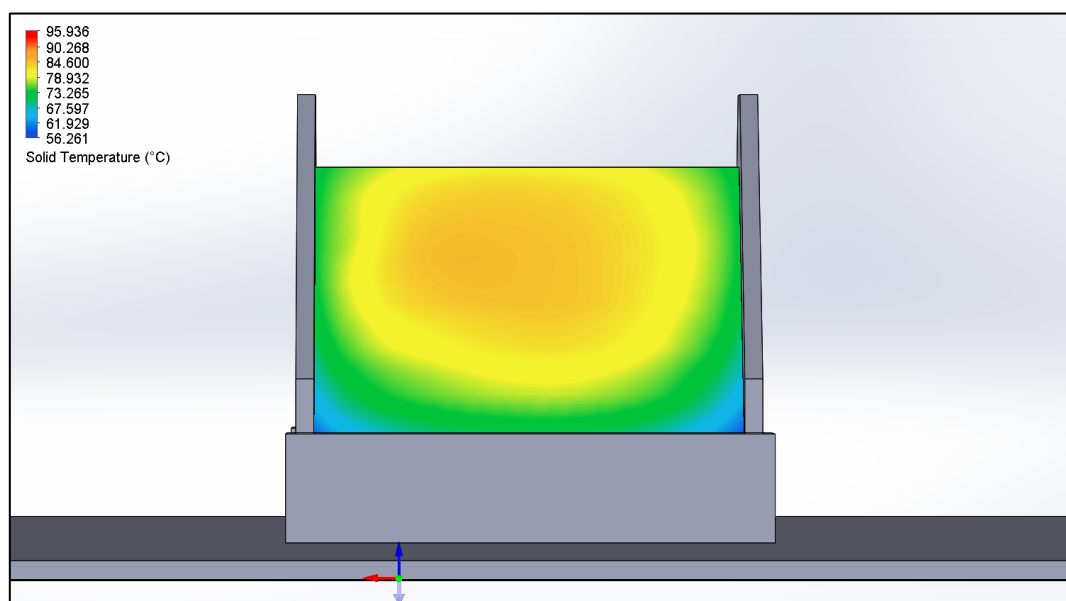
- **Base a tagli rettangolari:**

Quello che salta all'occhio è la sostanziale uguaglianza nelle distribuzioni superficiali tra le due basi: entrambe presentano una regolarità evidente rispetto alla simulazione a piastre chiuse e il gradiente tra le due piastre è rimasto essenzialmente invariato.

Ciò che si è mantenuto inalterato nel confronto tra le due basi in entrambe le prove è la differenza tra massimi e minimi: in tutti i casi, la configurazione a fori ha registrato massimi più alti sulle piastre e medie distribuite di temperature generalmente maggiori rispetto alla controparte a tagli rettangolari (Figura 65 e 66).



**Figura 65.** Gradiente termico su piastra diretta per prova a piastre aperte con base a tagli rettangolari.

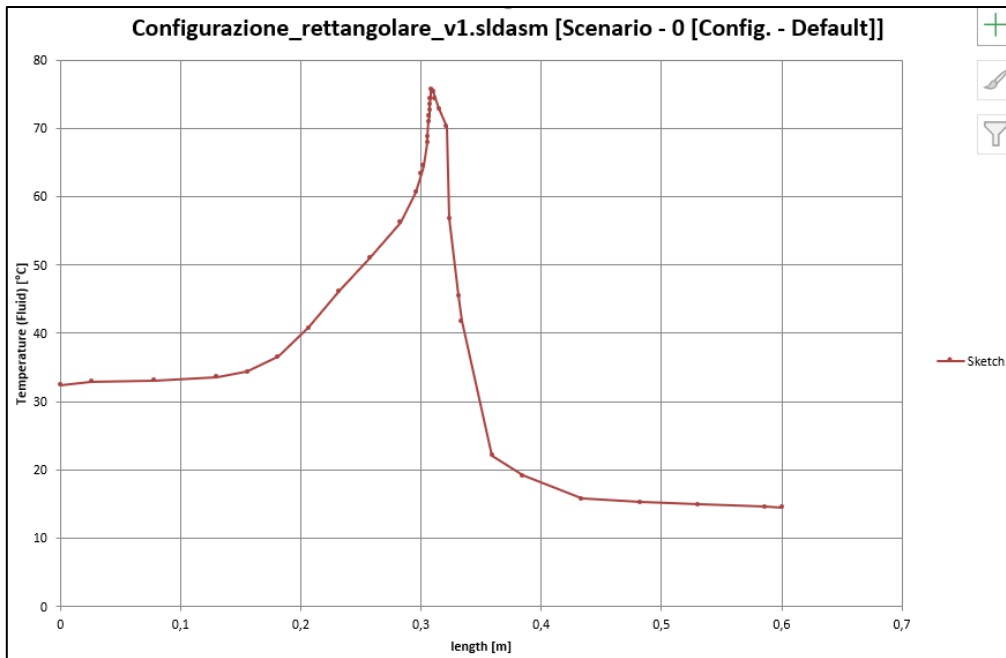


**Figura 66.** Gradiente termico su piastra indiretta per prova a piastre aperte con base a fori.

Il gradiente termico verticale in camera di essiccazione è il dato che si distingue più degli altri (Figura 67). Pur immaginando che le temperature si sarebbero abbassate considerevolmente rispetto alla configurazione a fori, per la prima volta la temperatura di partenza sul fondo della camera risulta nettamente inferiore rispetto alle simulazioni effettuate finora (da 45°C a 30°C).

Inoltre, non si registra alcuna crescita fino a 15 cm di altezza, per poi raggiungere i 45°C (minimi per l'efficacia del processo) soltanto a 25 cm di altezza, con un massimo di poco superiore a 70°C (quasi 15°C di differenza rispetto all'altra configurazione).

Ne consegue che la maggiore superficie esposta al flusso d'aria nella base a tagli rettangolari influenza fortemente l'andamento termodinamico all'interno della camera, limitando la posizione dei prodotti ad una altezza minima di 25 cm affinché il processo di essiccazione possa avvenire in maniera efficace.



**Figura 67.** Schema grafico delle temperature registrate sulla verticale in camera di essiccazione dal fondo per prova a piastre aperte con base a tagli rettangolari.

### 6.2.3. Comparazione dei risultati

Dalle simulazioni preliminari sembra emergere una netta superiorità della configurazione con base a fori in termini di efficienza termica e condizioni di processo.

Non solo le temperature raggiunte all'interno della camera di essiccazione risultano in media superiori (permettendo di mantenere gli ideali parametri di processo anche in contesti di prova più avversi), ma anche le condizioni ottimali sono raggiunte e mantenute in un volume maggiore all'interno della camera (lunghezza dell'intervallo ottimale di temperatura maggiore), consentendo di sfruttare più spazio per il carico di prodotti da essiccare.

## 7. TEST SPERIMENTALI

Terminata la simulazione preliminare, lo studio è entrato nella fase sperimentale: nel corso di alcuni mesi, sono state effettuate numerose prove non solo variando i parametri del sistema come l'apertura superiore della camera oppure la superficie di passaggio del flusso d'aria sulla base, ma anche sottoponendo il prototipo a contesti di prova di volta in volta diversi per temperature ambiente, intensità di radiazione solare o velocità del vento.

Sebbene i test iniziali abbiano avuto lo scopo di determinare la geometria del modello più adatta e di mettere a punto il banco di prova, essenzialmente questa fase di sperimentazione è servita a convalidare i dati ricavati dalle simulazioni preliminari e a confrontare le prestazioni termiche delle due configurazioni di essiccatore proposte (con base a fori e con base a tagli rettangolari).

Infine, una volta determinata la funzionalità del prototipo, sono stati eseguiti alcuni 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 (Figura 68).

## 7.1. CONFRONTO TRA LE DUE CONFIGURAZIONI

Di seguito vengono riportati i dati di medie e massime temperatura e radiazioni rilevate nei test di confronto tra le due configurazioni di essiccatore proposte divise in base alle condizioni di prova imposte.

20/10/2021	Forno unico ad Ancona, base e piastre chiuse, configurazione base senza supporto specchi indiretti, piastre verniciate da forno, nuovo supporto di misurazione, 3 ore e 50 minuti dalle 10:20 alle 14:10, vento nella norma										
	T amb	T bassa	T media	T alta	Tpiastra diretta	Tpiastra indiretta	DNImedia				
Max	21,49	38,61	52,56	61,37	102,08	83,56	913,63				
Media	18,58	33,71	44,98	55,46	95,88	78,81	798,91				
Ora Tmax	/	/	/	/	/	/	12:19				
27/10/2021	Forno unico ad Ancona, base con fori aperta, piastre chiuse, nuovo orientamento specchi, lastre di ferro come piastre, configurazione base senza supporto specchi indiretti, 1 ora e 15 minuti dalle 11:15 alle 12:30, nuvole sparse										
	T amb	T bassa	T media	T alta	Tpiastra diretta	Tpiastra indiretta	DNImedia				
Max	15,54	35,4	36,77	50,54	68,5	67,77	743,37				
Media	14,38	30,64	32,13	38,1	65,55	63,61	724,07				
Ora Tmax	/	/	/	/	/	/	11:22				
28/10/2021	Forno unico ad Ancona, base con fori chiusa, piastre chiuse, unico specchio indiretto su carrello, 3 ore e 40 minuti dalle 10:40 alle 14:20, vento nella norma										
	T amb	T bassa	T media	T alta	Tpiastra diretta	Tpiastra indiretta	DNImedia				
Max	22,57	60,46	71,92	79,5	100,14	83,33	776,95				
Media	14,47	40,08	61,59	70,54	92,28	71,74	730,44				
Ora Tmax	13:57	12:53	13:46	12:54	12:54	12:52	11:41				
30/11/2021	A base con fori, B rettangolare, supporto specchi indiretti nuovo, sotto e sopra chiuse, 3 ore e 10 minuti dalle 12:35 alle 15:45, vento nella norma										
	T amb	T bassa A	T media A	T alta A	Tpiastra diretta A	Tpiastra indiretta A	DNImedia	T media B	T alta B	Tpiastra diretta B	Tpiastra indiretta B
Max	16,16	54,19	70,36	85,14	97,45	88,88	1158,03	76,77	82,56	94,13	83,48
Media	10,88	46,44	57,51	68,69	79,21	73,77	1059,27	60,08	73,24	79,61	63,12
Ora Tmax	14:24	13:06	13:11	13:12	13:15	14:32	13:51	14:21	13:10	12:38	14:21
15/12/2021	A base con fori, B rettangolare, sotto aperto e sopra chiuso, 3 ore e 15 minuti dalle 11:15 alle 14:30, vento nella norma										
	T amb	T bassa A	T media A	T alta A	Tpiastra diretta A	Tpiastra indiretta A	DNImedia	T media B	T alta B	Tpiastra diretta B	Tpiastra indiretta B
Max	14,77	33,06	42,07	52,77	69,53	56,48	619,52	36,49	46,37	65,49	58,01
Media	11,45	27,37	28,83	33,27	59,42	45,18	490,34	29,2	35,21	53	49,01

Figura 68. Esempio di tabella Excel riassuntiva con primi test sperimentali registrati e relative date.

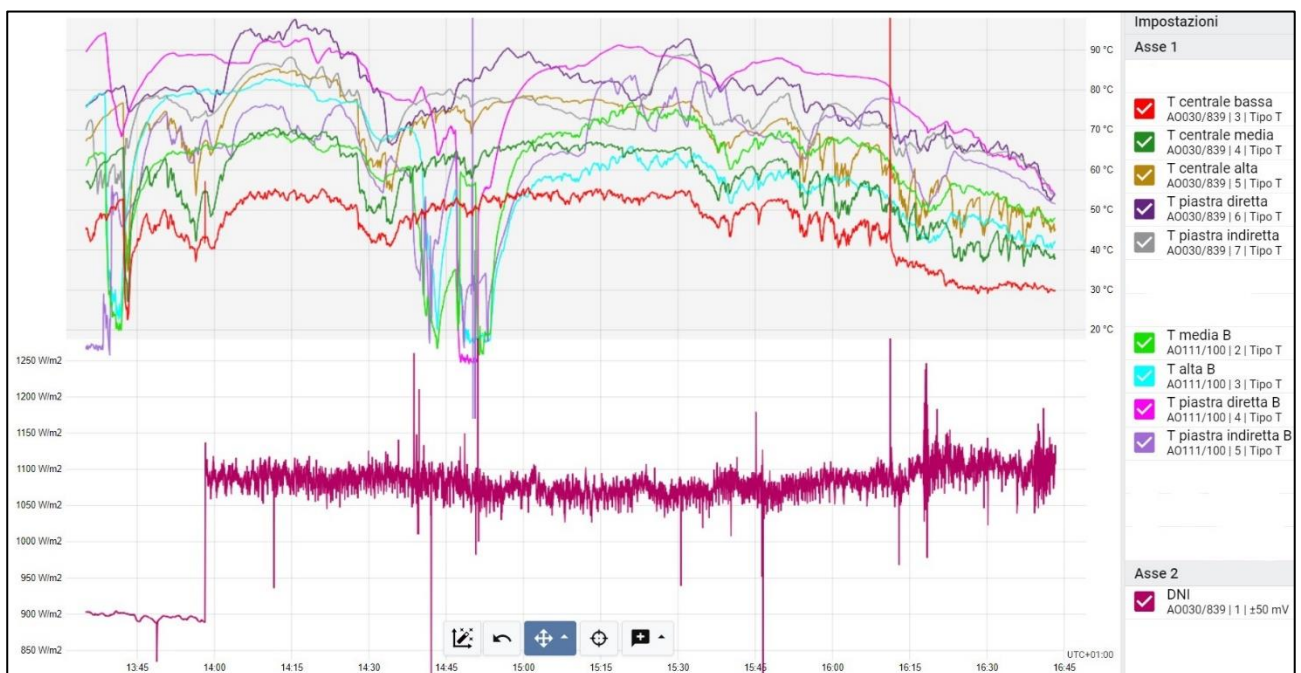
### 7.1.1. Base e piastre chiuse

- 30/11/2021

Uno dei primi test effettuati aveva lo scopo di valutare l'andamento termodinamico in camera di essiccazione e verificare se tale andamento coincidesse con quello ottenuto nelle simulazioni.

A tal proposito sono state chiuse sia le aperture di ingresso del flusso d'aria sulla base sia l'apertura sulla sommità della camera, posizionando termocoppie lungo la verticale della camera a più livelli di altezza (rispettivamente 10, 15 e 20 cm) e su ciascuna piastra (Figure 69 e 70).

I dati risultanti hanno verificato la funzionalità termica dell'essiccatore e convalidato l'ipotesi preliminare di un gradiente termico verticale all'interno della camera di essiccazione, ma senza evidenti differenze tra le due configurazioni.



30/11/2021	A base con fori, B rettangolare, supporto specchi indiretti nuovo, sotto e sopra chiuse, 3 ore e 10 minuti dalle 12:35 alle 15:45, vento nella norma										
	T amb	T bassa A	T media A	T alta A	Tpiastra diretta A	Tpiastra indiretta A	DNImedia	T media B	T alta B	Tpiastra diretta B	Tpiastra indiretta B
Max	16,16	54,19	70,36	85,14	97,45	88,88	1158,03	76,77	82,56	94,13	83,48
Media	10,88	46,44	57,51	68,69	79,21	73,77	1059,27	60,08	73,24	79,61	63,12
Ora Tmax	14:24	13:06	13:11	13:12	13:15	14:32	13:51	14:21	13:10	12:38	14:21

Figure 69 e 70. Registrazione Picolog di un test a basi e piastre chiuse per entrambe le configurazioni con relativo rapporto di Excel.

Anche le piastre non hanno evidenziato notevoli differenze ad eccezione delle medie di temperatura delle piastre indirette (che presentano dieci gradi di differenza). Tuttavia, la discrepanza nelle registrazioni delle piastre indirette potrebbe essere riconducibile ad errori di misurazione (notare sul grafico le temperature fuori scala della configurazione B intorno alle 14:45) e quindi trascurabile ai fini della nostra sperimentazione.

### 7.1.2. Basi aperte e piastre chiuse

- 15/12/2021

In base all'ipotesi espressa sopra, si è pensato di aprire completamente le basi per verificare quanto una maggiore area di apertura o una forma diversa influissero sull'andamento termodinamico in camera di essiccazione (Figure 71 e 72).

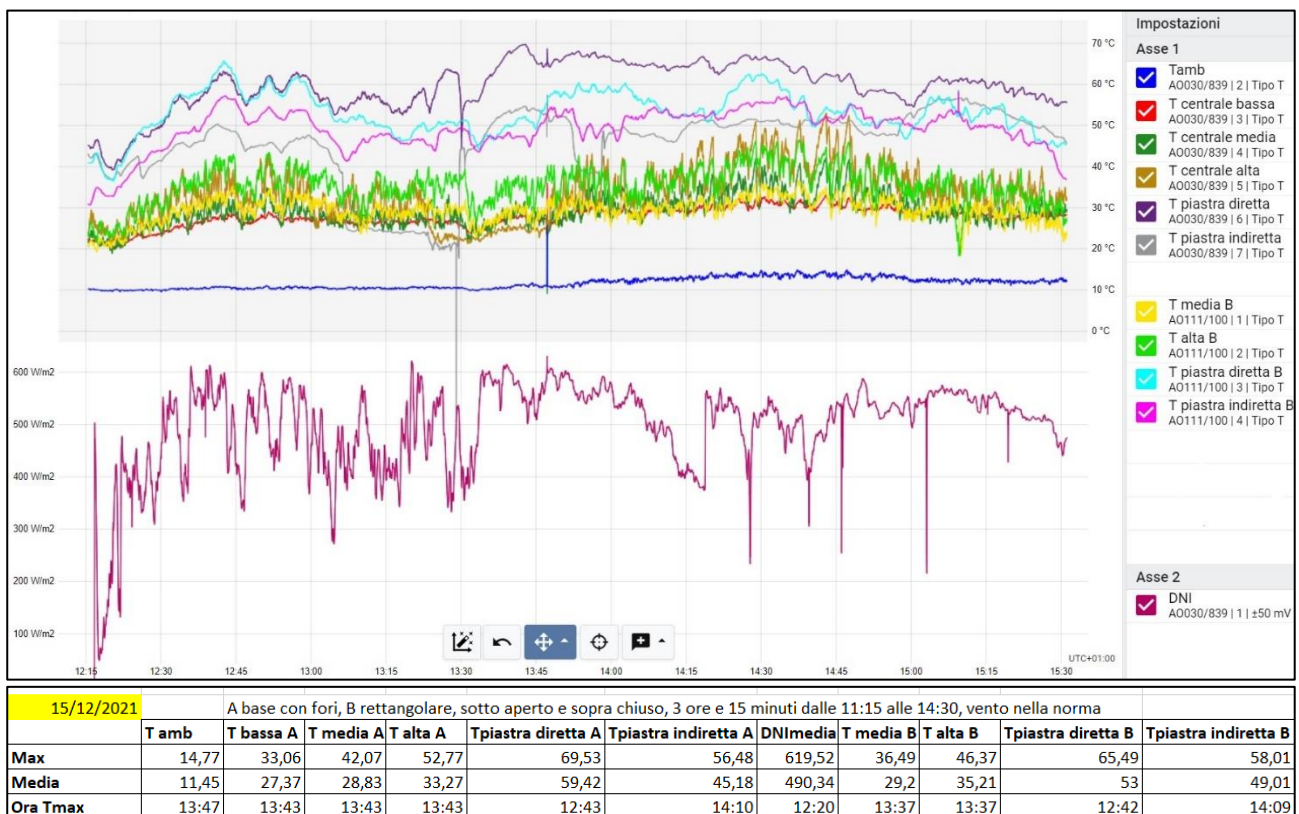


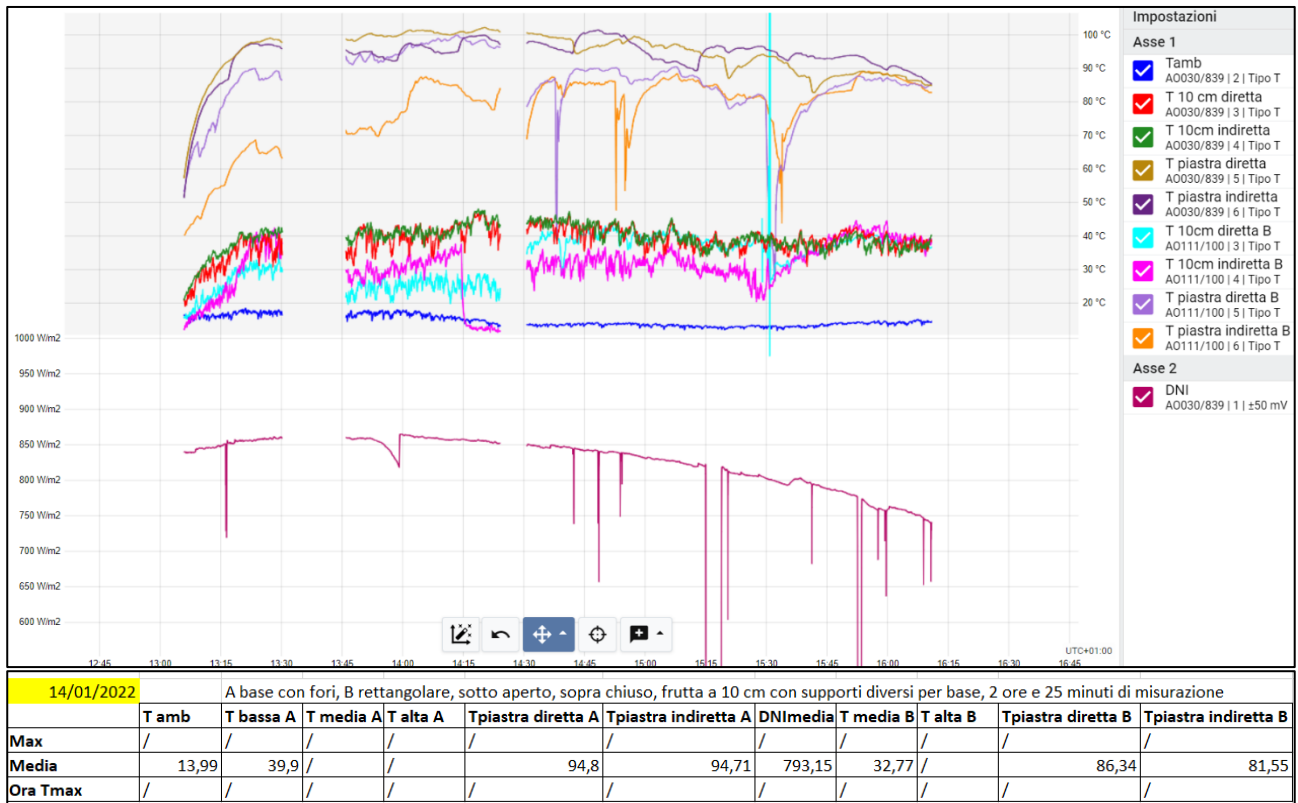
Figure 71 e 72. Registrazione Picolog di un test a basi aperte e piastre chiuse per entrambe le configurazioni con relativo rapporto di Excel.

Quello che salta all'occhio immediatamente è la generale netta diminuzione delle temperature rilevate a prescindere dalla configurazione considerata, dovuto però a valori di intensità di radiazione solare di gran lunga inferiori a quelli del test precedente, per cui non è stato possibile notare differenze tra le basi.

Un fatto interessante è però l'oscillazione sistematica delle temperature in camera in un intervallo di 15°C: ciò è probabilmente dovuto alle variazioni repentine di portata d'aria in ingresso in camera causate da folate di vento, le quali rendono incerta la misurazione istantanea della temperatura.

- **14/01/2022**

Stesse condizioni della prova precedente, stavolta però all'interno della camera sono state inserite soltanto due termocoppie alla stessa altezza, una più vicina alla piastra diretta e una alla piastra indiretta, per verificare l'eventuale esistenza di un gradiente termico orizzontale in camera (Figura 73 e 74).



**Figura 73 e 84.** Registrazione Picolog di un test a basi aperte e piastre chiuse per entrambe le configurazioni con relativo rapporto di Excel.

I dati risultanti hanno confutato l'ipotesi sopra citata, in quanto la differenza di temperatura tra le due termocoppie (al netto dei problemi di misurazione all'origine dei valori fuori scala o delle interruzioni di registrazione sopra visibili) è risultata prettamente irrisoria e trascurabile, tanto da riportare nel riassunto della prova soltanto la media delle due termocoppie per ciascuna base.

L'esito della prova è stato alquanto soddisfacente: le temperature registrate (considerando l'altezza a cui sono state rilevate) sono soddisfacenti e rispecchiano il gradiente termico ipotizzato tra le due configurazioni; tuttavia, i valori registrati si discostano leggermente da quelli simulati preliminarmente, a testimonianza del fatto che in un contesto reale sono presenti variabili incontrollabili e difficilmente approssimabili.

### 7.1.3. Base chiusa e piastre aperte a 4 mm

- **17/12/2021**

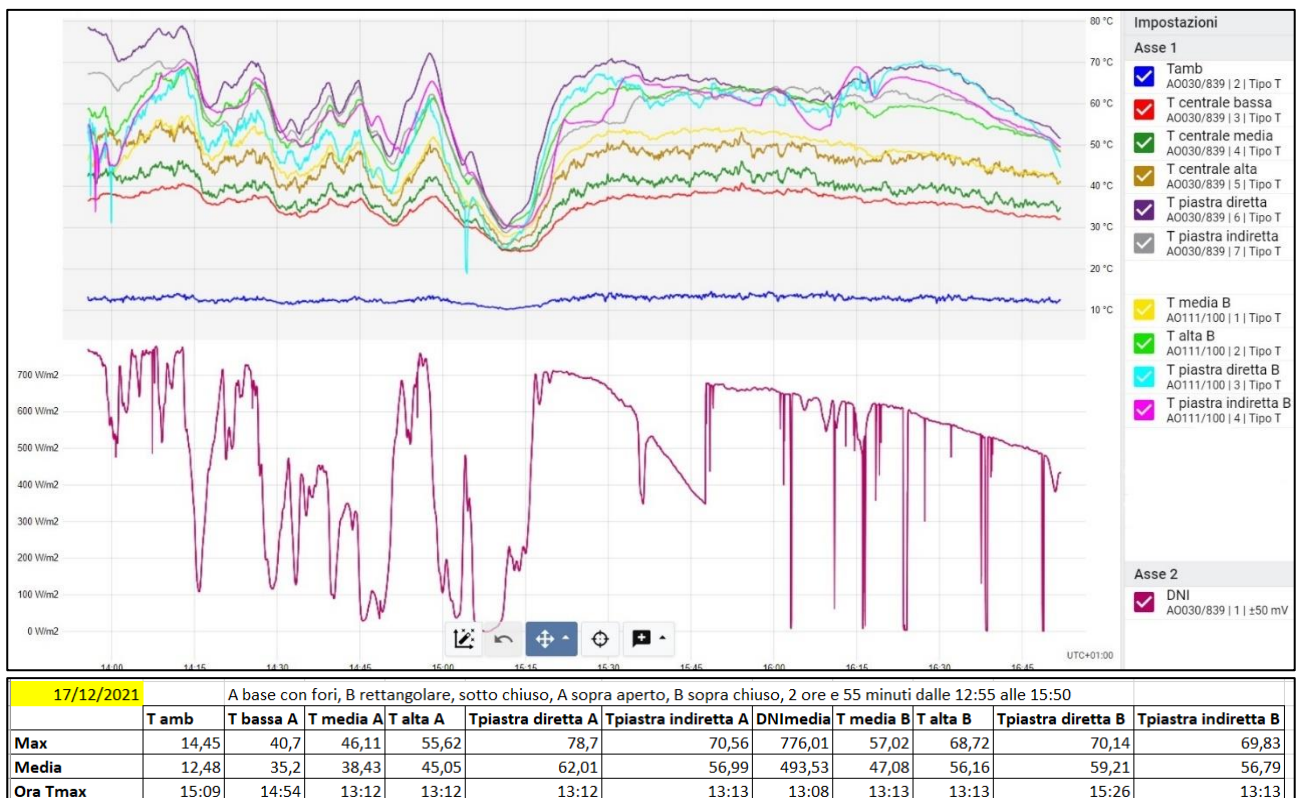
Come accennato precedentemente, il fattore vento incide notevolmente sulle prestazioni di un essiccatore in quanto causa una repentina accelerazione nel flusso d'aria passante nella camera con conseguente asportazione di calore e riduzione di temperatura.

Per ridurre l'impatto di questa variabile sulle misurazioni senza intaccare la funzionalità dell'essiccatore, si è pensato di chiudere quasi completamente l'apertura delle basi mediante la lastra di legno apposta posta sotto di esse.

Non è auspicabile interrompere del tutto l'afflusso d'aria in quanto una minima portata è necessaria per rimuovere efficacemente il contenuto d'umidità nei prodotti.

Nel test seguente, si è pensato inoltre di comparare le prestazioni dei due essiccatori con o senza apertura sulla sommità della camera a parità di condizioni ambientali: la configurazione con base a fori presenta una apertura di 4 mm, mentre la configurazione con tagli rettangolari non ha alcuna apertura sulla sommità della camera (Figura 75 e 76).

A prescindere dalla configurazione utilizzata, l'obiettivo del test era di comparare l'efficienza termica del prototipo a piastre aperte con quella a piastre chiuse (non adatta all'essiccazione).



**Figura 75 e 76.** Registrazione Picolog di un test a basi chiuse con piastre aperte a 4 mm per la configurazione a fori e con piastre chiuse per la configurazione a tagli rettangolari con relativo rapporto di Excel.

Come già rinvenuto dalle simulazioni, si nota una generale diminuzione delle temperature rinvenute in camera di essiccazione nella configurazione a piastre aperte rispetto a quella a piastre chiuse: probabilmente l'aria nella camera, non potendo defluire, ristagna nella parte alta e si riscalda maggiormente per convezione con le piastre, sebbene in questo modo non possa (almeno ipoteticamente) espellere l'umidità asportata dai prodotti.

Un dato da registrare è la sostanziale uguaglianza in termini di temperature misurate tra le piastre in una configurazione e l'altra a prescindere dai valori interni: decade definitivamente l'ipotesi che l'andamento termodinamico interno alla camera di essiccazione influenzi in qualche modo le temperature sulle piastre.

Da notare inoltre che le misurazioni, avendo ridotto l'impatto delle folate di vento, risultano più pulite e chiare da leggere.

Tutto sommato l'esito del test può dirsi sufficiente: le temperature registrate nella configurazione con base a fori (quella con le condizioni auspicabili di essiccazione in questo caso) non sono soddisfacenti, eppure il

confronto tra le basi è stato valido e tali prestazioni sono giustificabili in base agli esigui valori di radiazione registrati in quella giornata.

#### 7.1.4. Basi e piastre aperte a 4 mm

- 13/01/2022

Sebbene i test a base quasi completamente chiusa presentassero notevoli vantaggi in termini di qualità della misura e valori in camera di essiccazione misurati, ipoteticamente una base chiusa non gioverebbe alla funzionalità dell'essiccatore per lo stesso motivo delle piastre chiuse: una esigua portata d'aria in ingresso limiterebbe l'asportazione del contenuto d'aria dai prodotti, sconfiggendo lo scopo stesso del processo.

Lo scopo dei test successivi è stato quindi di verificare la funzionalità termodinamica dell'essiccatore nelle condizioni di prova "peggiori" (tutto aperto) e confrontare le prestazioni delle due configurazioni proposte (Figura 77 e 78).

Nel test seguente sono state inoltre poste soltanto due termocoppie nelle camere alla stessa altezza, ma diversa collocazione longitudinale (una più vicina ad uno sportello e una all'altro) al fine di verificare l'eventuale esistenza di un gradiente termico longitudinale all'interno della camera (parametro non esposto nelle simulazioni in quanto l'unico gradiente studiato all'interno della camera è stato quello verticale al centro).

Analogamente a quello orizzontale tra una piastra e l'altra, anche il gradiente termico longitudinale è risultato trascurabile, tanto da riportare nel riassunto della prova la media delle misurazioni in camera allo stesso livello di altezza (T bassa).

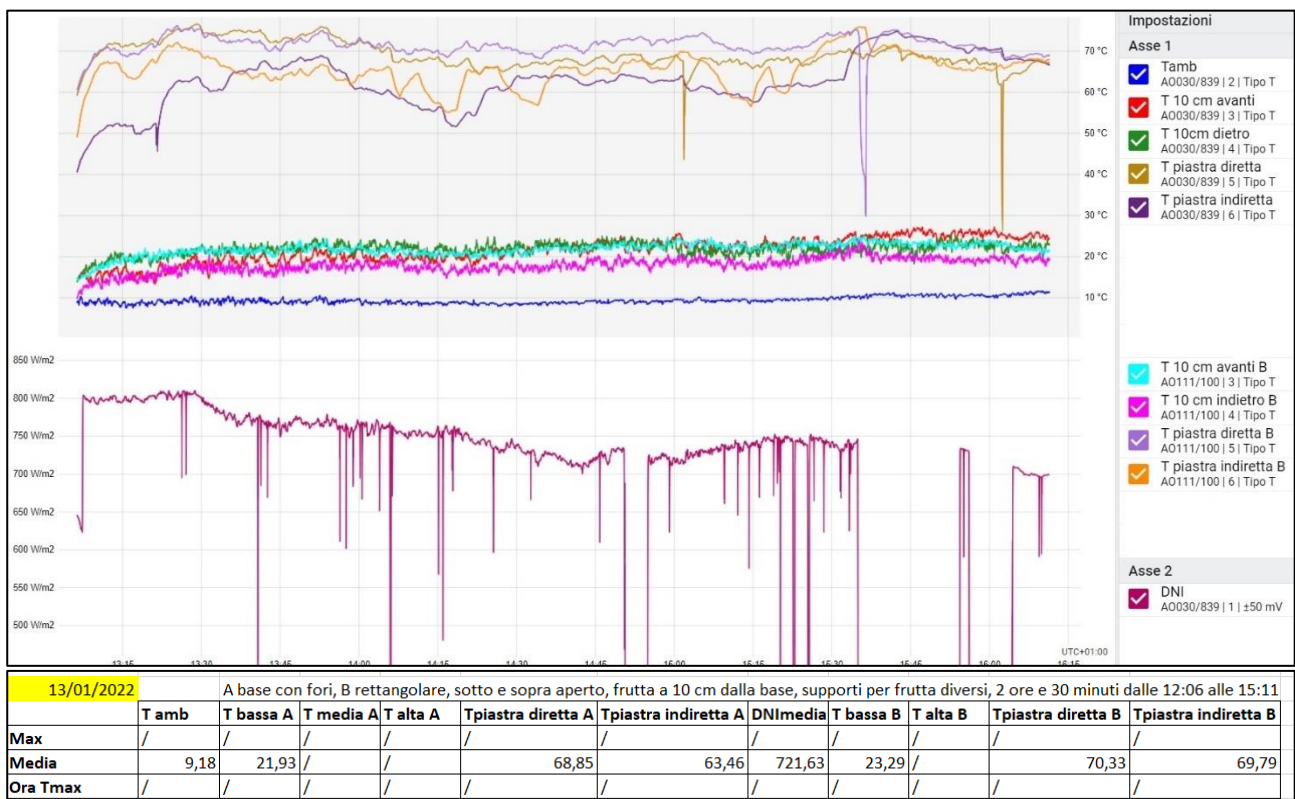


Figura 77 e 78. Registrazione Picolog di un test a basi aperte e piastre aperte a 4 mm per entrambe le configurazioni con relativo rapporto di Excel.

Il risultato della prova stavolta non è stato soddisfacente: a dispetto della configurazione considerata, le temperature raggiunte non sono assolutamente adatte al processo di essiccazione, nemmeno considerando la bassa quota di considerazione; inoltre non è stata registrata una rilevante differenza tra le due configurazioni a dispetto di quanto rinvenuto dalle prove precedenti.



L'unica ipotesi plausibile è che le condizioni di prova siano state tanto avverse da non permettere di rilevare una sostanziale differenza tra i dati delle configurazioni: al netto di bassa temperatura ambiente, esigue radiazioni e vulnerabilità alle folate di vento, le configurazioni non hanno potuto raggiungere una funzionalità a regime tale da mostrare tratti distintivi.

### 7.1.5. Basi e piastre aperte a 0,5 mm

- 25/01/2022

Le condizioni di prova sono le stesse del test precedente, eccetto per un'apertura stavolta corrispondente a 0,5 mm invece di 4 mm sulla sommità della camera (Figure 79 e 80).

Tale scelta è stata dettata dalla necessità di ridurre l'impatto del vento sull'andamento termodinamico in camera senza intaccare le funzionalità operative dell'essiccatore: non potendo chiudere né la superficie di ingresso del flusso d'aria né l'apertura superiore della camera, si è cercato di individuare un'apertura minima sulla sommità tale da non ostruire il processo di essiccazione e al contempo limitare l'effetto delle variazioni repentine di portata sull'andamento termodinamico.

Inoltre, a differenza dei test precedenti, sono state poste ben quattro termocoppie per piastra, due a diversi livelli di altezza (20 cm e 10 cm) sull'asse verticale baricentrico della piastra e due su un asse verticale situato lateralmente.

L'idea dietro questa scelta consisteva nell'identificare sperimentalmente l'esistenza dei diversi gradienti termici su ciascuna piastra rinvenuti nelle simulazioni ed eventualmente verificarne l'attinenza o meno al modello supposto in fase preliminare dal software di elaborazione.

Data l'esigenza di impiegare numerose termocoppie per ogni piastra e la limitata disponibilità di quest'ultime, è stato deciso di impiegare nel test soltanto la configurazione con base a fori: dovendo escludere una delle due, è stata scelta per l'utilizzo la configurazione che fino ad ora ha mostrato risultati migliori (dal punto di vista termodinamico) nelle prove sperimentali.

A fine test è stata poi esclusa la misura della termocoppia centrale bassa della piastra indiretta in quanto ritenuta malfunzionante (stessa temperatura rilevata per tutto il test).

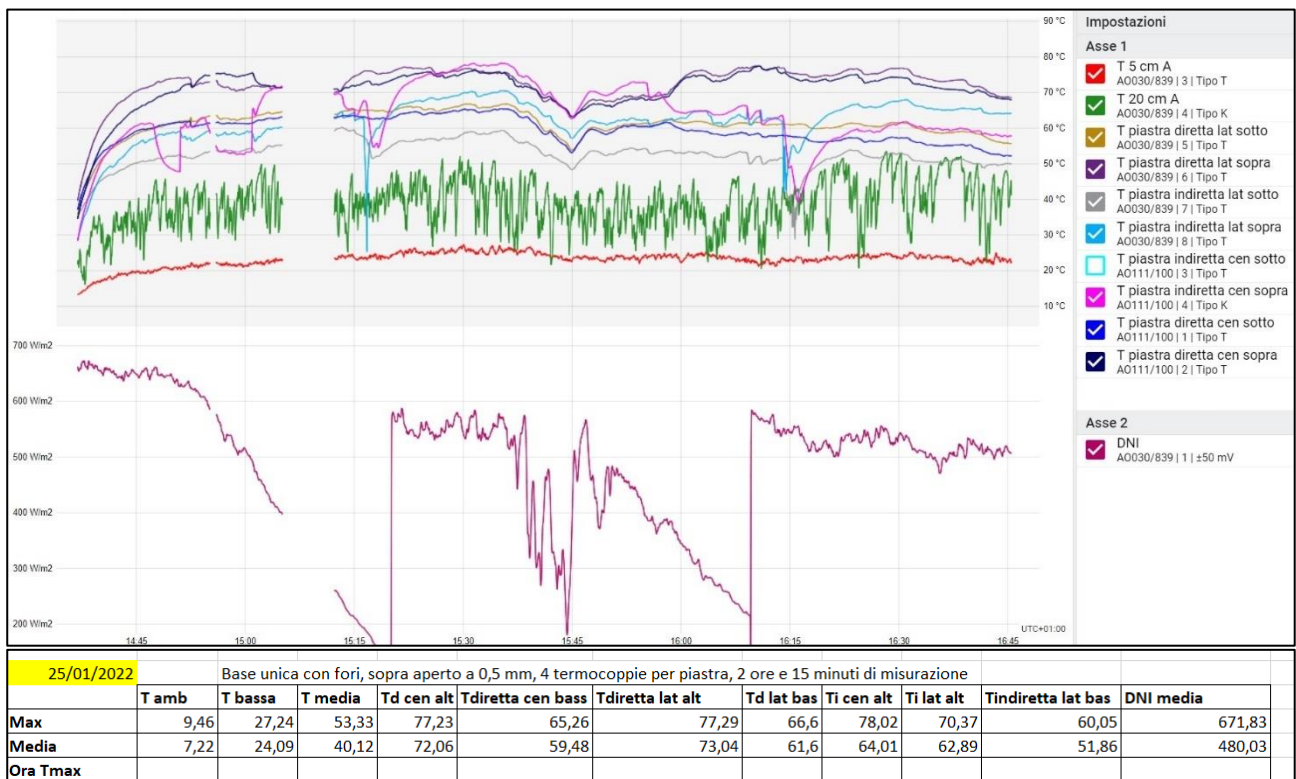


Figura 79 e 80. Registrazione Picolog di un test a base aperta e piastre aperte a 0,5 mm per la configurazione con base a fori con relativo rapporto di Excel.

Un dato interessante è sicuramente l'assenza di oscillazione nella misura a 5 cm di altezza dal fondo della camera: si potrebbe ipotizzare che, avendo l'aria nello strato più basso condizioni più simili a quelle dell'aria in ingresso, una repentina variazione di portata non affligga particolarmente la precisione di misura della termocoppia (quindi non venga rilevata una differenza degna di nota).

Lo stesso non si può dire per lo strato d'aria più vicino all'espulsione: la misura è particolarmente instabile ad un'altezza superiore, a testimonianza di quanto, a temperature maggiori, la convezione forzata introdotta dalle accelerazioni del flusso d'aria affligga i valori rilevati in camera di essiccazione.

Spostando l'attenzione sulle piastre, è possibile notare che i dati risultanti sono pressappoco in linea con quelli rinvenuti nelle simulazioni: il gradiente termico verticale su ciascuna piastra è evidente, dato che per entrambe le piastre le termocoppie superiori hanno registrato valori nettamente maggiori rispetto a quelle inferiori ( $\pm 10^\circ\text{C}$ ).

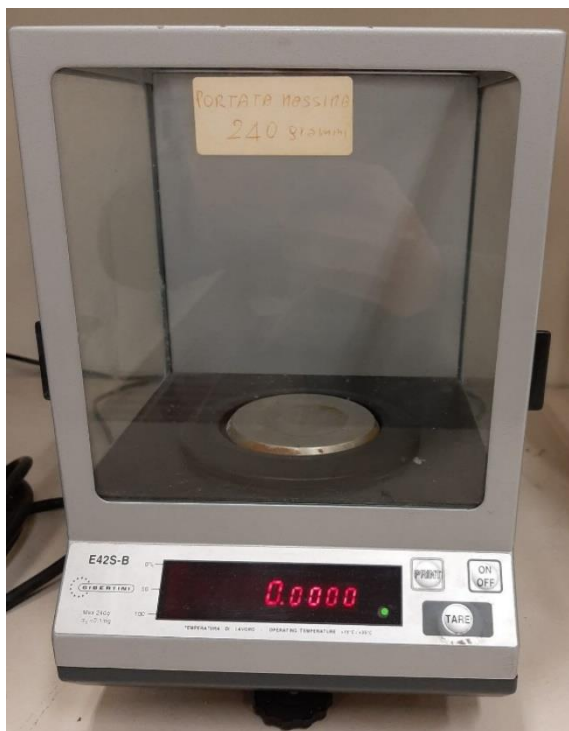
Il discorso cambia confrontando le temperature alle stesse altezze: ad eccezione della piastra indiretta, dove la differenza può essere spiegata da una sovrapposizione delle radiazioni riflesse dai due specchi sulla termocoppia centrale a dispetto di quella laterale, un gradiente termico orizzontale apprezzabile non è stato registrato sulla piastra diretta.

I risultati del test possono comunque considerarsi soddisfacenti: le temperature registrate in camera sono nettamente superiori al test precedente a dispetto dell'intensità di radiazioni rilevata inferiore ed è stato possibile apprezzare un gradiente termico non trascurabile tra le due piastre in linea con le simulazioni preliminari.

## 7.2. PROVE DI ESSICCAZIONE

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 del prototipo nel realizzare il processo di essiccazione vero e proprio.

Per fare questo, parallelamente alle misure esposte sopra, sono stati introdotti di volta in volta nell'essiccatore ad un'altezza prefissata diversi spicchi di mela il cui peso è stato registrato mediante una bilancia di precisione prima e dopo la prova (Figura 81).



**Figure 81 e 82.** Bilancia di precisione e igrometro portatile utilizzati per le rilevazioni rispettivamente di peso e umidità relativa.

A partire dai dati di massa registrati, è stato possibile indicare per ciascuno spicchio la percentuale di umidità relativa persa nel processo, utilizzando la formula seguente:

$$[(\text{Massa finale} - \text{Massa iniziale}) / \text{Massa iniziale}]$$

La misura della massa è stata corredata in parallelo da una misura dell'umidità relativa dell'aria ambiente in camera di essiccazione: introducendo un igrometro di dimensioni ridotte assieme agli spicchi di mela nella camera di essiccazione e segnando ogni quarto d'ora il valore da esso riportato, è stato possibile registrare l'andamento dell'umidità relativa in funzione delle condizioni termodinamiche instaurate nella camera di essiccazione (Figura 82).

Come base di appoggio per gli spicchi di mela è stato scelto un setaccio sorretto da due listelli in legno (Figura 83).



*Figura 83. Sistema di supporto per gli spicchi di mela da essiccare.*

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.

- **13/01/2022**

Al netto dei risultati termodinamici insoddisfacenti ottenuti nello stesso test a causa di un contesto di prova avverso, la prova di essiccazione ha dato risultati tutto sommato sufficienti: considerata la relativamente breve durata della prova (per un processo completo solitamente sono richieste 7-8 ore) e l'alta umidità relativa esterna per il periodo preso in considerazione, gli spicchi di mela hanno perso in media il 40% del loro contenuto di umidità, lasciando buone aspettative nel caso in cui il processo fosse continuato per un intervallo di tempo più adatto.



Inoltre, è stato possibile rilevare una netta differenza operativa tra le due configurazioni: la media delle umidità relative asportate dagli spicchi nella configurazione con base a fori risulta nettamente superiore rispetto a quella nella configurazione con base a tagli rettangolare ( $\pm 10\%$ ).

Dai risultati ottenuti si potrebbe affermare che in condizioni di prova moderate (tali da permettere lo stabilirsi di un regime di funzionamento stazionario) l'essiccatore sia in grado di realizzare con efficacia al di sopra della media il processo di essiccazione, in particolar modo nella configurazione con la base a fori.

I risultati ottenuti risultano ancor più sorprendenti considerando che il test sia stato eseguito chiudendo la sommità della camera di essiccazione: sebbene fosse stato ipotizzato che in questo modo sarebbe venuto a mancare l'effetto camino necessario al processo, l'asportazione di umidità potrebbe essere giustificata dal fatto che le piastre non siano ermeticamente chiuse e che un minimo flusso d'aria riesca comunque a defluire dalla camera.

## 8. CONCLUSIONI

In seguito ai risultati dei test sperimentali sopra esposti, sono state tratte le conclusioni qui sotto riassunte:

- Il prototipo di essiccatore progettato risulta essere efficiente dal punto di vista termodinamico e funzionale al processo di essiccazione.  
I dati raccolti nelle prove dimostrano che le temperature raggiunte all'interno della camera di essiccazione anche in un contesto di prova avverso sono funzionali all'essiccazione: pur registrando valori medi relativamente bassi della radiazione diretta, il prototipo presenta all'interno della camera temperature ottimali per l'essiccazione (tra i 45°C e i 60°C) fin dai 15 cm di altezza, garantendo quindi una buona capacità di carico e un processo efficace anche in condizioni di prova avverse.
- I risultati dei test sperimentali confermano i dati delle simulazioni numeriche preliminari.  
Le distribuzioni sperimentali delle temperature delle piastre sono in accordo con gli andamenti mostrati dal software relativamente ai gradienti termici rinvenuti su ciascuna piastra (tra i 30°C e 40°C in direzione verticale e pressappoco 10°C tra centro e lato di ciascuna piastra) e alle differenze dei valori registrati tra una piastra e l'altra (tra i 10°C e i 20°C tra le medie di ciascuna piastra) al netto dei parametri impostati.
- In base ai dati registrati nei test di essiccazione effettuati si può affermare che il prototipo garantisce un processo essiccativo efficiente al variare delle condizioni di prova scelte.  
Anche nella configurazione meno adatta al processo essiccativo (piastre chiuse sulla sommità della camera di essiccazione), i prodotti essiccati in entrambe le versioni dell'essiccatore proposte hanno registrato elevate percentuali di umidità relativa asportata (tra il 55% e il 70%) in tempi relativamente brevi (poco più di 3 ore di prova), lasciando buone aspettative nel caso in cui l'essiccazione fosse continuata per un intervallo di tempo in linea con quelli registrati in letteratura (tra 6 ed 8 ore).
- Al netto delle condizioni di prova testate, l'assetto che sembra essere ottimale per l'essiccazione è quello con base aperta e apertura tra le piastre posta a 0,5 mm.  
Tale configurazione presenta infatti un buon compromesso tra efficacia termodinamica, funzionalità di processo essiccativo e riduzione degli effetti negativi delle variabili incontrollabili.  
Sebbene siano state registrate temperature inferiori delle piastre e all'interno della camera di essiccazione rispetto agli assetti con basi chiuse o apertura nulla sulla sommità della camera (in media 15°C di differenza), i test effettuati con questa configurazione hanno comunque mostrato valori di temperatura adatti al processo essiccativo, ma soprattutto maggiore stabilità dei valori registrati e tempi di funzionamento a regime dell'essiccatore più lunghi.
- Dal confronto dei risultati di entrambe le configurazioni del prototipo proposte, la configurazione migliore per funzionalità di processo ed efficacia termodinamica sembra essere quella con la base a fori.

In linea con le simulazioni numeriche preliminari, la configurazione con base a fori presenta medie di temperatura in camera di essiccazione maggiori (di circa 10°C) e una maggiore capacità di carico dovuta all'altezza minore alla quale la temperatura ottimale per l'essiccazione (45°C) viene raggiunta (in media 10 cm dal fondo per la base a fori contro i 15 cm della base a tagli rettangolari).

Inoltre, dai test di essiccazione è emerso che, a parità di durata della prova, i prodotti inseriti nella configurazione con base a fori presentano in media il 10% di umidità relativa asportata in più rispetto a quelli inseriti nella configurazione con base a tagli rettangolari.

Ciò a conferma che una minore superficie di ingresso permette una gestione migliore delle variazioni repentine di portata d'aria senza intaccare l'efficacia del processo essiccativo.

## 9. BIBLIOGRAFIA

1. Stambouli, A.B., Koinuma, H., 2012. A primary study on a long-term vision and strategy for the realisation and the development of the Sahara Solar Breeder project in Algeria. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 16, 591–598.
2. Yettou, F., Azoui, B., Malek, A., Gama, A., Panwar, N., 2014. Solar cooker realizations in actual use: An overview. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 37, 288–306.
3. Enerdata, 2020. *Global Energy Statistical Yearbook 2020*.
4. Pillai, I.R., Banerjee, R., 2009. Renewable energy in India: Status and potential. *Energy* 34, 970–980.
5. Karekezi, S., Kithyoma, W., 2002. Renewable energy strategies for rural Africa: is a PV-led renewable energy strategy the right approach for providing modern energy to the rural poor of sub-Saharan Africa? *Energy Policy* 30, 1071–1086.
6. Walsh, M.J.; Gerber Van Doren, L.; Shete, N.; Prakash, A.; Salim, U. Financial tradeoffs of energy and food uses of algal biomass under stochastic conditions. *Appl. Energy* 2018, 210, 591–603.
7. Monforti-Ferrario, F.; Dallemand, J.-F.; Pascua, I.P.; Motola, V.; Banja, M.; Scarlat, N.; Bertoldi, P.; Pennington, D. *Energy Use in the EU Food Sector: State of Play and Opportunities for Improvement*; Publications Office of the EU: Luxembourg, 2015.
8. Awasthi, S.K.; Sarsaiya, S.; Awasthi, M.K.; Liu, T.; Zhao, J.; Kumar, S.; Zhang, Z. Changes in global trends in food waste composting: Research challenges and opportunities.
9. Azwin Kamarulzaman, M. Hasanuzzaman, N.A. Rahim; *Global advancement of solar drying technologies and its future prospects: A review*; Higher Institution Centre of Excellence (HICoE), Kuala Lumpur, Malaysia.
10. WindEurope – the voice of the wind energy industry.
11. GSE – Gestore dei servizi energetici.
12. Thirugnanasambandam, M., Iniyan, S., Goic, R., 2010. A review of solar thermal technologies☆. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 14 (1), 312–322.
13. Hage, H.E., Herez, A., Ramadan, M., Bazzi, H., Khaled, M., 2018. An investigation on solar drying: A review with economic and environmental assessment. *Energy* 157, 815–829.
14. Kumar, M., Sansaniwal, S.K., Khatak, P., 2016. Progress in solar dryers for drying various commodities. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 55, 346–360.
15. Musembi, M.N., Kiptoo, K.S., Yuichi, N., 2016. Design and analysis of solar dryer for mid-latitude region. *Energy Procedia* 100, 98–110.
16. SCI – Solar Cookers International, Newton Solar Oven, Matteo Muccioli.
17. Esiglass, Design glass solutions.
18. Saint-Gobain, comfort e sostenibilità in edilizia.
19. TC – Misure e Controlli srl.
20. A. Kaya; O. Aydın; C. Demirtas; *Drying Kinetics of Red Delicious Apple* 15 February 2007.
21. 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.
22. Jayaraman, Gupta Das. In: Mujumdar AS, editor. *Handbook of industrial drying*. New York: Marcel Decker Inc.; 1995.
23. sito.entecra.it “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.
24. <https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/products/simcenter/flotherm-xt.html>.
25. <https://www.cadlog.eu/cfd-software-analisi-termica-e-fluidodinamica/flotherm-xt/>.
26. [http://www.epcb.it/software\\_picolog.php](http://www.epcb.it/software_picolog.php).

## 10. RINGRAZIAMENTI

In primis, un ringraziamento speciale al mio relatore, il Prof. Giovanni Di Nicola, sempre presente, puntuale e disponibile, per i suoi consigli, le conoscenze e la serenità trasmesse durante tutto il percorso di tirocinio e di progetto.

Un sentito grazie al Dott. Sebastiano Tomassetti, correlatore di tesi, e al Dott. Francesco Mucciaccia per il supporto, la guida e l'immensa pazienza durante le fasi della progettazione prima e per la stesura della tesi poi.

Ringrazio l'Ing. Matteo Muccioli per avermi dato la possibilità di studiare il suo prototipo iniziale e per il costante aiuto e l'ispirazione durante le varie fasi del progetto.

Ringrazio il Dott. Matteo Falone per la pazienza e la disponibilità dimostrate nella realizzazione della simulazione numerica fondamentale per la stesura della tesi.

Un ringraziamento particolare ai miei genitori, che mi hanno sempre spronato e sostenuto permettendomi di arrivare fin qui.

Spero di avervi dato grande soddisfazione, perché è quello che meritate.

Infine un grazie sincero agli amici, ai compagni di corso e soprattutto ai colleghi Ettore Donati e Federico Longo perché in un modo o nell'altro ci siamo sempre aiutati per arrivare assieme al traguardo.