

ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITA' DI BOLOGNA

SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA
Sede di Forlì

Corso di Laurea in
INGEGNERIA MECCANICA
Classe L-9

ELABORATO FINALE DI LAUREA
in TERMOFLUIDODINAMICA APPLICATA

CARATTERIZZAZIONE SPERIMENTALE DI CICLI DI
COTTURA DI UN FORNO DOMESTICO AD INCASSO

CANDIDATO

Vincenzo Di Paola

RELATORE

Marco Lorenzini

CORRELATORE

Michael Lucchi

Anno Accademico 2016/2017

Quanto più l'universo ci appare comprensibile, tanto più ci appare senza scopo.

Lo sforzo di capire l'universo è tra le pochissime cose che innalzano la vita umana al di sopra del livello di una farsa, conferendole un pò della dignità di una tragedia.

Steven Weinberg

Indice

Introduzione	3
Capitolo 1: Modalità di scambio termico	4
1.1 La conduzione	4
1.2 La convezione	7
1.3 Conduzione monodimensionale, stazionaria, senza generazione	8
1.4 La convezione naturale	11
1.5 Convezione forzata	14
1.6 Irraggiamento	15
Capitolo 2: Il forno	21
2.1 Raffreddamento del forno	22
2.2 Elementi riscaldanti	24
2.3 Pulsantiera di comando	25
Capitolo 3: Sistema di acquisizione dei dati	27
3.1 Generalità delle termocoppie	28
3.1.1 Principi di funzionamento delle termocoppie	28
3.2 Hardware	32
3.2.1 Disposizione termocoppie	35
3.3 Software	40
Capitolo 4: Comprensione dei fenomeni	42
4.1 Funzionamento statico	43
4.2 Funzionamento ventilato	54
4.3 Effetto del set-point	63
4.3.1 Caso statico	63
4.3.2 Caso ventilato	63
4.3.3 Confronto tra le due modalità	64
Capitolo 5: Test di efficienza del forno elettrico	67
5.1 Generalità	67
5.2 Preparazione del mattone	68
5.3 Preparazione del forno	70
5.4 Esecuzione del test	70
5.5 Dati registrati e validazione della prova	71
5.6 Risultati test del mattone nel caso di funzionamento statico	73
5.7 Risultati test del mattone nel caso di funzionamento ventilato	78
Conclusioni e sviluppi futuri	83
Bibliografia	84
Ringraziamenti	85

Introduzione

Un primo obiettivo di questo lavoro sarà quello di effettuare delle prove sperimentali su un forno elettrico domestico, al fine di determinare quali siano i fenomeni di scambio termico che caratterizzano il forno e, a seguito di un'adeguata elaborazione dei risultati, i parametri caratteristici del forno necessari alla realizzazione di un modello matematico che descriva e simuli il comportamento termico all'interno della cavità durante la vera e propria fase di cottura. Un ulteriore obiettivo del seguente lavoro consiste nell'effettuare test, seguendo le specifiche derivanti dalle norme, che stabiliscano la reale efficienza dell'elettrodomestico.

Il forno che analizzeremo ci viene fornito dall'Electrolux, azienda leader a livello globale nella realizzazione di questo tipo di apparecchi elettronici.

Nonostante non sia l'obiettivo primario di questa tesi, dal punto di vista teorico si è pensato di realizzare il modello matematico mediante l'utilizzo dei parametri concentrati (o problema 0 dimensionale) che risulta essere un metodo analitico relativamente semplice.

Innanzitutto sarà necessario analizzare il forno e i suoi componenti, in modo da capire quali siano le modalità di scambio termico che si verificano sia all'interno della cavità che all'esterno. Tali competenze saranno strettamente necessarie per lo svolgimento delle prove sperimentali che prevedono la realizzazione di un sistema di acquisizione dati, la caratterizzazione del forno e, successivamente, grazie alle nozioni di teoria apprese e ad altri strumenti tecnici, saremo in grado di scegliere quali e quanti parametri saranno necessari per la costruzione del modello analitico.

Capitolo 1

Modalità di scambio termico

In natura la trasmissione di calore (ovvero il trasferimento di energia termica) si verifica in presenza di corpi aventi differenti temperature. Tale fenomeno può verificarsi secondo tre modalità di scambio termico:

- i. CONDUZIONE: Avviene in mezzi solidi o fluidi.
- ii. CONVEZIONE: Avviene tra un solido e un fluido.
- iii. IRRAGGIAMENTO: Avviene nel vuoto, in assenza di mezzi interposti.

1.1 La conduzione

La conduzione è una modalità di scambio termico che si palesa tramite interazioni a livello molecolare o atomico. Infatti le particelle dotate di più energia la cedono in parte alle altre. La temperatura può essere ricondotta (secondo la teoria cinetica dei gas) all'energia delle singole molecole. In presenza di gradienti termici, il trasferimento di energia avviene dalla temperatura maggiore a quella minore.

In via del tutto esplicativa, è possibile considerare un gas contenuto in un recipiente le cui pareti si trovano a temperatura $T_1 < T_2$ (figura sottostante): si nota che le particelle superiori possiedono una temperatura maggiore, il che si traduce in un'energia maggiore che esse stesse scambiano, tramite urti, con le particelle sottostanti che si trovano a temperatura (energia) minore. In tal modo si verifica un trasferimento di energia dalla parete calda alla fredda.

Nei liquidi il processo è analogo, mentre nei solidi il trasporto di energia è un fenomeno diffusivo, dovuto alle vibrazioni del reticolo (nel caso materiali elettricamente non conduttori) o al moto traslatorio degli elettroni liberi (nei materiali elettricamente conduttori).

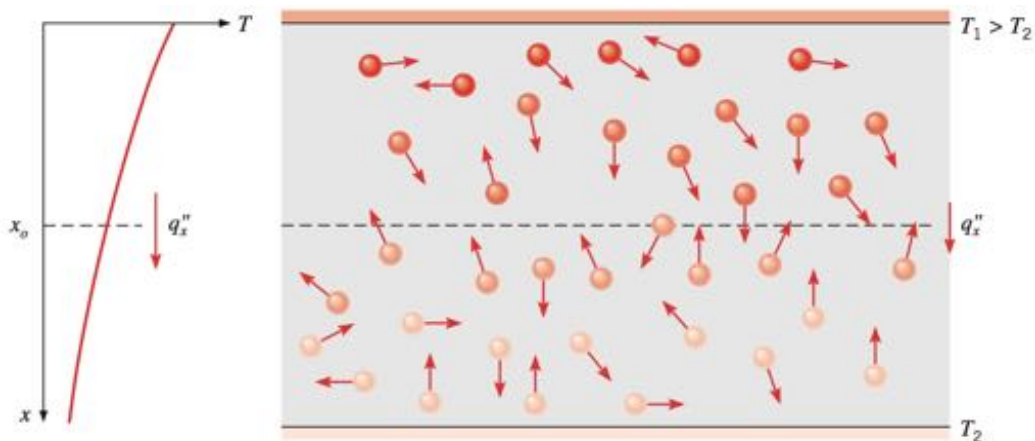


Figura 1.1 Moto traslatorio degli elettroni.

Una delle relazioni di maggior rilevanza è la nota legge di Fourier, determinata in maniera del tutto sperimentale (detta legge perché mai contraddetta).

Si consideri un cilindro di lunghezza Δx , di area A , isolato lateralmente con temperature superficiali note e pari a T_1 e T_2 tali che $\Delta T = T_1 - T_2 > 0$.

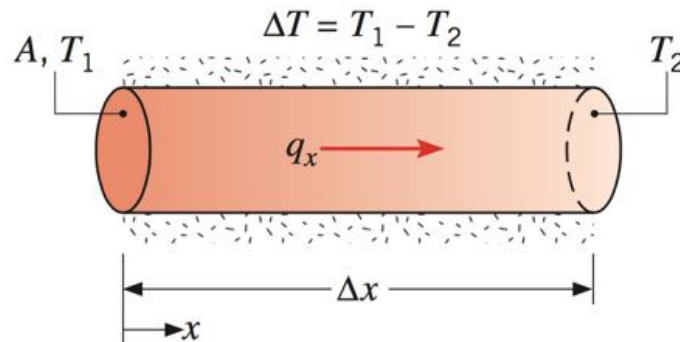


Figura 1.2

Allora, esiste una relazione per la potenza termica che è la seguente:

$$\dot{Q} \propto A \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

Dove: \dot{Q} è la potenza termica scambiata in direzione “x” (caso -monodimensionale).

In tale relazione compare il segno di proporzionalità semplicemente perché la potenza scambiata dipende anche dal tipo di materiale considerato, a tal proposito si avrà:

$$\dot{Q}_x = kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (1.1)$$

Dove: k è la conducibilità termica; proprietà termofisica legata al tipo di materiale.

In termini di flusso termico:

$$q_x'' = \frac{\dot{Q}}{A} \quad (1.2)$$

Dove: q'' indica il flusso termico, non è altro che una grandezza vettoriale ortogonale al gradiente di temperatura.

Infine, un altro risultato di grande rilevanza (ottenuto applicando l'equazione di bilancio dell'energia termica ad un volume infinitesimo) è sicuramente l'equazione del calore:

$$\rho \cdot c \frac{\partial T}{\partial \tau} = q''' + \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (1.3)$$

Dove: " ρ " è la densità, " c " è la capacità termica e q''' è il termine generativo.

L'equazione di diffusione del calore consente di determinare la distribuzione della temperatura all'interno dei corpi e di fare quindi considerazioni in relazione al campo di temperatura stesso (omogeneo, non omogeneo etc...).

1.2 La convezione

La convezione descrive il trasporto di energia tra un fluido e una superficie che il fluido stesso lambisce. Il fenomeno comprende sia il contributo dovuto al movimento macroscopico del fluido (adduzione) che quello microscopico e casuale delle molecole (diffusione). A questo proposito, lo strato limite gioca un ruolo fondamentale: rappresenta la zona all'interno della quale si verificano variazioni di velocità. Essa è importante perché al suo interno avvengono i due fenomeni accennati precedentemente:

- i. La diffusione (conduzione) avviene in prossimità della parete, più precisamente nella zona di aderenza.
- ii. L'adduzione avviene appena al di sopra della zona di diffusione e va scemando man mano che ci si allontana dalla superficie lambita.

Analogamente a prima, andiamo a definire la potenza termica scambiata per convezione come:

$$\dot{Q}_{conv} = h A(T_s - T_\infty) \quad (1.4)$$

Dove: h è il coefficiente di scambio termico convettivo, A è l'area della superficie lambita dal fluido, T_s è la temperatura della superficie lambita e T_∞ è la temperatura del fluido nella corrente libera.

Si possono distinguere diversi tipi di convezione:

- i. La convezione "forzata": si verifica quando il fluido viene mantenuto in movimenti da agenti esterni (ad esempio macchinari).
- ii. La convezione "naturale": si verifica quando il fluido è mantenuto in movimento da forze di volume (come galleggiamento, centrifuga ecc...).

In entrambi in casi è possibile fare una distinzione tra:

- i. Convezione interna: quando lo strato limite si propaga in uno spazio delimitato da pareti (tubazioni, cavità, ecc...).
- ii. Convezione esterna: quando lo strato limite si propaga all'esterno di una determinata superficie (lastra piana, profilo idrodinamici ecc...)

1.3 Conduzione monodimensionale, stazionaria, senza generazione

Lo studio di questo particolare caso è utile per valutare quale sarà la distribuzione di temperatura sulle varie pareti del forno.

La parete piana è il caso più semplice da studiare poichè caratterizzata da un'unica dimensione significativa, lo spessore, come possiamo vedere in figura:

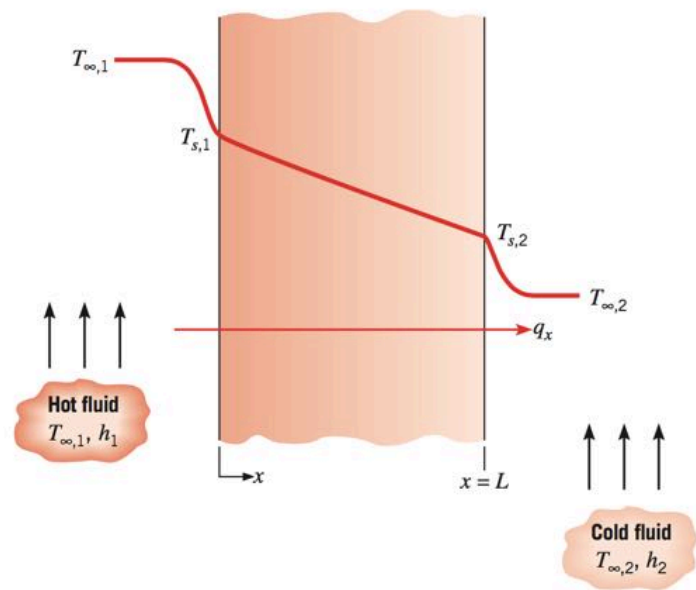


Figura 1.3 Profilo di temperatura attraverso una parete piana.

A questo punto per determinare l'andamento della temperatura (curva rossa in figura) si terrà conto delle seguenti considerazioni:

- i. La temperatura delle pareti è uniforme ed è tale che $T_{s1} > T_{s2}$.
- ii. Il termine generativo (q''') nell'equazione di diffusione è nullo.
- iii. Il termine di accumulo ($\rho c \frac{dT}{dt}$) sia nullo.

Quindi, l'equazione del calore (1.3) diventerà:

$$\rho \cdot c \frac{\partial T}{\partial \tau} = q''' + \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) = 0 \quad (1.5)$$

Integrando due volte:

$$T(x) = C_1 x + C_2 \quad (1.6)$$

Si avrà un andamento lineare decrescente, passando da T_{s1} a T_{s2} .

L'equazione differenziale verrà quindi risolta in base alle condizioni al contorno:

$$1) \quad T(0) = T_{s1}$$

e

$$2) \quad T(L) = T_{s2}$$

Che sostituite in (1.6), forniranno:

$$1) \quad C_2 = T_{s1}$$

$$2) \quad C_1 L + C_2 = T_{s2} \rightarrow C_1 = \frac{T_{s2} - T_{s1}}{L}$$

Infine:

$$T(x) = (T_{s2} - T_{s1}) \frac{x}{L} + T_{s1} \quad (1.7)$$

Dall'equazione (1.7) si vede che il profilo di temperatura dipende dalla sola coordinata x .

Il flusso termico invece è dato dalla derivata della (1.7) ovvero:

$$q_x'' = \frac{k}{L} (T_{s1} - T_{s2}) \quad (1.8)$$

la quale risulta essere costante e indipendente dalla coordinata x .

La distribuzione di temperatura nel caso piano monodimensionale suggerisce un'analogia tra il trasporto termico e quello di corrente elettrica. Definendo la resistenza come il rapporto tra il potenziale motore e il corrispondente rateo di scambio di una quantità, si può scrivere la resistenza termica equivalente per la lastra piana come:

$$R_{t,cond} = \frac{T_{s1} - T_{s2}}{\dot{Q}} = \frac{L}{kA} \quad (1.9)$$

Nel caso di una parete multistrato come quella del forno avremo, ad esempio:

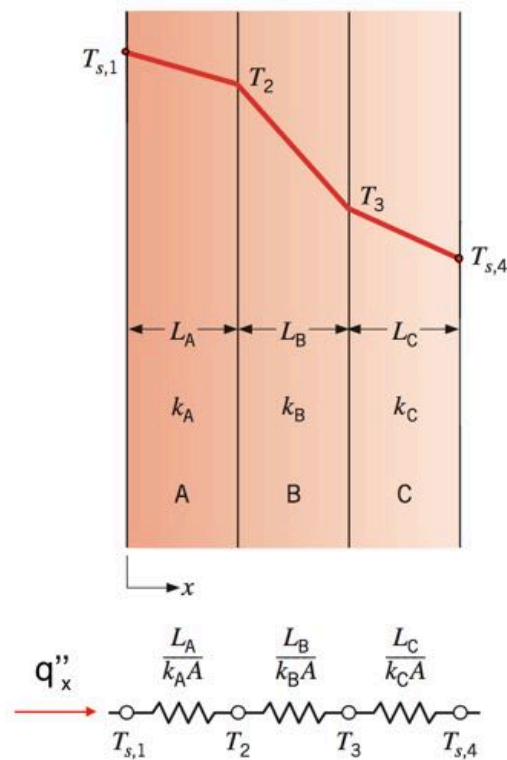


Figura 1.4 Profilo delle temperature in diversi materiali.

Grazie al circuito equivalente, è possibile scrivere:

$$R_{t,TOT} = \frac{1}{\frac{L_A}{k_A A} + \frac{L_B}{k_B A} + \frac{L_C}{k_C A}} \quad (1.10)$$

Quindi:

$$\dot{Q}_x = \frac{T_{s1} - T_{s4}}{\frac{L_A}{k_A A} + \frac{L_B}{k_B A} + \frac{L_C}{k_C A}} \quad (1.11)$$

1.4 Convezione naturale

Nella convezione forzata il moto del fluido è generato da una forza esterna, di natura superficiale, ad esempio l'azione dei palettamenti di una turbomacchina. Si analizza ora il caso in cui il fluido è mosso da una forza di galleggiamento, risultante cioè dall'azione di una forza di volume accoppiata a un gradiente di densità. I fenomeni di scambio termico legati ad essa prendono il nome di convezione naturale o libera. Il galleggiamento è dovuto alla presenza combinata di un gradiente di densità nel fluido e di una forza di volume proporzionale alla densità che agisce su tale gradiente. Solitamente, la forza di volume è l'attrazione gravitazionale, altrimenti potrebbe essere la forza di Coriolis o quella centrifuga (palettamenti di turbina). Il gradiente di densità è solitamente determinato dal campo di temperatura. Per i fluidi, la densità dipende dalla temperatura: essa va in genere aumentando al calare di quest'ultima ($\partial\rho/\partial T < 0$).

Si ricorda inoltre che la presenza di un gradiente di densità e di una forza di volume non bastano ad assicurare l'instaurarsi della convezione libera: infatti, è necessario che la distribuzione di temperatura sia tale da permettere e mantenere il movimento del fluido.

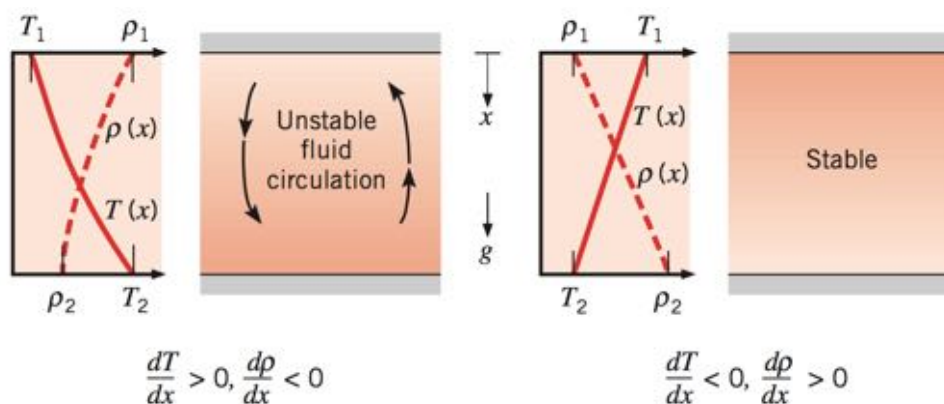


Figura 1.5

Dalla figura 1.5 si vede che, solo nel caso a sinistra le temperature sono tali da mantenere una circolazione stabile del fluido; mentre nel caso di destra si ha una stratificazione termica e un fluido in quiete.

L'equazione di conservazione della quantità di moto diviene quella dello strato limite, ma in essa compaiono anche le forze di galleggiamento, pari a “ $-\rho g$ ”, dove “ ρ ” è la densità del fluido nello strato limite e “ g ” l'accelerazione di gravità locale.

Di conseguenza, si avrà:

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{dp_{\infty}}{dx} - g + v \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (1.12)$$

dove: $\frac{dp_{\infty}}{dx}$ è il gradiente di pressione nel fluido in quiete al di fuori dello strato limite, in tale regione $u=0$ allora:

$$\frac{dp_{\infty}}{dx} = -\rho_{\infty} g \quad (1.13)$$

Sostituendo (1.13) nell'equazione dello strato limite (1.12):

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{\rho_{\infty}}{\rho} g - g + v \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (1.14)$$

Posto: $\Delta\rho = \rho_{\infty} - \rho$ e raccogliendo "g" in (1.14) avremo:

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = g \frac{\Delta\rho}{\rho} + v \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (1.15)$$

Se le variazioni di densità sono dovute solo al campo termico, è possibile metterle in relazione con la temperatura tramite una proprietà termofisica chiamata coefficiente volumetrico di espansione termica isobara, β :

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p \quad (1.16)$$

Esso indica quanto varia la densità per una variazione di temperatura a pressione costante e può essere approssimato come segue:

$$\beta \approx -\frac{1}{\rho} \frac{\Delta\rho}{\Delta T} = -\frac{1}{\rho} \frac{\rho_{\infty} - \rho}{T_{\infty} - T} \Rightarrow \frac{\Delta\rho}{\rho} = \beta(T - T_{\infty}) \quad (1.17)$$

Infine, sostituendo (1.18) in (1.16), l'equazione dello strato limite diventa:

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = g\beta(T - T_\infty) + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (1.18)$$

In cui la relazione tra temperatura e forza di galleggiamento è resa esplicita.

Tale relazione, una volta adimensionalizzata, consente di trovare il profilo dello strato limite adimensionalizzato e di risolvere quindi il problema della convezione.

Infatti, dalla soluzione ricaviamo il valore del numero di Nusselt locale:

$$Nu_x = \frac{hx}{k} = \left(\frac{Gr_x}{4}\right)^{\frac{1}{4}} g(Pr) \quad (1.19)$$

Dove: Gr_x è il numero di Grashof definito come (per $x=L$):

$$Gr_L = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu^2} \quad (1.20)$$

esso rappresenta il rapporto tra le forze di inerzia e quelle di galleggiamento ed è il criterio per stabilire il regime di moto (infatti $Ra_x = Gr_x Pr$).

Mentre Pr rappresenta il numero di Prandtl, il quale fornisce una misura dell'efficienza relativa del trasporto di quantità di moto ed energia nei corrispettivi strati limite, in formule:

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (1.21)$$

Dove: ν rappresenta la viscosità cinematica e α è la diffusività termica: attitudine di un materiale a trasmettere l'energia per diffusione.

1.5 Convezione forzata

Nella convezione forzata il fluido è costretto a scorrere sulle superfici dei dispositivi. Si tratta di ciò che accade all'interno del forno quando il ciclo di cottura prevede l'azione della ventola, la quale che crea un moto dell'aria all'interno della sua cavità.

In maniera analoga a quanto già visto nella convezione naturale, una volta risolte le equazioni dello strato limite siamo in grado di risolvere il problema della convezione: sostanzialmente siamo in grado di valutare il numero di Nusselt.

La relazione per la lastra piana con fluido in moto laminare è la seguente:

$$Nu_x = \frac{h_x x}{k} = 0.332 Re_x^{\frac{1}{2}} Pr^{\frac{1}{3}} \quad (1.22)$$

Dove:

- i. Re_x è il numero di Reynolds, dato dalla relazione:

$$Re_x = \frac{\rho u_{\infty} x}{\mu} \quad (1.23)$$

Esso non è altro che il rapporto tra le forze di inerzia e le forze viscosi, infatti ci consente di sapere se ci troviamo in condizioni di moto turbolento o laminare.

In letteratura esistono altre relazioni di "Nu" in funzione della tipologia della superficie, del tipo di moto e delle caratteristiche del fluido.

1.6 Irraggiamento

L'irraggiamento è una modalità di scambio termico che avviene per propagazione fotonica e di onde elettromagnetiche, di conseguenza non necessita di alcun mezzo interposto.

Lo scambio per irraggiamento avviene tra superfici che si trovano a temperatura differente.

La temperatura gioca quindi un ruolo fondamentale anche nella determinazione della potenza termica, la quale è definita come segue:

$$\dot{Q}_{irr} = \varepsilon A \sigma (T_p^4 - T_{sur}^4) \quad (1.24)$$

Dove:

- i. σ è la costante di Stefan Boltzmann, pari a $5,67 \cdot 10^{-8} \left(\frac{W}{k^4 \cdot m^2}\right)$.
- ii. ε è l'emissività: essa dipende dalla morfologia della superficie e dal tipo di materiale.
- iii. A è l'area della superficie emettitrice.
- iv. T_p è la temperatura della superficie emettitrice.
- v. T_{sur} è la temperatura delle pareti dell'ambiente.

Generalmente lo scambio per irraggiamento avviene in parallelo alla convezione.

Come già detto, il trasporto termico per irraggiamento non necessita di mezzi interposti tra le superfici coinvolte e la potenza trasmessa per irraggiamento dipende dalla temperatura relativa delle superfici (equazione 1.24) che interagiscono, quindi risulta chiaro che per due corpi alla stessa temperatura la potenza netta scambiata sia nulla.

L'irraggiamento ha manifestazioni sia quantistiche che ondulatorie, le quali si attribuiscono alla radiazione termica che possiede una frequenza ν e una lunghezza d'onda λ , legate dalla velocità della luce nel mezzo, c :

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \quad (1.25)$$

L'intensità della radiazione termica ha una distribuzione spettrale, ovvero dipende dalla lunghezza d'onda, in modo continuo ma non uniforme. L'emissione ha anche una dipendenza dalla direzione.

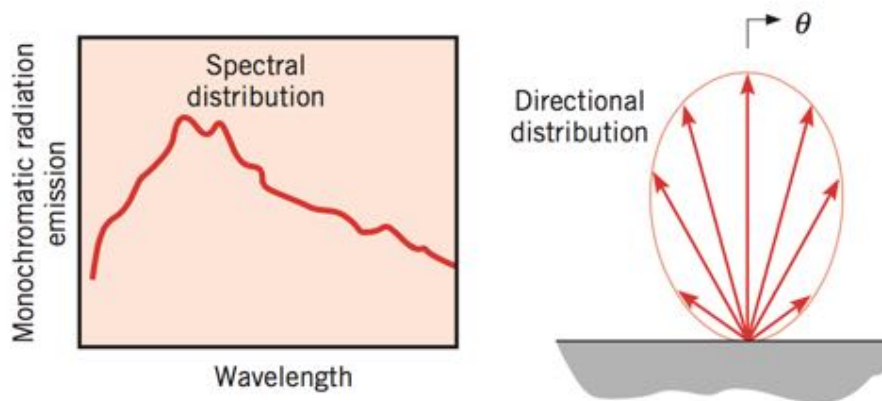


Figura 1.6

Le superfici emettono in tutte le direzioni, ed spesso è utile conoscere la distribuzione della radiazione nello spazio; parimenti la radiazione incidente su una superficie può venire da diverse direzioni e la risposta di questa è dipendente da esse. Gli effetti direzionali possono essere di importanza primaria nel determinare lo scambio termico netto per irraggiamento e possono essere trattati introducendo l'intensità di radiazione.

Prima però, è necessario definire l'angolo solido, che è l'analogo tridimensionale dell'angolo piano. La sua forma differenziale $d\omega$ è definita come il rapporto tra l'area infinitesima dA_n sulla superficie di una sfera e il quadrato del raggio della sfera stessa r^2 .

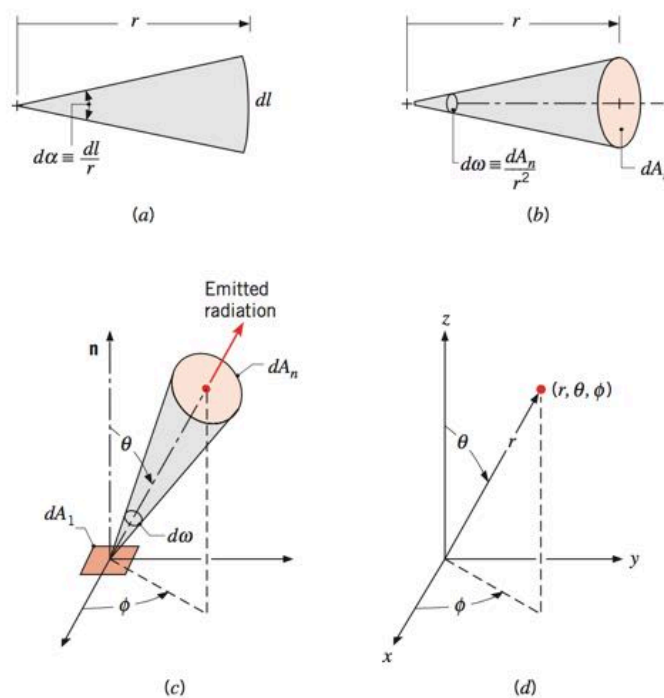


Figura 1.7

(a)Angolo piano, (b)Angolo solido, (c)Emissione di radiazione da una superficie dA_n in un angolo solido $d\omega$ sotteso a dA_n in un punto su dA_1 , (d)Coordinate sferiche.

L'emissione di una superficie opaca infinitesima dA_1 , in direzione θ attraverso l'area infinitesima dA_n , la quale sottende un angolo solido $d\omega$.

L'area è data dal prodotto $r d\theta \cdot r \sin\theta d\phi$ pertanto:

$$dA_n = r^2 d\omega = r^2 \sin\theta d\phi d\theta \quad (1.26)$$

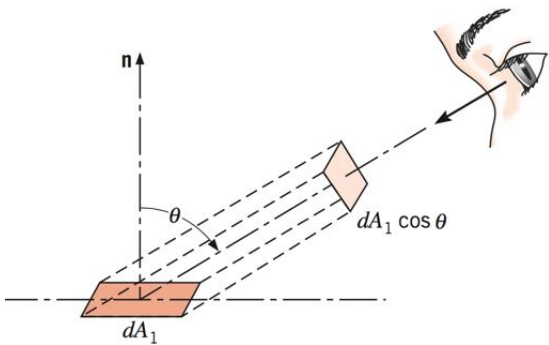
e quindi:

$$d\omega = \sin\theta d\phi d\theta \quad (1.27)$$

L'emissione può avvenire su una semi-sfera a cui è associato l'angolo solido $d\omega$:

$$\int d\omega = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \sin\theta d\theta d\phi = 2\pi sr \quad (1.28)$$

La potenza emessa da dA_1 , che passa per dA_n , viene quindi espressa in termini di intensità spettrale, I_λ :



È l'energia radiante emessa alla lunghezza d'onda λ nella direzione (θ, ϕ) per area della superficie ortogonale a tale direzione, per angolo solido attorno alla stessa direzione e per lunghezza d'onda $d\lambda$.

Figura 1.8 *Proiezione normale di dA_1 normale alla direzione di irraggiamento.*

$$I_{\lambda,e}(\lambda, \theta, \phi) = \frac{d\dot{Q}}{dA_1 \cos\theta d\omega d\lambda} \left(\frac{W}{m^2 sr \mu m} \right) \quad (1.29)$$

Con:

$$d\dot{Q}_\lambda = \frac{dQ}{d\lambda} \quad (W \mu m^{-1}) \quad (1.30)$$

che è la potenza associata alla lunghezza d'onda λ che lascia dA_1 e cade su dA_n .

Per non complicare troppo la trattazione dell'irraggiamento si può riassumere dicendo che la grandezza suddetta è fondamentale per definirne altre come:

- i. Potere emissivo spettrale emisferico (o flusso termico) “ E_λ ”(energia emessa da una certa superficie).
- ii. Irradiazione spettrale “ G_λ ” (energia che colpisce una certa superficie).
- iii. Radiosità spettrale “ J_λ ” (energia che lascia una certa superficie ed è composta da un contributo emissivo e riflessivo).

Un ultimo concetto importante, utile per capire come si verifica lo scambio termico per irraggiamento, consiste nell'introdurre il concetto di fattore di vista. Lo scambio radiativo interessa generalmente due o più superfici che interagiscono in modo dipendente dall'orientamento, dalla geometria, dalla loro temperatura e dalle proprietà radiative. Quindi, per tenere conto delle caratteristiche geometriche delle superfici, si introduce il concetto di fattore di vista, che permette lo studio sia delle superfici di un corpo nero sia di quelle di corpi che non sono perfetti assorbitori.

Per completezza viene fornita anche la definizione di corpo nero, le cui caratteristiche sono:

- i. assorbe tutta la radiazione incidente, indipendentemente dalla lunghezza d'onda e dalla direzione.
- ii. nessuna superficie può emettere più di un corpo nero a temperatura e lunghezza d'onda fissata.
- iii. è un emettitore diffuso (cioè l'emissione è uguale in tutte le direzioni).

Per quanto si è visto, il fattore di vista tiene conto delle caratteristiche della superficie irradiante. Il fattore di vista F_{ij} rappresenta la parte di radiazione che lascia la superficie “i” e va a colpire la superficie “j”, in formule:

$$F_{ij} = \frac{\dot{Q}_{i \rightarrow j}}{A_i J_i} \quad (1.31)$$

Si considerino le superfici di area dA_i e dA_j , mutuamente orientate in modo arbitrario, connesse dalla linea R che forma gli angoli θ_i e θ_j con le rispettive normali n_i e n_j (figura 1.9):

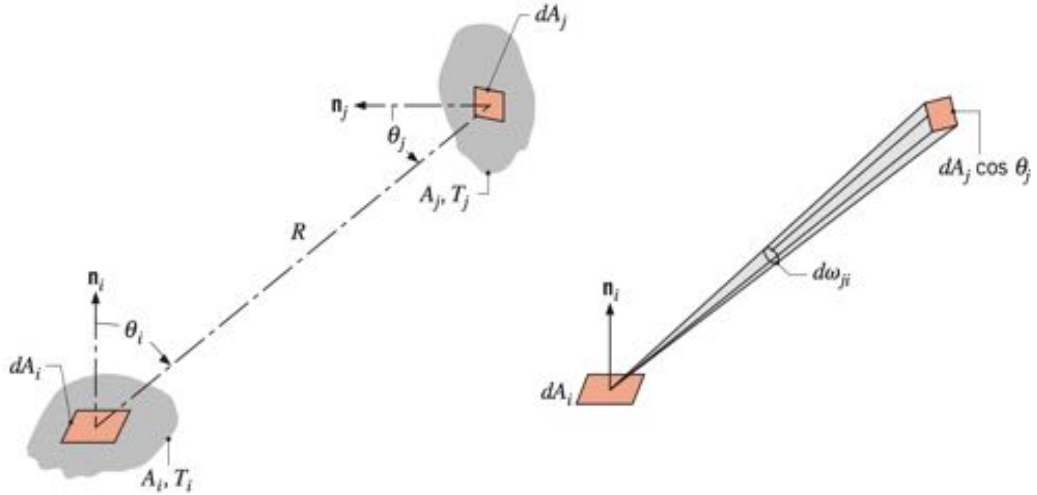


Figura 1.9 Fattore di vista associato allo scambio termico radiativo tra le superfici di area dA_i e dA_j .

Impiegando la definizione di intensità di radiazione, la potenza radiativa che lascia la superficie dA_i per colpire dA_j è esprimibile come:

$$d\dot{Q}_{i \rightarrow j} = I_{e+r,i} \cos\theta_i dA_i d\omega_{i \rightarrow j} \quad (1.32)$$

dove l'angolo solido infinitesimo è esprimibile come:

$$d\omega_{i \rightarrow j} = \frac{\cos\theta_j dA_j}{R^2} \quad (1.33)$$

se le superficie "i" emette e riflette in maniera diffusa, allora si può scrivere:

$$d\dot{Q}_{i \rightarrow j} = \frac{J_i \cos\theta_j \cos\theta_i dA_i dA_j}{\pi R^2} \quad (1.32)$$

integrando:

$$\dot{Q}_{i \rightarrow j} = \frac{J_i}{\pi} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos\theta_j \cos\theta_i dA_i dA_j}{R^2} \quad (1.33)$$

Applicando la definizione di fattore di vista (equazione 1.31), si ha:

$$F_{ij} = \frac{1}{A_i} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos\theta_j \cos\theta_i dA_i dA_j}{R^2} \quad (1.34)$$

Se si considera ora la parte di radiazione emessa da dA_j che va a colpire la superficie dA_i si ottiene, per il fattore di vista:

$$F_{ji} = \frac{1}{A_j} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos\theta_j \cos\theta_i dA_i dA_j}{R^2} \quad (1.35)$$

Da cui, confrontando le due equazioni 1.34 e 1.35 si perviene alla relazione:

$$A_i F_{ij} = A_j F_{ji} \quad (1.36)$$

detta anche “legge di reciprocità”.

Nel caso di una cavità, come il forno, vale la relazione:

$$\sum_{j=1}^N F_{ij} = 1 \quad (1.37)$$

Poiché tutta la radiazione che lascia la superficie i -esima deve essere catturata dalle pareti della cavità (si veda la figura 1.10). Il termine F_{ii} rappresenta la parte di radiazione che investe la superficie emettente: è non nullo solo se tale superficie è concava.

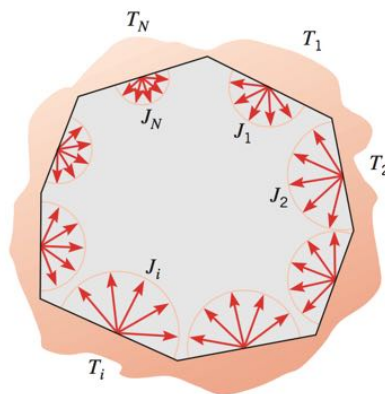


Figura 1.11 Radiazione scambiata all'interno di una cavità.

Generalmente i fattori di vista vengono valutati per via intuitiva mediante l'utilizzo di diagrammi per una data geometria o sfruttando soluzioni analitiche, accoppiate all'applicazione della regola di reciprocità e di somma. Questi concetti base possono essere utili per capire come l'irraggiamento influisca, tramite i vari carichi del forno, sul campo delle temperature e quindi sulla cottura del cibo.

Capitolo 2

Il forno

Il forno che si andrà ad analizzare e modellare è stato reso disponibile dall'Electrolux.

Prima di procedere occorre portare avanti una fase di approfondimento, volta soprattutto alla comprensione della macchina utilizzata. A tal proposito si rivolgerà l'attenzione al funzionamento ed alla struttura compositiva del prodotto.

In particolare, il modello studiato è un "Electrolux-EOB6850BOX" avente dimensione d'incasso 558x573 con capienza di 72 litri.



Figura 2.1 Il forno.

Il forno è caratterizzato da ben 12 funzioni di cottura e di 9 programmi automatici preimpostati per un'ottima cottura di pollo, pizza, dolci, verdure e pane.

2.1 Raffreddamento del forno

Una peculiarità importante del forno è data dalla presenza di una ventola di raffreddamento (figura 2.2), la quale ha lo scopo di ridurre la temperatura della porta del forno e della maniglia di apertura della porta stessa. Durante il funzionamento, è possibile percepire l'attività della ventola tramite il getto d'aria calda che fuoriesce dalla fessura presente tra il frontalino e la porta del forno.

A fine cottura la ventola rimane in funzione finché il forno non arriva ad essere sufficientemente freddo: lo scopo è quello di proteggere i componenti elettronici anche ad apparecchio spento.

La ventola è generalmente disposta nella parte superiore del forno, ove si ha la presenza del cosiddetto camino ed in particolare, è posizionata dal lato opposto rispetto alla porta del forno.



Figura 2.2 Ventilazione tangenziale.

L'azione della ventola interessa anche l'aria presente nell'intercapedine tra il mobile di rivestimento e il telaio del forno poiché, in questo modo, si crea un ricircolo d'aria al fine di limitare il flusso di calore verso il mobile, il quale rimane così a temperature contenute.

Temperature elevate, infatti, potrebbero causare danni significativi ai materiali impiegati nella struttura del mobile in cui il forno dovrà essere installato.

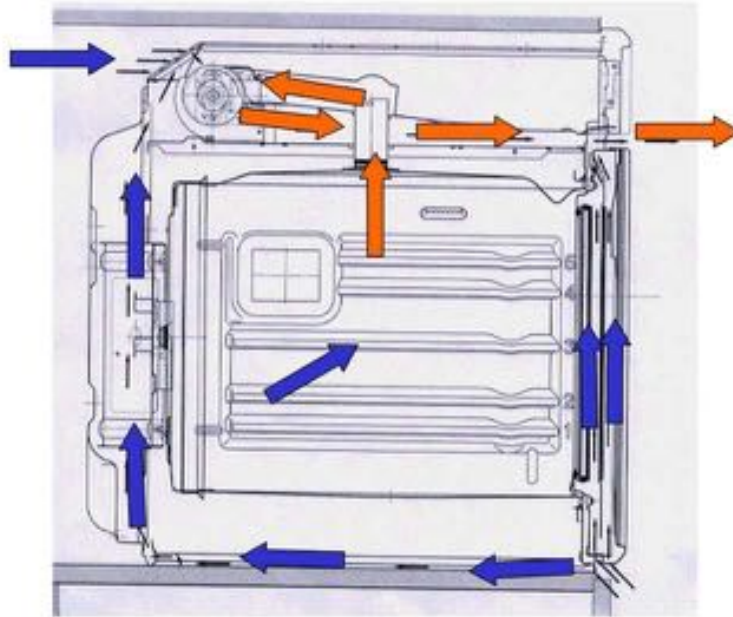


Figura 2.3 Schema del flusso d'aria dovuto alla ventilazione.

Il ricircolo si genera grazie alle aperture presenti sulle superfici del telaio, le quali permettono al ventilatore di aspirare l'aria esterna (quella che si trova tra il telaio e il mobile) (figura 2.3). Il ventilatore, inoltre, aspira l'aria portata verso l'esterno dal camino del forno, riuscendo in questo modo ad espellere dalla cavità tutti quei vapori che si possono formare durante la cottura di una pietanza, ottenendo così, benefici per quanto riguarda la qualità del prodotto cucinato. In questo modo si risolve anche il problema della formazione di condense sulle superfici più fredde del forno. Si può notare che con tale sistema attivo durante la cottura, la cavità del forno si trova in leggera depressione rispetto all'ambiente esterno: questo evita la fastidiosa fuoriuscita di vapore che si avrebbe, invece, all'apertura della porta necessaria per controllare o sfornare il cibo.

2.2 Elementi riscaldanti

Il forno è caratterizzato dalla presenza di elementi riscaldanti costituiti da resistenze elettriche, le quali si attivano e scaldano la cavità in relazione alla funzione di cottura che è stata impostata. Gli elementi riscaldanti sono alimentati da una tensione di 230 V, ma hanno un valore della resistenza elettrica diverso e assorbono quindi una quantità differente di potenza elettrica. Le resistenze raggiungono valori di temperatura diversi tra loro, hanno naturalmente forme e dimensioni diverse e sono posizionate in diverse aree del forno. Il primo elemento riscaldante che consideriamo è denominato “Resistenza top” ed è situato all’interno della muffola del forno nei pressi della parete superiore, riuscendo da questa posizione ad irraggiare calore direttamente in tutta la cavità (figura 2.4).



Figura 2.4 Resistenza grill .

L’elemento riscaldante è costituito da un ramo resistivo (in alcuni forni è possibile la presenza di più rami resistivi). Esso assorbe una potenza nominale di 2300 W. La lunghezza del relativo tratto caldo è di 2.00 m, mentre la sua sezione circolare ha un diametro pari a 0.0055 m: si ha quindi a disposizione una superficie irraggiante totale che raggiunge i 0.03456 m^2 .

Il secondo elemento riscaldante presente, è detto “resistenza ring” o “circolare”, ed è collocato nella parete posteriore della muffola e ricoperto da una lamiera.



Figura 2.5 Resistenza circolare.

I dati relativi alla resistenza circolare sono: 1900 W la potenza nominale assorbita, la lunghezza del tratto caldo è di 1.300 m e la sua sezione circolare ha un diametro di 0.0055 m. Queste informazioni permettono di calcolare una superficie irraggiante di 0.02246 m^2 .

Sulla parete posteriore, nello spazio interno della resistenza circolare (si veda la figura 2.5), è posizionata una ventola la cui funzione consiste nell'aumentare la circolazione dell'aria attorno all'elemento caldo e nel soffiarla verso la cavità del forno attraverso una griglia. La presenza di una ventola atta a svolgere il suddetto compito dà il nome a questa tipologia di forni, definiti a “convezione forzata”.

Il terzo ed ultimo elemento riscaldante è detto “Resistenza bottom” (figura 2.6) ed è collocato all'interno di un'intercapedine che si trova nella parte inferiore del forno.

I dati relativi a tale resistenza sono: 1000W la potenza assorbita, la lunghezza del tratto caldo è di 1.250 m e la sua sezione circolare ha un diametro di 0.0055 m. Queste informazioni permettono di calcolare una superficie irraggiante di 0.02159 m^2 .

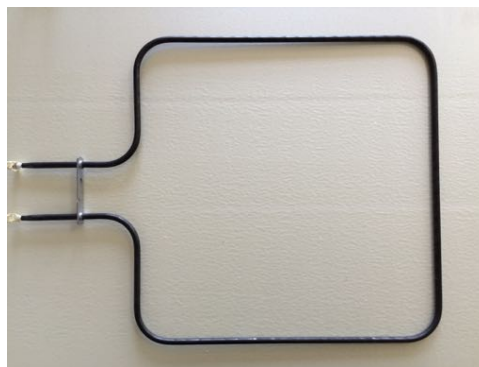


Figura 2.6 Resistenza Bottom.

2.3 Pulsantiera di comando

Il pannello dei comandi è situato sul frontalino ed è caratterizzato dalla presenza di “pulsanti touch”, in altre parole non sono presenti tasti fisici per selezionare le diverse funzioni del forno; dalla figura 2.7 si possono vedere quali sono i vari tasti sensore presenti:

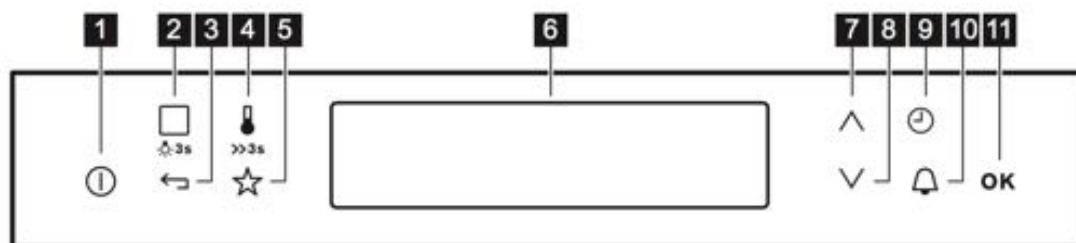




Figura 2.7 Frontalino.

Le diverse caratteristiche dei tasti ed il loro funzionamento possono essere descritte tramite l'utilizzo di una tabella che li comprenda tutti:

Tasto sensore	Funzione	Descrizione
1	Acceso/spento	Per attivare e disattivare l'apparecchiatura
2	Funzione cottura	Sfiorare il tasto sensore una volta per scegliere una funzione cottura o il menù: Cottura guidata. Sffiorare nuovamente il tasto sensore per passare da un menù all'altro: Funzioni cottura, Cottura guidata. Per attivare o disattivare la luce forno, premere il tasto per 3 secondi.
3	Tasto indietro	Per tornare a un livello precedente del menù. Per visualizzare il menù principale, sfiorare il tasto sensore per 3 secondi.
4	Selezione temperatura	Per impostare la temperatura o visualizzare la temperatura corrente all'interno dell'apparecchiatura. Sffiorare il tasto sensore per 3 secondi per attivare o disattivare la funzione: Riscaldamento rapido.
5	Favoriti	Per salvare ed accedere ai favoriti.
6	Display	Visualizza le impostazioni attuali dell'apparecchiatura.
7	Tasto su	Per spostarsi verso l'alto all'interno del menù.
8	Tasto giù	Per spostarsi verso il basso all'interno del menù.
9	Tempo e funzioni supplementari	Per impostare funzioni differenti. Quando una funzione cottura è attiva, sfiorare il tasto sensore per impostare il timer o le funzioni: Blocco tasti, Favoriti, Pronto da servire, Set + Go.

10 	Contaminuti	Per impostare la funzione: Contaminuti.
11 	OK	Per confermare la selezione o le impostazioni.

Come si è visto nella tabella, il funzionamento del display necessita di una descrizione tutta sua infatti, osservando la figura 2.8 si nota che appaiono diverse indicazioni:

- A) Indica la funzione di riscaldamento selezionata.
- B) Indica l'orario.
- C) Indicatore del riscaldamento.
- D) Temperatura selezionata.
- E) Durata cottura.

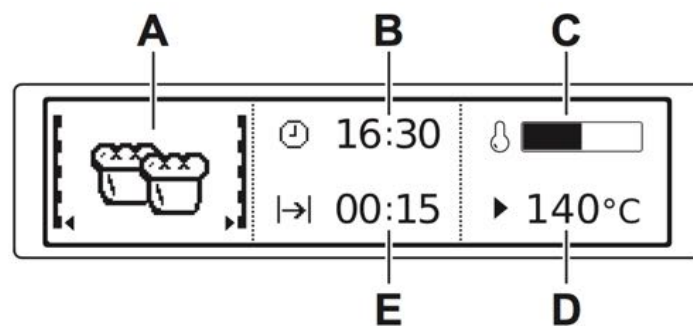


Figura 2.8 Display.

Per concludere, si deve notare che queste informazioni sono presenti nel manuale utente fornito da Electrolux nel quale, vengono spiegate anche tutte le funzioni di cottura speciali in maniera dettagliata.

Capitolo 3

Sistema di acquisizione dei dati

Al fine di implementare un modello del forno che simuli nel migliore dei modi il comportamento reale dei fenomeni fisici e termici che intervengono in ogni suo ciclo di funzionamento, occorre ricavare dati reali riguardanti le temperature di diversi punti del forno mediante l'utilizzo di termocoppie.

In particolare, saranno di interesse i dati registrabili durante l'esecuzione di diversi cicli cottura caratteristici, come:

- i. Cicli statici a 220-200-180 (°C).
- ii. Cicli ventilati a 200-180-160 (°C).

I dati ottenuti dalle prove effettuate risultano di fondamentale importanza per la realizzazione di modelli matematici che possano simulare il comportamento dinamico del forno. Dai risultati ottenuti è infatti possibile ottenere informazioni sull'ordine dei modelli, ovvero sul numero minimo di temperature rappresentative che consente di ottenere una risposta in regime dinamico quanto più simile alla realtà.

3.1 Generalità delle termocoppie

La temperatura è la misura dell'energia cinetica media delle particelle in un materiale espressa in gradi su un termometro standard. Le termocoppie sono trasduttori di temperatura largamente diffusi. Si tratta di sensori relativamente economici eppure accurati, in grado di misurare un ampio intervallo di temperature.

Una termocoppia è costituita da una coppia di conduttori elettrici di diverso materiale uniti tra loro in un punto (detto giunto o giunzione); data la diversità dei materiali produce una piccola differenza di potenziale elettrico intesa come una funzione di temperatura. La tensione termoelettrica è nota come tensione di Seebeck, dal nome del fisico Thomas Seebeck che nel 1821 scoprì questo fenomeno. La relazione tra la differenza di temperatura e la differenza di potenziale prodotta non è lineare, tuttavia la relazione può essere linearizzata e viene generalmente scritta come:

$$\Delta V \cong S \cdot \Delta T \quad (3.1)$$

Dove:

- i. ΔV rappresenta la differenza di potenziale.
- ii. ΔT rappresenta la differenza di temperatura.
- iii. S è detto coefficiente di Seebeck è dipendente dalla natura del materiale.

Esistono diverse tipologie di termocoppie che vengono identificate tramite lettere maiuscole in accordo con la normativa dell'American National Standards Institute (ANSI).

Generalmente le più comuni sono di tipo K, J, T, N, B, R e S; nel nostro caso, utilizzeremo termocoppie di tipo K, le quali si caratterizzano per essere costituite da un conduttore di Chromel (Ni-Cr) (+) ed uno di Alumel (Ni-Al) (-). Esse sono di uso generale, economiche e sono disponibili in una grande varietà di formati. Il loro intervallo di misura va da -200 °C a 1260 °C. La sensibilità è di circa 41 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$.

3.1.1 Principi di funzionamento delle termocoppie

La misura della differenza di potenziale e quindi della temperatura, può essere realizzata tramite il circuito che viene mostrato nella figura seguente:



Figura 3.1

Il circuito illustrato sopra mostra la misura della temperatura nell'ambiente "1" mediante termocoppia. I due conduttori sono collegati ai connettori di rame del dispositivo di acquisizione dati. Si noti che il circuito contiene tre giunzioni di conduttori elettrici di diverso materiale J1, J2 e J3. La giunzione J1 della termocoppia genera una forza elettromotrice proporzionale alla temperatura dell'ambiente stesso, mentre J2 e J3 dispongono del proprio coefficiente di Seebeck e generano la propria tensione termoelettrica proporzionale alla temperatura T_{rif} dei terminali di acquisizione dati. Per determinare il contributo di tensione proveniente da J1 è necessario conoscere la temperatura delle giunzioni J2 e J3 nonché la relazione tensione-temperatura relativa a queste giunzioni. In seguito, è possibile sottrarre i contributi delle giunzioni parassite di J2 e J3 dalla tensione misurata nella giunzione J1. Le termocoppie richiedono la conoscenza della temperatura T_{rif} , per compensare la presenza di giunzioni parassite definite "a freddo". Il metodo più diffuso riguarda la misura della temperatura nella giunzione di riferimento tramite un sensore di lettura diretta e la sottrazione dei contributi dei giunti parassiti. Questo processo viene definito come "compensazione di giunzione a freddo".

Grazie ad alcune proprietà delle termocoppie è possibile semplificare il calcolo della compensazione del giunto a freddo. Infatti, utilizzando la legge dei metalli intermedi e facendo delle semplici supposizioni, è possibile vedere come la misura di tensione da parte di un sistema di acquisizione dati dipenda solo dalla tensione e dalla temperatura del giunto a freddo. La tensione misurata non dipende dalla composizione delle connessioni di misura e dai giunti a freddo J2 e J3. Secondo la "Legge dei metalli intermedi", l'inserimento di un qualsiasi tipo di cavo in un circuito di una termocoppia non ha effetto sull'uscita finché entrambe le estremità di quel cavo raggiungono la stessa temperatura, in altre parole sono isoterme, (come si vede nella Figura 3.2).

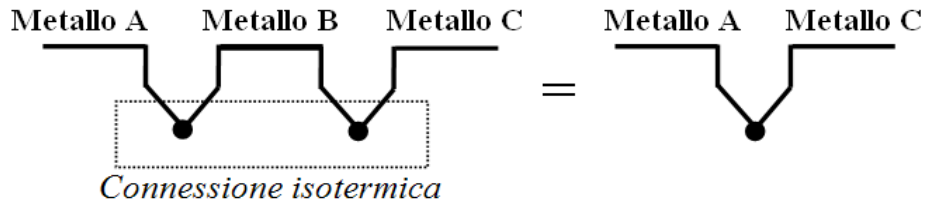


Figura 3.2

Il circuito della Figura 3.3 è simile a quello della Figura 3.1, tuttavia è stato inserito un filo di costantana prima del giunto J3. Per quanto detto, è necessario che i giunti abbiano la stessa temperatura. Supponendo che ciò accada per i giunti J3 e J4, la Legge dei metalli intermedi indica che il circuito in Figura 3.3 è elettricamente equivalente al circuito in Figura 3.1, ciò implica che qualsiasi risultato ottenuto dal circuito in Figura 3.3 sia applicabile al circuito mostrato in Figura 3.1.

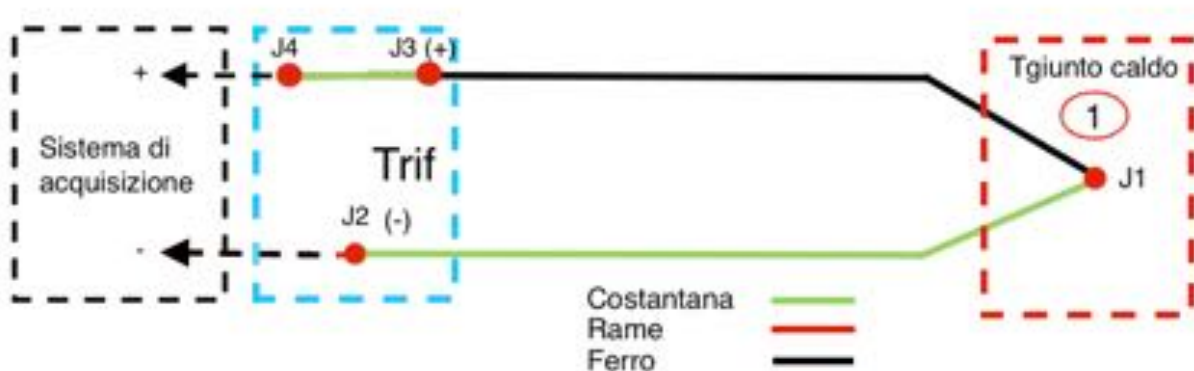


Figura 3.3

Nella Figura 3.3, i giunti J2 e J4 sono dello stesso tipo (rame-costantana) e poiché entrambi si trovano nella regione isoterma (hanno la stessa temperatura). Nota la direzione della corrente attraverso il circuito, J4 fornisce una tensione positiva e J2 ne restituisce una uguale ma negativa, di conseguenza l'effetto dei giunti si elide dando un contributo totale alla tensione misurata, pari a zero. I giunti J1 e J3 sono entrambi costituiti da una lega di rame-costantana, ma trovandosi a diverse temperature (non condividono una regione isotermica), si avrà una differenza di temperatura dei giunti J1 e J3 che darà luogo a tensioni aventi moduli diversi.

Per compensare il giunto freddo J3, viene misurata la sua temperatura e il voltaggio fornito viene sottratto dalla misura della termocoppia. Utilizzando la notazione $V_{J_x}(T_y)$ per indicare la tensione generata dal giunto J_x alla temperatura T_y , il problema generale della termocoppia è ridotto alla seguente equazione:

$$V_{meas} = V_{J1}(T_{TC}) + V_{J3}(T_{rif}) \quad (3.2)$$

Dove:

- i. T_{TC} è la temperatura della termocoppia J1.
- ii. T_{rif} è la temperatura del giunto di riferimento.

L'equazione è valida finché V_{J1} e V_{J3} sono entrambe funzioni di temperatura relative alla stessa temperatura di riferimento. Generalmente, per le termocoppie, il giunto di riferimento si pone ad una temperatura pari a 0 °C. Per questo motivo, si nota che il giunto J3 è identico a quello J1, ma fornisce una tensione opposta $V_{J3}(T_{rif}) = -V_{J1}(T_{rif})$, pertanto è necessario riscrivere l'equazione (3.2):

$$V_{meas} = V_{TC}(T_{TC}) + V_{TC}(T_{rif}) \quad (3.3)$$

A questo punto, conoscendo la misura di V_{meas} , T_{rif} e la relazione tensione- temperatura della termocoppia, è possibile determinare la temperatura del giunto caldo della stessa.

3.2 Hardware

Per effettuare le acquisizioni delle temperature, si hanno a disposizione:

- i. 9 moduli di acquisizione per termocoppie con 8 canali ciascuno;



Figura 3.4 Primi 4 moduli di acquisizione.

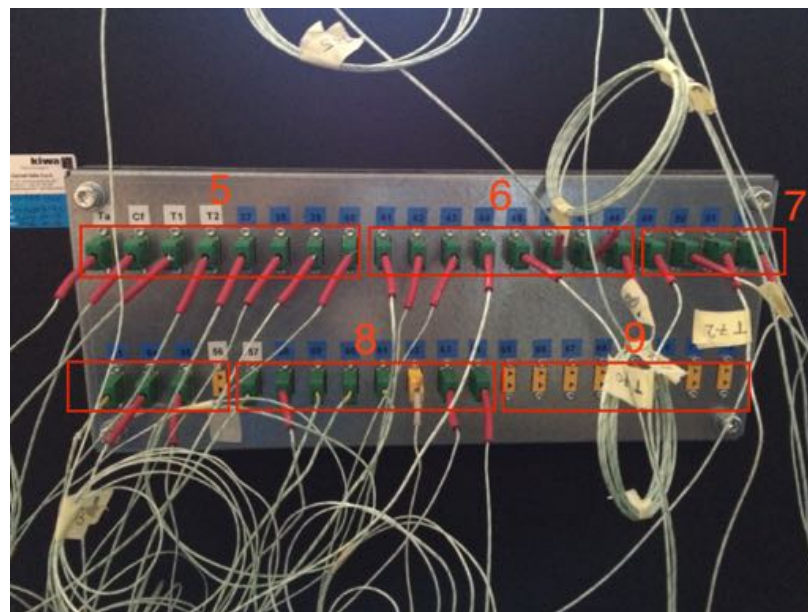


Figura 3.5 Ultimi 5 moduli di acquisizione.

Notiamo quindi che le termocoppie vengono collegate, tramite morsetto, ai moduli di acquisizione secondo un preciso ordine (vedi tabella seguente):

Cavità interna parete sinistra diagonale superiore DX	T10
Temperatura aria	T11
Resistenza superiore/Top anteriore SX	T12
Resistenza superiore/Top posteriore SX	T13
Resistenza superiore/Top anteriore DX	T14
Resistenza Ventola/Ring DX	T15
Resistenza Ventola/Ring SX	T50
Cavità interna parete posteriore	T51
Cavità interna parete superiore	T52
Cavità interna parete sinistra	T53
Centro forno	T54
Cavità interna parete inferiore	T55
Cavità interna parete destra	T56
PT500	T57
Resistenza superiore/Top anteriore DX	T60
Cavità interna/vetro parete anteriore	T61
Involucro esterno vetro/esterno parete anteriore	T62
Involucro esterno parete destra	T63
Involucro esterno parete superiore	T64
Involucro esterno parete posteriore	T65
Involucro esterno parete inferiore	T66
Involucro esterno parete sinistra	T67
Resistenza inferiore DX	T70
Resistenza inferiore SX	T71
Resistenza inferiore anteriore	T72
Cavità interna parete sinistra diagonale inferiore SX	T73
Cavità interna parete destra diagonale superiore SX	T74
Cavità interna parete destra diagonale inferiore DX	T75
Cavità interna parete superiore DX	T76
Canale Assente	T77
Cavità interna parete superiore SX	T80
Cavità interna parete inferiore DX	T81
Cavità interna parete inferiore SX	T82
Cavità interna parete posteriore diagonale DX	T83
Cavità interna parete posteriore diagonale SX	T84
Cavità interna vetro DX	T85
Cavità interna vetro SX	T86
Cavità interna vetro intercapedine	T87

I moduli invieranno i dati di temperatura al computer che elaborerà i dati in modo da renderli fruibili tramite file “.txt”.

- ii. Termocoppie di tipo K;
- iii. PTC 500;

Nella figura 3.6 si nota il cosiddetto “Power meter”, il quale ci consente di misurare la potenza assorbita dai singoli carichi e da carico totale e di inviare i dati al computer in modo da poterli inserire nel file “.txt” per l’elaborazione dei dati (il tutto con un’incertezza percentuale del $\pm 0,5\%$).

Si vede anche che questo componente è caratterizzato da un selettore, il quale ci consente di visualizzare sullo schermo led la potenza assorbita da uno dei rispettivi carichi, istante per istante.



Figura 3.7 Power meter.

3.2.1 Disposizione termocoppie

La disposizione e il numero delle termocoppie viene stabilito principalmente per “tentativi”: un certo numero di termocoppie, generalmente maggiore del necessario, viene disposto nel forno e successivamente, in base alle esigenze del modello, si sceglie tramite l’analisi dei dati se le informazioni possedute siano necessarie o ridondanti e se sia opportuno aggiunga altre termocoppie.

Nel nostro caso, all’interno del forno, esse sono disposte nel modo seguente:

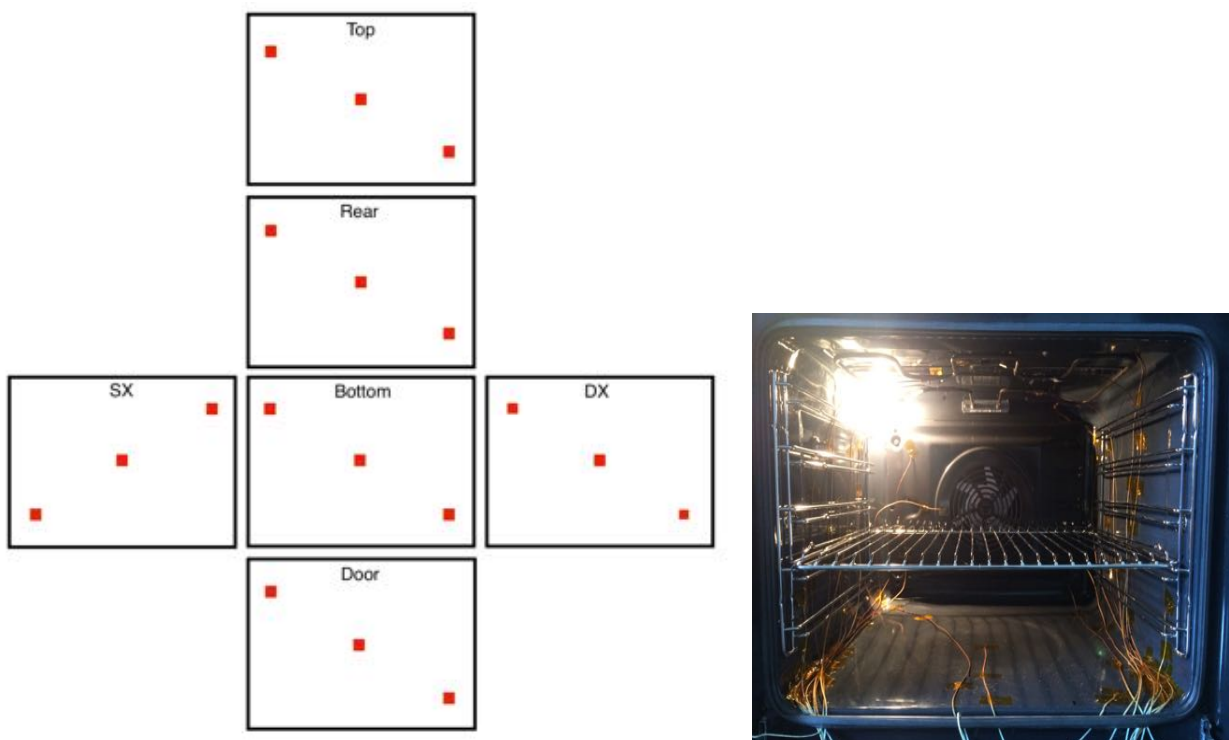


Figura 3.8 Disposizione schematica e reale delle termocoppie nella cavità interna.

Le altre termocoppie sono disposte come di seguito illustrato:

- i. 3 sulla “resistenza bottom”

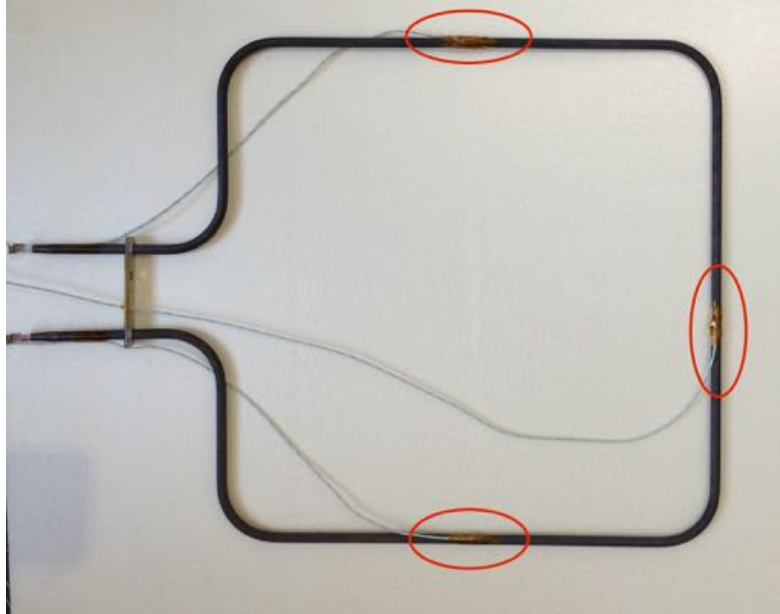


Figura 3.9 Montaggio termocoppie sulla resistenza bottom.

- ii. 1 sulla PTC500

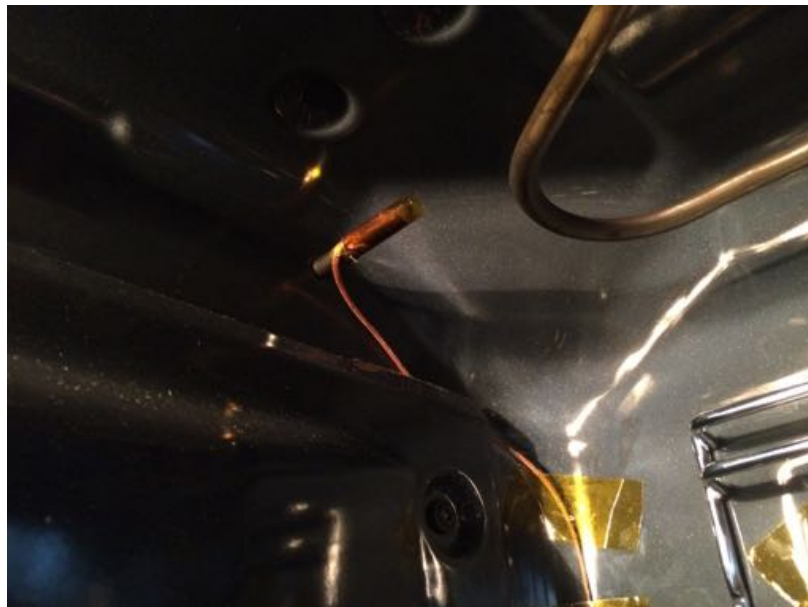


Figura 3.10 Termocoppia sulla PTC500.

- iii. 4 sulla “resistenza top”, rispettivamente vicino ai 4 vertici



Figura 3.11 Posizionamento termocoppie sulla resistenza top.

- iv. 1 nell'intercapedine del vetro



Figura 3.12 Termocoppia nell'intercapedine del vetro anteriore.

- v. 1 misura la temperatura dell'aria
- vi. 6 nelle facce esterne del forno
- vii. 2 sulla resistenza circolare



Figura 3.13 termocoppie disposte a 180° sulla resistenza circolare.

In totale, si contano 36 termocoppie e il forno si presenta come in figura 3.14:



Figura 3.14 Forno strumentato.

3.3 Software

Il software di acquisizione è stato realizzato utilizzando l'ambiente di programmazione LabVIEW (vedi figura 3.15).

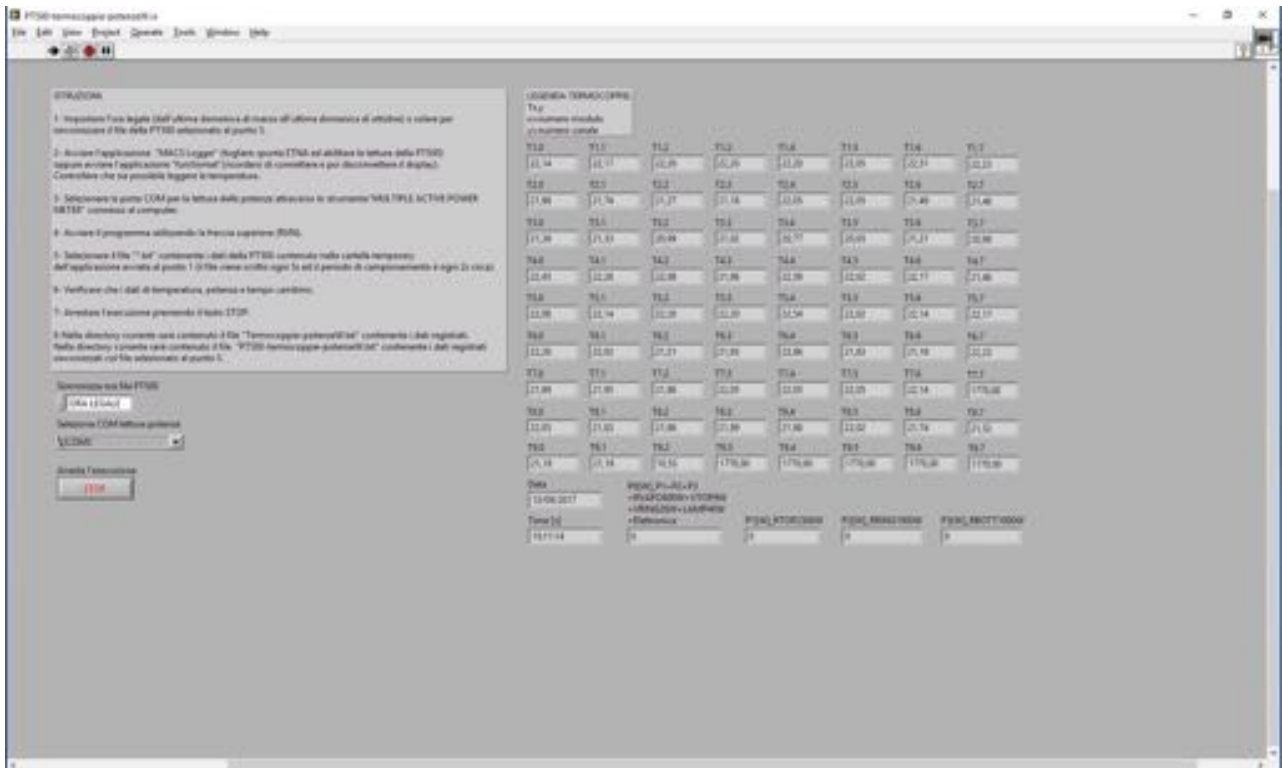


Figura 3.15 Schermata dell'ambiente LabVIEW che ci consente di vedere in tempo reale l'andamento delle temperature e delle potenze acquisite.

Tuttavia sfruttando un altro programma fornito dall'Electrolux, , chiamato "MACS logger", è possibile acquisire anche il valore della temperatura misurata dalla PTC500, lo stato delle potenze (quindi i carichi attivati, dovuti alle varie resistenze) ed infine, da esso si possono attivare o disattivare manualmente i vari carichi tramite l'interfaccia del programma stesso. Quindi, ricapitolando, il programma realizzato in ambiente LabVIEW fornisce un file di testo ".txt" ove sono presenti tutti i dati relativi a una data acquisizione come ad esempio:

Time[s]	PT500[°C]	T1.0[°C]	T1.1[°C]	T1.2[°C]	T1.3[°C]	T1.4[°C]	T1.5[°C]	T1.6[°C]	T1.7[°C]	T1.8[°C]	T1.9[°C]	T2.0[°C]
24/08/2017 14:24:00	30.50	26.55	25.81	26.77	28.99	29.24	35.46	26.87	26.56	26.28	26.16	25.81
24/08/2017 14:24:02	30.50	26.55	25.81	26.77	28.99	29.24	35.46	26.87	26.56	26.28	26.16	25.81
24/08/2017 14:24:04	30.50	26.55	25.81	26.77	28.99	29.24	35.46	26.87	26.56	26.28	26.16	25.81
24/08/2017 14:24:06	30.50	26.55	25.81	26.77	28.99	29.24	35.46	26.87	26.56	26.28	26.16	25.81
24/08/2017 14:24:08	30.50	26.55	25.81	26.77	28.99	29.24	35.46	26.87	26.56	26.28	26.16	25.81
24/08/2017 14:24:10	30.50	26.55	25.81	26.77	28.99	29.24	35.46	26.87	26.56	26.28	26.16	25.81
24/08/2017 14:24:12	30.50	26.55	25.81	26.77	28.99	29.24	35.46	26.87	26.56	26.28	26.16	25.81
24/08/2017 14:24:14	30.50	26.55	25.81	26.77	28.99	29.24	35.46	26.87	26.56	26.28	26.16	25.81
24/08/2017 14:24:16	30.50	26.55	25.81	26.77	28.99	29.24	35.46	26.87	26.56	26.28	26.16	25.81
24/08/2017 14:24:18	30.50	26.55	25.81	26.77	28.99	29.24	35.46	26.87	26.56	26.28	26.16	25.81
24/08/2017 14:24:20	30.50	26.55	25.81	26.77	28.99	29.24	35.46	26.87	26.56	26.28	26.16	25.81
24/08/2017 14:24:22	30.50	26.55	25.81	26.77	28.99	29.24	35.46	26.87	26.56	26.28	26.16	25.81

Figura 3.16 File .txt creato da LabVIEW.

È possibile notare come vengano forniti, in ordine: data, istante di tempo (misurazione ogni due secondi), temperature PTC500 e delle termocoppie ed il valore della potenza assorbita dai vari carichi. Questo file, inserito in MATLAB, ci consente di comprendere meglio i vari fenomeni di scambio termico che si verificano all'interno del forno.

Capitolo 4

Comprensione dei fenomeni

Finora si è descritto l'insieme dei concetti teorici che governano lo scambio termico e gli strumenti tecnici che ne rendono possibile la valutazione.

L'obiettivo di questo capitolo è quindi quello di capire, tramite tali strumenti, cosa avvenga all'interno del forno quando i vari carichi vengono attivati in funzione della diversa modalità di funzionamento del forno, se "statico" o "ventilato": mentre nel primo caso vengono utilizzate le resistenze "top" e "bottom", nel secondo viene impiegata solamente la resistenza "ring".

A questo punto si potrebbe notare che le prove vengono eseguite generalmente a 3 temperature standard per ogni modalità, ovvero:

Modalità	Temperatura (C°)
Statico	180
Statico	200
Statico	220
Ventilato	160
Ventilato	180
Ventilato	200

Il motivo di questa scelta è legato principalmente alla norma "TM SP000003129 - EU Energy Consumption Test for Electric Ovens" (che useremo successivamente per l'esecuzione del "test del mattone") nella quale si definisce un certo ΔT come la differenza tra la temperatura del forno e la temperatura media dell'ambiente.

È necessario precisare che anche questa differenza di temperatura dipende dalla modalità di funzionamento. In altre parole per il caso statico può valere, ad esempio, $180 \pm 5C^\circ$; mentre per il ventilato, $155 \pm 5C^\circ$ (notiamo ancora che: se ad ognuna di queste temperature aggiungessimo i $25C^\circ$ relativi alla temperatura media dell'ambiente, si avrebbe uno dei casi precedenti).

A questo punto si prendono in considerazione le acquisizioni relative alle prove realizzate alle temperature mediane di $200C^\circ$ per il caso statico e $180C^\circ$ per il caso ventilato.

4.1 Funzionamento statico

Come si è già detto in precedenza, le informazioni del file di testo vengono elaborate in Matlab al fine di poterne ricavare i grafici relativi all'andamento delle temperature nel forno e delle potenze in funzione del tempo.

Inizialmente si possono notare le variazioni delle temperature, sulle varie pareti del forno partendo da quelle interne:

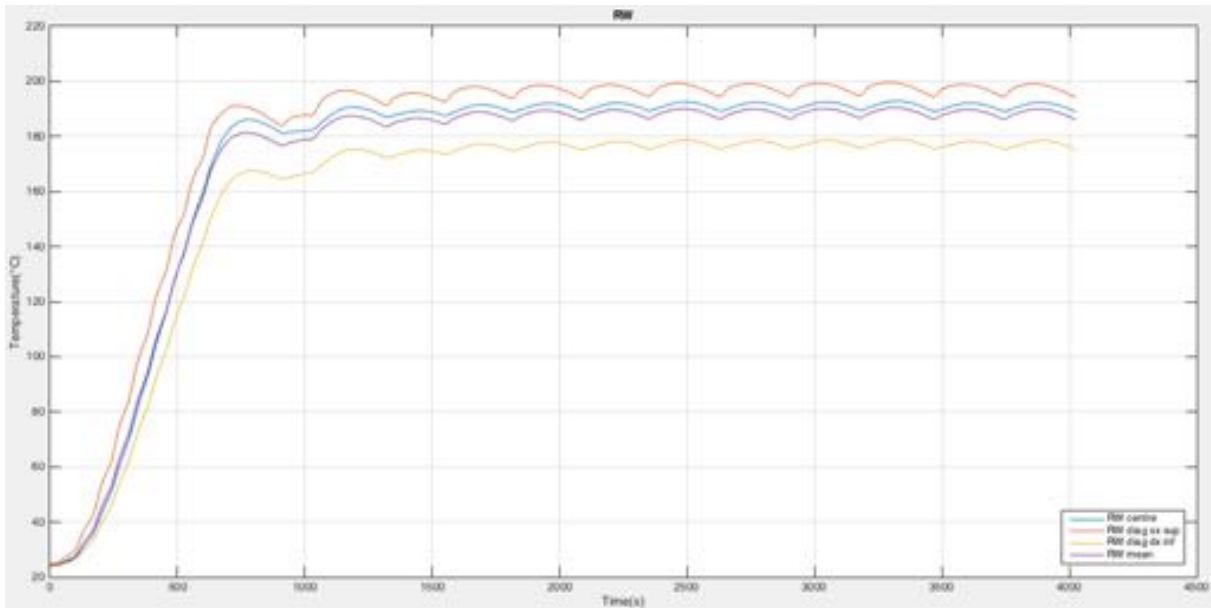


Figura 4.1 Andamento delle temperature lungo la diagonale relativa alla parete destra.

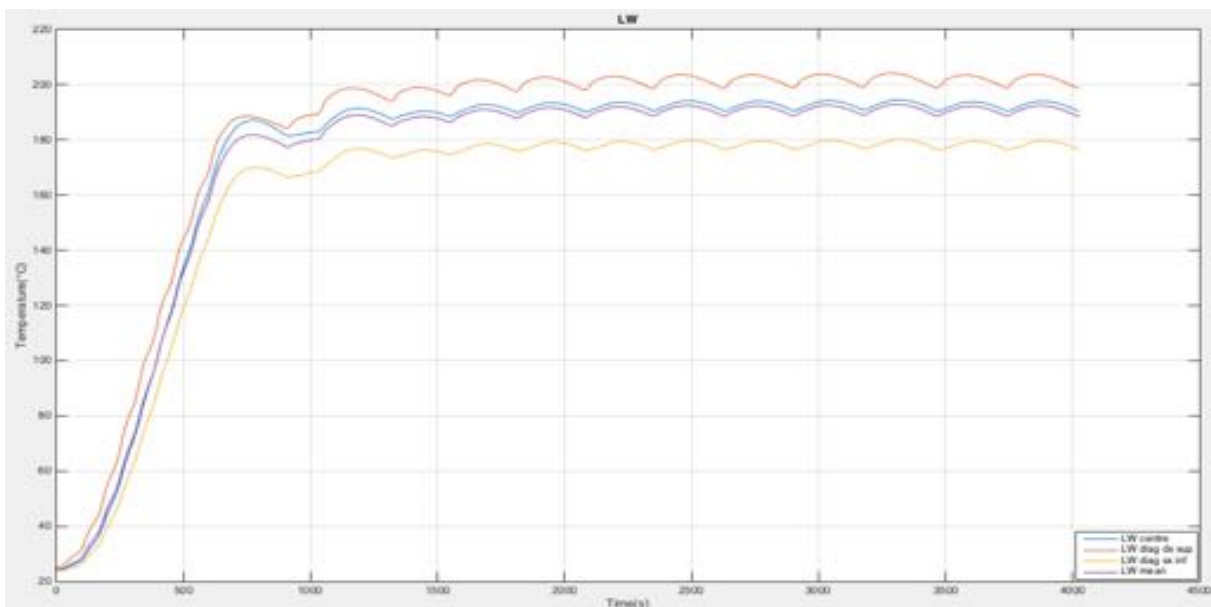


Figura 4.2 Andamento delle temperature lungo la diagonale relativa alla parete sinistra.

Dalle figure 4.1 e 4.2 si nota che gli andamenti delle temperature sulle diagonali delle due pareti sono tra loro speculari, inoltre, si osserva che la temperatura dell'aria nella parte inferiore del

forno è in generale più bassa, a causa di un ristagno della stessa dovuto al fatto che nel caso di funzionamento statico non si ha la presenza della ventola in funzione e quindi la densità dell'aria è minore solo in corrispondenza della "resistenza top", mentre sul fondo del forno risulta essere maggiore e quindi, per quanto detto, non si ha circolazione. Si deve sottolineare anche che le temperature "LW diag sx inf" e "RW diag dx inf" vengono acquisite in prossimità della porta, la quale viene mantenuta a temperatura inferiore per evitare di recare danni all'utente.

Si considerino ora le pareti in corrispondenza delle quali si hanno le resistenze.

A tal proposito si osservi il grafico (figura 4.3) relativo all'andamento della temperatura sulla parete superiore e si cerchi di capire il perché di questo suo andamento:

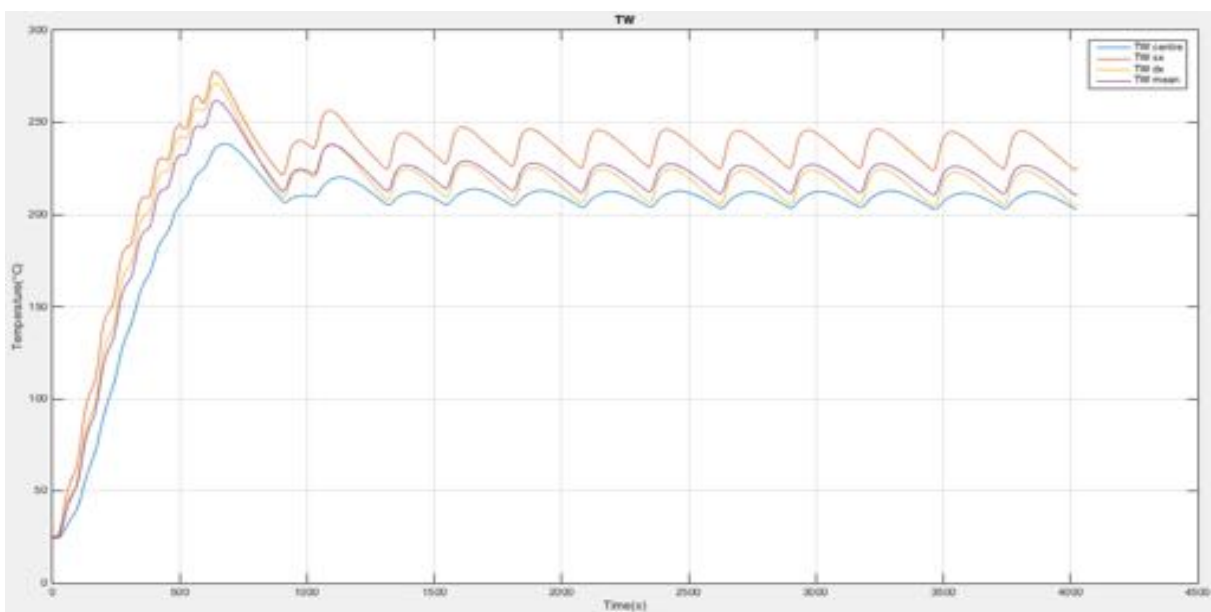


Figura 4.3 Andamento della temperatura sulla parete superiore.

Innanzitutto si può notare che la temperatura "TW dx" è inferiore alla "TW sx", questo è dovuto alla presenza della ventola appena sopra alla muffola: come spiegato nei capitoli precedenti, viene inserita una ventola di raffreddamento che garantisce l'integrità dell'elettronica del forno ed evita il raggiungimento di elevate temperature in corrispondenza del vetro, questo spiega il perché della minor temperatura.

In aggiunta, ma con effetto minore, la presenza della ventola porta ad avere uno scambio termico con l'esterno maggiore in corrispondenza del frontalino (per una porzione "triangolare" vedi figura 4.4), dovuto alla presenza di convezione forzata appena sopra lo strato di isolante.

L'effetto dell'abbassamento della temperatura a causa della ventola è confermato dal fatto che la "TW centre" risulta essere la più bassa delle tre e attorno ai 210°C, il che risulta corretto essendo quella la temperatura sopra, al centro del forno: ci si aspetta che andando più in basso la temperatura cali fino a raggiungere il valore impostato, pari a 200°C.

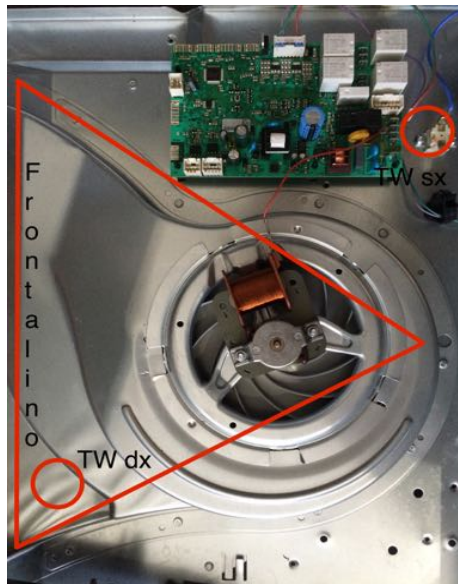


Figura 4.4 *Influenza della presenza della ventola sull'andamento della “TW centre” e “TW dx” rispetto alla “TW sx”.*

L'andamento periodico della temperatura, inteso dopo il transitorio iniziale, è dovuto alla continua accensione e spegnimento della resistenza top. Considerando ciò, osservando i grafici relativi alle temperature delle quattro termocoppie poste sulla resistenza ed il grafico relativo alla potenza assorbita, possiamo fare altre considerazioni:

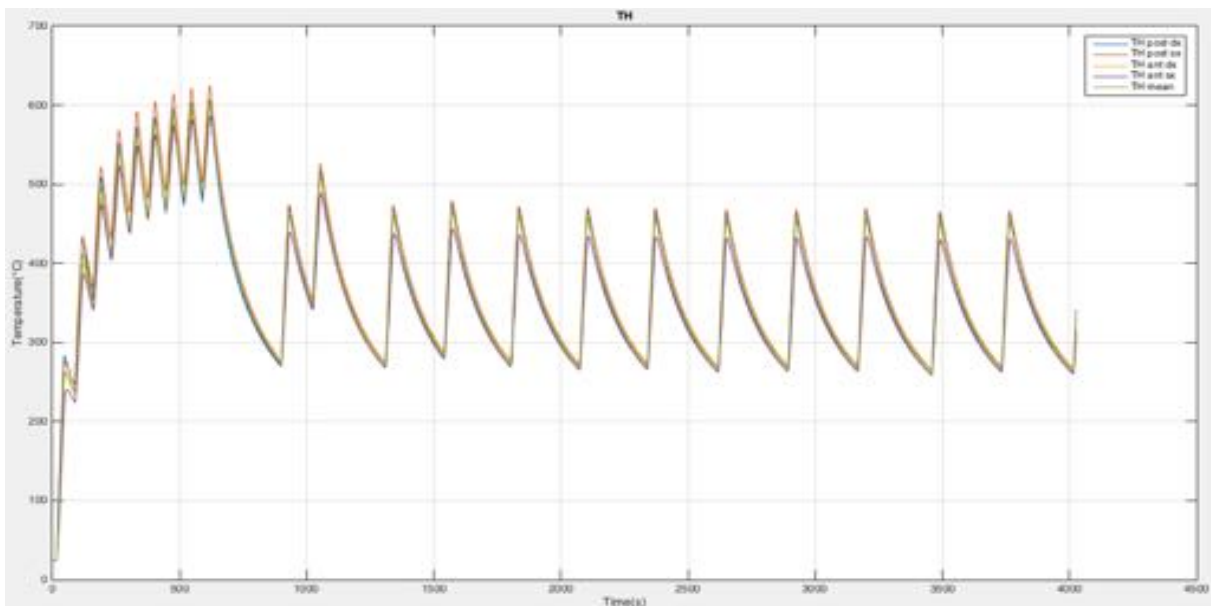


Figura 4.5 *Andamento delle temperature registrate dalle quattro termocoppie poste sulla resistenza.*

Il grafico in figura 4.5 fa vedere che la temperatura lungo la resistenza non varia di tanto nei diversi punti e ciò significa che anche la potenza scambiata dalla resistenza può essere definita omogenea. Quanto si è detto potrebbe sembrare banale, tuttavia, ai fini della realizzazione del modello matematico, si tratta di un concetto fondamentale poiché ne riduce il costo computazionale.

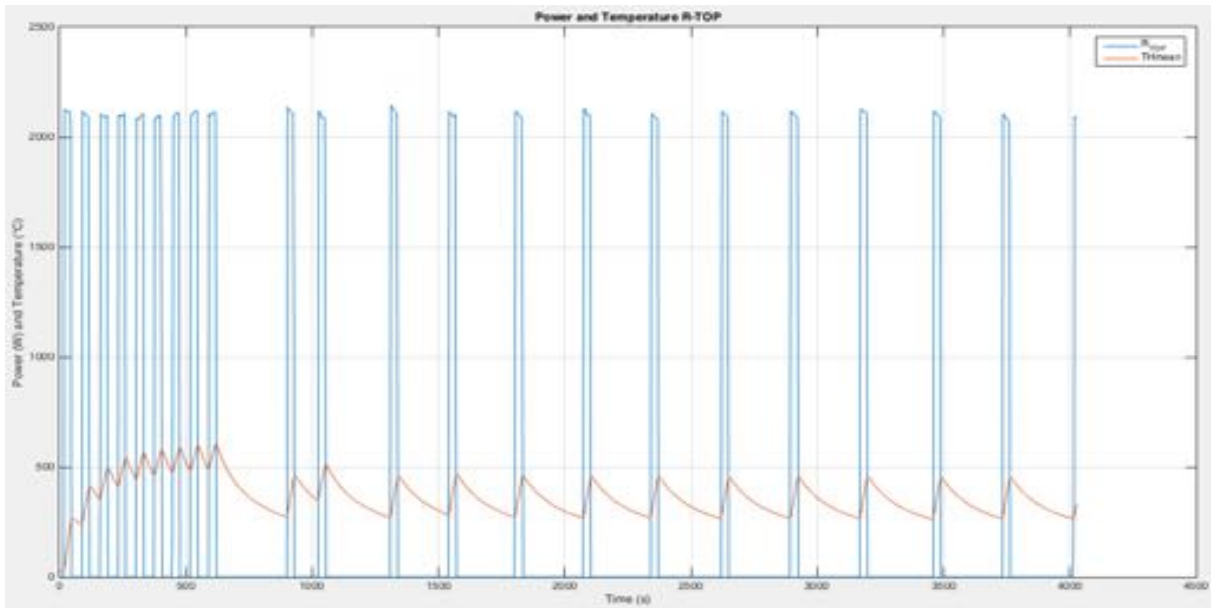


Figura 4.6 Stato della resistenza e andamento medio della temperatura.

Dalla figura 4.6 si nota subito che, una volta raggiunte le condizioni stazionarie, la resistenza viene attivata ad intervalli di tempo maggiori e regolari rispetto agli istanti iniziali, questo perché inizialmente il forno si trovava a temperatura ambiente. Invece, a transitorio concluso, l'obiettivo non è più quello di raggiungere la temperatura di set-point a centro forno, bensì consiste nel mantenere la temperatura impostata a centro forno. Tale temperatura è misurata dalla PTC500, che dialoga con la logica di controllo del forno, la quale reagisce imponendo determinati cicli di accensione e spegnimento. Inoltre, ingrandendo il grafico (figura 4.7), si nota la presenza di fenomeni inerziali: prima che si verifichi il cambiamento di pendenza della curva di temperatura "TH mean" (in positivo o negativo) associato all'accensione o allo spegnimento della resistenza, passa un certo intervallo di tempo.

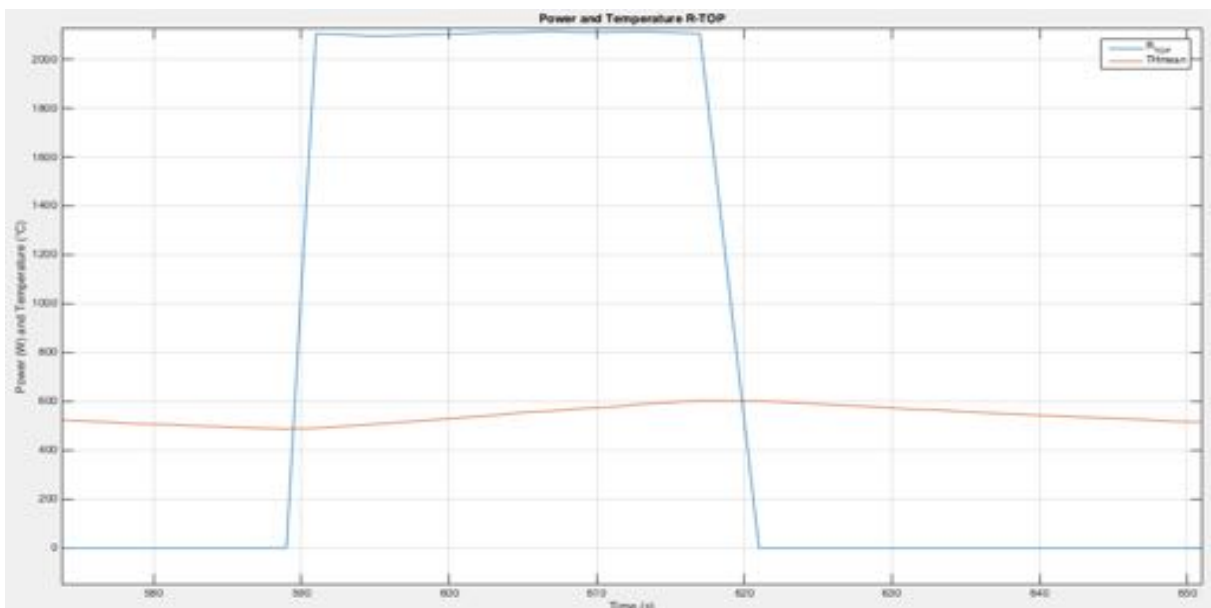


Figura 4.7 Fenomeno inerziale di accensione e spegnimento della resistenza.

Si passi ora alla parete inferiore: in generale dalla figura 4.8 si vede che le temperature sono più basse rispetto alla parete superiore, in quanto la resistenza inferiore si trova al di fuori della muffola e non all'interno del forno come la resistenza superiore. Inoltre, si nota subito un'analogia con l'andamento della temperatura nella parete superiore (vedi figura 4.3), legata alla posizione delle termocoppie. Si vede infatti che la temperatura diminuisce lungo la diagonale, man mano che ci si sposta verso il vetro. In particolare la temperatura "BW dx" è minore della "BW sx" poiché essa si trova in corrispondenza della porta, che come sappiamo viene raffreddata.

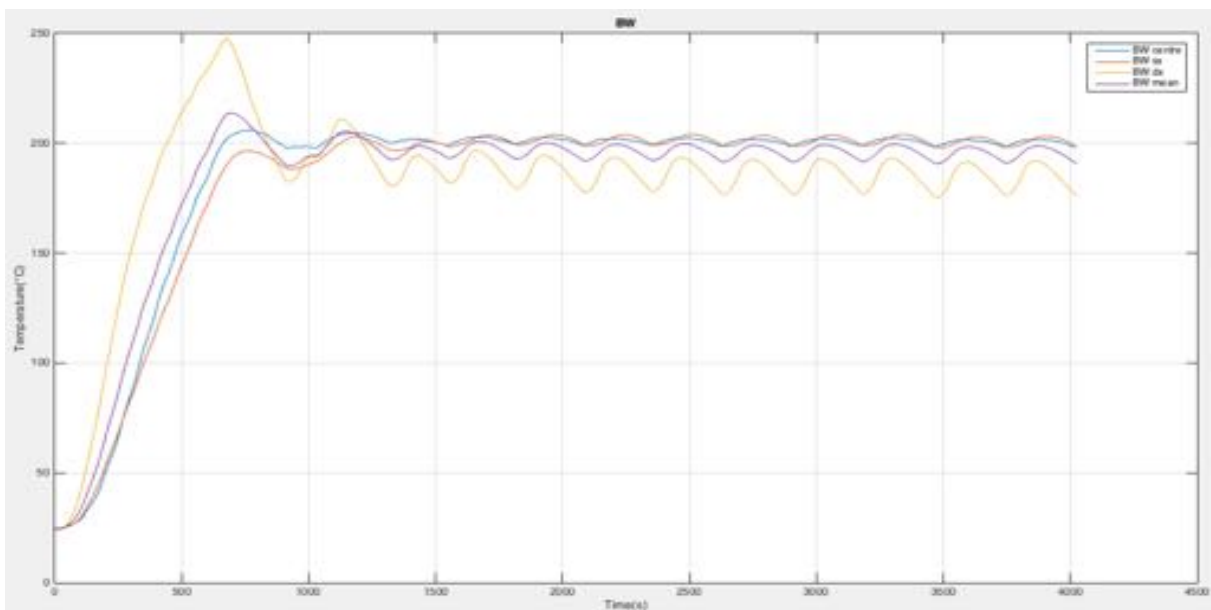


Figura 4.8 Andamento delle temperature sulla parete inferiore.

Concludendo si noti che quanto si vedeva osservando la figura 4.3 viene confermato: la "BW centre" è di poco superiore ai 200°C, quindi, in generale allontanandosi dal centro delle pareti "BW" e "TW" fino al centro del forno "OC", la temperatura cala fino a raggiungere i 200°C mentre, la temperatura deve aumentare nel caso delle pareti "LW" e "RW".

Anche in questo caso è possibile vedere, dalla figura 4.9, che la potenza scambiata dalla resistenza può definirsi omogenea in quanto le tre resistenze, una volta conclusi i transitori, misurano lo stesso valore di temperatura.

Dalla figura 4.10 si nota che una volta raggiunto lo stazionario, la resistenza viene accesa e spenta ad intervalli regolari in modo da mantenere la temperatura di set-point impostata, mentre inizialmente, a differenza della "TH", la resistenza viene tenuta accesa per un periodo più lungo: il motivo è legato al fatto che tale resistenza, come già detto, è posizionata all'esterno della muffola, per cui, per avere un sensibile incremento di temperatura anche all'interno del forno è necessario mantenere il carico acceso per più tempo.

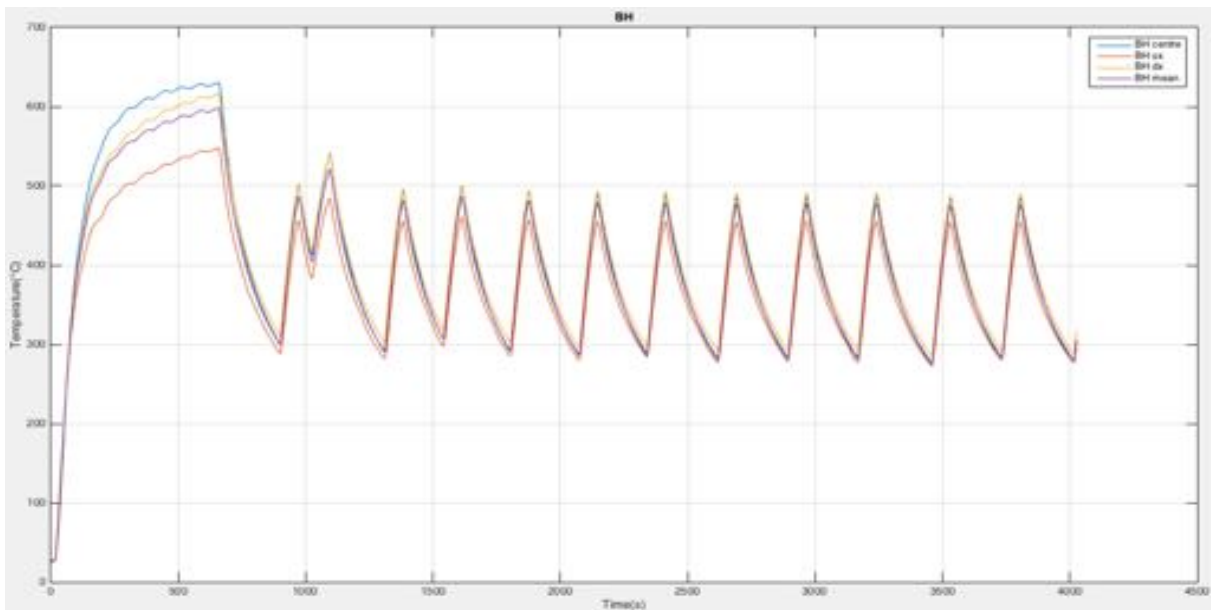


Figura 4.9 Andamento delle temperature registrate dalle tre termocoppie poste sulla resistenza.

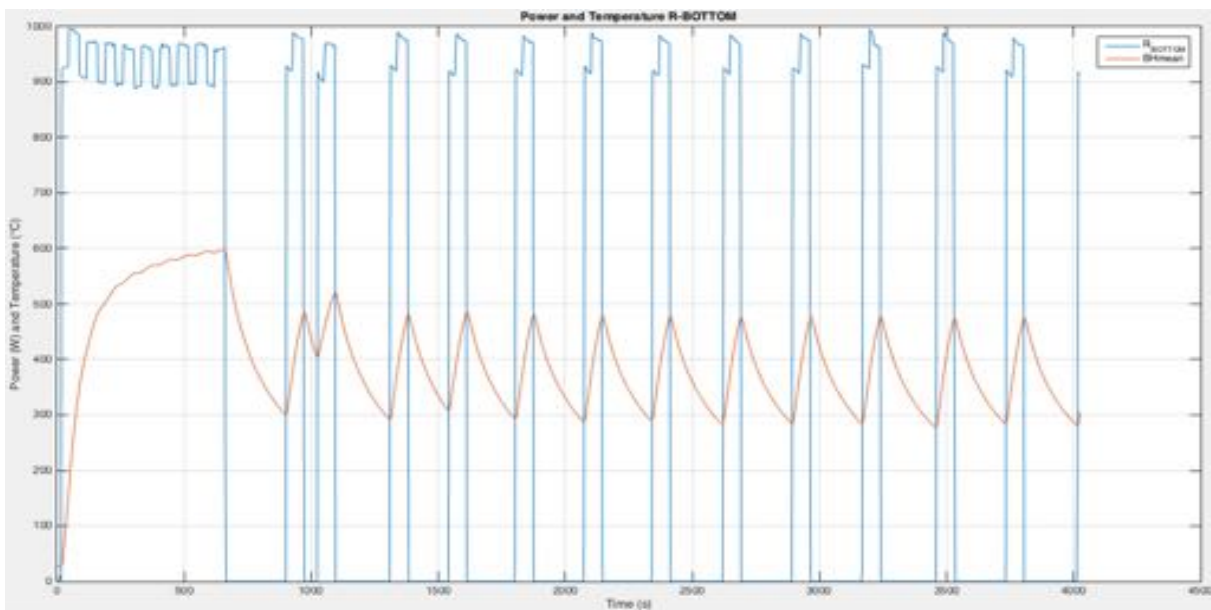


Figura 4.10 Stato della resistenza e andamento medio della temperatura.

L'ultima parete con resistenza è quella posteriore ove è presente la resistenza circolare.

Anche per questo caso, dalla figura 4.11, si nota la differenza di temperatura tra la "PW dx", e "PW sx" dovuta semplicemente alla posizione delle termocoppie.

Inoltre si vede che le temperature sono complessivamente basse per essere in corrispondenza di un carico, tuttavia è necessario ricordare che nella funzione "statico 200°C" la "ring" non viene mai attivata e per questo motivo le temperature non raggiungono valori elevati.

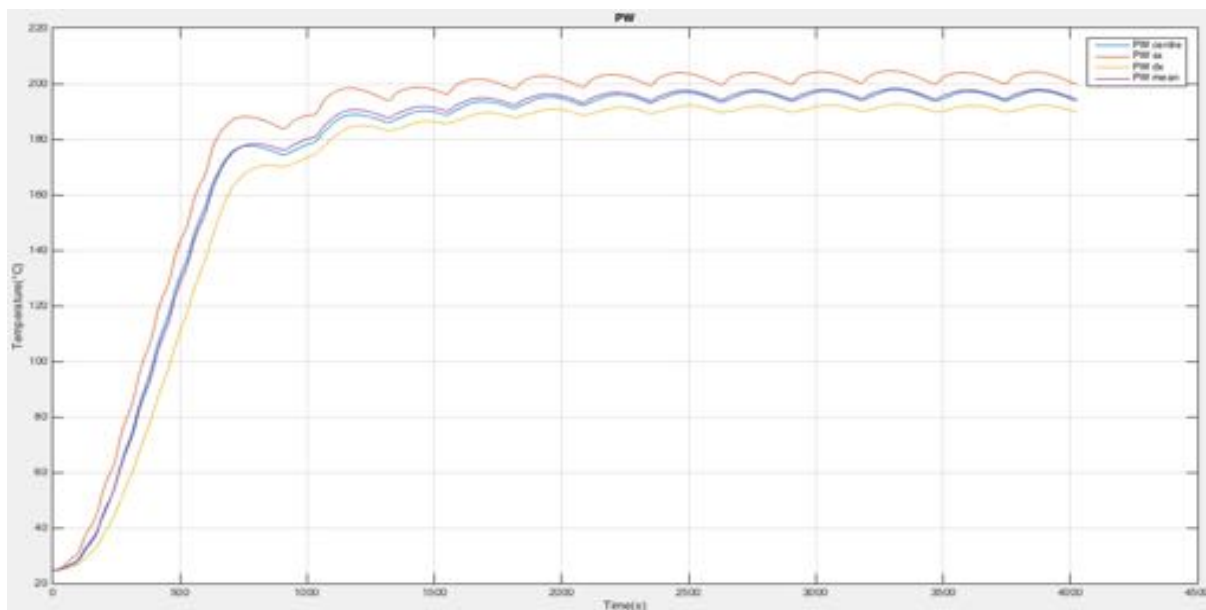


Figura 4.11 *Andamento delle temperature sulla parete posteriore.*

Dalla figura 4.12 si nota che le temperature sulla “ring” sono omogenee, ma in questo caso non si può affermare nulla su ciò che riguarda l’omogeneità della potenza trasmessa al forno perché la temperatura raggiunta è dovuta solamente ai fenomeni di scambio termico presenti e non all’accensione della resistenza stessa.

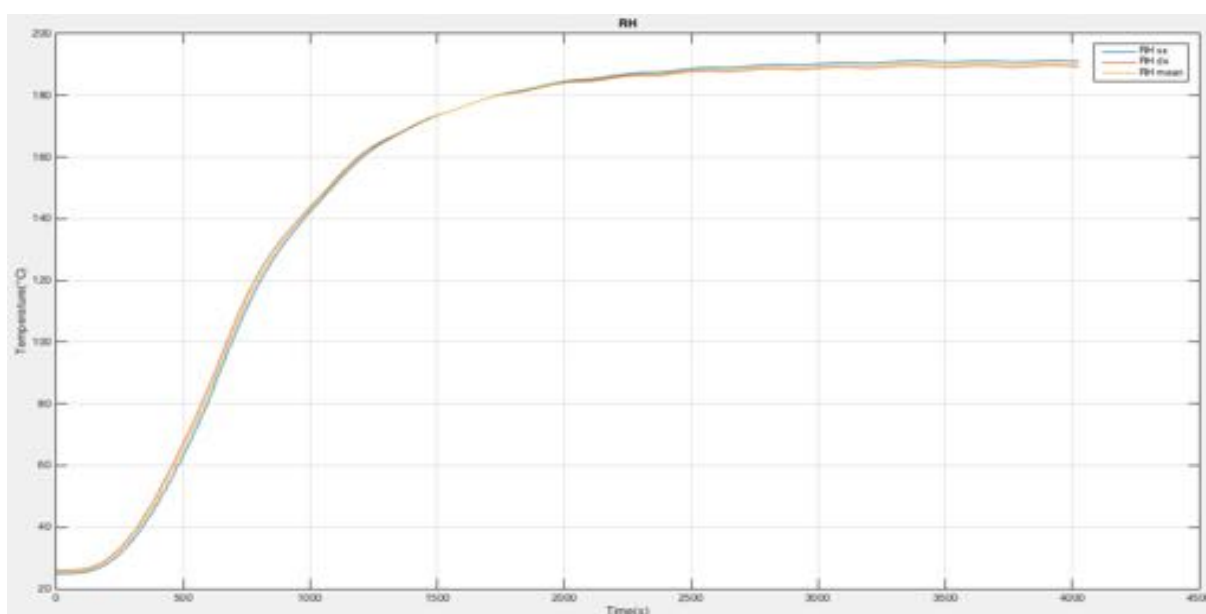


Figura 4.12 *Andamento delle temperature registrate dalle due termocoppie poste sulla resistenza.*

A conferma di quanto si è detto sulla resistenza viene allegata la figura 4.13 in cui si vede che la temperatura media arriva a 190°C circa mentre la potenza risulta essere sempre nulla.

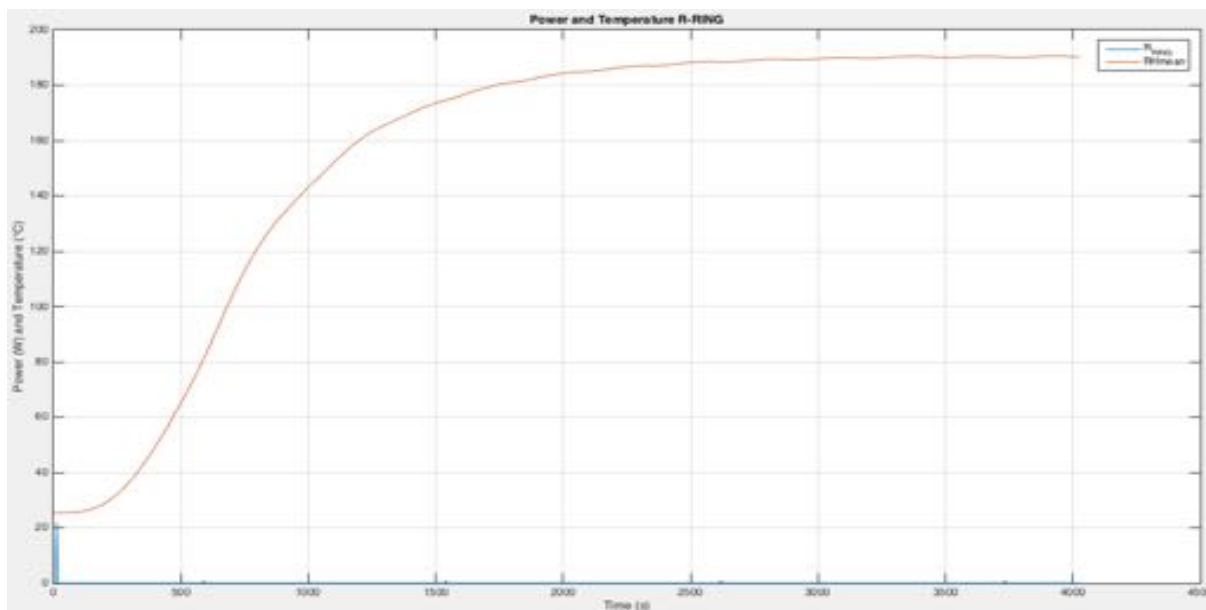


Figura 4.13 Stato della resistenza e andamento medio della temperatura.

Infine, per quanto riguarda la cavità interna, si prende in considerazione la porta del forno.

Dalla figura 4.14 si nota subito che la temperatura “IG dx” è maggiore alla “IG sx” e questo è dovuto sempre alla posizione delle termocoppie, infatti, in questo caso la termocoppia di sinistra è quella che si trova più in basso lungo la diagonale.

Si osserva anche che la “IG centre” è maggiore della “IG dx” perché in corrispondenza della termocoppia di destra (la più alta delle tre) è presente il flusso d’aria dovuto alla ventola di raffreddamento che porta ad una diminuzione della temperatura.

In particolare, il grafico mostra che tutte le temperature del vetro sono in generale più basse delle altre finora analizzate ed il tutto, ovviamente, va a favore della sicurezza.

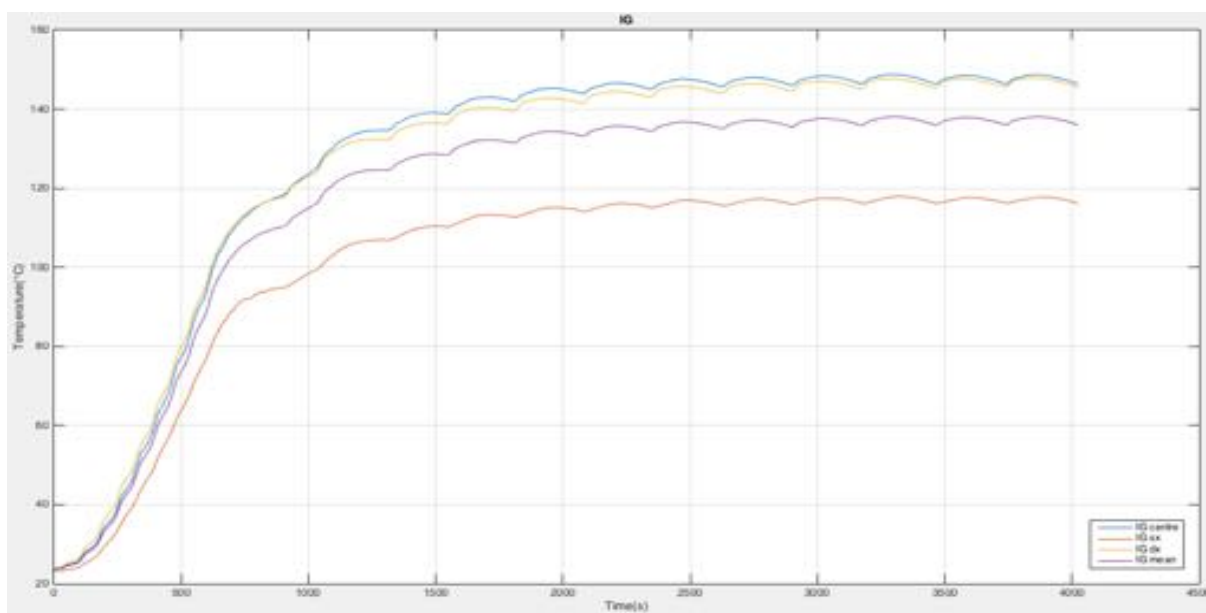


Figura 4.14 Andamento delle temperature sul vetro della porta.

Altre conferme provengono dalla figura 4.15, dove si nota che le schermature derivanti dai quattro vetri disposti in serie più intercapedini d'aria, sono sufficienti ad abbassare la temperatura fino a 27°C circa.

Graficamente si vede che la temperatura “Glass cavity”, registrata dalla termocoppia disposta nella prima intercapedine, risulta essere molto più bassa rispetto alla temperatura media del vetro lato interno “Glass inner side” ed inoltre, l'andamento della curva azzurra è diverso da quello dell'arancione per via dell'effetto puramente capacitivo (si precisa che tale temperatura coincide con la “IG mean” della figura 4.14).

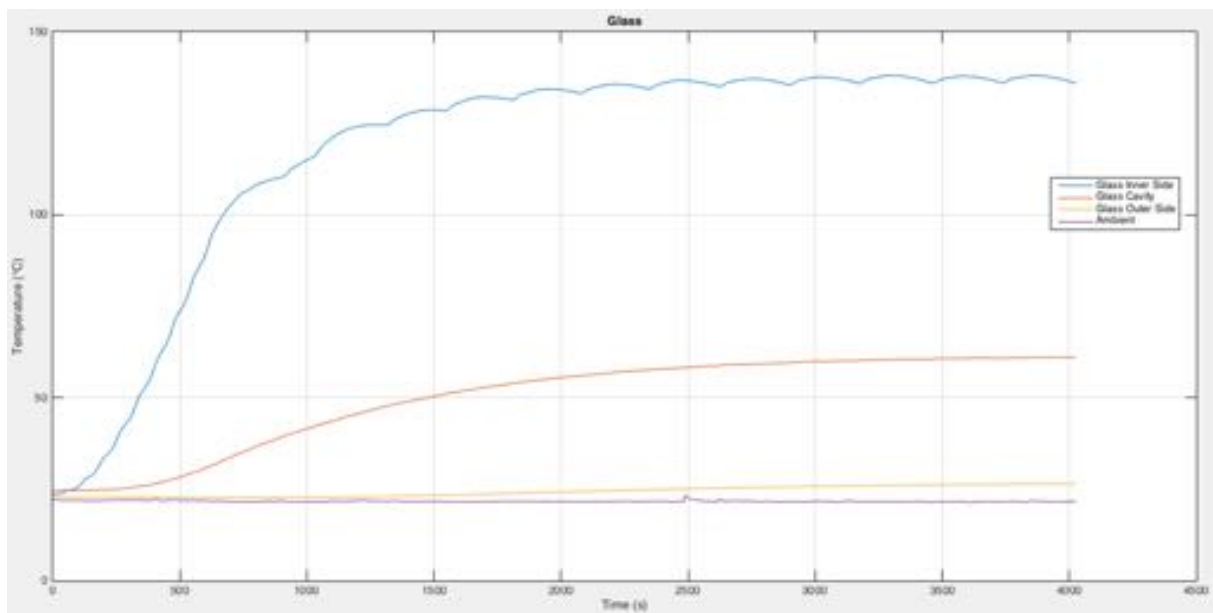


Figura 4.15 Andamento delle temperature nei vari strati di vetro della porta.

Quanto si è visto finora dovrebbe dare un'idea, almeno qualitativa, del campo di temperature all'interno del forno e degli effetti che lo influenzano nel caso di funzionamento “statico”.

Come già sottolineato, l'obiettivo della logica di controllo è quello di riuscire a mantenere la temperatura di centro forno pari alla temperatura di set-point impostata e per verificare che questo accada, si è posta una termocoppia nel centro del forno ed un'altra sulla PTC500 per vedere cosa essa potesse misurare. Lo scopo di quest'ultima è quello di poter trarre delle informazioni sulla logica di controllo del forno. A tal proposito si osservi la figura 4.16.

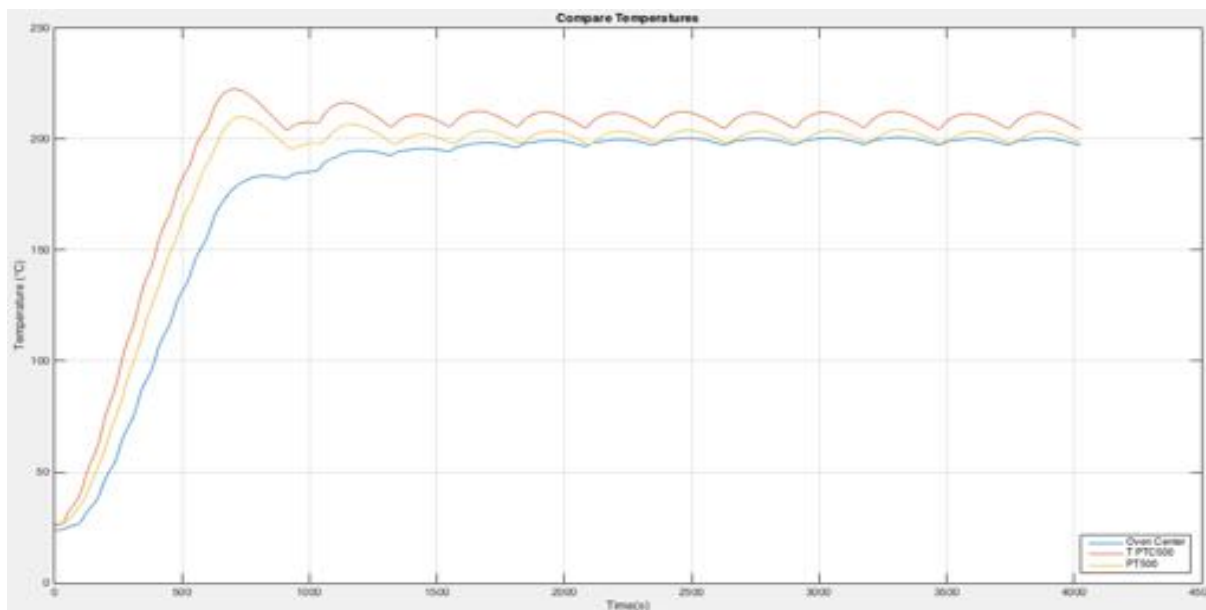


Figura 4.16 Confronto temperature “OC”, “T PTC500” e “PTC500”.

Si nota facilmente che la temperatura di centro forno, “Oven Center”, viene raggiunta con facilità dopo un transitorio iniziale. Si osserva anche che la “T PTC500”, misurata dalla termocoppia posta sopra alla “PTC500”, è di circa 214°C, mentre quella registrata dalla “PTC500” è di 200°C. Questo ha sollevato diverse soluzioni relative a come potesse essere gestita la logica di controllo del forno, inizialmente si pensava che la correlazione tra “PTC500” e “OC” fosse quella di diminuire di 14°C la temperatura misurata dalla “PTC500” stessa, tuttavia tale soluzione non veniva rispettata in altre modalità di funzionamento, per cui è stata scartata.

L’ultimo grafico che si analizzerà per il caso di funzionamento statico, riguarda l’andamento delle temperature sul “case esterno” (vedi figura 4.17).

Dal grafico sottostante si può vedere che l’isolamento risulta essere efficace per ciò che riguarda il vetro e le pareti posteriore e superiore mentre, per le pareti di destra, di sinistra e per la parete inferiore, le temperature aumentano.

In questo caso un’elevata temperatura delle pareti esterne è indice di un isolamento imperfetto, che porta ad un maggiore scambio termico con l’esterno e quindi ad un maggior consumo di energia.

Per quanto riguarda la parete inferiore, il motivo di valori così elevati è sicuramente legato alla posizione della resistenza inferiore, inoltre l’elevata temperatura iniziale è dovuta al grande utilizzo iniziale del carico, che deve poter garantire un sensibile aumento della temperatura all’interno del forno.

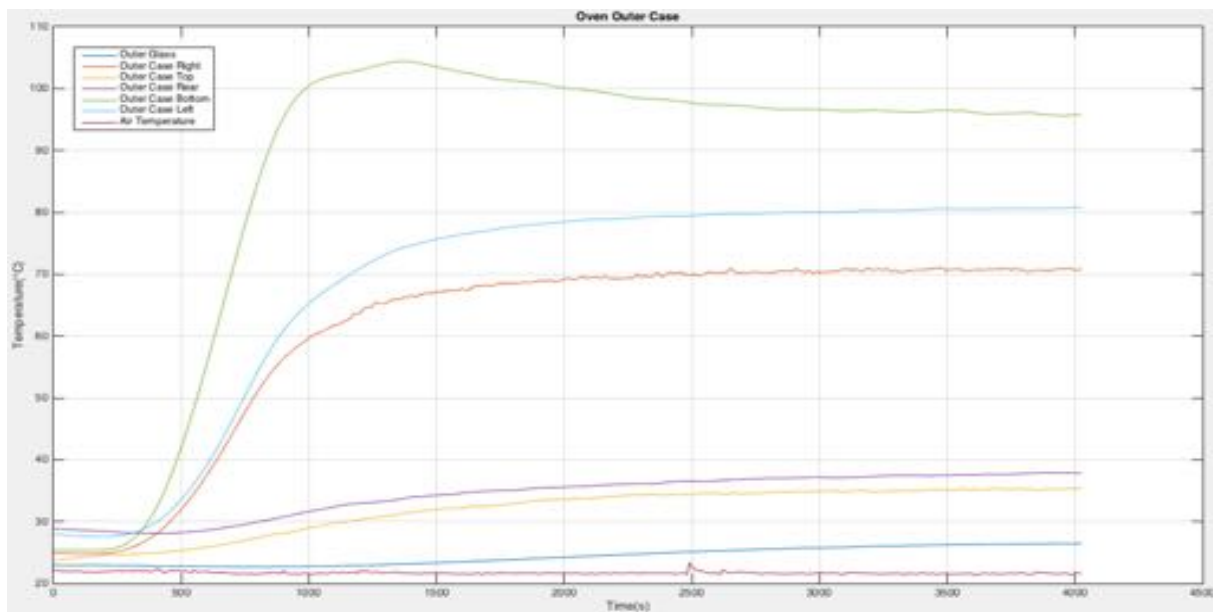


Figura 4.17 Andamento delle temperature sulle pareti esterne del forno.

4.2 Funzionamento ventilato

Innanzitutto, si ricorda che questa modalità di funzionamento prevede solamente l'utilizzo della resistenza circolare, per cui si cercherà di ragionare in maniera analoga al caso statico appena visto.

A tal proposito, si parte con l'analizzare i grafici relativi alle pareti interne del forno:

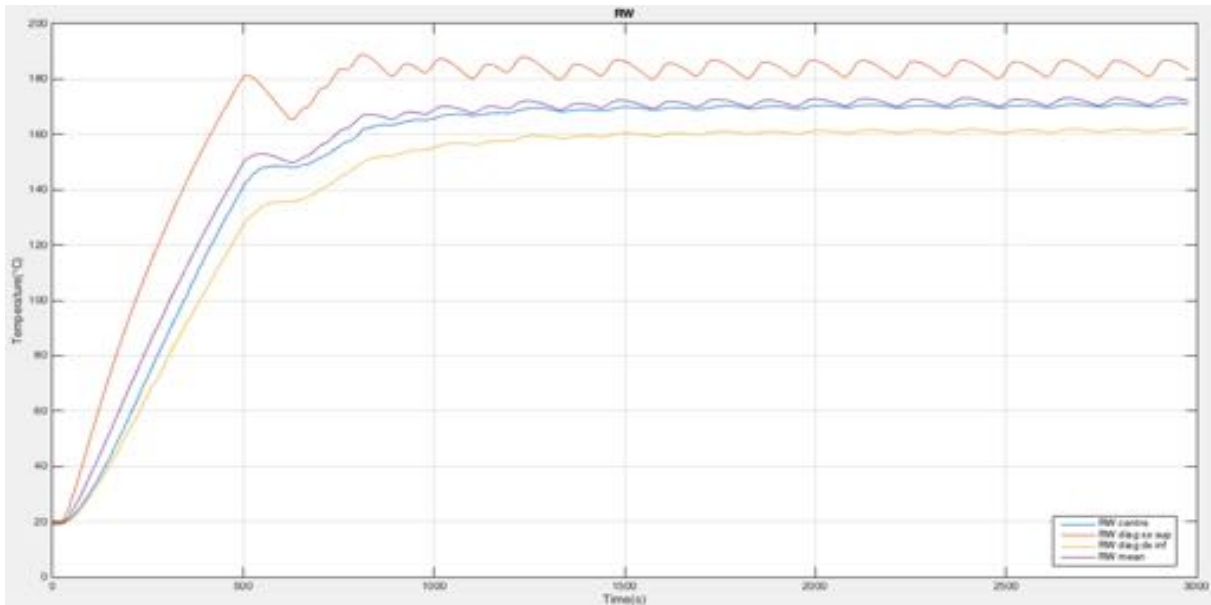


Figura 4.18 Andamento delle temperature lungo la diagonale relativa alla parete destra.

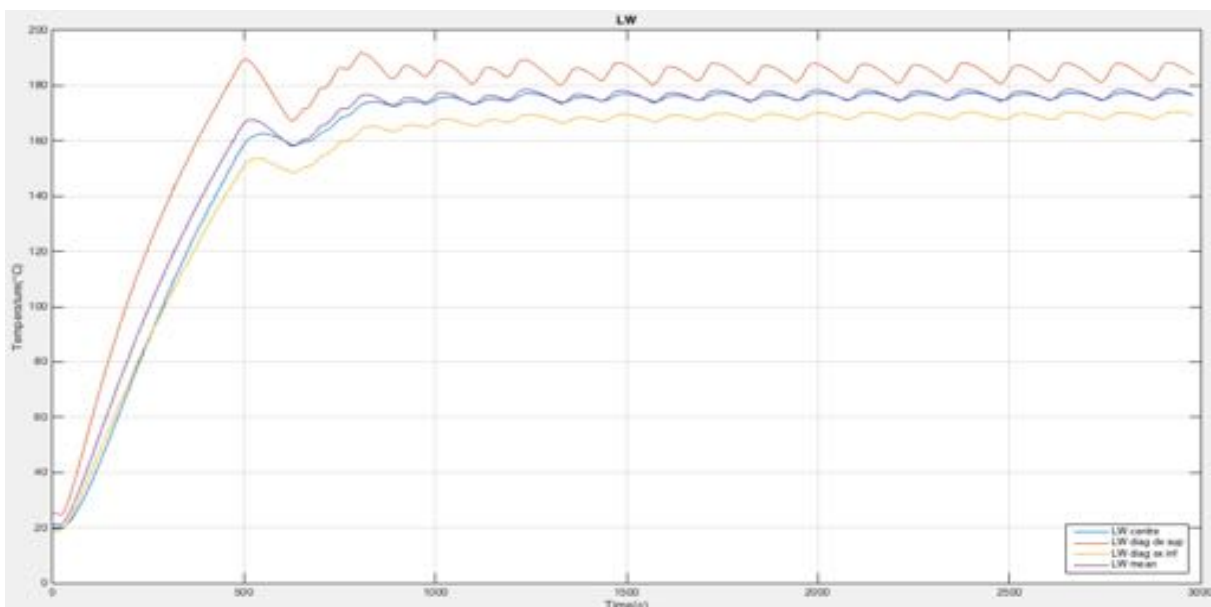


Figura 4.19 Andamento delle temperature lungo la diagonale relativa alla parete sinistra.

Dalle figure 4.18 e 4.19 si può notare che le temperature lungo le diagonali delle pareti sono tra loro speculari, tuttavia si nota una differenza di circa 10°C tra la temperatura “LW diag sx inf” e la “LW diag dx sup” dovuta al senso di rotazione orario della ventola, la quale spinge l'aria

verso la parete sinistra facendo sì che anche nella parte inferiore della parete, l'aria arrivi più calda.

Un'altra considerazione di carattere generale consiste nel far notare che lo stazionario viene raggiunto in tempi minori rispetto al caso di funzionamento statico.

Si passi ora alle temperature che interessano la parete superiore, dove l'effetto precedente, dovuto alla rotazione della ventola, si ripete in misura minore poiché la termocoppia di destra, rispetto a quella di sinistra, è posizionata nella parte opposta a quella in cui è presente la ventola e quindi l'effetto si manifesta con minore intensità perché, appunto, è più lontana e vicina alla porta, comunque raffreddata, del forno. (vedi figura 4.20):

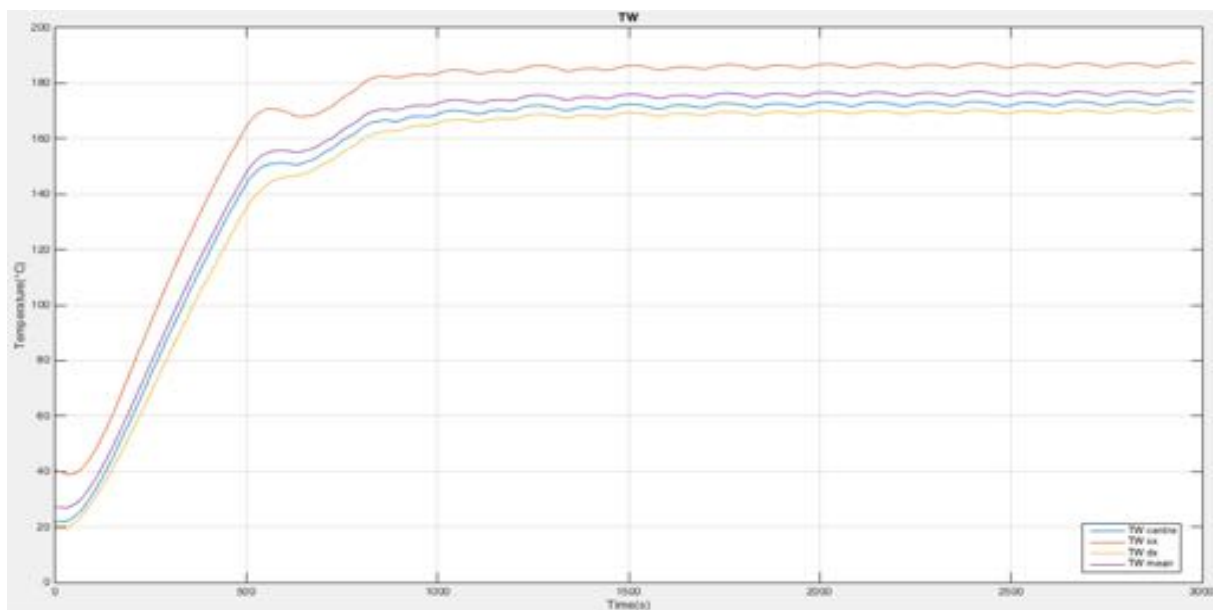


Figura 4.20 *Andamento delle temperature sulla parete superiore.*

Dai seguenti grafici (figure 4.21 e 4.22), si trae conferma del fatto che la resistenza “top” non viene utilizzata (la potenza è sempre pari al valore nullo) per scaldare la cavità, per cui essa raggiunge semplicemente la temperatura presente all’interno del forno durante il ciclo preimpostato:

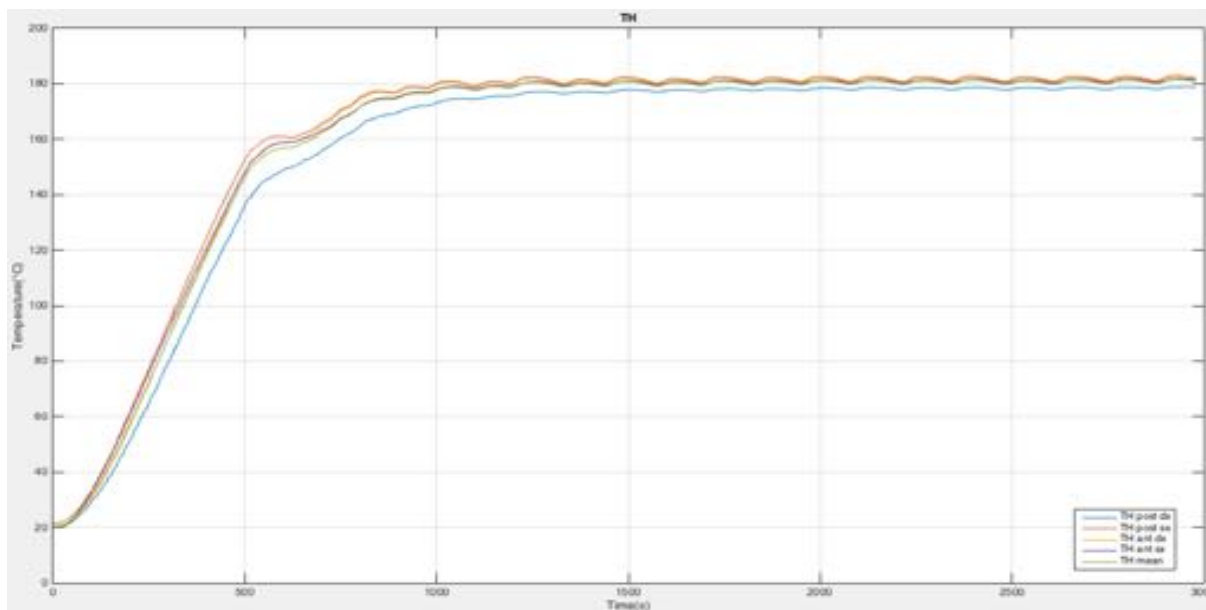


Figura 4.21 Andamento delle temperature registrate dalle quattro termocoppie poste sulla resistenza.

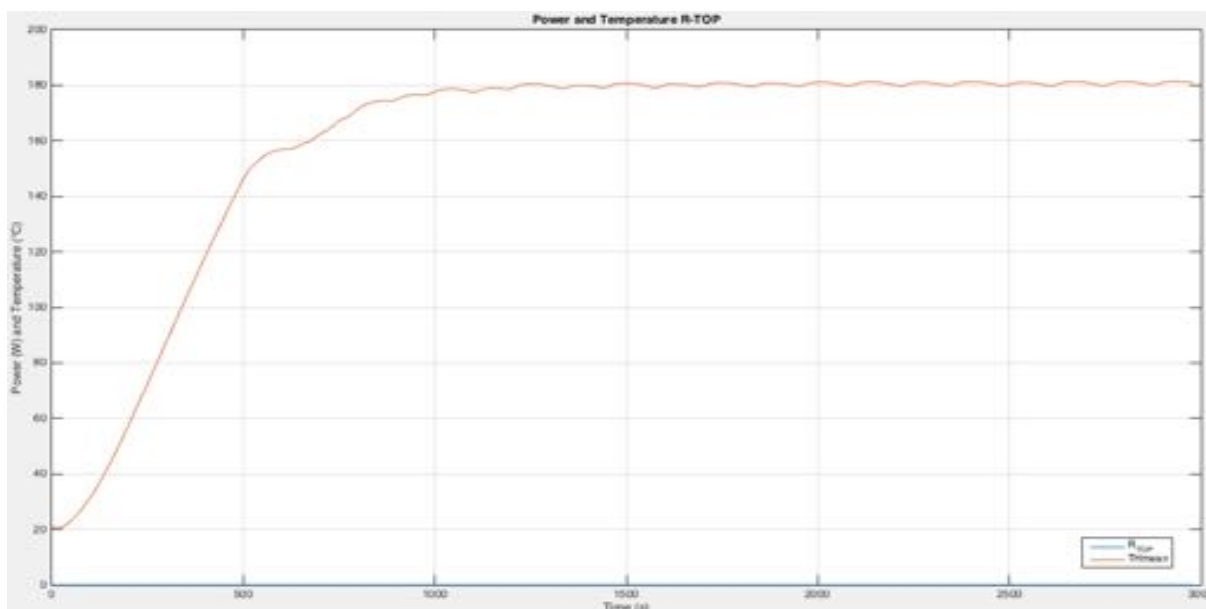


Figura 4.22 Stato della resistenza e andamento medio della temperatura.

Si passi ora alla parete inferiore: dalla figura 4.23 sottostante, si nota che le temperature sono in generale minori rispetto a quelle della parete superiore perché l'aria calda, dotata di minor densità, si sposta verso l'alto (nota: le temperature medie tra parete superiore e inferiore sono differenti, ma non di tanto come nel caso di funzionamento statico). Inoltre, come si è già detto, la termocoppia di destra si trova a temperatura inferiore, sia per effetto della rotazione, sia perché risulta essere lontana dalla ventola e vicina alla porta del forno.

Anche in questo caso, dai grafici (figure 4.24 e 4.25) si può constatare che la resistenza "bottom" non viene utilizzata (la potenza è sempre pari al valore nullo) per scaldare la cavità, per cui essa si riscalda a causa del calore espulso dalla parete inferiore.

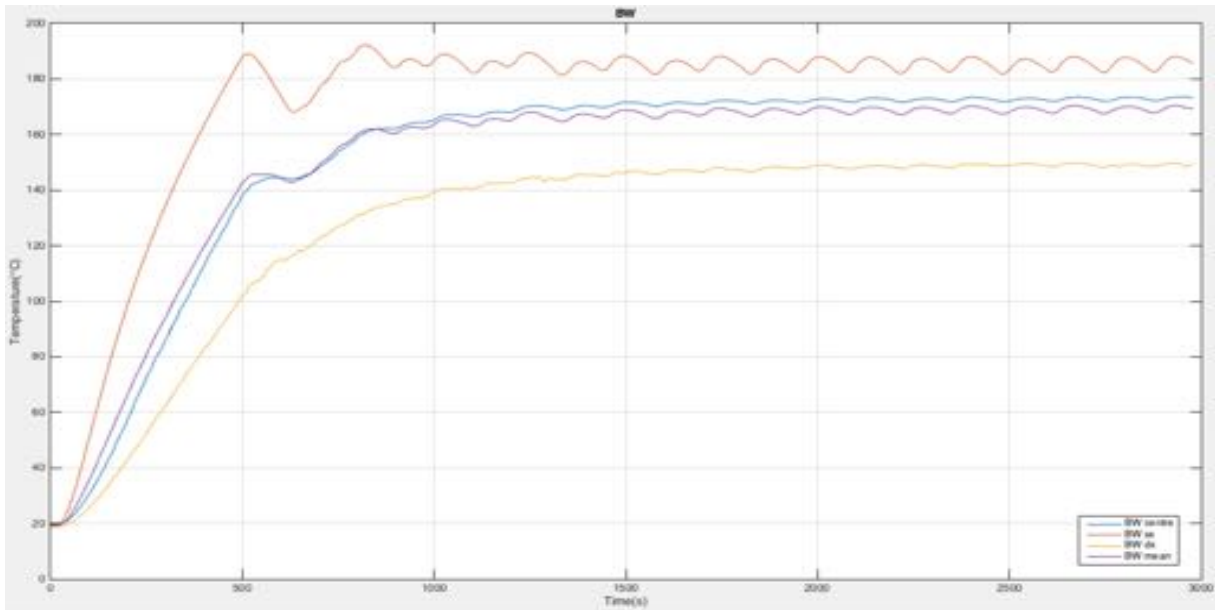


Figura 4.23 Andamento delle temperature sulla parete inferiore.

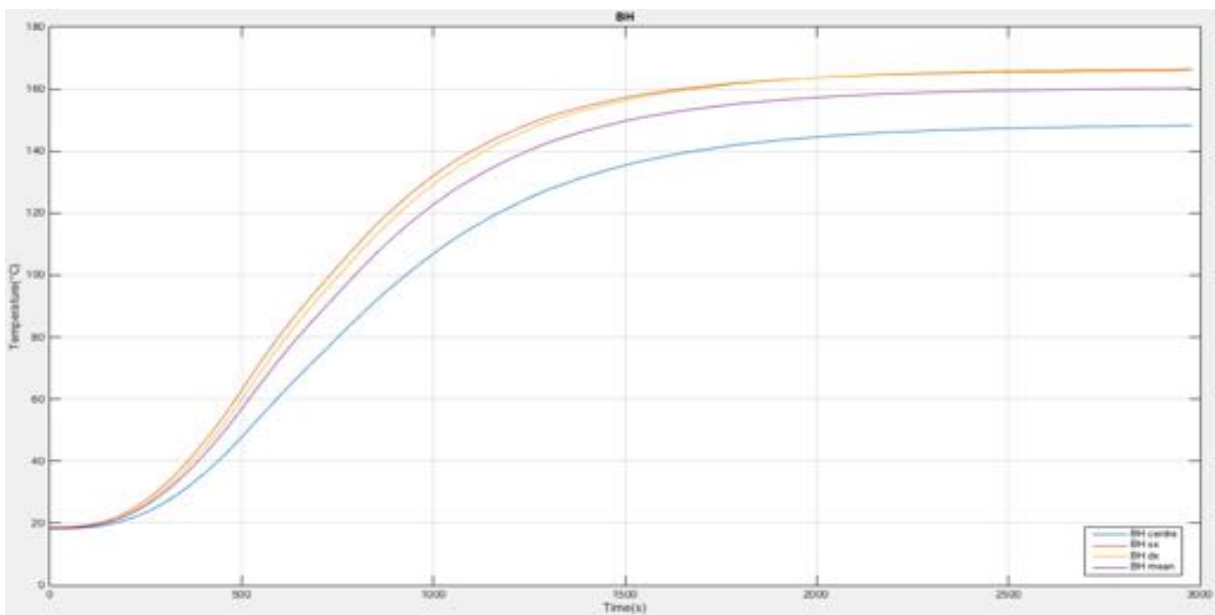


Figura 4.24 Andamento delle temperature registrate dalle tre termocoppie poste sulla resistenza.

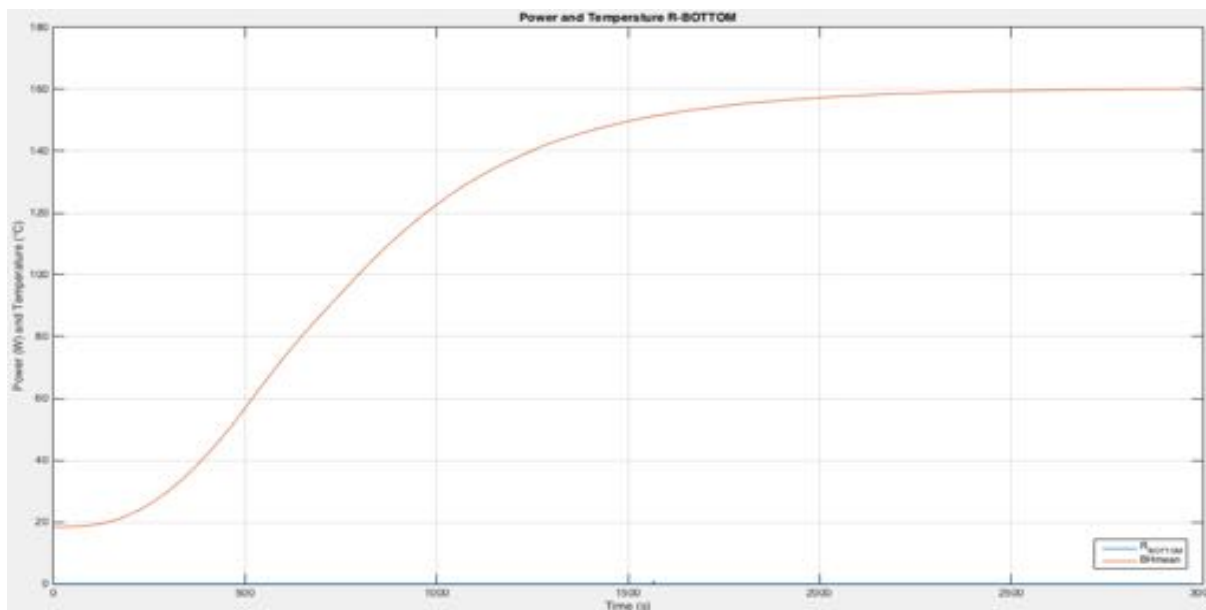


Figura 4.25 Stato della resistenza e andamento medio della temperatura.

L'ultima parete dotata di resistenza è la posteriore: dalla figura 4.26 si può vedere che le termocoppie di destra e sinistra, questa volta, forniscono pressochè la stessa misura perché si trovano alla stessa distanza dal centro della parete. Si noti che al centro c'è maggiore variabilità della temperatura in quanto ci si trova maggiormente vicino alla resistenza Ring e conseguente vi è un maggior scambio termico, sia per convezione che per irraggiamento.

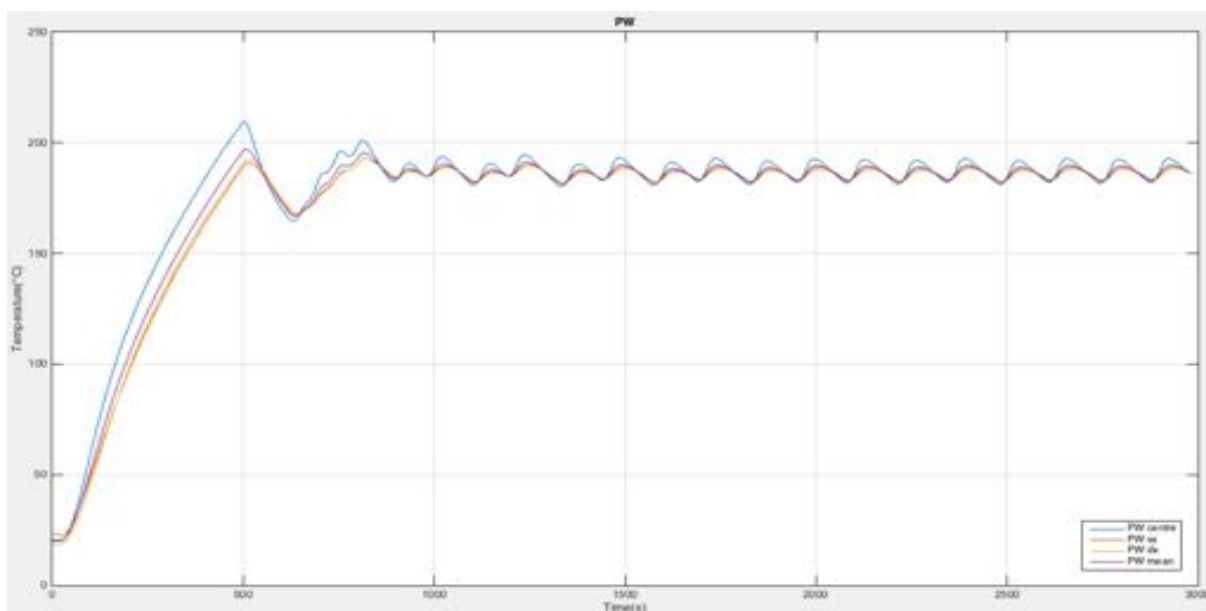


Figura 4.26 Andamento della temperatura sulla parete posteriore.

Per quanto riguarda le temperature registrate dalle termocoppie poste sulla resistenza, si può vedere (figura 4.27) che, anche se sono disposte in punti diversi, la loro temperatura è praticamente la stessa. Quindi, si può ancora affermare che la potenza viene scambiata in maniera del tutto omogenea.

Come si è già sottolineato nel caso di funzionamento statico, queste ultime considerazioni non sono da ritenersi banali ma, anzi, sono importanti poichè ci consentiranno, in un secondo momento, di realizzare il modello matematico in maniera più semplice.

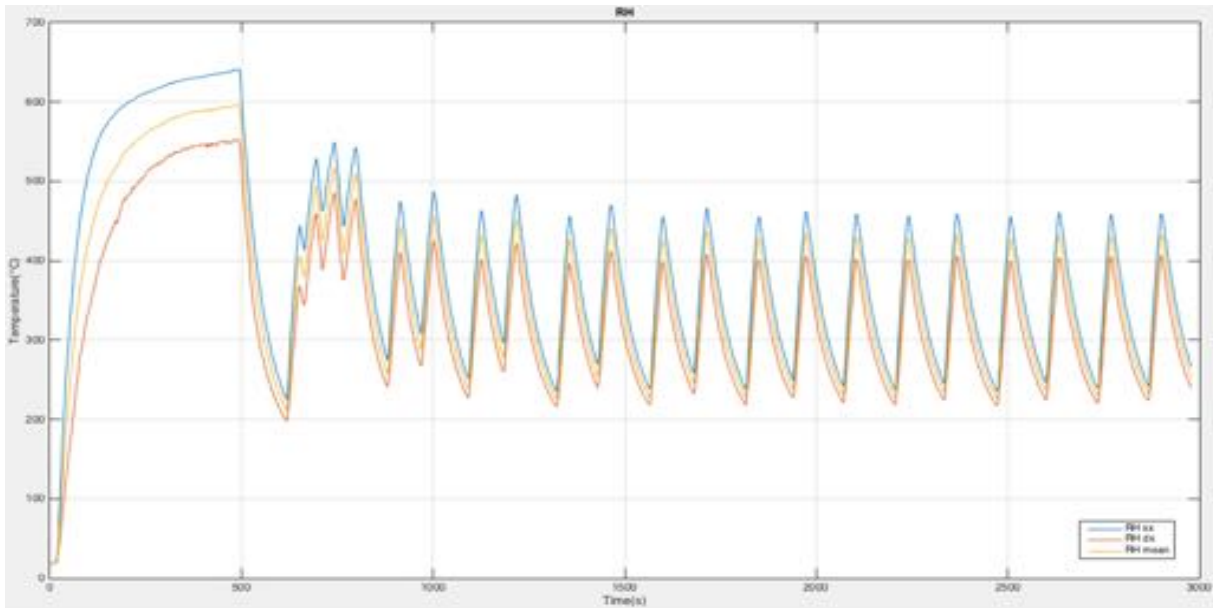


Figura 4.27 Andamento delle temperature registrate dalle due termocoppie poste sulla resistenza.

La modalità di utilizzo della resistenza, si può vedere osservando la figura 4.28, ove si nota che il carico viene inizialmente mantenuto attivo per un lungo periodo in modo da raggiungere velocemente una temperatura simile a quella di set-point. Successivamente, finito il transitorio, la resistenza viene accesa e spenta per periodi regolari in modo da mantenere la temperatura al valore precedentemente settato.

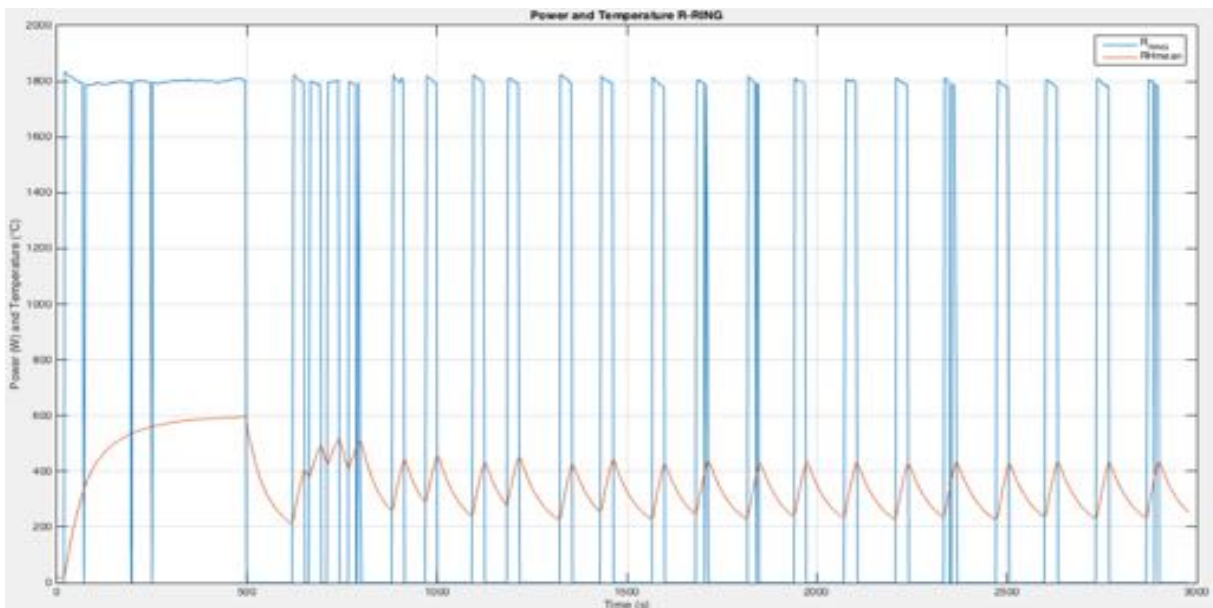


Figura 4.28 Stato della resistenza e andamento medio della temperatura.

La presenza di disturbi nel segnale di potenza non va ad inficiare i risultati della prova, per capirlo si può osservare che il profilo di temperatura è regolare e non viene influenzato.

Infine, per quanto riguarda la cavità interna, si consideri la porta del forno:

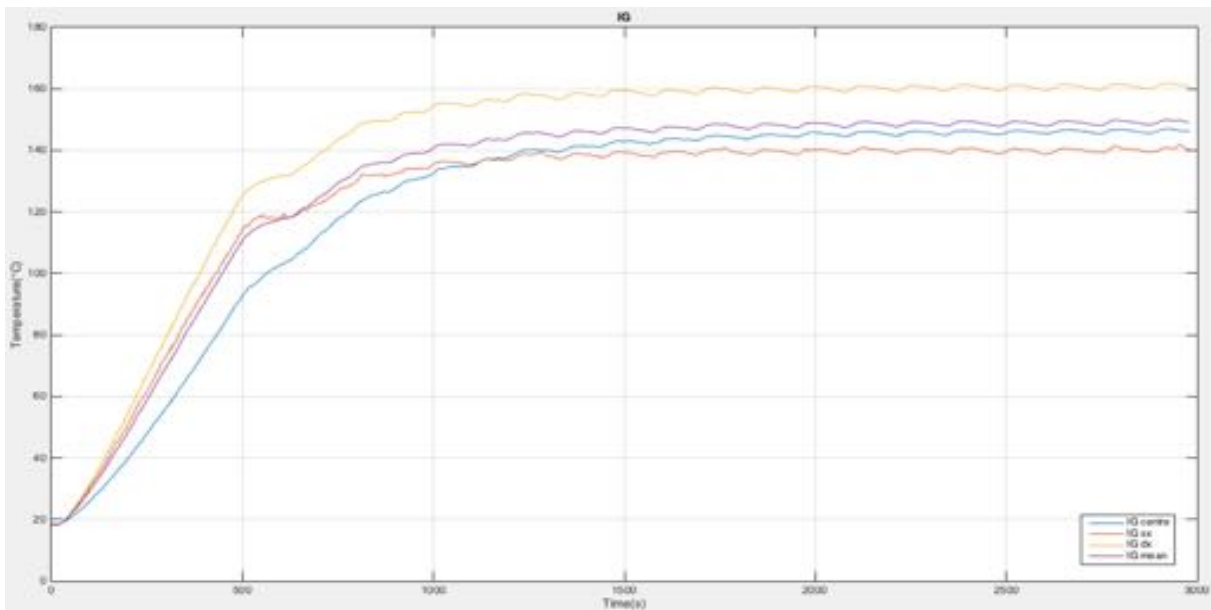


Figura 4.29 Andamento delle temperature sul vetro della porta.

Dalla figura 4.29 si vede che la temperatura “IG dx” è maggiore della “IG sx”, questo è dovuto al fatto che la termocoppia di destra si trova nella parte alta della diagonale, ove è presente l’aria calda. In analogia a quanto si è visto nel caso di funzionamento “statico”, le temperature del vetro risultano essere, in generale, minori di quelle analizzate finora: il motivo è legato al fatto che la porta è attraversata da un flusso d’aria fresca uscente dalla ventola di raffreddamento. L’andamento della temperatura nei vari strati della porta può essere visualizzata tramite la figura 4.30; si noti che la differenza principale tra i due casi (si veda la figura 4.15) è legata alla forma della curva azzurra che, in questo caso, ha una pendenza maggiore nel transitorio e delle oscillazioni di periodo minori nello stazionario a causa della presenza di convezione forzata.

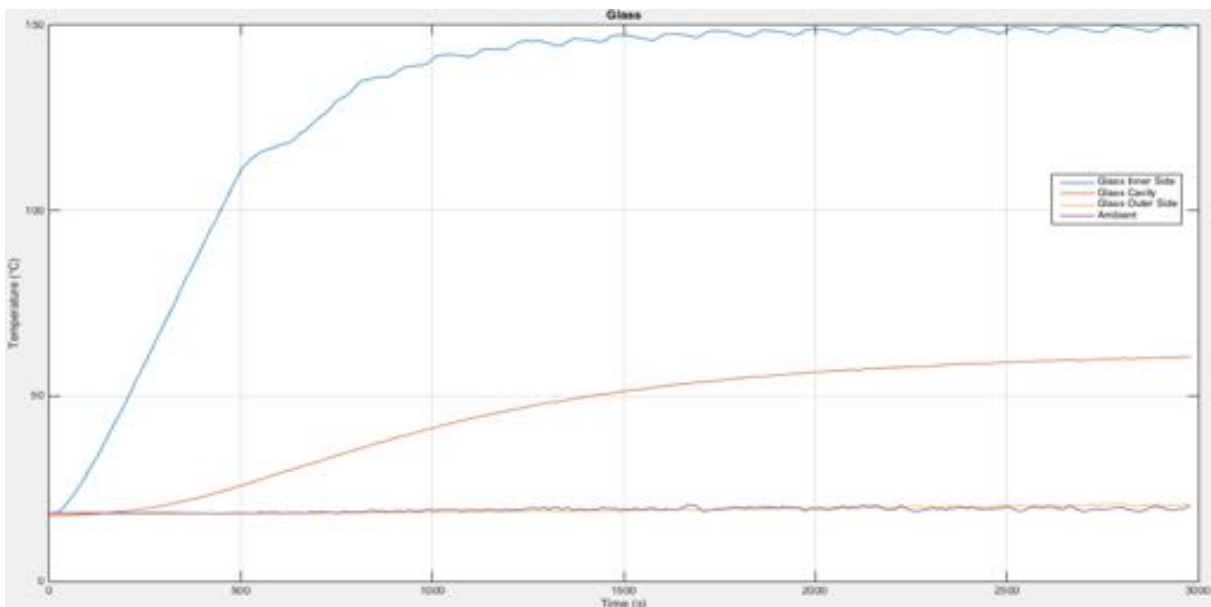


Figura 4.30 Andamento delle temperature nei vari strati di vetro della porta.

A questo punto, nel caso di funzionamento statico, si era in grado di capire come potesse essere il campo di temperature all'interno della cavità, ma in questo caso, il tutto è reso più difficile a causa dei moti caotici dell'aria, imputabili all'utilizzo della ventola posteriore.

In ogni caso, l'obiettivo della logica di controllo rimane quello di mantenere la temperatura di centro forno pari alla temperatura di set-point impostata e per verificare che questo accada, si è posta una termocoppia nel centro del forno più una sulla "PTC500", per cercare di capire cosa essa potesse misurare. Lo scopo di quest'ultima consiste nel poter trarre delle informazioni sul funzionamento della logica di controllo del forno. A tal proposito osserviamo, si osservi la figura 4.31.

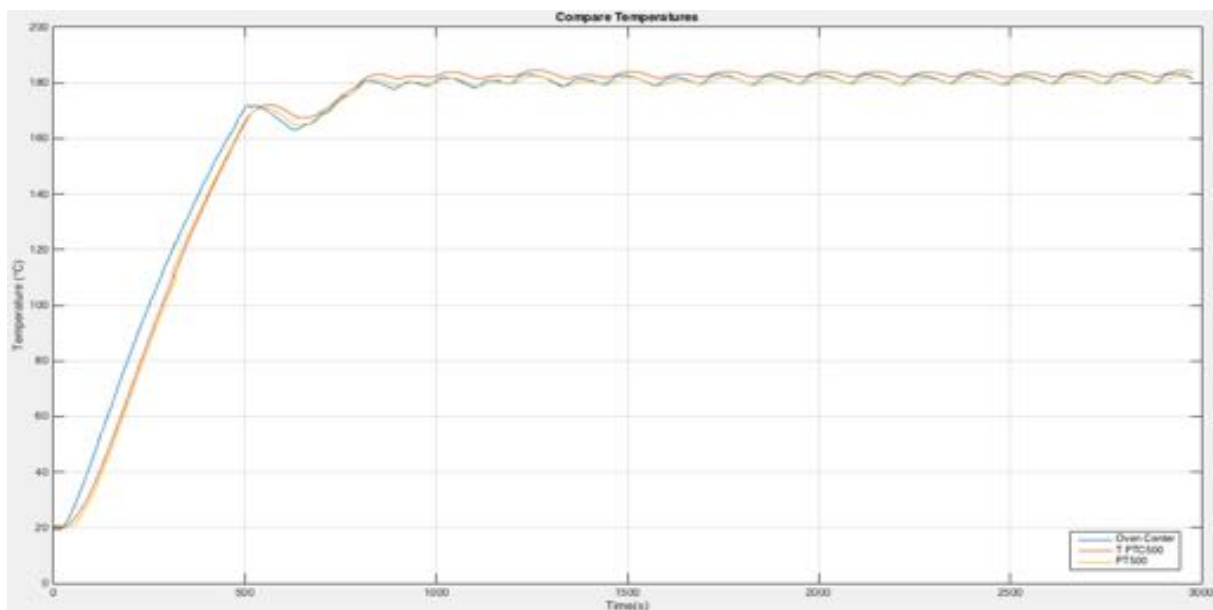


Figura 4.31 Confronto temperature "OC", "T PTC500" e "PTC500".

A differenza del caso di funzionamento statico, questa volta, tutte le temperature forniscono la stessa misura.

Quanto si è appena detto conferma che la correlazione dei 14°C, vista nel caso statico, non viene rispettata nelle diverse modalità di funzionamento.

Il fatto che le termocoppie, posizionate in luoghi differenti, forniscano la stessa misura e che l'andamento sia caratterizzato da poche oscillazioni, fa capire come queste due aree siano poco influenzate dai moti dell'aria all'interno del forno.

Analogamente a quanto si è visto prima, l'ultimo grafico che si analizzerà per il caso di funzionamento ventilato, riguarda l'andamento delle temperature sul "case esterno" (vedi figura 4.32).

Dal grafico sottostante si può vedere che l'isolamento risulta essere efficace per ciò che riguarda il vetro e le pareti posteriore e superiore mentre, per le pareti di destra, di sinistra e per la parete inferiore, le temperature aumentano.

In questo caso, un'elevata temperatura delle pareti esterne è indice di un isolamento imperfetto che porta ad un maggiore scambio termico con l'esterno e quindi ad un maggior consumo di energia.

In particolare, si vede subito che la parete di sinistra raggiunge valori molto elevati e questo si poteva prevedere, dato che la rotazione impone un moto tale da spingere l'aria calda verso di essa.

Per quanto riguarda la parete inferiore, il motivo di valori così elevati è ancora legato alla posizione della resistenza inferiore che porta alla rimozione, almeno in parte, dell'isolamento termico, in modo da far spazio alla resistenza stessa.

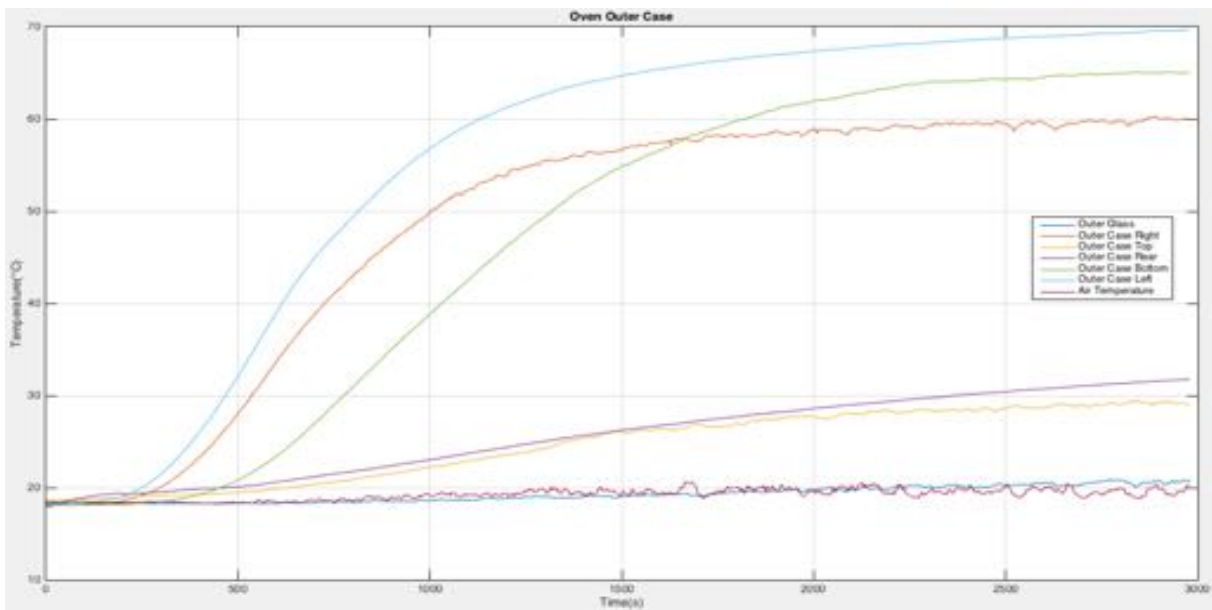


Figura 4.32 Andamento delle temperature sulle pareti esterne del forno.

4.3 Effetto del set-point

In questo caso, si vuole vedere come variano gli andamenti delle curve di temperatura al variare del set point nelle diverse modalità di funzionamento.

Si prenderanno in considerazione i tre valori di temperatura caratteristici sia per il caso statico che per ventilato.

4.3.1 Caso statico

Nel caso statico, dalla figura 4.33 si può notare che la pendenza della rampa iniziale non varia al crescere del set point.

Tuttavia, si vede che il tempo necessario al raggiungimento delle condizioni stazionarie cala al diminuire della temperatura impostata e ciò è plausibile perché il forno è soggetto ad una dispersione minore che consente, a sua volta, il raggiungimento delle condizioni stazionarie in maniera più rapida (inoltre, ovviamente, la temperatura da raggiungere è più bassa).

Graficamente:

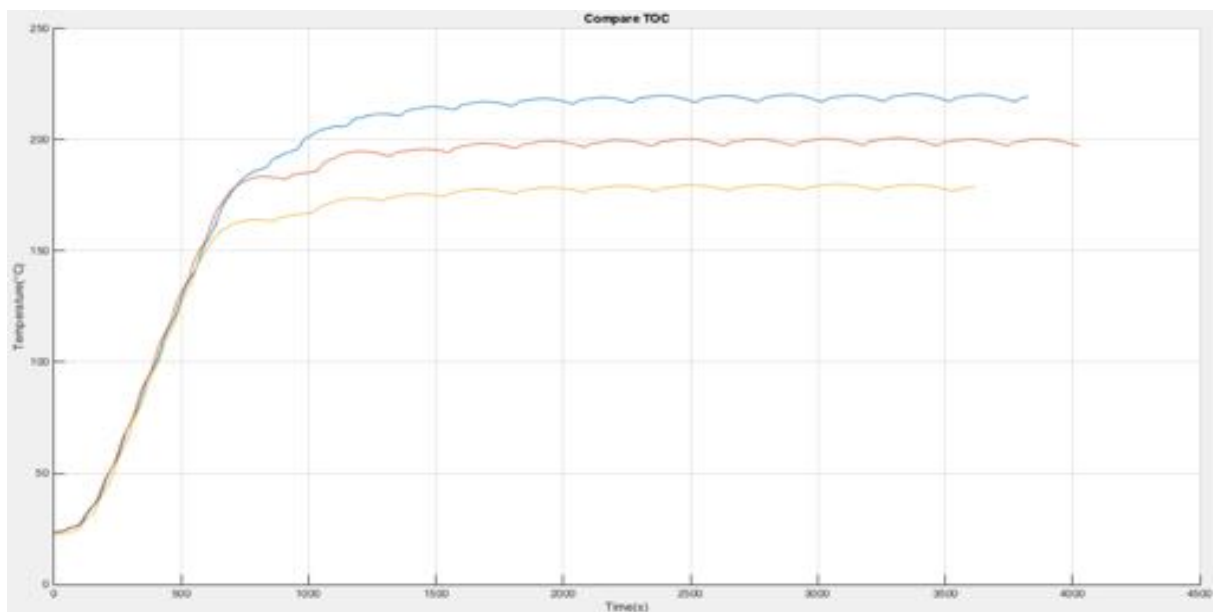


Figura 4.33 Andamento delle temperature al variare del set point.

4.3.2 Caso ventilato

Nel caso ventilato, dalla figura 4.34 si può notare che la pendenza della rampa iniziale non varia all'aumentare del set point.

Per quanto riguarda il tempo di raggiungimento delle condizioni stazionarie, si vede che questo non cambia di tanto al variare della temperatura e ciò è sicuramente legato alle condizioni di

moto dell'aria all'interno del forno che è come se inibissero lo scambio termico con l'esterno garantendo un rapido raggiungimento del set point.

Graficamente:

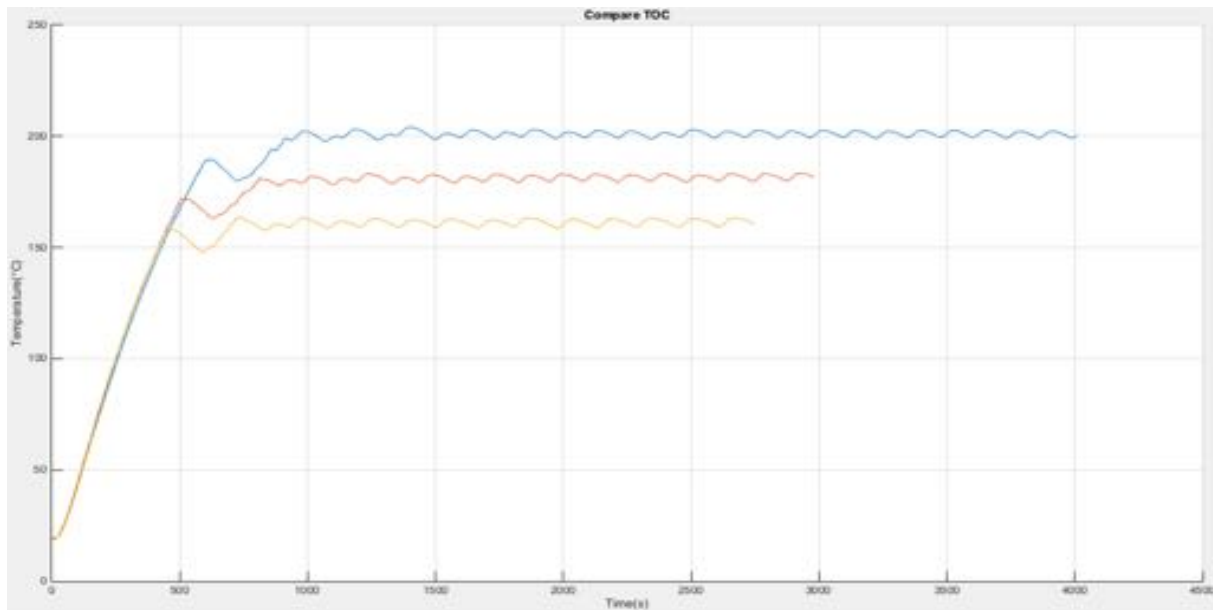


Figura 4.34 Andamento delle temperature al variare del set point.

4.3.3 Confronto tra le due modalità

Infine, si vogliono esplicitare le differenze relative alle due modalità di funzionamento in corrispondenza delle temperature mediane pari a 200°C nel caso statico e 180°C per il ventilato.

Quindi, dalle figure 4.35, 4.36, 4.37 e 4.38 si possono notare alcune differenze (alcune delle quali già esplicitate nei capitoli 4.3 e 4.4) che caratterizzano le due modalità:

- i. La prima peculiarità consiste nel notare una pendenza differente nei due casi (figura 4.35). In particolare, una maggior pendenza (caso ventilato) è indice di migliori prestazioni del forno in termini di raggiungimento della temperatura di set point, che avviene in maniera più rapida cioè, in tempi minori.
- ii. Una seconda differenza consiste nel notare la diversa forma delle due curve di temperatura una volta terminati i transitori: nel caso ventilato le pendenze di risalita e discesa delle “gobbe” è maggiore ed inoltre, si nota che il periodo di formazione delle “gobbe” stesse è di gran lunga minore. Quanto si è appena detto è scontato ed è imputabile alla presenza di moti turbolenti dell'aria che richiedono, per avere una temperatura di centro forno uguale alla temperatura impostata, un maggior controllo. Per “maggior controllo” si intende la continua accensione e successivo spegnimento, rapido, della resistenza “ring” (figura 4.36). Nel caso statico la frequenza di accensione e

spegnimento delle resistenze è minore (figure 4.37 e 4.38) facendo sì che la curva di temperatura sia più regolare.

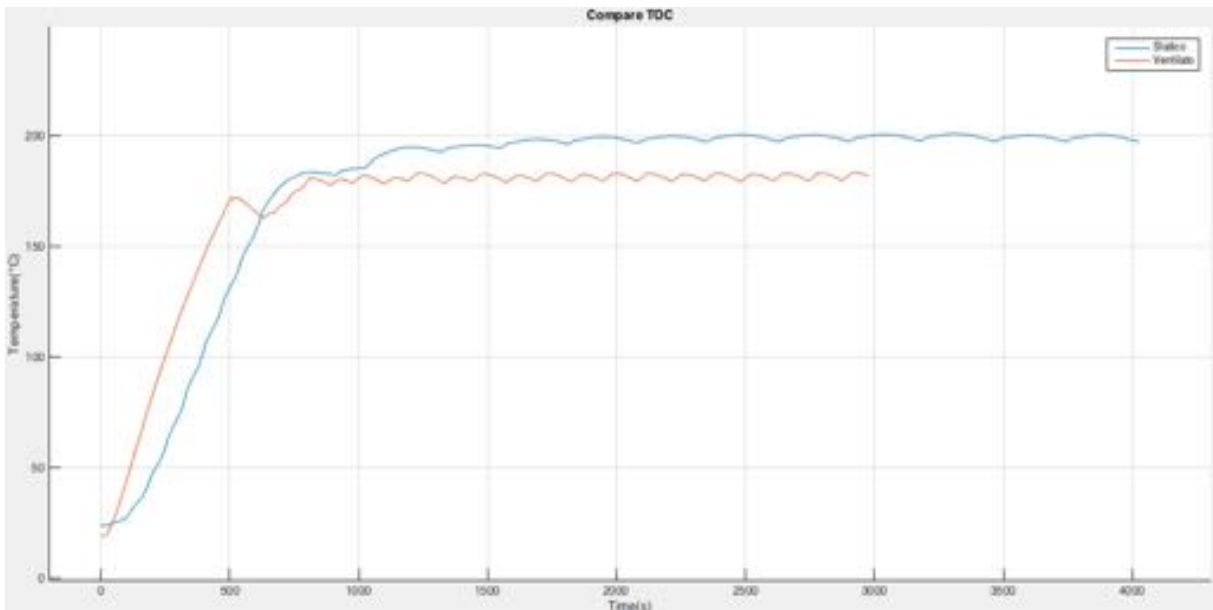


Figura 4.35 Andamento delle temperature di centro forno nel caso di funzionamento statico e ventilato.

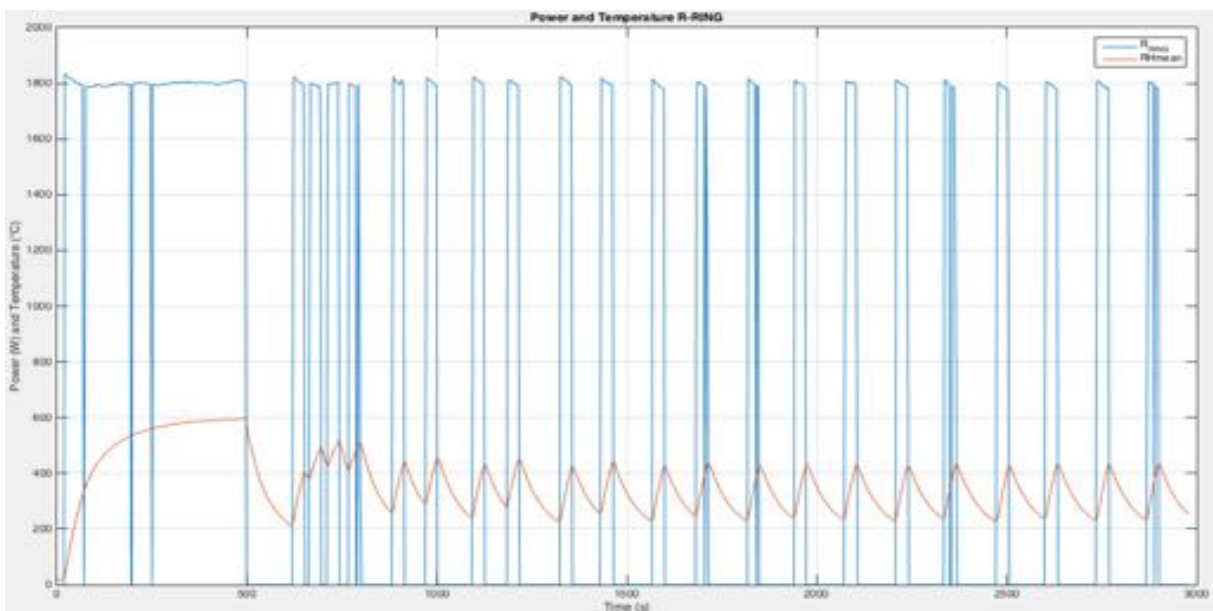


Figura 4.36 Stato della resistenza "ring" e andamento medio della temperatura nel caso di funzionamento ventilato.

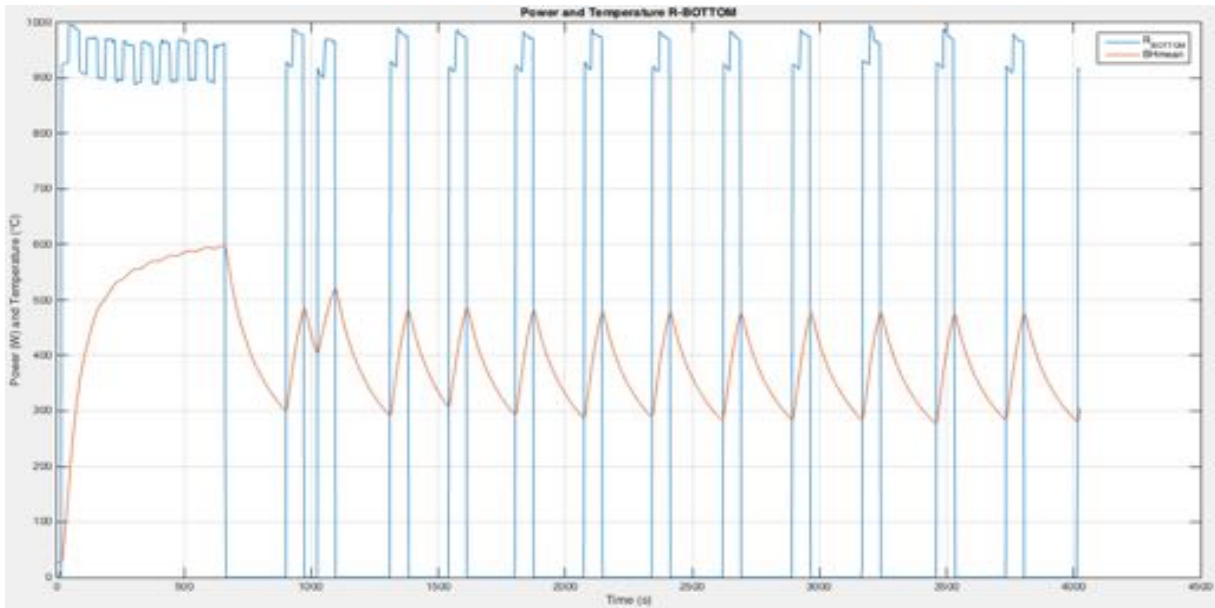


Figura 4.37 Stato della resistenza “bottom” e andamento medio della temperatura nel caso di funzionamento statico.

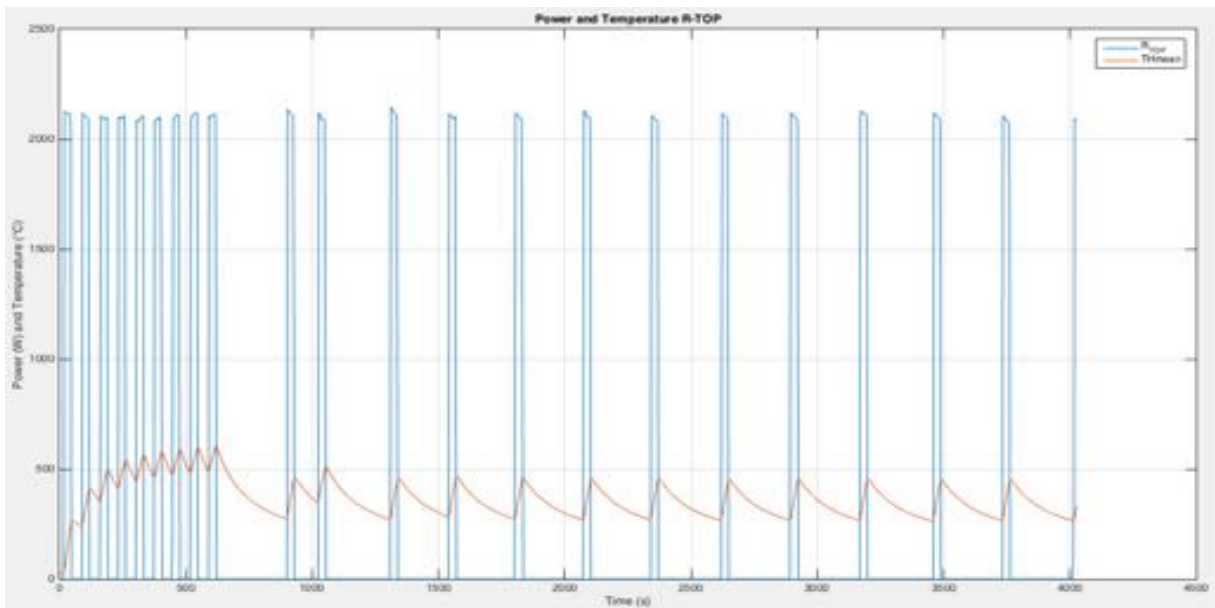


Figura 4.38 Stato della resistenza “top” e andamento medio della temperatura nel caso di funzionamento statico.

Capitolo 5

Test di efficienza energetica del forno elettrico

Lo scopo principale del test è quello di riuscire a determinare l'efficienza del forno. Tuttavia questo obiettivo diventerà secondario, in quanto si vuole innanzitutto capire quali siano i fenomeni che si verificano all'interno del forno quando si simula la presenza del cibo tramite l'utilizzo del mattone.

5.1 Generalità

I test vengono eseguiti in una stanza la cui temperatura viene mantenuta a $23\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$.

La velocità massima del flusso d'aria, misurata frontalmente all'apparecchio, non deve essere superiore a 0.7 m/s . La misurazione non è influenzata dal funzionamento di altri elettrodomestici. La temperatura ambiente viene misurata in un punto che è alla stessa altezza del centro del volume della cavità del forno in prova calcolato e ad una distanza di 0.5 metri diagonalmente da uno dei bordi anteriori dell'apparecchio (figura sottostante):

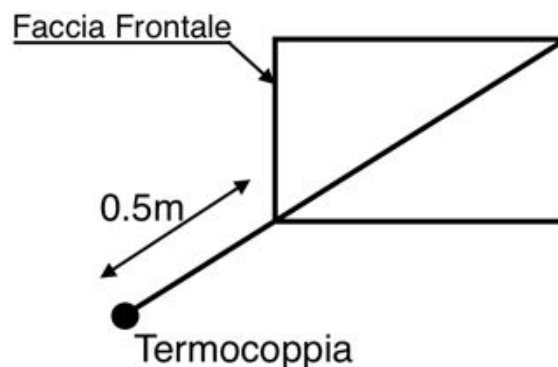


Figura 5.1 Posizionamento termocoppia per la misurazione della temperatura ambiente.

La tensione di alimentazione deve essere pari a $230\text{V} \pm 1\%$ o $400\text{V} \pm 1\%$, come definito nelle istruzioni del manuale di installazione, con tutti gli elementi riscaldanti accesi. La frequenza di alimentazione è fissata ad un valore nominale pari a 50Hz , inoltre le impostazioni del forno non devono essere modificate durante l'intera prova.

Gli strumenti che vengono utilizzati per effettuare le misurazioni devono avere determinati requisiti, come descritto nelle norme europee EN60350-1 e nella EN60335-2-6.

5.2 Preparazione del mattone

Il mattone da utilizzare nel test di consumo di energia deve essere pre-trattato e preparato secondo la seguente procedura.

Un nuovo mattone, prima di poter essere utilizzato per la prima volta, viene essiccato in un forno di circa 50l di volume con funzione di circolazione forzata d'aria a 175 °C per 3h.

Non si possono essiccare più di due mattoni contemporaneamente nello stesso forno.

Un mattone che è ancora umido a causa di un precedente test, necessita di almeno 8h di essiccazione come descritto sopra.

Il peso del mattone completamente asciutto, senza termocoppie, deve essere misurato entro cinque minuti dalla rimozione dello stesso dal forno e la misura viene annotata in grammi.

Il peso secco deve essere in accordo con le seguenti specifiche:

- Nome: Hipor (vedi figura 4.2)
- Densità a secco: $(550 \pm 40) \text{ kg/m}^3$
- Porosità: 77% (simile alla consistenza del cibo)
- Massa a secco: $(920 \pm 75) \text{ g}$ (senza termocoppia)
- Massa d'acqua assorbita: $(1050 \pm 50) \text{ g}$
- Altezza: $(64 \pm 0,5) \text{ mm}$
- Lunghezza-profondità-altezza: $(230 \times 114 \times 64) \text{ mm}$

Il mattone viene lavorato su tutte e 6 le superfici, con tolleranza pari a 0.5mm.

A questo punto è necessario posizionare le due termocoppie in maniera tale che il punto di misura rimanga ad una profondità di 32mm rispetto alla superficie del mattone (vedi figura 5.3).

Le termocoppie devono inoltre essere fissate in maniera tale da assicurarsi che il punto di misura rimanga lo stesso durante tutta la prova.

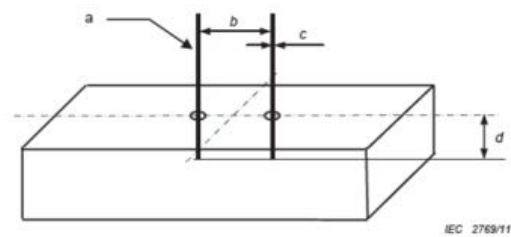
Una volta essiccato, il mattone viene inserito ed immerso completamente in una vasca contenente acqua ad una temperatura inferiore ai 20 °C.

Il contenitore d'acqua e il mattone devono essere riposti, per almeno 8 h, in un frigorifero (vedi figura 5.4) fintanto che il mattone non raggiunge una temperatura al centro pari a $(5 \pm 2)^\circ\text{C}$ (misurata dalle termocoppie, le quali devono arrivare entrambe alla temperatura indicata).

Prima di poter inserire un mattone caldo all'interno dell'acqua, è necessario che la sua temperatura al centro stia al di sotto dei 25°C: il raffreddamento deve avvenire in aria. Una volta che si è prelevato il mattone dal contenitore d'acqua, questo viene fatto sgocciolare per circa un minuto, successivamente il peso del mattone bagnato deve essere misurato e la quantità d'acqua assorbita è determinata tenendo conto anche del peso delle termocoppie.



Figura 5.2 Esempio di mattone utilizzato per il test.



Key

- a Two metal sheet tube thermocouples
- b 50 mm, with holes at $b/2$
- c $\varnothing 1$ mm, both thermocouples and holes
- d 32 mm both thermocouples and holes

Figura 5.3 Posizionamento delle termocoppie nel mattone.



Figura 5.4 Inserimento del mattone nel frigorifero, si noti la presenza delle termocoppie che misurano, oltre al centro del mattone, anche la temperatura all'interno del frigorifero.

5.3 Preparazione del Forno

Innanzitutto, una volta consegnato il forno, è necessario disporlo in un laboratorio con una temperatura pari a $23\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ per almeno 24h.

Successivamente si può eseguire un pre-test del forno, che prevede:

- Accensione del forno per 30min alla temperatura di 200 °C .
- Fase di raffreddamento, la quale prevede l'utilizzo di ventilatori esterni.

È bene ricordare che non è consentito effettuare prove meccaniche che potrebbero influenzare l'integrità del forno stesso.

5.4 Esecuzione del test

Generalmente si effettuano tre test per ogni modalità di funzionamento del forno.

In particolare, una volta effettuate le operazioni precedentemente descritte, si può inserire il mattone nel forno riponendolo sull'apposita griglia (fornita dalla casa) in maniera tale che il centro del mattone sia il più possibile coincidente con il centro della cavità.

A questo punto è necessario che la misurazione avvenga accendendo il forno entro 3 minuti dalla rimozione del mattone dal frigorifero. Successivamente, il mattone viene estratto quando l'ultima delle due termocoppie ha raggiunto un aumento di temperatura al centro pari a 55 K , mentre il forno viene fatto funzionare ancora per un'ora circa, fino al raggiungimento delle condizioni stazionarie.

Ognuno dei mattoni deve avere un proprio numero individuale, inoltre deve essere registrata la frequenza con cui ognuno di essi viene usato, infatti, un mattone può essere utilizzato per un massimo di 20 prove (se maneggiato normalmente).



Figura 5.5 Mattone all'interno del forno durante il test.

5.5 Dati registrati e validazione della prova

I dati che vengono rilevati durante la prova, e che devono essere annotati, sono i seguenti:

- ID del mattone.
- Peso del mattone a secco.
- Peso del mattone bagnato.
- Misurare il peso a umido del mattone a fine cottura.
- La temperatura misurata dalla prima termocoppia all'inizio della prova.
- La temperatura misurata dalla seconda termocoppia all'inizio della prova.
- Le temperature del mattone alla fine della prova, arrotondate alla prima cifra decimale ed espresse in ° C.

I dati ottenuti nelle varie prove sono i seguenti:

1) Dati delle prove nel caso di funzionamento statico:

ID	m a secco	m bagnato	m essiccato	Tin sx	Tin dx	Tf	N°test	Data	T modalità
6	948 grammi	1952 grammi	1820 grammi	5,2	5,2	59,2	2	26-set	220 statico
3	950 grammi	1946 grammi	1825 grammi	6,5	6,6	61,6	1	22-set	200 statico
5	950 grammi	1960 grammi	1858 grammi	3,9	3,8	59,9	2	26-set	180 statico

2) Dati delle prove nel caso di funzionamento ventilato:

ID	m a secco	m bagnato	m essiccato	Tin sx	Tin dx	Tf	N°test	Data	T modalità
5	948 grammi	1950 grammi	1800 grammi	4,6	4,6	59,6	1	21-set	160 ventilato
4	950 grammi	1930 grammi	1720 grammi	6,7	6,8	61,7	1	19-set	180 ventilato
1	950 grammi	1945 grammi	1775 grammi	3,6	3,4	58,5	2	22-set	200 ventilato

La prova risulta essere valida se la temperatura media ΔT_k^i rimane nel range di $\pm 10K$ ovvero:

$$\Delta T_k^i = T_{k,measured}^i - T_{amb} \quad (5.1)$$

con $T_{k,measured}^i$ che corrisponde alla temperatura media presente all'interno del forno, calcolabile considerando il valore medio dei valori medi di temperatura di cinque cicli consecutivi.

Modalità di riscaldamento	Riscaldamento statico	Riscaldamento ventilato
ΔT_1^i	$(140 \pm 10)\text{K}$	$(135 \pm 10)\text{K}$
ΔT_2^i	$(180 \pm 10)\text{K}$	$(155 \pm 10)\text{K}$
ΔT_3^i	$(220 \pm 10)\text{K}$	$(175 \pm 10)\text{K}$

Un esempio di calcolo potrebbe essere il seguente: si consideri il caso ventilato con T di set point pari a 180°C e si osservi la figura 5.6.

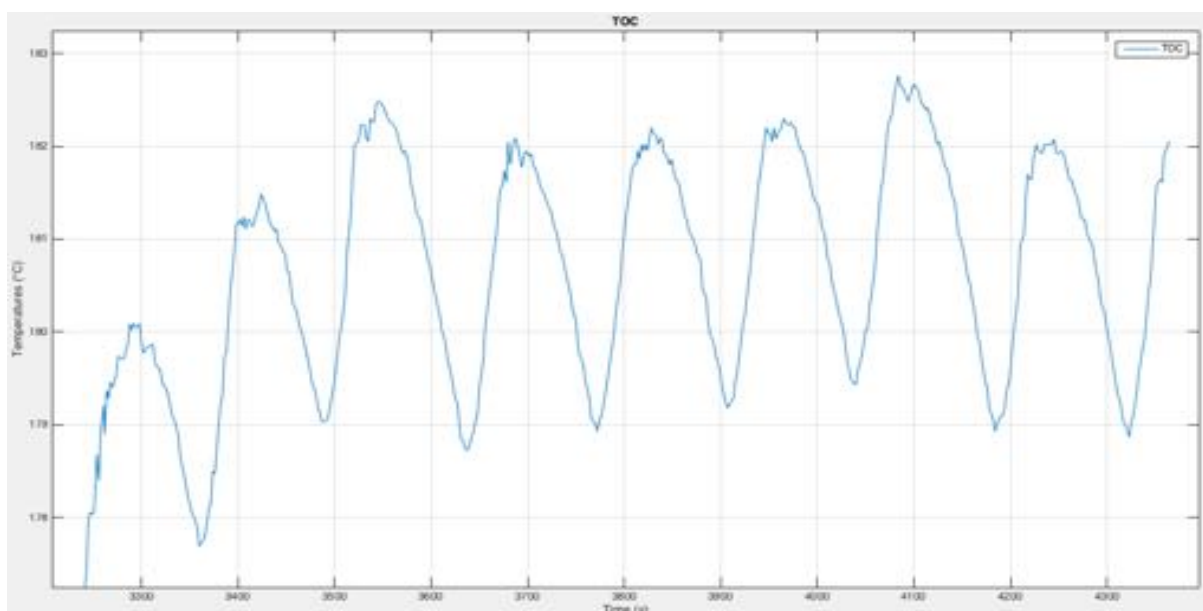


Figura 5.6 Andamento della temperatura a centro forno.

A partire dal primo ciclo i dati registrati sono:

	1°ciclo	2°ciclo	3°ciclo	4°ciclo	5°ciclo
T max (°C)	180	181,4	181,9	182,2	182,2
T min (°C)	177,8	179,1	179	179,2	179,5
T media (°C)	178,9	180,3	180,4	180,6	180,9

Da cui, $T_{k,measured}^i$ risulta essere pari a 180,2 °C e quindi, essendo T_{amb} pari a 19,4°C, si avrà

$\Delta T_2^i = 160,8^\circ\text{C}$ che è minore di 165°C.

5.6 Risultati test del mattone nel caso di funzionamento statico

Lo scopo di questo capitolo consiste nel capire quali siano i fenomeni che si verificano, nel caso di funzionamento statico, all'interno della cavità quando al suo interno viene inserito il mattone secondo le modalità descritte nel capitolo 5. A tale scopo, è necessario analizzare i grafici seguenti.

Il primo grafico prende in considerazione la temperatura media al centro del mattone:

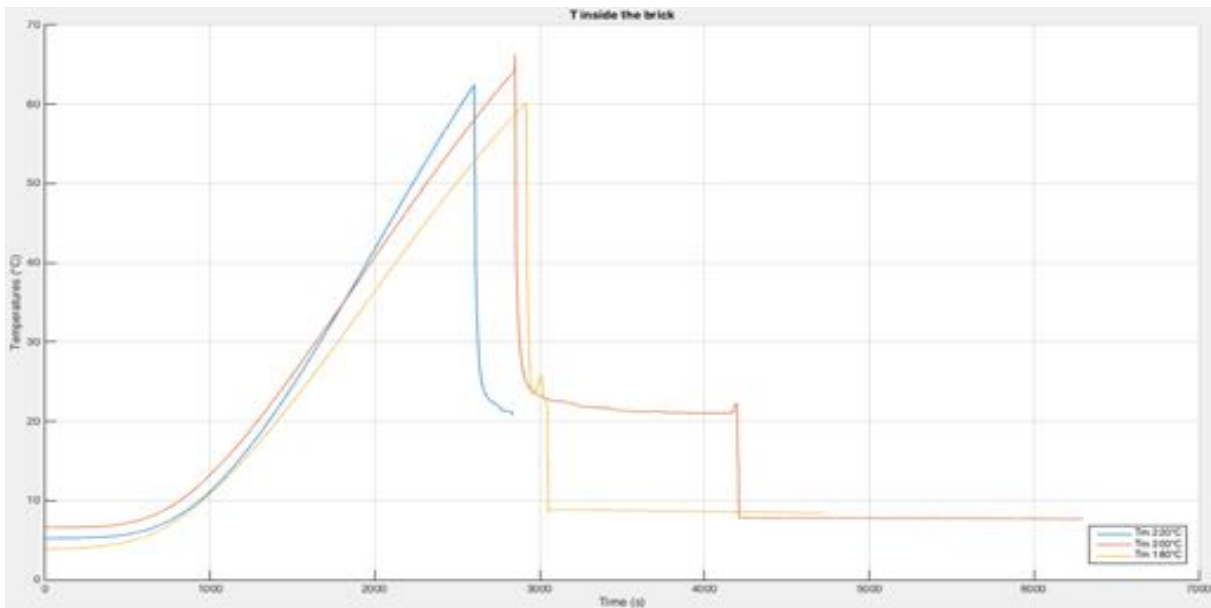


Figura 5.7 Grafico delle temperature medie al centro del mattone al variare del set point.

Dalla figura 5.7 si nota subito che nel caso di funzionamento statico a 220°C (linea azzurra) le due termocoppie all'interno del mattone raggiungono più velocemente, rispetto agli altri due casi, la temperatura imposta dalla norma, data dalla temperatura del mattone ad inizio prova (cioè quando esso viene estratto dal frigorifero) più un incremento di 55°C. Inoltre si nota che le curve si trovano a distanze pressochè uguali e ciò implica che il fenomeno avvenga in maniera simile al variare della temperatura di set point.

Nonostante questa modalità di funzionamento preveda la presenza dell'irraggiamento (fenomeno non lineare), possiamo notare in generale che l'effetto è opposto, cioè il fenomeno è pressochè lineare decrescente perché il rateo di evaporazione della massa d'acqua nei tre casi è pari a: 0,052g/s per $T_{set}=220^{\circ}\text{C}$ con durata pari a 42min, 0,045g/s per $T_{set}=200^{\circ}\text{C}$ con durata pari a 45min) ed infine 0,035g/s per $T_{set}=180^{\circ}\text{C}$ con durata pari a 48min.

Un altro grafico interessante riguarda l'andamento della temperatura misurato dalla PTC500:

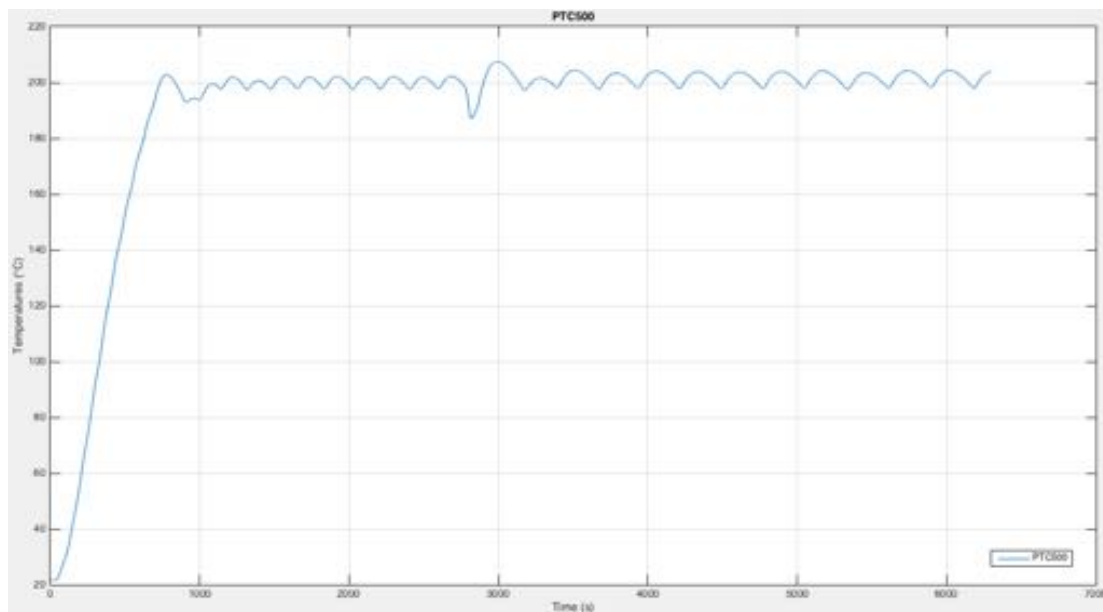


Figura 5.8 *Andamento della temperatura rilevato dalla PTC500.*

Dalla figura 5.8 si nota che l'improvviso calo di temperatura è dovuto all'estrazione del mattone dal forno, inoltre si vede chiaramente che anche in assenza del mattone la temperatura oscilla attorno al valore di set point.

Tuttavia, si osserva che in presenza del mattone l'andamento della curva è caratterizzato da un'ampiezza e un periodo diversi rispetto al caso di assenza del mattone stesso: è come se il forno si accorgesse della sua presenza.

In realtà il forno non può accorgersi in maniera tangibile della presenza del mattone, per cui l'andamento di temperatura è semplicemente legato alla modalità di programmazione della logica di controllo. Per capire meglio cosa avvenisse attorno al mattone si è deciso di introdurre altre quattro termocoppie che misurassero la temperatura dell'aria nell'intorno delle pareti del mattone, a tal proposito si veda la figura 5.9.

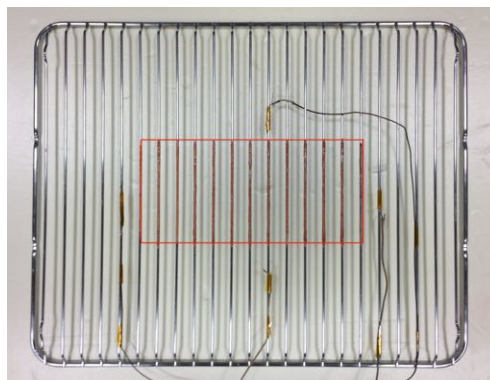


Figura 5.9 *Posizione del mattone e delle termocoppie sulla griglia.*

Mentre l'andamento delle temperature misurato dalle quattro termocoppie può essere osservato tramite la figura 5.10 sottostante:

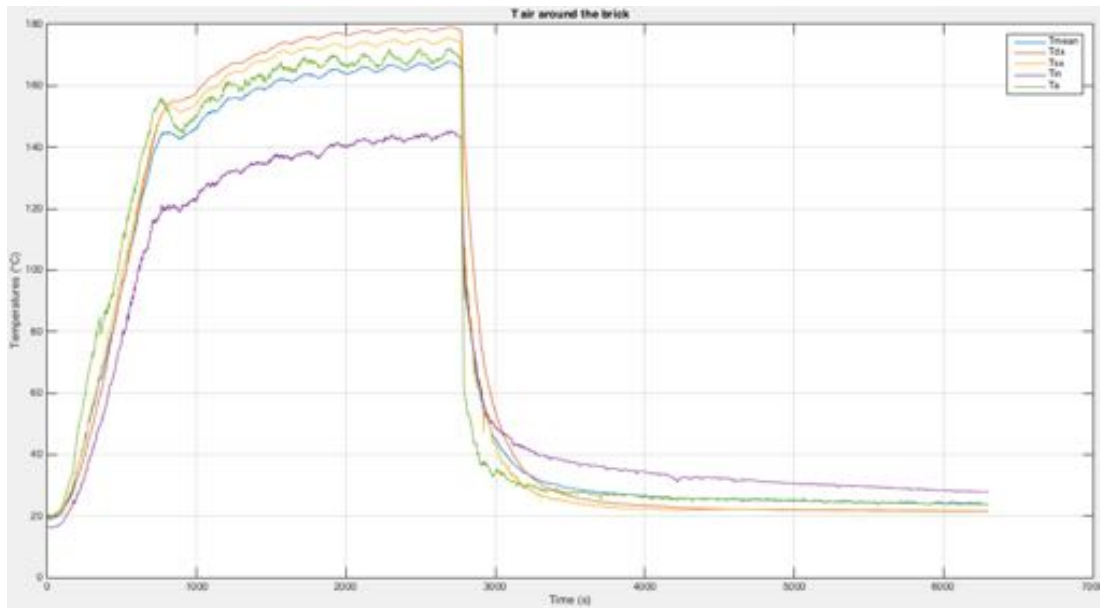


Figura 5.10 Andamento delle temperature dell'aria attorno al mattone.

Dal grafico si nota che l'andamento delle temperature nel caso di riferimento per il funzionamento statico (ovvero per T di set pari a 200°C) è pressochè identico lungo ogni faccia del mattone, il ché significa che il campo di temperature può essere considerato uniforme.

Si noti che l'andamento della temperatura "Tin" non è corretto, evidentemente a causa di un malfunzionamento della termocoppia.

Considerando sempre la temperatura di riferimento per il caso di funzionamento statico, si prendano i grafici relativi alle misurazioni della PTC500 e della TOC con e senza mattone (si osservino le figure 5.11 e 5.12, rispettivamente):

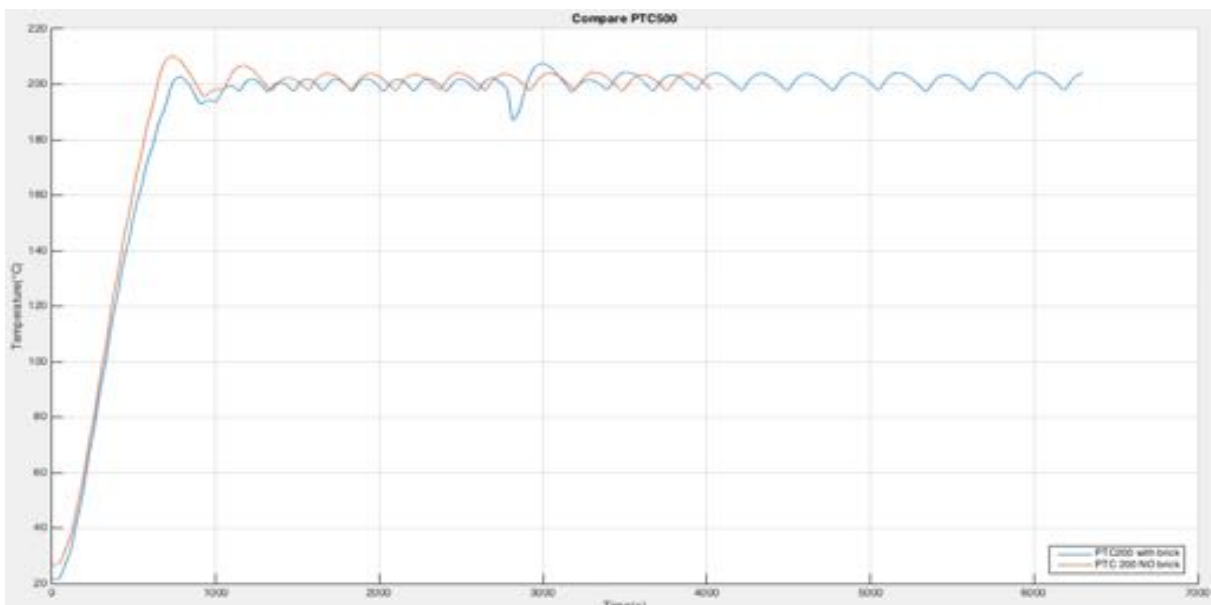


Figura 5.11 Andamento delle temperature registrato dalla PTC500.

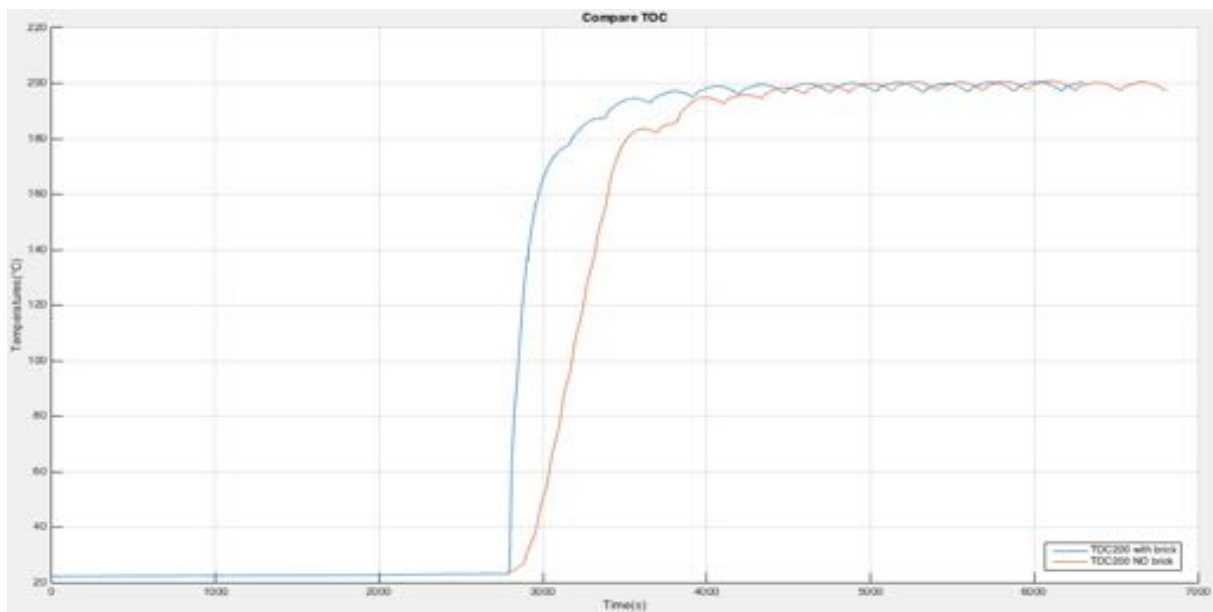


Figura 5.12 *Andamento delle temperature registrato dalla termocoppia disposta a centro forno TOC.*

Dalla figura 5.11 si nota che l'andamento della temperatura in assenza del mattone è caratterizzato da un'ampiezza e un periodo differenti rispetto al caso in cui è presente il mattone, questa considerazione conferma quanto già visto nella figura 5.8.

Anche dalla figura 5.12 si può osservare che una volta raggiunta la condizione di regime, i due andamenti, in assenza del mattone ed a meno degli sfasamenti, sono pressochè uguali.

Volendo riassumere quanto visto si può affermare che: l'andamento delle temperature nel caso in cui è presente il mattone è differente rispetto al caso senza mattone ed è del tutto plausibile, in quanto esso va ad influenzare il bilancio di potenze, inoltre la sua presenza costringe la logica di controllo del forno a variare, in modo da poter raggiungere con precisione la temperatura di set-point impostata.

Infine, il test del mattone si può considerare utile per quanto riguarda l'aspetto della comprensione dei fenomeni (che era l'obiettivo principale); tuttavia, non può essere considerato conforme alla norma, in quanto alcune condizioni non venivano rispettate (ad esempio la temperatura del laboratorio o gli strumenti utilizzati che dovevano rispettare le norme EN60350-1 e EN60335-2-6).

Quanto si è appena detto riguardo alle condizioni imposte dalla normativa potrebbe sembrare banale, ma effettuando semplici calcoli si può notare che l'indice di efficienza "EEI" ricavato a partire dalle tre prove precedenti risulta essere pari a (vedi i dati della prima tabella presente nel capitolo 5.5): EEI=82 nel caso T_{set} sia pari a 180°C, EEI=98 nel caso T_{set} sia pari a 200°C e EEI=104 nel caso T_{set} sia pari a 220°C, il che vuol dire, consultando la tabella sottostante, una classe di efficienza pari ad "A" rispetto a quella dichiarata da Electrolux pari ad "A⁺".

Energy efficiency classes of domestic ovens

Energy Efficiency Class	Energy Efficiency Index (EEI _{cavity})
A+++ (most efficient)	$EEI_{cavity} < 45$
A++	$45 \leq EEI_{cavity} < 62$
A+	$62 \leq EEI_{cavity} < 82$
A	$82 \leq EEI_{cavity} < 107$
B	$107 \leq EEI_{cavity} < 132$
C	$132 \leq EEI_{cavity} < 159$
D (least efficient)	$EEI_{cavity} \geq 159$

In particolare, il calcolo suddetto viene effettuato su Matlab impostando come “time” il vettore che va dall’istante di tempo “zero” fino all’istante in cui viene estratto il mattone dal forno. Successivamente la funzione “trapz” calcola l’integrale della potenza totale “P_TOT”, che coincide con il consumo di energia “EC1”.

Infine si utilizzano le formule empiriche presenti nella norma per ricavare l’indice di efficienza energetica, come si vede in figura 5.13

```

%% CONSUMO ENERGETICO E CLASSE DI EFFICIENZA
time(2471:4043)=[]; %stat200.1186:2623/stat220.1101:1202/stat180.2471:4043
Temperatures_Power((2471:4043),:)=[]; %vent200.1073:2273/ventMatt180.1289:1835/ventMatt160.1245:1607
P_TOT=Temperatures_Power(:,74)';
EC1=trapz(time,P_TOT) %sono W*s
EC=EC1/(3600*1000); %sono kWhh
SEC=0.0042*72+0.55;
EEI=(EC/SEC)*100

```

Figura 5.13 Calcolo dell’indice di efficienza energetica su Matlab.

5.7 Risultati test del mattone nel caso di funzionamento ventilato

Analogamente a quanto si è visto nel capitolo precedente, riguardante il caso statico, lo scopo di questo capitolo consiste nel capire quali siano i fenomeni che si verificano, nel caso di funzionamento ventilato, all'interno della cavità quando al suo interno viene inserito il mattone secondo le modalità descritte nel capitolo 5. A tale scopo è necessario analizzare i grafici seguenti. Il primo grafico prende in considerazione la temperatura media al centro del mattone:

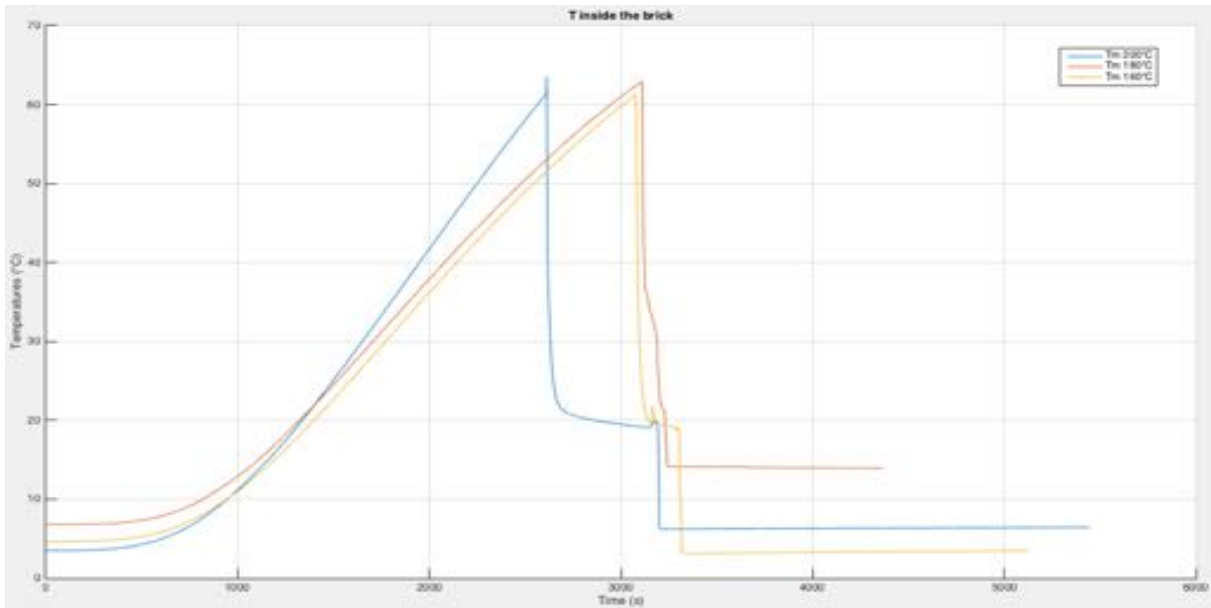


Figura 5.14 Grafico delle temperature medie al centro del mattone al variare del set point.

Dalla figura 5.14 si nota subito che, nel caso di funzionamento ventilato a 200°C (linea azzurra), le due termocoppie all'interno del mattone raggiungono più velocemente la temperatura imposta dalla norma, data dalla temperatura del mattone ad inizio prova (cioè quando esso viene estratto dal frigorifero) più un incremento di 55°C.

Quanto visto si spiega prendendo in considerazione i diversi fattori che intervengono:

- i. Innanzitutto si deve considerare che la pendenza tra delle curve a 200,180 e 160°C, a parità di “h” e “A” varia al variare del ΔT presente nell'equazione (1.4), che riscriviamo per chiarezza: $\dot{Q}_{conv} = h A (T_s - T_\infty)$ da cui $\dot{Q} = \rho c V \frac{dT_m}{dt}$ ovvero $\dot{Q} = C \frac{d(\rho T_m)}{dt}$.
- ii. Inoltre, si nota che il rateo di evaporazione della massa d'acqua è pressochè costante e pari a 0,06÷ 0.07 g/s per i tre casi.
- iii. Infine, si precisa che i mattoni utilizzati nelle prove non sono gli stessi (si veda la seconda tabella presente nel capitolo 5), per cui, essendo i fenomeni di evaporazione dipendenti dalla forma del mattone, in termini di capillari presenti al suo interno, è possibile che questa vada ad influire sui risultati della prova.

Tenendo anche conto del fatto che le condizioni iniziali delle prove sono differenti (si prendano ad esempio le temperature iniziali dei mattoni), è possibile affermare che il fenomeno, in generale complesso perché si tratta di un mezzo poroso in presenza di convezione forzata, non è “linearizzabile” da cui si ha il motivo del perché la pendenza e il tempo impiegato dal mattone per raggiungere la temperatura imposta dalla norma non differisce di tanto tra i 180 e 160°C. Un altro grafico interessante riguarda l’andamento della temperatura misurato dalla PTC500:

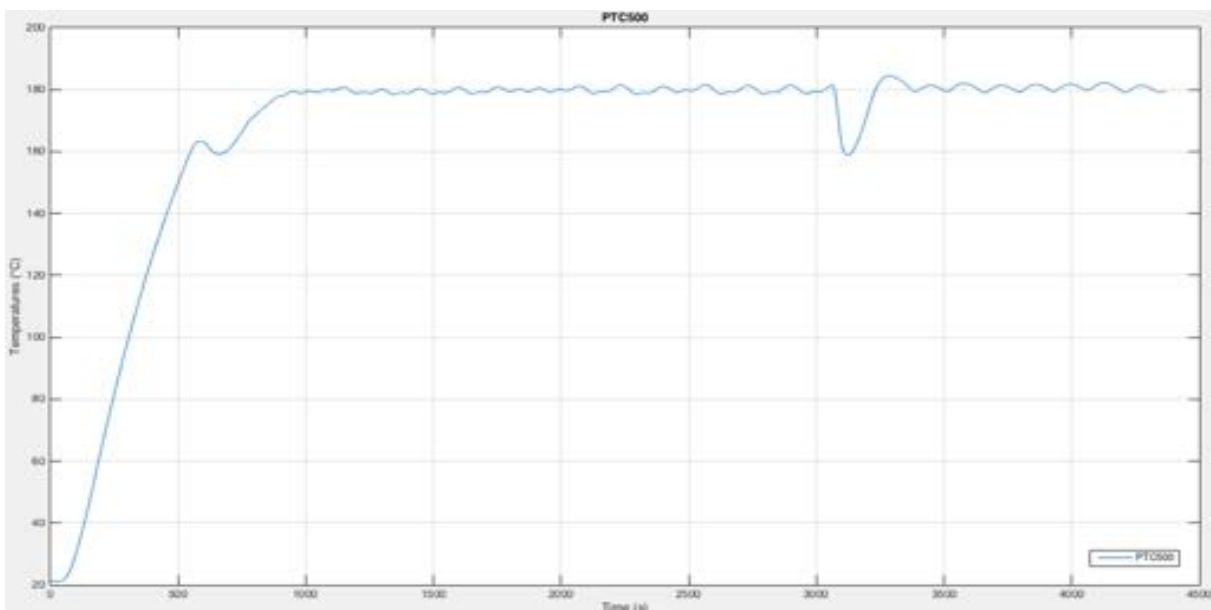


Figura 5.15 Andamento della temperatura rilevato dalla PTC500 .

Dalla figura 5.15 si nota che l’improvviso calo di temperatura è dovuto all’estrazione del mattone dal forno, inoltre si vede chiaramente che anche in assenza del mattone la temperatura oscilla attorno al valore di set point.

Tuttavia, analogamente a quanto visto nel caso statico, si osserva che in presenza del mattone l’andamento della curva è caratterizzato da un’ampiezza e un periodo diversi rispetto al caso di assenza del mattone stesso: è come se il forno si accorgesse della sua presenza.

In realtà, il forno non può accorgersi in maniera tangibile della presenza del mattone, per cui l’andamento di temperatura è semplicemente legato alla modalità di programmazione della logica di controllo.

Per capire meglio cosa avvenisse attorno al mattone, si è deciso di introdurre altre quattro termocoppie che misurassero la temperatura dell’aria nell’intorno delle pareti del mattone, a tal proposito si veda la figura 5.9 del capitolo 5.6.

Mentre l'andamento delle temperature misurato dalle quattro termocoppie può essere osservato tramite la figura 5.16 sottostante:

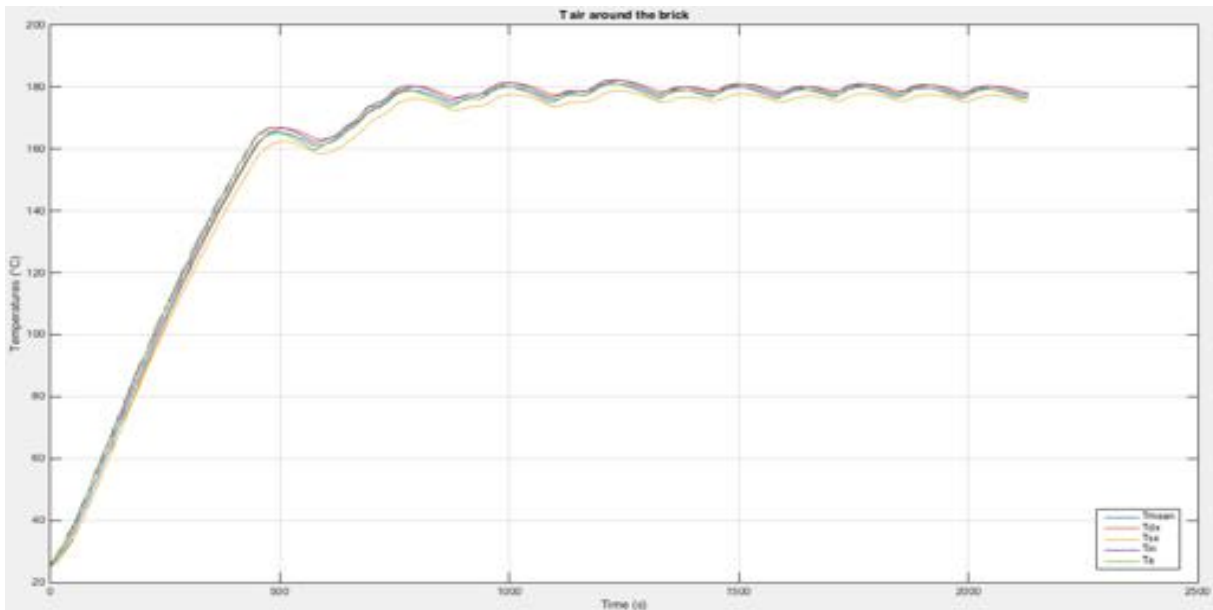


Figura 5.16 Andamento delle temperature dell'aria attorno al mattone.

Dal grafico si nota che l'andamento delle temperature nel caso di riferimento per il funzionamento ventilato (ovvero per T di set pari a 180°C) è pressochè identico lungo ogni faccia del mattone, il che significa che il campo di temperature può essere considerato simmetrico. Inoltre, si nota che la presenza della ventola non va ad influenzare in maniera negativa il campo di temperature nella zona centrale della cavità.

Considerando sempre la temperatura di riferimento per il caso di funzionamento ventilato, si prendano i grafici relativi alle misurazioni della PTC500 e della TOC con e senza mattone (si osservino le figure 5.17 e 5.18, rispettivamente):

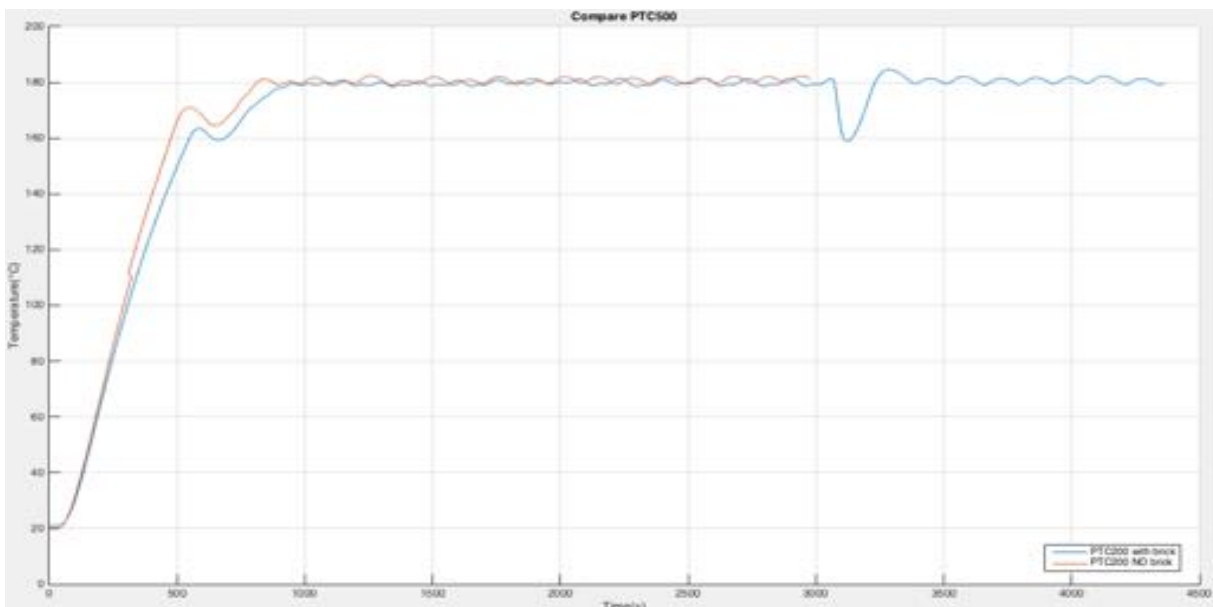


Figura 5.17 Andamento delle temperature registrato dalla PTC500.

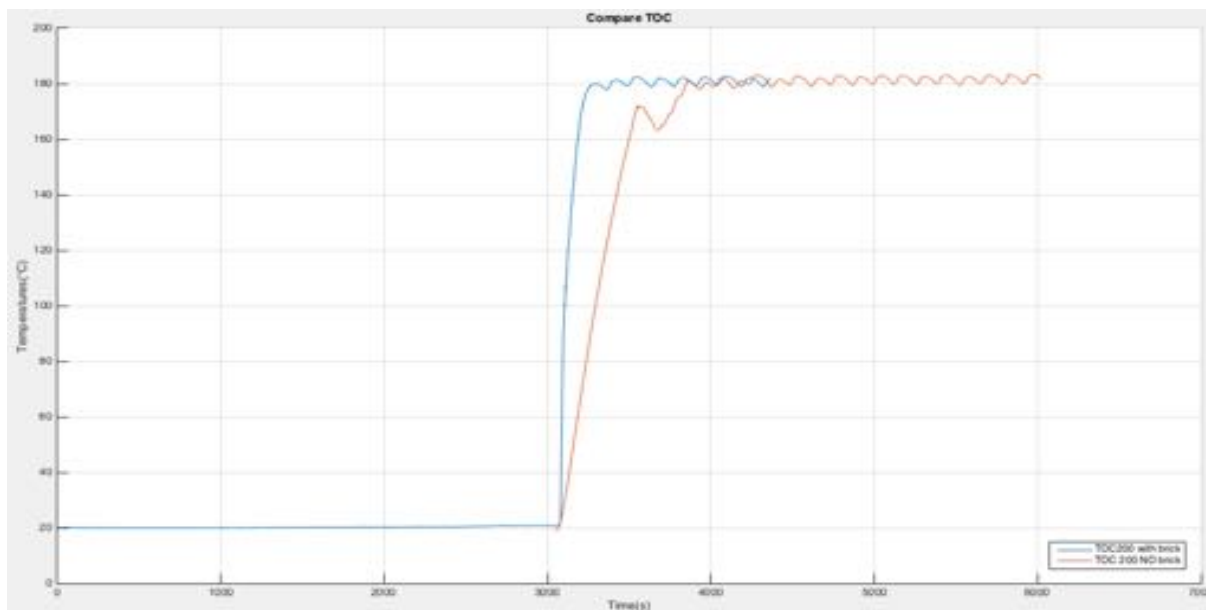


Figura 5.18 *Andamento delle temperature registrato dalla termocoppia disposta a centro forno TOC.*

Dalla figura 5.17 si nota che l'andamento della temperatura in assenza del mattone è caratterizzato da un'ampiezza e un periodo differenti rispetto al caso in cui è presente il mattone, questa considerazione conferma quanto si è già visto nella figura 5.15.

Anche dalla figura 5.18 si può osservare che, una volta raggiunta la condizione di regime, i due andamenti, in assenza del mattone ed a meno degli sfasamenti, sono pressochè uguali.

Volendo riassumere quanto visto, si può affermare che: l'andamento delle temperature nel caso in cui è presente il mattone è differente rispetto al caso senza mattone ed è del tutto plausibile, in quanto esso va ad influenzare il bilancio di potenze. Inoltre, la sua presenza costringe a variare la logica di controllo del forno, in modo da poter raggiungere la temperatura di set-point impostata.

Infine, il test del mattone si può nuovamente considerare utile per quanto riguarda l'aspetto della comprensione dei fenomeni (che era l'obiettivo principale); tuttavia, non può essere considerato conforme alla normativa, in quanto alcune condizioni non venivano rispettate (ad esempio la temperatura del laboratorio o gli strumenti utilizzati che dovevano rispettare le norme EN60350-1 e EN60335-2-6).

Quanto si è appena detto riguardo alle condizioni imposte dalla normativa potrebbe sembrare banale ma, effettuando semplici calcoli, si può notare che l'indice di efficienza "EEI", ricavato a partire dalle tre prove precedenti, risulta essere pari a (vedi i dati della seconda tabella presente nel capitolo 5.5): $EEI=107$ nel caso T_{set} sia pari a 160°C , $EEI=102$ nel caso T_{set} sia pari a 180°C e $EEI=105$ nel caso T_{set} sia pari a 200°C , il ché vuol dire, consultando la tabella sottostante, una classe di efficienza pari ad "A" rispetto a quella dichiarata da Electrolux pari ad "A⁺".

Energy efficiency classes of domestic ovens

Energy Efficiency Class	Energy Efficiency Index (EEI _{cavity})
A+++ (most efficient)	$EEI_{cavity} < 45$
A++	$45 \leq EEI_{cavity} < 62$
A+	$62 \leq EEI_{cavity} < 82$
A	$82 \leq EEI_{cavity} < 107$
B	$107 \leq EEI_{cavity} < 132$
C	$132 \leq EEI_{cavity} < 159$
D (least efficient)	$EEI_{cavity} \geq 159$

Anche in questo caso, il calcolo suddetto viene effettuato su Matlab impostando come “time” il vettore che va dall’istante di tempo “zero” fino all’istante in cui viene estratto il mattone dal forno. Successivamente la funzione “trapz” calcola l’integrale della potenza totale “P_TOT” che coincide con il consumo di energia “EC1”.

Infine si utilizzano le formule empiriche presenti nella norma per ricavare l’indice di efficienza energetica, come si vede in figura 5.19:

```
%% CONSUMO ENERGETICO E CLASSE DI EFFICIENZA
time(1289:1835)=[];
Temperatures_Power((1289:1835),:)=[]; %vent200.1070:2273/ventMatt180.1289:1835/ventMatt160.1245:1607
P_TOT=Temperatures_Power(:,74)';
EC1=trapz(time,P_TOT)           %sono W*s
EC=EC1/(3600*1000);           %sono kWh
SEC=0.0042*72+0.55;
EEI=(EC/SEC)*100
```

Figura 5.19 Calcolo dell’indice di efficienza energetica su Matlab.

Conclusioni e sviluppi futuri

L'obiettivo di questa tesi era quello di riuscire a caratterizzare il forno dell'Electrolux andando a capire quali fossero i fenomeni di maggior influenza all'interno della cavità durante le diverse modalità di funzionamento (statico e ventilato con o senza il mattone) ed al variare del set-point (rispettivamente 220-200-180°C e 200-180-160°C).

Il suddetto obiettivo è stato raggiunto con successo in maniera graduale: prima si è cercato di capire, tramite test preliminari, quante termocoppie fossero necessarie e dove esse andassero posizionate. Il passo successivo è stato quello di riuscire a descrivere il comportamento del forno e dei fenomeni di scambio termico presenti senza la presenza del mattone, sia per il caso statico che per il ventilato. Successivamente, le cose sono state complicate con l'inserimento del mattone all'interno del forno, il quale aveva lo scopo di simulare la presenza del cibo in modo che si potesse capire come mutassero i fenomeni di scambio termico precedentemente compresi. Un obiettivo aggiuntivo, nato durante lo svolgimento del test del mattone, è quello di determinare la classe di efficienza del forno seguendo le indicazioni delle normative presenti. Tuttavia, anche seguendo tali indicazioni, l'obiettivo non può considerarsi raggiunto dal punto di vista numerico, a causa della presenza di fattori non direttamente controllabili che andavano ad alterare i risultati delle prove, al contrario può considerarsi certamente raggiunto dal punto di vista formativo.

La difficoltà principale consisteva nel riuscire a caratterizzare la resistenza bottom a causa della sua posizione, tutt'altro che accessibile all'interno del forno.

Gli eventuali miglioramenti potrebbero essere i seguenti:

- i. Un primo miglioramento potrebbe riguardare il sistema di acquisizione, il quale spesso portava a dover ripetere le prove (con inevitabile perdita di tempo), a causa di un dato mancante che non veniva registrato.
- ii. Il secondo ed ultimo miglioramento sarebbe quello di riuscire ad effettuare le prove all'interno di un'ambiente mantenuto alla temperatura richiesta dalla norma: questo permetterebbe di poter eseguire la prova in maniera più corretta in modo da poter, eventualmente, raggiungere la classe di efficienza dichiarata da Electrolux.

Infine, tale lavoro viene concluso con la speranza che esso possa essere una "rampa di lancio" per una comprensione, e di conseguenza progettazione, migliore di questi apparecchi elettronici mediante l'implementazione di modelli matematici.

Bibliografia

- 1) Fundamentals of Heat and Mass Transfer 7th edition-Theodore L. Bergman, Adrienne S. Lavine, Frank P. Incropera, David P. DeWitt.
- 2) Appunti e diapositive del corso di termofluidodinamica applicata a cura del professor Marco Lorenzini.
- 3) Impianti meccanici- Marco Gentilini-Pitagora Editrice-ISBN 88-371-1139-8.
- 4) Oven mathematical modelling-Università politecnica delle marche.

Ringraziamenti

Infine, dopo tre lunghi anni, vorrei concludere questo percorso ed in particolare questa tesi spendendo alcune parole di ringraziamento nei confronti di tutte le persone che mi hanno aiutato e sostenuto in questo lungo periodo:

Il primo ringraziamento va inevitabilmente al professor Marco Lorenzini il quale, oltre ad avermi donato una grande conoscenza, mi ha dato fiducia assegnandomi questo progetto, rivelandosi sempre disponibile e pronto ad aiutarmi criticando il lavoro in maniera costruttiva.

Un semplice ma grande “grazie” va anche a Micheal Lucchi, correlatore di questa tesi, che mi ha assistito pazientemente, correggendomi, durante tutto il periodo. Non posso far altro che augurarti il meglio per ciò che riguarda i tuoi studi di dottorato.

Un enorme ringraziamento va a te, mamma, che oltre ad avermi cresciuto e sostenuto moralmente hai fatto di tutto in termini economici affinché io potessi raggiungere questo obiettivo, che mai avrei pensato di raggiungere.

Ora passo a ringraziare mia zia Vanessa, conosciuta anche come niní, che mi ha sempre e per sempre inteso sempre, sostenuto come una seconda madre. Grazie.

Chiaramente la mia gratitudine va anche a mia nonna Stefania, produttrice di ragù: fonte di energia inestimabile e chiave del mio successo con gli esami. (Gli esami non sono finiti).

Non mi sono dimenticato di zia Barbara, che ringrazio per la sua presenza e per l’effetto collante che ha sulla famiglia, sembra non esserci alcun collegamento con l’università, in realtà le buonissime e semplicissime cene che organizzi le sere d’inverno, dopo le struggenti lezioni, son un momento di stacco non indifferente.

Anche mia sorella, nonostante il suo comportamento “acido”, merita un grazie per avermi ascoltato nei momenti di panico e di delirio totale.

Come dimenticarsi dei miei amici: Enrico Rontini, Enea Olivoni ed Edoardo Gramigna (noto solo dopo tre anni le tre E, destino forse?).

-Ad Erro non posso che dire grazie per TUTTI i momenti di svago passati assieme, per esserci sempre come amico e per tutte le serate blu-ray e pizza/Mac.

-Ad Enea Olivoni amico e fedele compagno di corso, col quale ho passato ore ed ore sui libri chiedo prima scusa, per avergli costantemente impresso le mie ansie e paure ed infine, non posso che ringraziarlo perché insieme siamo riusciti a far gruppo e a trainarci l'un l'altro fino a raggiungere questo obiettivo insieme per cui, Grazie.

-Lo stesso vale per Edoardo Gramigna amico e compagno di corso che alla fine del primo anno ci ha abbandonato per seguire il ramo dell'ingegneria aerospaziale, non mi scorderò mai la cabala, la trescata, dodiland e i pranzi passati assieme, grazie Dod per averci deliziato con le tue battute nei giorni più pesanti.

E per ultima, il che non vuol dire che sia la meno importante, vorrei ringraziare di cuore Caterina Conti che, non solo mi ha sopportato e supportato ad ogni mia decisione contribuendo positivamente a questo mio successo ma, ha sempre avuto la pazienza di rispettare i miei orari devastanti mettendomi sempre al primo posto.

