



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA



DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE
CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN
INGEGNERIA ELETTRICA

TESI DI LAUREA MAGISTRALE IN
INGEGNERIA ELETTRICA

**PROGETTO E REALIZZAZIONE
DI UN APPARATO SPERIMENTALE
PER LA CARATTERIZZAZIONE TERMICA DI
PENTOLE PROFESSIONALI RISCALDATE AD
INDUZIONE**

RELATORE: Prof. Michele Forzan

CORRELATORE: Ing. Michele Simonato

LAUREANDO: Valentino Cucit

ANNO ACCADEMICO 2014-2015

Indice

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | PRINCIPIO RISCALDAMENTO AD INDUZIONE | 5 |
| 1.1 | ASPETTI GENERALI | 5 |
| 1.2 | INDUZIONE NEL DOMESTICO | 7 |
| 1.3 | MATERIALI METALLICI | 8 |
| 1.3.1 | FERRO | 8 |
| 1.3.2 | ACCAIO INOX | 9 |
| 1.3.3 | ALLUMINIO | 11 |
| 1.3.4 | RAME | 11 |
| 1.4 | SOLUZIONI REALIZZATIVE | 12 |
| 1.5 | ELETTRONICA DI POTENZA | 14 |
| 1.5.1 | DIODI | 15 |
| 1.5.1.1 | FUNZIONAMENTO DEL DIODO | 16 |
| 1.5.2 | TIRISTORI | 16 |
| 1.5.3 | INTERRUTTORI CONTROLLATI | 17 |
| 1.5.3.1 | BJT | 18 |
| 1.5.3.2 | MOSFET | 19 |
| 1.5.3.3 | GTO | 20 |
| 1.5.3.4 | IGBT | 21 |
| 1.6 | RADDRIZZATORI | 21 |
| 1.7 | TOPOLOGIE DI INVERTER | 24 |
| 2 | TRASMISSIONE DEL CALORE | 29 |
| 2.1 | CONDUZIONE TERMICA | 30 |
| 2.1.1 | CASO DI 2 MATERILI | 31 |
| 2.1.2 | CASO DI 4 MATERILI | 32 |
| 2.2 | CONDUTTIVITÀ DELLE SOSTANZE | 32 |
| 2.2.1 | SOSTANZE SOLIDE | 32 |
| 2.2.2 | SOSTANZE LIQUIDE | 33 |
| 2.2.3 | SOSTANZE GASSOSE | 33 |
| 2.3 | DILATAZIONE DEI MATERIALI | 33 |
| 2.4 | EFFETTO DELLA TEMPERATURA | 35 |
| 2.5 | EBOLLIZIONE | 36 |
| 3 | STRUMENTI DI MISURA | 39 |
| 3.1 | INDUTTORE | 39 |
| 3.2 | LABVIEW | 40 |
| 3.2.1 | STRUTTURA LABVIEW | 41 |
| 3.2.2 | TIPI DI DATI E PRINCIPALI STRUTTURE | 44 |
| 3.2.3 | CONNESSIONE STRUMENTI | 45 |
| 3.3 | TERMOCOPPIE | 46 |
| 3.3.1 | FUNZIONAMENTO TERMOCOPPIE | 46 |
| 3.3.2 | REGOLE DI CONNESSIONE TERMOCOPPIE | 47 |
| 3.3.3 | TIPI di TERMOCOPPIE | 47 |
| 3.4 | AGILENT 34972A | 48 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 3.5 | YOKOGAWA WT210 | 49 |
| 3.6 | CONTROLLO DA REMOTO | 49 |
| 3.7 | STRUMENTI DI CONNESSIONE | 49 |
| 3.8 | LIQUIDO RISCALDATO | 50 |
| 3.8.1 | AGAR | 50 |
| 3.8.1.1 | PROPRIETÀ AGAR | 51 |
| 4 | ELABORAZIONE PROGETTO | 53 |
| 4.1 | CONFIGURAZIONE ADOTTATA | 53 |
| 4.2 | PROVE SVOLTE | 55 |
| 4.2.1 | PENTOLE UTILIZZATE | 57 |
| 4.2.2 | CONNESSIONE TERMOCOPPIE | 57 |
| 4.3 | SCHEMA ACQUISIZIONE IN AMBIENTE LABVIEW | 58 |
| 4.3.1 | CONNESSIONE STRUMENTI USATI | 60 |
| 4.3.1.1 | AGILENT 97272A | 62 |
| 4.3.1.2 | YOKOGAWA WT210 | 63 |
| 5 | ANALISI DATI | 65 |
| 5.0.2 | ERRORE DI MISURA | 65 |
| 5.1 | PRIMA PROVA | 66 |
| 5.1.1 | ANALISI ENERGETICA | 72 |
| 5.2 | SECONDA PROVA | 73 |
| 5.3 | TERZA PROVA | 83 |
| 5.4 | QUARTA PROVA | 93 |
| 5.4.1 | DILATAZIONI | 95 |
| 6 | CONCLUSIONI | 97 |

RIASSUNTO

Questa tesi è stata realizzata in seguito a un tirocinio quadrimestrale in azienda. L'azienda ospite è Electrolux Professional Spa con sede a Vallenoncello provincia di Pordenone. Il lavoro di tesi sperimentale comprende lo studio sulla caratterizzazione energetica delle pentole. Ovvero sono state studiate e analizzate diverse tipologie di pentole con le seguenti caratteristiche: uguale geometria, diversi materiali e diversi allestimenti. Per il confronto è stato utilizzato un piano a cottura professionale Electrolux da 5.2 kW. Viene scelta la cottura ad induzione, sia in ambito domestico che industriale, in sostituzione alle altre fonti di riscaldamento, per il risparmio energetico. L'obiettivo della ricerca è ottimizzare la trasmissione di calore, in quanto il piano "202020" richiede la riduzione del consumo di energia e delle fonti fossili. La ricerca è finalizzata a determinare la tipologia di pentola più idonea per un nuovo tipo di elettrodomestico industriale. La nuova apparecchiatura dovrà svolgere funzioni di cottura professionale con le seguenti caratteristiche: tempi di cottura più brevi possibili, efficienza energetica e uniformità di cottura. I tempi di cottura incidono in una cucina industriale con gli alti standard che essa deve mantenere, accanto a questo importante fattore è necessario preservare l'efficienza energetica ovvero il consumo di potenza minore, infine come ultima caratteristica, non meno importante, è necessario avere una uniformità di cottura su tutta la superficie di contatto. Per eseguire il confronto è stata allestita una postazione di misura.

Nelle varie prove infatti sono state rilevate:

- grandezze elettriche a monte del sistema (tensione, corrente, fattore di potenza, potenza attiva, reattiva e apparente) attraverso un analizzatore di rete monofase della Yokogawa WT210;
- grandezze elettriche all'interno del sistema induttore attraverso uno strumento di acquisizione e controllo realizzato da progettisti interni;
- Temperatura della pentola con più termocoppie rilevate attraverso l'Agilent 37972A.

Tutti questi strumenti sono stati connessi al PC e interfacciati attraverso il linguaggio di programmazione grafico di tipo G LabView della National Instruments. Questo programma ha permesso l'acquisizione dei dati e il controllo degli strumenti.

Inoltre, attraverso il programma è stato possibile salvare in maniera più semplice i dati raccolti in formato Excel. Durante l'allestimento della postazione di misura sono state anche eseguite diverse prove di fissaggio delle termocoppie con diverso materiale al fine di evitare il distacco di queste ultime dal fondo interno della pentola.

L'analisi delle quattro pentole studiate viene eseguita attraverso diverse prove finalizzate a creare un metodo di studio adatto.

Le prove svolte sono quattro con il rispettivo numero di termocoppie indicato tra parentesi:

1. misura delle temperature interne(17);
2. misura delle temperature esterne(17);
3. misura delle temperature dell'acqua(19);
4. misura delle temperature dell'agar(19).

Le prove vengono realizzate in 3 livelli di potenza (1500, 2000 e 2500W) e ciascuna prova viene ripetuta tre volte. Dalle N misure è stato possibile fare l'analisi dei dati con dei modelli matematici che rappresentano i risultati trovati.

Capitolo 1

PRINCIPIO RISCALDAMENTO AD INDUZIONE

1.1 ASPETTI GENERALI

Il riscaldamento a induzione si basa sul principio del trasferimento dell'energia senza che vi sia un contatto diretto tra la bobina induttrice e il corpo da riscaldare. La produzione di calore, dunque, avviene mediante correnti indotte nel corpo da riscaldare per induzione elettromagnetica; le correnti indotte danno luogo a perdite per effetto Joule direttamente nel materiale da riscaldare. La distribuzione delle correnti indotte e delle sorgenti di calore risulta sempre disuniforme a causa dell'effetto pelle e di quello di prossimità. Il circuito in cui avviene questo riscaldamento è composto da 3 principali parti: il campo magnetico di eccitazione viene ottenuto facendo circolare una corrente di intensità e frequenza opportuna all'interno di una bobina chiamata induttore. La bobina generalmente viene realizzata in tubo di rame, per lo più disposta in vicinanza al corpo da riscaldare chiamato carico. Infine, la circolazione di corrente sulla bobina fa nascere all'interno del materiale il campo di reazione che si muove in direzione opposta alla sua sorgente.

Il campo magnetico generato dalla bobina e il campo di reazione dovuto alle correnti indotte si possono rappresentare come un trasformatore, costituito da un primario e da un secondario.

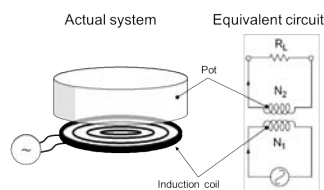


Figura 1.1.1: schema induzione

L'impedenza del trasformatore dipende dal comportamento delle correnti indotte. A seconda del tipo di riscaldamento da realizzare possono essere utilizzati molti altri induttori. È possibile anche variare la frequenza del campo di eccitazione a seconda delle diverse esigenze imposte dalle diverse applicazioni, l'alimentazione della bobina viene effettuata a frequenze maggiori della frequenza industriale. Queste frequenze vengono oggi ottenute mediante tiristori, IGBT o MOSFET.

Un impianto a induzione è composto da un convertitore di frequenza, da bobina e carico, ed è inoltre presente anche la batteria di condensatori necessaria per la compensazione del fattore di potenza del sistema. Questo sistema di riscaldamento viene preferito ad altri per il fatto che non necessita di contatto e consente una formazione di calore precisa, localizzata, rapida e controllabile. È possibile variare la corrente all'interno del carico, controllando quindi l'effetto Joule. La densità di corrente indotta diminuisce all'aumentare della distanza dalla superficie

esterna. Questo fenomeno viene chiamato effetto pelle e rappresenta l'attitudine della corrente alternata a distribuirsi dentro un conduttore in maniera non uniforme con densità maggiore sulla superficie e densità minore all'interno. La relazione che c'è tra distanza dall'asse e densità di corrente è lo spessore di penetrazione; questo fenomeno rappresenta l'andamento della corrente nel bordo esterno del corpo da riscaldare. Esso dipende dalla seguente relazione in cui si può osservare, la dipendenza dalla frequenza.

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}}$$

dove:

- ρ : resistività elettrica del metallo;
- μ : permeabilità magnetica relativa;
- $\omega = 2\pi f$ è la pulsazione della corrente con f valore della frequenza.

Per questo motivo la frequenza è un fattore importante nel riscaldamento ad induzione, in quanto si può variare la frequenza e ottenere spessori di penetrazioni differenti, che a loro volta permettono di ottenere diversi tipi di riscaldamento: riscaldamento localizzato e uniforme. Le basse frequenze, da 5kHz a 30kHz, sono adatte per materiali decisamente spessi, che richiedono una penetrazione profonda del calore, mentre frequenze maggiori, dai 100 kHz ai 400 kHz, sono utili per riscaldamenti superficiali o di zone piccole e limitate. Questi ultimi sono usati per ottenere processi differenti in metallurgia, variando le caratteristiche strutturali dei materiali; in particolare la tempra a induzione viene usata per rendere il materiale, blumi e billette d'acciaio, specifico per le successive lavorazioni.[1]

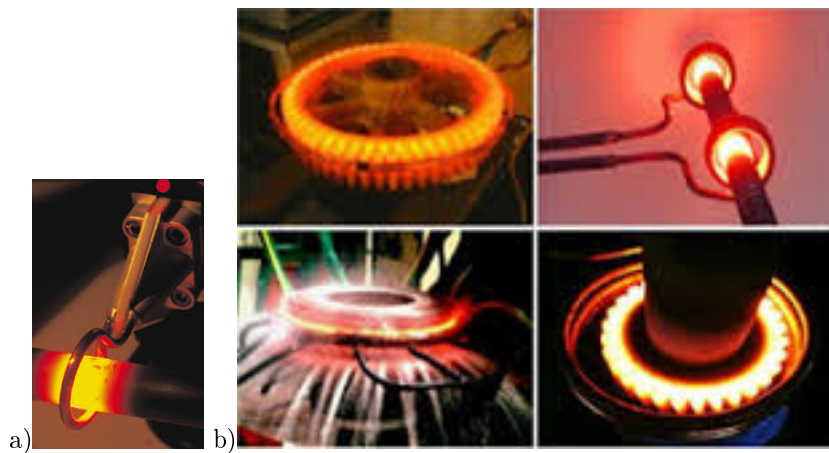


Figura 1.1.2: a)tempra ad induzione b) applicazioni tempra ad induzione

1.2 INDUZIONE NEL DOMESTICO

Il riscaldamento a induzione viene utilizzato non solo per le applicazioni metallurgiche, ma anche in ambito alimentare, sia domestico sia industriale. La sua comparsa ha infatti rivoluzionato l'idea di cottura apportando una serie di vantaggi e di innovazioni altrimenti irraggiungibili con i classici fornelli a gas.



Figura 1.2.1: piani cottura ad induzione

Viene raggiunto uno straordinario livello di sicurezza ed affidabilità grazie ad un organismo di controllo basato sull'utilizzo di microcontrollori che comandano gli interruttori IGBT. Tramite un sistema di feedback, dunque, viene garantita l'affidabilità del sistema che è in grado di spegnere istantaneamente la piastra in caso di pericolo. È presente anche un sistema di sensori che monitorizza la presenza della pentola e apre l'interruttore in caso di mancata rilevazione. Il sistema di controllo fa sì che non ci siano delle perdite di campo magnetico dannose per l'uomo, ma riesce a dosare il campo per permettere l'accoppiamento perfetto tra induttore e pentola. Il piano in vetro ceramica, che mantiene le temperature basse, azzerla la possibilità di scottature e garantisce anche un minor riscaldamento dell'ambiente circostante. La piastra di contatto piana permette di mantenere pulita la zona di cottura a differenza dei modelli classici che presentano ugelli difficili da pulire e pericolosi. In ultimo i tempi di cottura sono radicalmente ridotti grazie ai bassi consumi e all'alta efficienza energetica che riducono il costo di utilizzo rispetto alle fonti convenzionali come il gas, piano a infrarossi e alogeno. Il rendimento del piano di cottura ad induzione può essere così confrontato con quello dei piani di cottura a gas radiante, alogeno, avendo i seguenti dati:

- COTTURA A GAS 35 – 40 %
- COTTURA RADIANTE 45 – 50 %

- COTTURA A LOGENA 55 – 60 %
- COTTURA AD INDUZIONE 85 – 90 %

I vantaggi che hanno portato alla diffusione massiccia di questa tecnologia sono i seguenti:

1. sviluppo di calore direttamente nel materiale da riscaldare;
2. assenza di perdite verso l'ambiente con conseguenza l'elevato rendimento;
3. una rapida entrata a regime del ciclo di riscaldamento.

La cottura a induzione ha la sua massima efficienza se il materiale da riscaldare è magnetico. I materiali di interesse possono essere ferro e acciaio in cui scorrerà una corrente indotta. Un semplice modo per capire se la pentola è compatibile con il piano è fare un test magnetico, ovvero avvicinare una calamita al fondo della pentola: se il magnete si attacca alla superficie allora è compatibile. Queste pentole sono progettate per assorbire l'energia magnetica, diffondere il calore rapidamente e uniformemente, aumentare l'efficienza energetica e riduzione di "hot spot". Quest'ultimo fenomeno crea disuniformità in quanto causa aree dove il cibo si attacca con conseguenti bruciature e aree dove il cibo rimane crudo. Attualmente molte aziende nel mondo producono pentole adatte per la cottura a induzione. Queste pentole sono composte, come già detto, da materiali magnetici come ghisa e acciaio, oppure da delle configurazioni combinate a strati ad esempio acciaio inox e alluminio.[2]

1.3 MATERIALI METALLICI

Le pentole utilizzate nella cottura sono realizzate con materiali che trasmettono in modo efficace il calore trasmesso dalla piastra ad induzione. I materiali delle pentole devono essere inoltre magnetici, in modo da poter essere percorsi dalla corrente che genera calore nella pentola. Queste due caratteristiche devono essere entrambe soddisfatte per ottenere un riscaldamento ottimale. Per questo scopo, studiando le caratteristiche di ciascun materiale, ci si accorge che non esiste un materiale ottimale, per cui è necessario adottare ed ideare delle soluzioni composite a multistrato. In genere tra tutti gli elementi presenti in natura i materiali che vengono maggiormente usati sono i seguenti: acciaio, ferro, rame e alluminio. Analizzo nel dettaglio i tipi di materiale e ne definisco le varie caratteristiche.

1.3.1 FERRO

Con il termine ferro vengono indicate le leghe di ferro definite acciai dolci. Tale elemento ha avuto un importantissimo sviluppo già nell'antichità con l'età del ferro. I più antichi reperti storici vengono dai Sumeri e dagli Ittiti che già 4000 anni prima di Cristo lo usavano per piccoli oggetti domestici. Esso è il materiale più abbondante all'interno della Terra, presente nei vari strati della terra con concentrazione massima nel nucleo. Dunque è anche presente sulla crosta terrestre in minerali costituiti dai suoi vari ossidi, tra cui ematite, magnesite, limonite. Per ricavare il ferro bisogna svolgere dei processi industriali di estrazione dei minerali, principalmente l'ematite e la magnetite attraverso un processo di riduzione al carbonio in una fornace a temperatura di circa 2000 °C.

Il ferro è un elemento estremamente importante nella tecnologia per le sue caratteristiche meccaniche, la sua lavorabilità e per le leghe da esso derivate, la ghisa e l'acciaio. La sua abbondanza in natura e il suo basso costo lo rendono il metallo più in assoluto usato dall'umanità. Il principale impiego è quello civile in cui viene usato l'acciaio derivante dal ferro per le sue

caratteristiche di resistenza. Inoltre viene anche usato nella cottura ad induzione grazie alle sue proprietà magnetiche. I composti del ferro più utilizzati comprendono:

- **GHISA:** si suddivide in ghisa di prima fusione contenente tra il 4 – 5 % di carbonio e altre impurità come lo zolfo, silicio e fosforo, e ghisa di seconda fusione, ovvero la ghisa vera e propria contenente tra il 2 – 3 % di carbonio, ha un punto di fusione compreso tra 1150 – 1200 °C. Materiale duro e fragile.
- **FERRO ARMCO:** ferro puro, viene prodotto con particolari procedimenti, impiegato dove viene richiesta una elevata permeabilità magnetica e un isteresi magnetica trascurabile.
- **FERRO COMUNE:** tecnicamente detto battuto o dolce è un materiale duro e malleabile contenente meno dello 0,5% di carbonio.
- **ACCIAIO AL CARBONIO:** che contiene quantità di carbonio tra lo 0,1 – 1,65% di carbonio. Esso può essere a sua volta suddiviso in extra-dolci (meno dello 0,15%), dolci (da 0,15 – 0,25%), semiduri (da 0,25 – 0,50%), duri (oltre lo 0,50%).
- **ACCIAI SPECIALI:** sono delle particolari leghe in cui oltre al carbonio compaiono in percentuali diverse altri materiali quali il cromo, il vanadio, il molibdeno, il nichel e il manganese per conferire particolari caratteristiche di resistenza fisica o chimica.

1.3.2 ACCIAIO INOX

L'acciaio inox o acciaio inossidabile sono delle leghe di ferro con le caratteristiche tipiche degli acciai al carbonio con una notevole resistenza alla corrosione , specie in aria umida o in acqua. Essi infatti hanno la possibilità, grazie al contenuto della percentuale di cromo, di passivarsi, cioè di ricoprirsi di uno strato di ossidi invisibile, di spessore pari a pochi strati atomici in grado di proteggere il metallo sottostante dagli attacchi corrosivi.

Gli acciai inox si dividono tradizionalmente in tre grandi famiglie: martensitici, ferritici e austenitici. Inoltre si hanno altre due famiglie il cui impiego è in forte ascesa: duplex e gli indurenti. Si descrive qui sotto le caratteristiche principali delle varie famiglie.

1. Acciaio Martensitico: sono leghe al cromo dall'11–18%, con carbonio relativamente elevato, contenenti piccole quantità di altri elementi: manganese, silicio, cromo e molibdeno; può essere aggiunto zolfo se si necessita di truciolabilità. È l'unico acciaio inossidabile che può essere sottoposto a tempra, trattamento termico atto ad aumentarne le proprietà meccaniche. Essendo magnetico si presta bene per la cottura a induzione. Questo acciaio è conosciuto soprattutto con la nomenclatura americana AISI. Alcuni esempi sono riportati in tabella:

| AISI | %Cr | %C |
|---------|-----|-----------|
| 410,420 | 13 | 0.2 a 0.4 |
| 440 | 17 | 1 |

Tabella 1.1: esempi di acciai martensitico

L'acciaio martensitico è autotemprante, ma per un semplice raffreddamento dalla temperatura di laminazione alla temperatura ambiente si sviluppa una struttura cristallina deformata, con forti tensioni residue e conseguente infragilimento. Per ovviare a tali condizioni sfavorevoli è possibile eseguire la ricottura, la tempra a 1000 °C e il rinvenimento. Un esempio di acciaio inossidabile martensitico è l'AISI 440 utilizzato per l'utensileria domestica come: coltello, forbice, bisturi e lametta.

| AISI | %Cr | %Ni |
|-------------|-----|-----|
| 304,316 | 18 | 8 |
| 321,347,348 | 18 | 10 |
| 317 | 18 | 13 |
| 309 | 23 | 12 |
| 310 | 25 | 20 |

Tabella 1.2: acciai austenitici

2. Acciaio Ferritico: acciai inossidabili al solo cromo variabile dall'11 al 30% circa. Questi acciai hanno buona resistenza meccanica e alla corrosione. Hanno grano cristallino a reticolo cubico a corpo centrato come gli acciai al carbonio, ma le caratteristiche meccaniche non possono essere incrementate per mezzo di trattamenti termici. Al proprio interno sono presenti anche: molibdeno necessario per aumentare assieme al cromo la resistenza alla corrosione, l'alluminio per aumentare la resistenza all'ossidazione a caldo, lo zolfo per facilitare la lavorabilità. Inoltre sono magnetizzabili, non sono suscettibili di tempra e devono necessariamente essere sottoposti alla ricottura; la saldabilità è scarsa, in quanto il materiale che viene surriscaldato subisce l'ingrossamento del grano cristallino. I trattamenti possibili, esclusa la tempra, sono la ricristallizzazione e l'incrudimento. Bisogna osservare particolare attenzioni alla temperatura: non scendere oltre gli 850 °C per evitare l'ingrossamento del grano cristallino, e a non sostare tra i 400 e i 570 °C nel raffreddamento per non incorrere nella fragilità al rinvenimento. Gli impieghi più comuni sono vasellame o posateria di bassa qualità, acquai, lavelli e finiture per l'edilizia. In lamiere sottili si usano per rivestimenti, piastre per ponti navali, sfioratori, trasportatori a catena, estrattori di fumi e depolverizzatori.
3. Acciaio Austenitici: è un acciaio a struttura cubica a facce centrate, contenente Ni e Cr in percentuale tale da conservare la struttura austenitica anche a temperatura ambiente. Sono classificati in base alla percentuale di Ni e di Cr secondo quanto riportato nella tabella. La composizione base dell'acciaio inox austenitico è il 18% di Cr e l'8% di Ni, (AISI 304). Una percentuale del 2-3% di molibdeno assicura una miglior resistenza alla corrosione (AISI 316). Il contenuto di carbonio è minore dello 0,08%, ma esistono anche acciai inox austenitici dolci con 0,03% di C massimo. Le proprietà fondamentali sono:
 - ottima resistenza alla corrosione;
 - facilità di ripulitura e ottimo coefficiente igienico;
 - facilmente lavorabile, forgiabile e saldabile;
 - incrudibile se lavorato a freddo e non tramite trattamento termico;
 - in condizione di totale ricottura non si magnetizza.

Gli impieghi di questi acciai sono molto vasti: pentole e servizi domestici, serramenti e finiture architettoniche, mattatoi, lattine per bibite e prodotti alimentari; serbatoi per gas liquefatti, scambiatori di calore, apparecchi di controllo dell'inquinamento e di estrazione di fumi, autoclavi industriali. La loro resistenza a gran parte degli aggressivi chimici li rende inoltre molto apprezzati nell'industria chimica. Infine per quanto concerne la cottura ad induzione questo tipo di lega non può essere utilizzata dato che l'acciaio inossidabile austenitico è paramagnetico.

4. Duplex: gli acciai duplex o anche detti austeno-ferritici presentano una struttura mista di austenite e ferrite. In questo acciaio ibrido il tenore di cromo va dal 18-26% e quello del nichel dal 4,5-6,5%. Inoltre contengono fra il 2,5-3% di molibdeno. Gli impieghi più comuni sono: scambiatori di calore, serbatoi e vasche per liquidi ad alta concentrazione di cloro, refrigeratori ad acqua marina, dissalatori, impianti per salamoia alimentare e acque sotterranee e ricche di sostanze aggressive.

5. Acciaio Indurenti: Questi acciai presentano la possibilità di innalzare notevolmente le proprie caratteristiche meccaniche per trattamenti termici particolari di invecchiamento, che consentono di far precipitare fasi intermetalliche dure nella matrice al fine di aumentare le proprietà meccaniche della lega. Inoltre questi acciai possiedono resistenza alla corrosione paragonabile a quella degli acciai austenitici classici, a parità di cromo e molibdeno.

1.3.3 ALLUMINIO

L'alluminio è uno degli elementi più abbondanti sulla terra. Si estrae principalmente dai minerali di bauxite, roccia bruno o giallo dalla composizione molto variabile a seconda dei giacimenti, in quanto l'estrazione dell'argilla è un processo costoso. L'alluminio nel suo stato grezzo viene lavorato con dei processi industriali come la fusione, la forgiatura e lo stampaggio. Attualmente viene usato in moltissime industrie, in particolare nell'industria aerea, nei trasporti e nelle costruzioni. È un metallo duttile color argento, tenero, leggero ma resistente, con un basso peso specifico (pari a circa un terzo di quello dell'acciaio o delle leghe di rame). Inoltre presenta un'eccellente resistenza alla corrosione, molto malleabile e non magnetico; per quest'ultima caratteristica non è possibile usarlo nella cottura ad induzione. Le caratteristiche dell'alluminio possono essere radicalmente modificate con l'aggiunta di una piccola quantità di rame, magnesio e silicio per formare nuove leghe. Sebbene queste leghe metalliche abbiano caratteristiche e funzioni specifiche, esse presentano alcune peculiarità in comune:

1. Bassa temperatura di fusione compresa tra i 510 – 650 °C;
2. Basso peso specifico compreso tra 2,66 e 2,85 g/cm³;
3. Elevatissima conducibilità elettrica e termica;
4. Contenuto di alluminio maggiore del 95%.

Oltre agli impieghi già citati come quello dei trasporti e delle costruzioni viene anche utilizzato negli imballaggi e nelle linee di trasmissione elettriche grazie al suo basso peso specifico e alla sua alta conducibilità elettrica.

1.3.4 RAME

Il rame è un metallo rossastro di conducibilità elettrica e termica elevatissime, superate solo da quelle dell'argento; è molto resistente alla corrosione, impermeabile al gas e non invecchia se esposto alla radiazione solare. Inoltre è facilmente lavorabile, estremamente duttile e malleabile, può essere facilmente riciclato e recuperato per formare insieme ad altri metalli numerose leghe metalliche (come il bronzo e l'ottone). Non essendo ferrosi, non è magnetico e dunque non viene usato nella cottura ad induzione. Escluso questo impiego, il rame viene usato grazie alle varie proprietà in un vasto campo di applicazioni, per esempio nella produzione e utilizzo dell'energia elettrica (motori, generatori, trasformatori e linee in cavo), negli scambiatori di calore, nel trasporto di acqua potabile, gas combustibile, e nella manifattura dei circuiti stampati per l'elettronica (settore sempre più in espansione).

1.4 SOLUZIONI REALIZZATIVE

Il mercato propone una vasta gamma di pentole di diverse forme, caratteristiche e dimensioni, realizzate con svariati materiali. Generalmente sono di forma circolare o quadrata con angoli arrotondati, possono essere costituite in metallo come ferro, acciaio inox ghisa, alluminio e rame oppure possono essere in coccio, pyrex o pietra ollare a seconda delle esigenze di cottura e delle tradizioni locali. Questa varietà di forme e materiali facilita la scelta delle stoviglie adeguate per il tipo di cottura prevista. In tale ambito è doveroso effettuare una distinzione fra le cotture veloci, nelle quali è fondamentale la precisione, e quelle che richiedono un lento processo di cottura. In base al tipo di cottura e all'alimento da servire è possibile fare un'altra distinzione tra pentole. Esse possono essere suddivise in casseruole, tegami e in padelle. Le prime, con fondo piano e pareti alte, servono per cuocere alimenti liquidi e/o voluminosi. Il tegame, affine alla casseruola, è costituita da bordo basso con fondo verticale, adatto per la cottura di qualsiasi alimento non troppo voluminoso che necessita l'utilizzo della casseruola. Infine le padelle di forma circolare, fondo largo e piano con bordi bassi e arrotondati, sono usate in cucina per vari scopi. Si analizza ora il tipo di materiale utilizzato per le varie configurazioni di pentola. In base alle considerazioni svolte nel paragrafo precedente si arriva alla seguente conclusione: nessuno di questi materiali possiede caratteristiche adatte alla cottura in quanto ci sono seri compromessi fra la qualità di trasferimento del calore e le qualità strutturali. Queste caratteristiche sono state riportate nella tabella qui sotto.

| | Densità | Calore Specifico | Conducibilità Termica | Capacità Termica | Permeabilità Magnetica Relativa |
|-----------|-----------|------------------|-----------------------|------------------|---------------------------------|
| | kg/m^3 | J/kgK | W/mK | J/K | <i>addimensionale</i> |
| ACCIAIO | 7800 | 502 | 16 | 3916 | 450 |
| ALLUMINIO | 2600-2750 | 880 | 236 | 2288 | 1.25E-06 |
| FERRO | 7880 | 444-490 | 73 | 3498 | 2.00E+05 |
| RAME | 8890-8930 | 385 | 390 | 3388 | 1.25E-06 |

Tabella 1.3: caratteristiche materiali

Il rame e l'alluminio infatti presentano maggiori prestazioni termiche grazie alla loro elevata conducibilità termica, mentre l'acciaio possiede delle buone proprietà metalliche a discapito di una minore conducibilità termica. L'ideale sarebbe avere un materiale con ottime caratteristiche sia termiche sia strutturali. Purtroppo tale elemento non esiste in natura. Una soluzione possibile è quella di realizzare delle strutture multistrato a sandwich inserendo per esempio uno strato di rame o di alluminio fra due strati esterni di acciaio inossidabile 18/10. La soluzione a triplo strato è molto diffusa in commercio, poichè essa assorbe più velocemente il calore, lo distribuisce in ogni zona del contenitore e infine lo trasferisce agli alimenti assicurando in tal modo una cottura uniforme. Oltre alla tipologia a tre strati vi sono delle particolari costruzioni con più strati come si può notare dalle figure qui sotto.

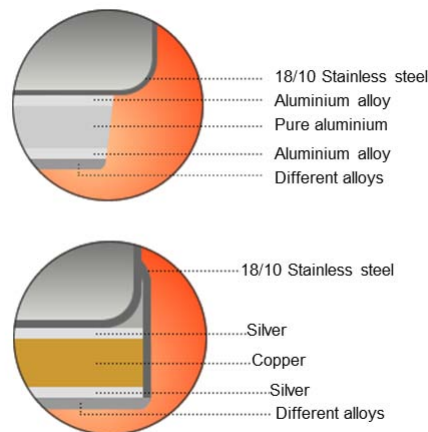


Figura 1.4.1: esempi di fondo multistrato



Figura 1.4.2: esempio pentola ad induzione

Per quanto concerne la cottura a induzione, si devono necessariamente utilizzare pentole a fondo ferroso e con una base liscia, o comunque non deformata o incavata, per avere una più elevata performance. Non possono essere usati materiali non magnetici come alluminio, rame, vetro, terracotta, ceramica e pyrex, che non attivano il processo induttivo. E' dunque indispensabile utilizzare il ferro ma questo elemento ha una bassa conducibilità termica e presenta una capacità termica tra le più elevate per cui al massimo può essere utilizzato solo per processi di cottura che non richiedono un rapido cambiamento della temperatura, inoltre presenta un problema di corrosione. Una soluzione alternativa potrebbe essere l'uso di acciai magnetizzabili ad alto contenuto ferritico inox (410 o similari). In questo modo si risolve il problema della resistenza alla corrosione ma permangono gli stessi problemi riscontrati nel caso del ferro visto che questa lega ha anch'essa una elevata capacità termica e un basso coefficiente $[\lambda]$ ad elevata conducibilità termica. Come nelle normali applicazioni, anche per quella ad induzione è dunque preferibile adottare delle strutture a strato tenendo stavolta presente che per l'effetto pelle le correnti indotte si distribuiscono sul fondo nelle vicinanze della superficie esterna. Una combinazione ottimale potrebbe essere quella di inserire uno strato di ferro fra l'alluminio e l'acciaio

magnetizzabile esterno ottenendo in questo modo, a scapito di un costo maggiore, un prodotto con ottime qualità di cattura, accumulo e trasmissione agli alimenti del calore.

1.5 ELETTRONICA DI POTENZA

In questo paragrafo vengono descritte le principali parti di una piastra ad induzione, nel dettaglio verranno descritte la parte circuitale di elettronica di potenza e le caratteristiche principali dei più moderni dispositivi presenti sul mercato, in particolare soffermandoci sui sistemi di sicurezza. Per prima cosa è però opportuno fare una carrellata di tutti i dispositivi elettronici usati, con rispettiva descrizione, approfondendone a pieno il funzionamento. Dopo questa breve analisi sarà dunque possibile descrivere il comportamento completo della piastra ad induzione. Prima di analizzare gli interruttori a semiconduttore è necessario fare una breve caratterizzazione dei materiali. Essi possono essere classificati in base al livello energetico studiando il legame chimico. Un atomo è costituito dal nucleo composto da un protone e un neutrone e degli elettroni negativi che ruotano intorno ad esso. Gli elettroni più lontani dal nucleo determinano il legame chimico con gli atomi vicini e prendono il nome di elettroni di valenza. Quest'ultimi sono legati agli atomi e quindi non sono liberi di spostarsi ordinatamente, se ora viene fornita una certa quantità di energia essi possono rompere il legame con gli atomi e diventare elettroni liberi. Gli elettroni di una sostanza possono occupare due livelli energetici distinti: livello energetico inferiore chiamata banda di valenza e il livello energetico superiore chiamata banda di conduzione. Le due bande sono separate dalla banda interdotta, cioè una banda energetica dove gli elettroni non possono stare. Gli elettroni sono in moto di agitazione termica e la loro velocità è proporzionale alla temperatura. Gli elettroni più veloci possono riuscire a saltare dalla banda di valenza alla banda di conduzione, diventando così elettroni liberi.

- **Isolanti:** in questi materiali la banda di valenza è molto larga e quindi non ci sono elettroni in grado di effettuare il salto dalla banda di valenza alla banda di conduzione. Quindi la banda di conduzione rimane vuota, cioè il materiale non ha elettroni liberi in grado di condurre la corrente elettrica. Se si applica allora una tensione ai capi del materiale si determinano delle forze sulle cariche, ma non si realizza alcuno spostamento su di esse, per cui la corrente generata è nulla.
- **Conduttori:** la banda di conduzione è sempre affollata di elettroni pronti a muoversi sotto l'azione di un campo elettrico. Per questo motivo se si applica una tensione ai capi di un conduttore le cariche elettriche presenti nella banda di conduzione sono soggette a una forza elettrica, forza di Coulomb, che le fa spostare dal potenziale maggiore verso il potenziale minore, generando di conseguenza una corrente elettrica.
- **Semiconduttori:** in questi materiali alcuni elettroni riescono a saltare dalla banda di valenza alla banda di conduzione. Il numero di elettroni che riescono a saltare nella banda di conduzione aumenta al crescere della temperatura, per questo motivo, alle basse temperature presentano un comportamento simile agli isolanti, mentre alle alte temperature è simile ai conduttori. Per permettere il salto di un elettrone dalla banda di valenza alla banda di conduzione è necessaria una certa energia. Essendo questa energia modesta esiste un metodo per aumentare notevolmente il numero di cariche presenti nella banda di conduzione: il drogaggio. Si tratta di una tecnica che permette di inserire nella struttura cristallina del semiconduttore delle quantità piccolissime di materiali particolari chiamati droganti. In funzione del materiale usato nel drogaggio il semiconduttore può essere drogato di tipo p o di tipo n: nel primo caso le cariche disponibili per il moto sono positive e vengono dette lacune, nel secondo sono negative e vengono dette elettroni.

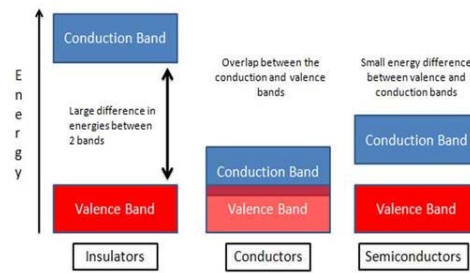


Figura 1.5.1: energy gap conduttore, semiconduttore e isolante

Negli ultimi anni gli interruttori a semiconduttore hanno reso possibile migliorie nelle applicazioni elettroniche, facilità di controllo e riduzione dei costi. Pertanto questi dispositivi sono sempre più usati per la realizzazione di convertitori, inverter e raddrizzatori.

1.5.1 DIODI

Il diodo è un componente elettronico passivo non lineare a due terminali, la cui funzione è quella di permettere il flusso di corrente elettrica in una direzione e di bloccarla nell'altra. Esso è costituito da una semplice giunzione pn, ovvero una struttura con due diverse zone di drogaggio, una di tipo n e l'altra di tipo p così come mostrato in figura.

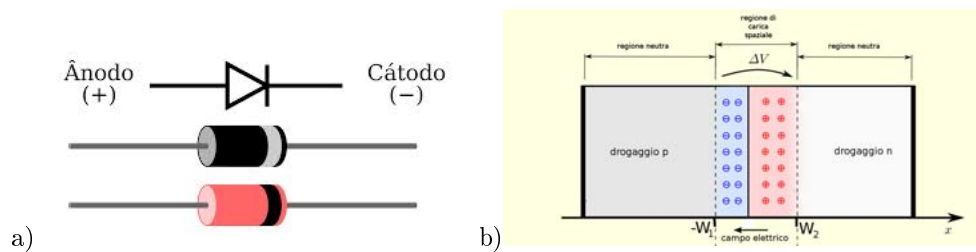


Figura 1.5.2: a)simbolo diodo b)giunzione pn

In prossimità della giunzione si determina una zona di svuotamento in cui non sono presenti cariche maggioritarie, ai capi di tale zona si localizza una differenza di potenziale, detta barriera di potenziale che presenta potenziale maggiore in corrispondenza della zona drogata di tipo p e potenziale minore in corrispondenza della zona drogata di tipo n. La caratteristica del diodo a semiconduttore dipende proprio dalla presenza di queste barriere; la zona drogata di tipo p corrisponde all'anodo del diodo, mentre la zona drogata di tipo n corrisponde al catodo.

Il funzionamento del diodo dipende da parametri esterni imposti dal circuito elettrico in cui è inserito visto che a seconda del loro segno può essere in stato di conduzione o di interdizione/blocco. Infatti se la tensione ai capi del diodo ha valore e polarità tali che nel diodo circola corrente, esso è polarizzato direttamente, nel caso opposto esso è polarizzato inversamente. Ricordando che l'anodo è la zona drogata di tipo p, possiamo affermare che una giunzione è polarizzata direttamente se il potenziale maggiore della tensione è applicato alla zona drogata di tipo p, mentre una funzione è polarizzata inversamente se il potenziale maggiore è applicato alla zona drogata di tipo n.

1.5.1.1 FUNZIONAMENTO DEL DIODO

Il diodo è una componente non lineare, ovvero la sua relazione tensione corrente non è una retta passante per l'origine, ma ha il seguente andamento:

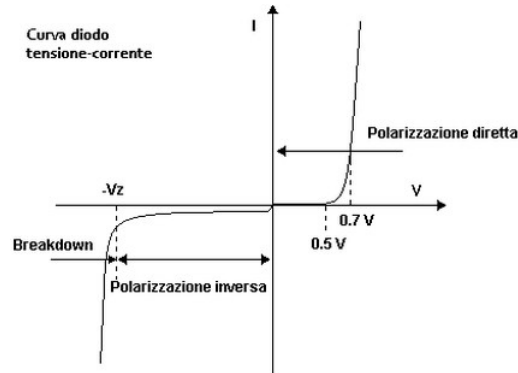


Figura 1.5.3: caratteristica I-V

Esaminando la figura si può notare che la parte che giace nel primo quadrante è ottenuta per valori positivi della tensione ai capi del diodo, dunque per una giunzione pn polarizzata direttamente. La parte di curva che giace nel terzo quadrante corrisponde a una tensione ai capi del diodo tale da polarizzare il dispositivo inversamente, in questa condizione la corrente assume valori molto bassi e decisamente trascurabili rispetto a quando il dispositivo è polarizzato positivamente. In questa situazione la tensione non deve superare la tensione di rottura o di break-down, se questa tensione viene raggiunta si incorre nella rottura del componente. Il fenomeno che avviene in questo caso viene chiamato break-down causato dall'effetto valanga e dovuto al campo elettrico presente nella regione di svuotamento della giunzione. Il diodo ha quindi quattro zone di funzionamento dipendenti dal valore della tensione applicata ai suoi capi, infatti per:

1. $0 < V < V_s$ la giunzione è polarizzata direttamente ma la corrente che attraversa il diodo è debole e il componente non conduce;
2. $V > V_s$ il diodo è in conduzione e la corrente diretta cresce esponenzialmente all'aumentare della tensione;
3. $-V_z < V < 0$ in questa situazione la corrente ha un valore trascurabile per cui si considera che il diodo è in blocco;
4. $V < -V_z$ si manifesta il fenomeno di breakdown in cui avviene un forte aumento della corrente inversa.

1.5.2 TIRISTORI

Il tiristore è un componente elettronico a semiconduttore avente la stessa funzione del diodo ma con la differenza che esso viene innescato con un segnale di controllo applicato al gate. È composto dall'unione di due giunzioni pn. Lo si può pertanto considerare equivalente all'unione

di due transistor composto da un quadruplo stato di semiconduttori p-n-p-n collegati come in figura.

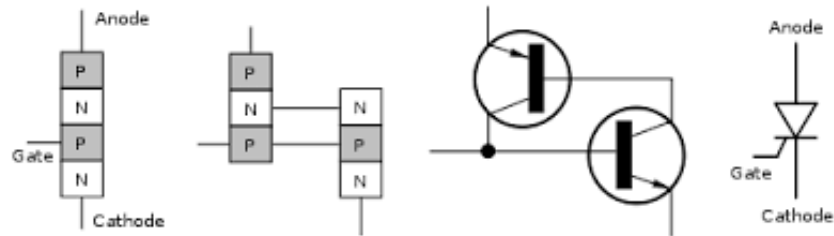


Figura 1.5.4: simbolo tiristori

Il funzionamento di questo dispositivo è strettamente dipendente dal circuito in cui viene inserito. Per cui, in maniera analoga al diodo, esso può assumere uno stato di conduzione o di blocco a seconda del segno della tensione applicata ai suoi capi. Tuttavia in presenza di polarizzazione diretta esso non conduce fino a quando non avviene un innesco, ovvero un impulso positivo di corrente applicata per un breve periodo al terminale di comando. La conduzione permane anche alla cessazione del segnale e dura fino a quando le condizioni esterne riportano il comportamento in interdizione. In base alla descrizione svolta è stata tracciata la caratteristica tensione-corrente. In essa si può notare la presenza della tensione diretta di rottura o tensione di breakover, ovvero una differenza di potenziale in corrispondenza della quale le correnti di deriva diventano non trascurabili e tali da attivare il dispositivo anche in assenza di comando. [3]

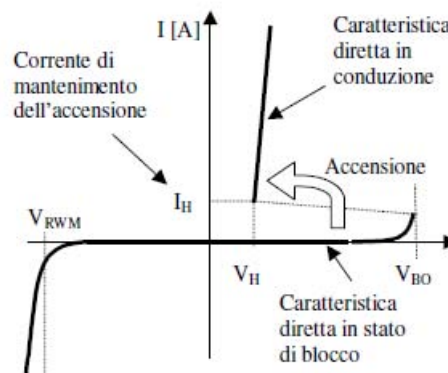


Figura 0-13. Caratteristica di un tiristore

Figura 1.5.5: caratteristica I-V

1.5.3 INTERRUTTORI CONTROLLATI

Gli interruttori controllati sono dei dispositivi a semiconduttore che possono essere innescati e disinnescati applicando un segnale al terminale di controllo. La loro funzione è infatti quella di lasciar passare la corrente solo in determinati intervalli del periodo della frequenza di fun-

zionamento, permettendo in tal modo di regolare la potenza o di attivare solo alcune zone del circuito. I più comuni dispositivi sono gli interruttori BJT, MOSFET, GTO e IGBT.

1.5.3.1 BJT

L' interruttore BJT è un transistor bipolare. Esso è composto da tre terminali semiconduttori. Generalmente viene realizzato con un cristallo di silicio in cui vengono realizzate tre diverse zone , drogate alternativamente di tipo n e di tipo p; in corrispondenza della superficie di transizione tra un tipo di drogaggio e l'altro si realizza una giunzione, dunque nel dispositivo sono presenti due diverse giunzioni.[3]

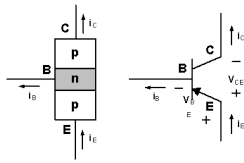


Figura 1.5.6: BJT

La struttura può essere di tipo npn con due zone di tipo n e una centrale di tipo p in questo caso si parla di transistor npn, oppure può essere pnp in questo caso si parla di transistor pnp. Le zone più esterne vengono definite collettore, quella centrale è la base e quella restante emettitore. Nel simbolo del BJT è presente una freccia, posta sul terminale emettitore, indicante il verso della corrente: in un transistor npn deve fluire

sempre dal collettore verso l'emettitore, mentre in un pnp deve fluire dall'emettitore verso il collettore. Pertanto il BJT è simile a un generatore di corrente comandato; il valore di corrente erogata dal componente è funzione di una grandezza di comando , la corrente di base. Vale la seguente relazione tra le correnti del transistor:

$$I_c = h_{fe} \cdot I_b$$

In cui:

I_b è la corrente della base;

I_c è la corrente del collettore;

h_{fe} è il guadagno di corrente del transistor.

L'analisi del funzionamento del dispositivo permette di individuare due diversi campi di funzionamento: la zona di conduzione o ON e la di blocco o OFF. Nella prima zona il valore della corrente di collettore è molto minore rispetto a quella comandata dalla corrente di base. Cioè vale la relazione:

$$I_c \ll h_{fe} \cdot I_b$$

In tale situazione la tensione presente tra collettore ed emettitore è prossima a zero. Nella zona di blocco, invece, si ha che la corrente di collettore è nulla, ciò implica che sia nulla anche la corrente di comando o di base:

$$I_b = I_c = 0$$

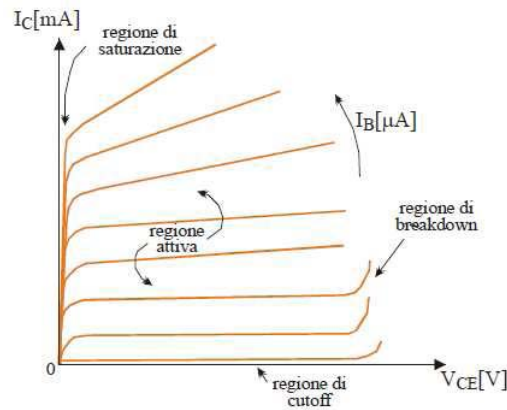


Figura 1.5.7: carateristica I-V BJT

Nei transistori di grande potenza il guadagno di corrente h_{fe} è di solito compreso tra 5 e 10, così questi dispositivi sono spesso connessi in configurazione Darlington per ottenere un guadagno più elevata. Questa nuova configurazione presenta dei svantaggi quali una caduta di tensione più alta e una velocità di commutazione leggermente più bassa.

1.5.3.2 MOSFET

È un transistor a effetto di campo a semiconduttore composto da tre terminali. I tre terminali sono detti drain, source e gate e corrispondono rispettivamente a collettore, emettitore e base. La struttura principale di un MOSFET è illustrata in figura.[3]

In una zona di semiconduttore chiamato substrato drogato di tipo p, sono realizzate due zone drogate di tipo n, che costituiscono il source e il drain del dispositivo. La struttura di un MOSFET rispetto a quella del BJT è più simmetrica, per questo motivo i due connettori di drain e di source possono essere invertiti senza provocare variazioni di funzionamento. Per fare attivare il dispositivo è necessario applicare una tensione positiva tra gate e substrato, le cariche negative vengono accumulate sotto lo strato di ossido. La presenza delle cariche negative stabilisce un canale di collegamento tra source e drain. Questa struttura agisce come un condensatore, ai capi del quale è applicata una tensione che comporta la presenza di una certa quantità di carica. Anche questo dispositivo è un componente non lineare; anche per esso infatti possono essere individuate due zone di funzionamento ON e OFF. Il modello è, in questo caso, un interruttore comandato dalla tensione di gate:

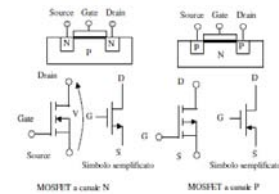


Figura 1.5.8: simbolo mosfet

- Se la tensione tra gate e substrato è nulla, allora il dispositivo è spento OFF
- Se la tensione ha il suo valore massimo il MOSFET è attivo ON



Figura 1.5.9: caratteristica I-V MOSFET

1.5.3.3 GTO

Un altro interruttore controllato è il GTO (Gate Turn Off). Questo dispositivo non è altro che un tiristore controllato che può essere sia innescato sia disinnescato. Infatti come il tiristore, il GTO può essere chiuso con un impulso di corrente di breve durata dato al gate; una volta che è in conduzione, il GTO può rimanervi senza ulteriore corrente di gate.

A differenza del tiristore, tuttavia, il GTO può essere riportato in stato di apertura applicando tra gate e catodo una tensione negativa tale da sostenere una corrente negativa sufficientemente grande. Quindi le operazioni consentite sono due: il GTO può essere acceso (turn on) o spento (turn off). Il turn on è attivato da un impulso di corrente positiva tra i terminali di gate e di catodo. Quando il gate-catodo si comporta come una giunzione p-n, c'è una tensione relativamente bassa tra i due terminali. Il turn off è attivato da un impulso di tensione negativa tra i terminali di gate e catodo. Parte della corrente positiva viene sottratta e utilizzata per indurre una tensione tra il gate e il catodo che a sua volta provoca una diminuzione della corrente positiva e il GTO si disattiverà. La tensione ai capi del GTO in conduzione è modesta (2-3 V), mentre i suoi tempi di commutazione sono compresi tra pochi microsecondi e 25 microsecondi.

Questo dispositivo è in grado di sopportare tensioni e correnti elevate, perciò viene impiegato quando è necessario avere a disposizione un interruttore in grado di interrompere tensioni e correnti elevate con frequenze di commutazione comprese tra poche centinaia di hertz e 10kHz. [3]

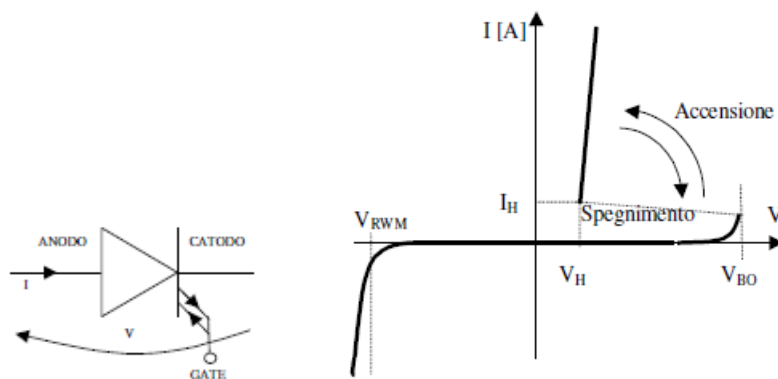


Figura 1.5.10: simbolo GTO e caratteristica I-V

1.5.3.4 IGBT

L'IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) , transistoro bipolare a gate isolato è un dispositivo a semiconduttore usato come interruttore elettronico. Il dispositivo abbina le caratteristiche favorevoli di un BJT e di un MOSFET. Il transistoro bipolare con gate isolato, allo stesso modo degli altri componenti esaminati in precedenza, si interfaccia con il circuito esterno mediante i soliti tre elettrodi ma presenta una complessa disposizione delle regioni drogate. Elettricamente possiede le caratteristiche derivanti dall'unione di un MOSFET e di un BJT, con il secondo transistoro collegato a valle del primo. Lo schema di funzionamento di un transistoro a giunzione bipolare isolato è particolarmente semplice in quanto dipende solamente dalla tensione fra il gate e l'emettitore.

In particolare l'IGBT rimane in interdizione fino a quando esternamente non gli viene applicata una differenza di potenziale maggiore del valore di soglia V_g del dispositivo. L'IGBT ha un tempo di commutazione di 1 microsecondo e sono disponibili in moduli con limiti di impiego di 1200 A e tensioni fino a 2-3 kV.[3]

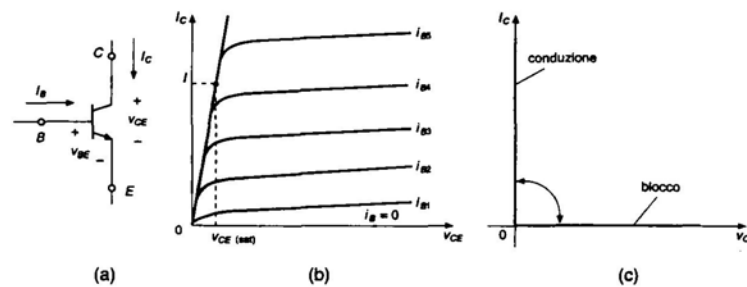


Figura 1.5.11: simbolo IGBT e caratteristica I-V

1.6 RADDRIZZATORI

In gran parte delle applicazioni elettroniche di potenza, viene convertita la potenza di ingresso da alternata sinusoidale a continua. Questa trasformazione è presente anche in un piano di cottura ad induzione. Questi circuiti sfruttano le caratteristiche dei diodi, dispositivi in grado di interdire il passaggio di corrente quando ai loro capi viene applicata una tensione negativa. Essi infatti convertono la sinusoide in ingresso, avente nel periodo un valore medio nullo, in una forma d'onda pulsata con valore medio diverso da zero. Esistono diversi dispositivi ac-dc; i raddrizzatori a diodi non controllati e i raddrizzatori controllati. Essi possono essere a sua volta suddivisi in raddrizzatori a singola semionda o a doppia semionda, in raddrizzatori monofase o trifase. Per ragioni economiche fra tutti i sistemi di conversione ac-dc appena citati i raddrizzatori a diodi non controllati sono quelli che trovano maggiore applicazione nell'elettronica di potenza. I raddrizzatori a singola semionda sono costituiti da un diodo in serie al carico. In questo caso se il catodo è rivolto verso il carico, il diodo consente il passaggio della sola semionda positiva, lasciando a zero il valore della tensione in corrispondenza della semionda negativa. I raddrizzatori a onda intera invece viene ottenuto mediante l'utilizzo di quattro diodi disposti secondo la configurazione ponte di Greatz.[3]

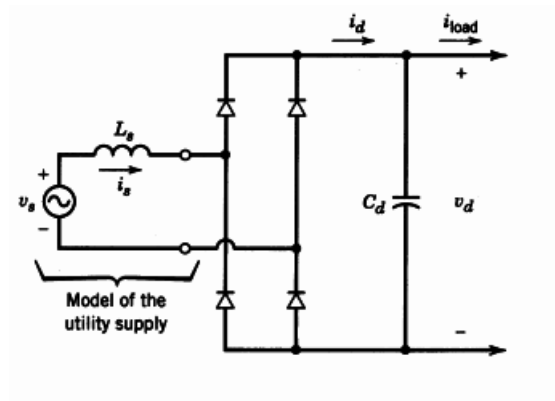


Figura 1.6.1: raddrizzatore a ponte di Greatz

Il principio di funzionamento consiste in una conduzione a coppie dei semiconduttori. In particolare quando v_s è positiva conducono i diodi 1 e 2 e si ha

$$v_d = v_s$$

$$i_s = i_d$$

mentre quando v_s diventa negativa si attivano i diodi 3 e 4 e in tal caso si ha

$$v_d = -v_s$$

$$i_s = -i_d$$

avendo indicato con v_d la tensione istantanea presente nel lato continua e con i_d e i_s le correnti rispettivamente a valle e a monte del circuito raddrizzatore.

Unendo i risultati ottenuti, la tensione d'uscita del raddrizzatore a diodi può essere espressa in ogni istante dalla

$$v_d(t) = |v_s|$$

Si possono notare in figura gli andamenti della tensione e della corrente rispettivamente prima e dopo la trasformazione.

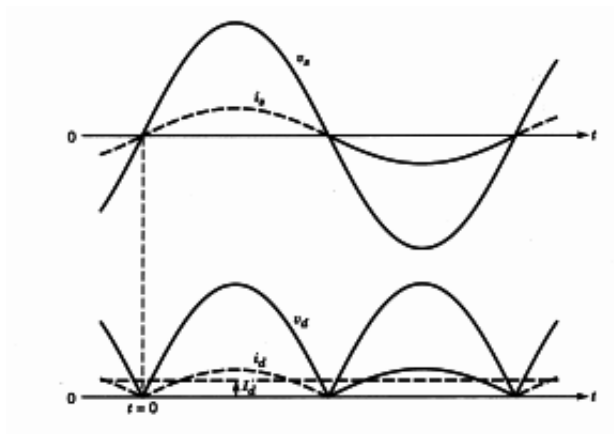


Figura 1.6.2: andamento della tensione e della corrente a monte e a valle del raddrizzatore

Analizzando le curve ottenute in particolare quella della tensione presente nel lato continua, si può ottenere il valore medio V_{d0} nell'intero periodo di v_s :

$$V_{d0} = \frac{1}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} \sqrt{2} \text{sen} \omega t dt = \frac{2}{\pi} \sqrt{2} V_s = 0.9 V_s$$

dove V_s indica il valore efficace della tensione d'ingresso.

I risultati sino a qui ottenuti sono validi in una situazione ideale; tuttavia nella realtà non si può trascurare il valore dell'impedenza interna della rete di alimentazione, prevalentemente induttiva, indicata con L_s . L'effetto di questa induttanza sul funzionamento del circuito è sostanzialmente quello di non rendere istantaneo il passaggio della corrente da una direzione all'altra e dunque diviene necessario analizzare gli effetti di questo tempo di ritardo.

Analizzando l'espressione dell'equazione della tensione ai capi dell'induttanza L_s si ottiene:

$$v_L = \int_0^u \sqrt{2} V_s \text{sen} \omega t = L_s \frac{di_s}{dt}$$

e considerando che la corrente attraverso L_s passa da $-I_d$ a $+I_d$, si ha, integrando durante l'intervallo di commutazione l'area di perdita A_u dovuta al fatto che durante il transitorio la tensione di alimentazione non giunge al carico.

$$A_u = \int_0^u \sqrt{2} V_s \text{sen} \omega t d(\omega t) = \sqrt{2} V_s (1 - \cos u) = \omega L_s \int_{-I_d}^{+I_d} di_s = 2\omega L_s I_d$$

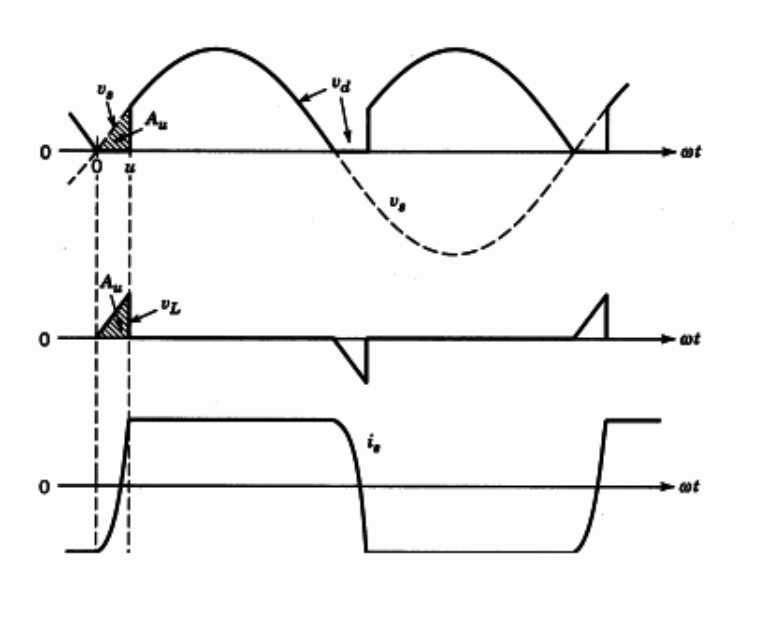


Figura 1.6.3: perdite di tensione durante il transitorio di commutazione

è possibile ora calcolare la tensione continua nel caso reale data dalla differenza tra la tensione continua nel caso ideale e la diminuzione di potenziale.

$$V_d = V_{d0} - \frac{A_u}{\pi} = 0.9 V_s - \frac{2\omega L_s I_d}{\pi}$$

Il valore V_d è un valore medio in quanto il principio di funzionamento del circuito non permette di avere in uscita una grandezza costante.

La tensione a valle dei diodi presenta delle indesiderate variazioni di ampiezza, pertanto tale problema viene ridotto collegando in parallelo un condensatore di filtro. In questo modo si

ottiene una tensione ancora dipendente dal tempo ma caratterizzata dall'aver un andamento più costante. Questo dipende dal fatto che l'elemento capacitivo inserito permette di accumulare una certa carica e di mantenere idealmente ai suoi capi una differenza di potenziale pari a $V_d = V_p$.

Nella situazione reale però il condensatore si scarica. Questa condizione dura fino al momento in cui la tensione della rete di alimentazione supera la differenza di potenziale presente ai suoi capi. Durante questo intervallo si ha dunque una diminuzione della V_p di una quantità pari alla tensione picco-picco di ripple che, nel caso di un raddrizzatore a doppia semionda, è data da

$$V_{rpp} = \frac{V_P}{2fCR}$$

dove R indica la resistenza di un carico collegato a valle del convertitore. Si comprende dunque che per evitare una rapida decrescita della tensione di uscita durante la fase di scarica il condensatore deve essere scelto con un valore di C elevato. Non è possibile inserire un componente dotato di una capacità tale in tutti i circuiti, pertanto al fine di ridurre il ripple e stabilizzare l'ampiezza della tensione viene utilizzato un regolatore di tensione.

Nelle applicazioni industriali dove sono disponibili tensioni alternate trifase, è preferibile usare circuiti raddrizzatori trifase realizzati con sei diodi disposti a ponte. Anche in questo caso è presente sul lato continua un condensatore di filtro necessario per ridurre le variazioni di tensioni a valori accettabili. [3]

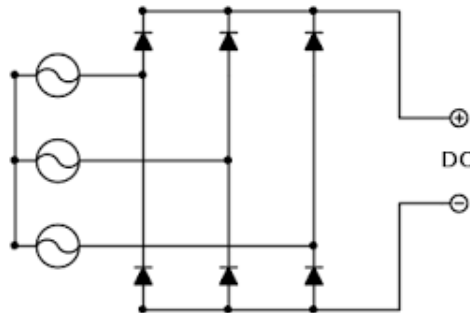


Figura 1.6.4: raddrizzatore trifase

Negli ultimi anni la disponibilità crescente di interruttori controllabili che funzionano con elevati valori di tensione e corrente ha permesso di realizzare raddrizzatori controllati. Pertanto in tali dispositivi la conversione di corrente da alternata a continua viene realizzata da tiristori. Questo è particolarmente vero in applicazioni dove è necessario poter controllare il flusso di potenza in entrambe le direzioni tra il lato alternata e il lato continua.

1.7 TOPOLOGIE DI INVERTER

L'inverter è un apparato elettronico usato per convertire una corrente continua in una corrente alternata. Il valore della tensione in uscita può essere regolato in ampiezza e frequenza a partire da una sorgente in ingresso. In genere è ottenuto raddrizzando e filtrando la tensione di linea mediante circuiti raddrizzatori a diodi. Tutt'oggi l'inverter viene utilizzato in svariate applicazioni elettriche ed elettroniche. Alcuni esempi possono essere: nei gruppi di continuità, nella trasmissione di energia elettrica, nell'utilizzo di pannelli fotovoltaici, per realizzare un'alimentazione switching e nella variazione di velocità nei motori elettrici.

È possibile ora illustrare lo schema di funzionamento di un inverter costituito da tre blocchi principali: raddrizzatore a diodi, condensatore di filtro e inverter a commutazione. Vista la configurazione schematica è intuibile che un sistema di questo tipo è reversibile, ovvero il flusso di potenza può fluire in entrambe le direzioni. Un esempio di questa applicazione è il recupero di energia cinetica eseguita durante la frenatura del motore. In quest'ultimo caso l'energia recuperata viene restituita alla linea di alimentazione.

Questi dispositivi si possono suddividere in base al tipo di sorgente impressa: inverter a corrente impressa CSI (Current Source Inverter) usati principalmente per motori AC di potenza elevata e inverter a tensione impressa VSI (Voltage Source Inverter). Quest'ultima tipologia, molto più utilizzata, può essere suddivisa nelle tre classi generali elencate qui di seguito:

- **INVERTER CON MODULAZIONE A LARGHEZZA D'IMPULSO:** classici, in essi l'ampiezza della tensione DC d'ingresso è essenzialmente costante e viene prodotta da un raddrizzatore a diodi per cui il convertitore deve controllare l'ampiezza e la frequenza della tensione d'uscita. Ciò avviene mediante una modulazione della larghezza dell'impulso PWM che va a comandare gli interruttori dell'inverter sulla base di diversi schemi progettati per costruire la forma d'onda della tensione alternata d'uscita, che deve essere quanto più possibile vicina a un'onda sinusoidale.
- **INVERTER A ONDA QUADRA:** diversamente dal precedente, il controllo dell'ampiezza della tensione alternata d'uscita avviene regolando quella continua d'ingresso per cui l'inverter deve controllarne solo la frequenza. La loro denominazione deriva dal fatto che la forma d'onda della tensione d'uscita è simile a quella quadra.
- **INVERTER MONOFASE CON CANCELLAZIONE DELLA TENSIONE:** questi convertitori riuniscono le caratteristiche di quelli discussi sopra in quanto controllano l'ampiezza e la frequenza della tensione d'uscita, simile a un'onda quadra, anche se quella d'ingresso è costante e gli interruttori dell'inverter non sono comandati con impulsi modulati. Questa tecnica di controllo, denominata di cancellazione della tensione, può però essere applicata solo ai convertitori monofase e non a quelli trifase.

Un'ulteriore classificazione degli inverter può essere eseguita anche in base alla loro topologia in inverter a ponte intero e in inverter a mezzo ponte.

Ora viene illustrato il funzionamento di un inverter a mezzo ponte con modulazione a larghezza d'impulso PWM. In questo tipo di inverter si desidera che la forma d'onda in uscita sia sinusoidale con frequenza ed ampiezza controllabili. Per ottenere una forma d'onda sinusoidale con una frequenza desiderata, un segnale di controllo sinusoidale con la frequenza desiderata è confrontato con un'onda triangolare. La frequenza dell'onda triangolare stabilisce la frequenza di commutazione degli interruttori ed è mantenuta costante assieme alla sua ampiezza. [3]

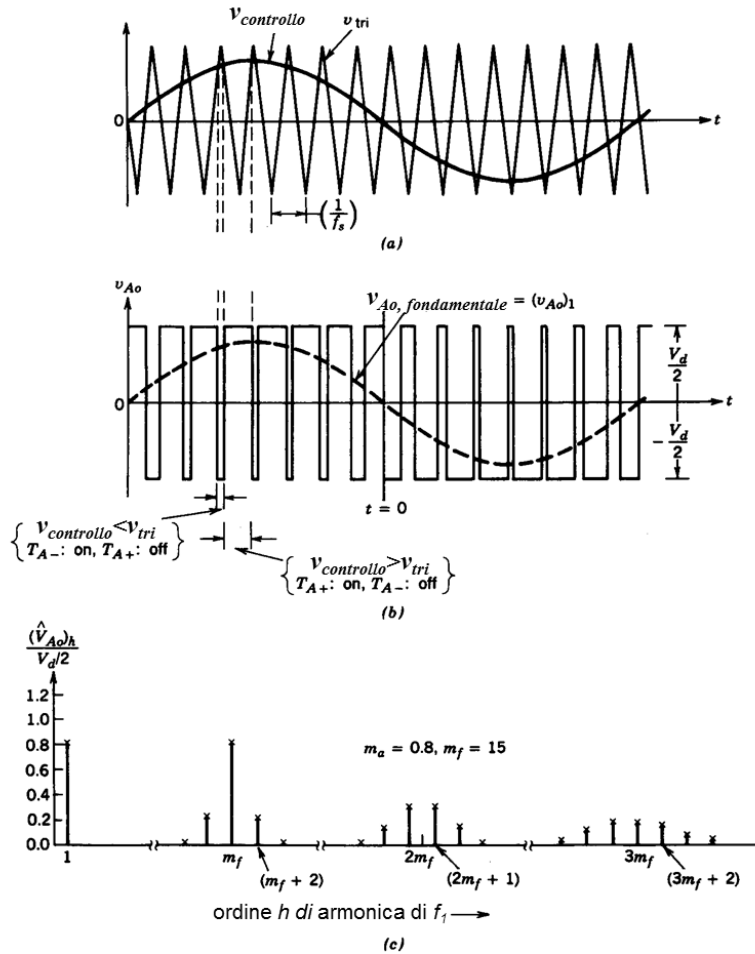


Figura 1.7.1: modulazione a larghezza d'impulso

Nella figura sono rappresentate la tensione di controllo $v_{controllo}$ usata per modulare il duty cycle dell'interruttore che ha frequenza f_1 , frequenza desiderata dalla prima armonica della tensione in uscita dell'inverter (detta frequenza modulante), la tensione triangolare indicata con v_{tri} con una frequenza di commutazione di f_s con la quale gli interruttori degli inverter sono comandati (detta frequenza portante).

È possibile definire quindi:

- **RAPPORTO DI MODULAZIONE D'AMPIEZZA** m_a dato dal rapporto tra il valore massimo del segnale di controllo $v_{controllo}$ e l'ampiezza del segnale triangolare v_{tri} che è tenuta costante.

$$m_a = \frac{V_{controllo}}{V_{tri}}$$

- **RAPPORTO DI MODULAZIONE DI FREQUENZA** m_f definito dal rapporto tra la frequenza portante f_s e la frequenza modulante f_1 .

$$m_f = \frac{f_s}{f_1}$$

Nell'esempio in figura, in cui è stato preso come modulo d'amplificazione d'ampiezza $m_a < 1$, gli interruttori 1 e 2 sono comandati in base al confronto tra $v_{controllo}$ e v_{tri} in cui si ottiene la seguente tensione in uscita che non dipende dal valore della corrente i_0 :

- $v_{controllo} > v_{tri}$ con T_{A+} chiuso ottengo $v_{ao} = +\frac{1}{2}V_d$
- $v_{controllo} < v_{tri}$ con T_{A-} chiuso ottengo $v_{ao} = -\frac{1}{2}V_d$

Essendo i due interruttori mai aperti contemporaneamente, la tensione d'uscita v_{ao} varia tra due valori $+\frac{1}{2}V_d$ e $-\frac{1}{2}V_d$.

Il valore massimo della prima armonica, ovvero della fondamentale dipende dal rapporto di modulazione d'ampiezza m_a e dalla tensione V_d .

$$V_{ao} = \frac{v_{controllo}}{V_{tri}} \cdot \frac{V_d}{2}$$

Le armoniche della tensione in uscita si possono rappresentare con delle sbarre verticali, centrate attorno alla frequenza di commutazione e ai suoi multipli. Le frequenze alla quale si hanno armoniche di tensione possono essere determinate con la seguente equazione:

$$f_h = (jm_f \pm k) \cdot f_1$$

È possibile anche variare la frequenza di commutazione e il rapporto m_f di modulazione di frequenza. È desiderabile scegliere una frequenza più alta possibile anche se si hanno delle perdite di commutazione elevate. Nella maggior parte di applicazioni, la frequenza di commutazione f_s è scelta o inferiore a 6kHz o superiore a 20kHz per essere più alta di quella udibile. Il rapporto di modulazione di frequenza, invece può essere grande o piccolo in base al suo valore limite $m_f=21$. [3]

- $m_f < 21$ si adotta la PWM sincrona usata nelle applicazioni di potenza più elevata, ovvero si fa in modo che m_f sia intero, ovvero che il periodo della portante sia contenuto esattamente un numero intero di volte in quello della modulante. Questa tipologia è indispensabile per non avere sub-armoniche.
- $m_f > 21$ si adotta la PWM asincrona, ovvero si mantiene la f_s costante al variare di f_1 almeno fino a che il rapporto di m_f non scenda al di sotto di un certo limite. Ciò fa sì che m_f non sia intero. Questo tipo di gestione del rapporto di modulazione presenta delle sub-armoniche a bassa frequenza che, anche se piccole, possono far circolare delle correnti consistenti che possono creare problemi ai motori AC.

Capitolo 2

TRASMISSIONE DEL CALORE

Il calore è la forma di energia che si manifesta nel passaggio da un corpo ad un altro quando tra i due vi è differenza di temperatura. Si distinguono tre modi di trasmissione del calore: conduzione, convezione e irraggiamento.

CONDUZIONE TERMICA: si manifesta come scambio di calore tra corpi solidi, liquidi, gassosi, senza movimento apparente di materia; è dovuta alla cessione di energia cinetica da parte di molecole, in zone a più alta temperatura, verso altre molecole in zona adiacente a più bassa temperatura.

CONVEZIONE TERMICA: consiste nel trasporto del calore che si attua in presenza di movimento macroscopico di particelle del fluido. Essa presuppone che almeno uno dei sistemi sia fluido (liquido, gas, sistema bifase liquido e vapore) ed è localizzato all'interfaccia di separazione tra le fasi. In base al moto del fluido si possono definire due tipi di convezione: naturale e forzata. La prima avviene per differenza di temperatura in un campo di forze di massa quale la gravità. La seconda è dovuta all'azione di dispositivi meccanici opportuni come ad esempio pompe, ventilatori e agitatori.

IRRAGGIAMENTO TERMICO: avviene per propagazione di onde elettromagnetiche nello stesso modo della propagazione della luce. Tutti i corpi ,solidi, liquidi, gassosi, emettono energia sotto forma di radiazioni elettromagnetiche, e sono in grado di assorbire questa energia. L'energia irradiata aumenta fortemente all' aumentare della temperatura. In alcune applicazioni in cui i tre modi di trasmissione sono concomitanti, l'irraggiamento potrebbe essere predominante a causa delle alte temperature. [4]

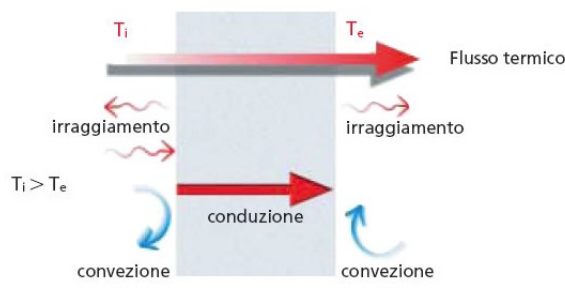


Figura 2.0.1: modi di trasmissione del calore

2.1 CONDUZIONE TERMICA

La trasmissione del calore per conduzione, che avviene tra corpi solidi, liquidi e gassosi, avviene quando c'è una differenza di temperatura tra 2 o più corpi. La grandezza fisica che si diffonde tra due corpi è la temperatura. La temperatura è funzione quindi della sua posizione e dell'istante considerato. Con riferimento a un sistema di coordinate cartesiane ortogonali si può scrivere:

$$T = f(x, y, z, t)$$

Oltre a questo fattore bisogna considerare sia la dipendenza delle proprietà fisiche del corpo funzione del tempo sia la funzione delle proprietà fisiche del corpo in funzione della direzione del flusso termico. Si possono definire quindi due metodi di studio: *regime stazionario* e *regime variabile*. Il primo è il *regime stazionario*, nel quale i valori di temperatura e del flusso termico non dipendono dal tempo, mentre il secondo è il *regime variabile* in cui la temperatura e il flusso termico sono funzione della temperatura.

Si può determinare la dipendenza della temperatura dal tempo e dalla coordinate spaziali in base all'equazione generale della conduzione termica. Questa equazione afferma che la somma della quantità di calore netta scambiata dQ_e più la quantità di calore generata internamente dal sistema dQ_g corrisponde alla variazione di energia interna del sistema dU . In un intervallo di tempo elementare dt si può scrivere l'equazione:

$$dQ_e + dQ_g = dU$$

Attraverso vari passaggi si ottiene la seguente formula: EQUAZIONE GENERALE DELLA CONDUZIONE

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{c\rho} \nabla^2 T + \frac{H}{c\rho}$$

Il valore $\frac{\lambda}{c\rho}$ si chiama diffusività termica del mezzo e si indica con il simbolo a . Esso ha le dimensioni di $\left[\frac{m^2}{s}\right]$ e indica la velocità con cui il corpo trasmette nel suo interno una variazione di temperatura, velocità che è proporzionale alla conduzione termica λ e inversamente proporzionale al calore specifico per unità di volume $c\rho$.

L'equazione può essere semplificata nei seguenti casi:

- senza la generazione interna di calore si ottiene L'EQUAZIONE DI FOURIER

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \nabla^2 T$$

- con temperature costanti nel tempo si ottiene L'EQUAZIONE DI POISSON

$$\nabla^2 T + \frac{H}{\lambda} = 0$$

- senza generazione interna di calore e con temperature costanti nel tempo si ottiene L'EQUAZIONE DI LAPLACE

$$\nabla^2 T = 0$$

in cui, con riferimento alle coordinate cartesiane si ottiene:

$$\begin{aligned} \nabla^2 T &= \nabla(\nabla T) = \\ &\left(\frac{\partial}{\partial x}i + \frac{\partial}{\partial y}j + \frac{\partial}{\partial z}k\right) \times \left(\frac{\partial T}{\partial x}i + \frac{\partial T}{\partial y}j + \frac{\partial T}{\partial z}k\right) = \\ &\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \end{aligned}$$

il termine ∇^2 viene detto operatore di Laplace o Laplaciano.

Per la soluzione delle equazioni della conduzione termica, ovvero per determinare la temperatura nei vari punti e il flusso termico, è necessario fissare le condizioni al contorno. [4]

Essi possono essere di tre diversi tipi:

- Condizione al contorno di primo tipo: si ha quando è fissata la temperatura sulla superficie del dominio. Questa condizione è detta anche condizione di Dirichlet.
- Condizioni al contorno di secondo tipo: si ha quando è fissata la derivata della temperatura normale alla superficie, derivata che può essere funzione del tempo e dello spazio.
- Condizioni al contorno di terzo tipo: si ha quando è fissata una combinazione lineare tra la temperatura della superficie e la derivata normale alla superficie stessa. Questa è detta anche superficie di Neumann.

La seguente trattazione della trasmissione del calore per conduzione termica è stata fatta su un modello matematico del corpo fisico continuo, uniforme, isotropo e con caratteristiche fisiche invariabili nel tempo ed indipendenti dalla temperatura. Viene quindi trattato il fenomeno stazionario.

In questo caso la formula generale della conduzione del calore si riduce nell'equazione di Poisson $\nabla^2 T + \frac{H}{\lambda} = 0$ oppure all'equazione di Laplace $\nabla^2 T = 0$ in cui non avviene la generazione interna del calore.

2.1.1 CASO DI 2 MATERIALI

Supponiamo di avere uno strato piano composto di due strati di materiale diversi di spessore rispettivamente l_1 e l_2 e conducibilità termica λ_1 e λ_2 e le temperature T_1 e T_2 sulle facce estreme.

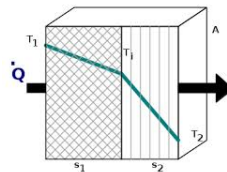


Figura 2.1.1: conducibilità tra due materiali diversi

Il flusso termico attraverso lo strato si ottiene attraverso la legge di Fourier.

$$q = \frac{\lambda A}{l} (T_1 - T_2)$$

Il rapporto $\frac{\lambda}{l}$ rappresenta la conduttanza termica specifica dello strato, cioè l'inverso della resistenza specifica. Portando la resistenza termica specifica al denominatore si ottiene:

$$q = \frac{T_1 - T_2}{\frac{l}{\lambda A}}$$

In essa si nota l'analogia con il caso elettrico del passaggio della corrente attraverso due resistenze in serie. La resistenza totale è la somma delle resistenze in serie:

$$R_1 + R_2 = \frac{l_1}{\lambda_1 A} + \frac{l_2}{\lambda_2 A} = R_{tot}$$

Nell'esempio è possibile anche determinare il profilo delle temperature nei due strati considerati.

$$tg\varphi_1 = \frac{T_1 - T''}{l_1} = \frac{q}{\lambda_1 A} = \frac{\frac{1}{\lambda_1}}{\frac{l_1}{\lambda_1} + \frac{l_2}{\lambda_2}} (T_1 - T_2)$$

$$tg\varphi_2 = \frac{T'' - T_2}{l_2} = \frac{q}{\lambda_2 A} = \frac{\frac{1}{\lambda_2}}{\frac{l_1}{\lambda_1} + \frac{l_2}{\lambda_2}} (T_1 - T_2)$$

2.1.2 CASO DI 4 MATERIALI

In questo caso analizzo uno strato piano con 4 materiali diversi di spessore rispettivamente l_1, l_2, l_3, l_4 e conducibilità termica $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$. Indico infine le temperature T_1 e T_2 rispettivamente sulle facce esterne.

Anche in questo caso come nel caso precedente si nota che ogni materiale ha una certa resistenza termica dipendente dallo spessore l e dalla conducibilità λ . Si calcola la resistenza totale in questo modo:

$$R_{tot} = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 = \frac{l_1}{\lambda_1 A} + \frac{l_2}{\lambda_2 A} + \frac{l_3}{\lambda_3 A} + \frac{l_4}{\lambda_4 A}$$

2.2 CONDUITTIVITÀ DELLE SOSTANZE

Il valore della conduttività esprime quanto conduce una certa sostanza in qualsiasi stato della materia ; solido, liquido o gassoso. Essa viene definita in $[\frac{W}{m^{\circ}C}]$.

La conduttività termica di un dato materiale dipende dal suo stato e può variare con la temperatura , la pressione e con i trattamenti precedenti che il materiale ha subito. Vengono ora svolti alcuni cenni sulla conduttività di sostanze omogenee, solide, liquide e gassose. [4]

2.2.1 SOSTANZE SOLIDE

Per quanto riguarda i solidi è possibile fare le seguenti osservazioni:

- I materiali metallici e i conduttori elettrici hanno valore di λ più elevato dei materiali dielettrici; i migliori materiali elettrici, come rame e argento, sono pure ottimi conduttori termici.
- La conduttività delle sostanze cristalline è sempre maggiore di quella delle sostanze amorfe; ovvero la conducibilità dei solidi è superiore a quella dei liquidi che è superiore a quella dei gas.
- Tutte le sostanze sottoposte a sforzi direzionali durante la loro formazione o durante lavorazioni successive, presentano anisotropia. La conducibilità termica dipende dal tipo, dal numero, e dall'entità dei trattamenti, meccanici, termici subiti.
- Il valore di λ dipende dalla presenza di sostanze impure e dal modo in cui esse sono inserite nella struttura.

2.2.2 SOSTANZE LIQUIDE

Per le sostanze liquide il calcolo della conduttività termica è assai complesso a causa dai moti convettivi che alterano le prove di misura. La conduttività diminuisce all'aumentare della temperatura. L'acqua tra i liquidi non metallici ha la conduttività termica più alta. I valori sono nettamente inferiori rispetto ai materiali solidi. [4]

2.2.3 SOSTANZE GASSOSE

Nei gas la conduzione è dovuta al movimento disordinato delle molecole. Vi è cessione di energia cinetica dalle zone di molecole a più alta velocità a zone con molecole a più bassa velocità. La conduttività di sostanze gassose non dipende dalla pressione. Infatti all'aumentare della pressione aumentano il numero di molecole, ma allo stesso tempo diminuisce il loro cammino libero. Tuttavia questa condizione non è verificata per bassa pressione. Si nota dal grafico i vari valori di λ in funzione della temperatura.

Nella figura si notano i diversi valori della conduttività di diversi materiali in forma solida, liquida e gassosa. L'acqua ha una conducibilità circa 10 volte inferiore rispetto a materiali solidi come l'acciaio. [4]

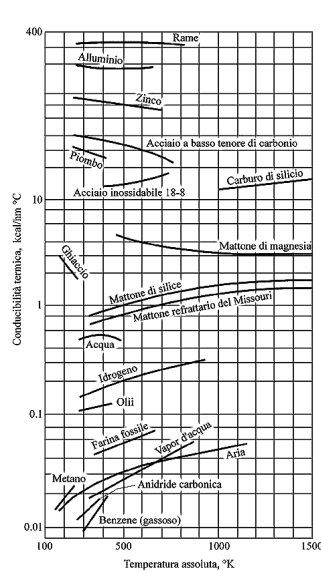


Figura 2.2.1: conducibilità termica

2.3 DILATAZIONE DEI MATERIALI

Nei materiali metallici l'influenza della temperatura provoca variazioni di volume, si possono avere espansioni o compressioni. L'effetto prende il nome di *dilatazione termica*.

Un semplice caso è quello di considerare la dilatazione termica di una ringhiera durante l'arco di un anno; in estate si avrà un'espansione di volume, mentre in inverno si avranno delle compressioni dovute alle basse temperature. I volumi di espansione considerati nell'esempio sono molto piccoli in relazione alla lunghezza della ringhiera.

Analizzo ora il caso in cui si ha un unico materiale che viene sottoposto a una variazione di temperatura indicata con ΔT . Nel materiale avviene il seguente fenomeno: un atomo acquisisce energia termica e comincia a vibrare, si comporta come se avesse un raggio atomico di dimensioni maggiori. La distanza media degli atomi, e quindi la distanza generale del corpo, aumentano. La variazione della lunghezza del materiale per unità di lunghezza Δl , si esprime mediante il coefficiente lineare di espansione termica α , definito dalla seguente relazione:

$$\alpha = \frac{1}{l} \frac{\Delta l}{\Delta T}$$

Dove ΔT indica l'incremento di temperatura e l la lunghezza iniziale. L'unità di misura di α è il reciproco della temperatura cioè $[\frac{1}{^\circ\text{C}}]$.

Dalla relazione si può notare che un basso valore di α indica che l'energia di legame degli atomi di materiale è elevata, mentre alte temperature di fusione indicano basso valore del coefficiente di dilatazione termica, e un forte legame atomico.

Conoscendo il valore del coefficiente lineare di espansione termica è possibile determinare il nuovo valore della lunghezza avvenuta con la variazione di temperatura:

$$l_f = l_0 (1 + \alpha \times \Delta T)$$

In cui si indica con l_0 la temperatura iniziale della struttura, con l_f la lunghezza finale.

La relazione appena vista indica una dilatazione lineare; durante il riscaldamento di un corpo avviene la dilatazione nelle tre dimensioni dello spazio. In base alla dimensione considerata, monodimensionale, bidimensionale o tridimensionale si hanno rispettivamente dilatazioni lineare, superficiale e volumetrica. La dilatazione volumetrica avviene come già detto nelle tre dimensioni dello spazio, nella direzione x , y e z . Come già visto nella dilatazione lineare avremo:

$$x_f = x_0 (1 + \alpha \times \Delta T)$$

$$y_f = y_0 (1 + \alpha \times \Delta T)$$

$$z_f = z_0 (1 + \alpha \times \Delta T)$$

Moltiplico membro a membro le tre equazioni ottengo:

$$x_f y_f z_f = x_0 y_0 z_0 (1 + \alpha \times \Delta T)^3$$

In cui il prodotto tra x_f , y_f e z_f indica il volume finale, mentre il prodotto tra x_0, y_0 e z_0 indica il volume iniziale.

Sviluppando il cubo tra parentesi si nota,

$$x_f y_f z_f = x_0 y_0 z_0 (1 + 3\alpha \times \Delta T + 3\alpha^2 \times \Delta T^2 + \alpha^3 \times \Delta T^3)$$

essendo il coefficiente di dilatazione termica basso, che i termini di ordine superiore al secondo sono trascurabili essendo infinitesimi. Dunque la dilatazione volumetrica si può così esprimere:

$$x_f y_f z_f = x_0 y_0 z_0 (1 + 3\alpha \times \Delta T)$$

Se si considera il coefficiente di dilatazione termica dell'acciaio inossidabile AISI 316 $\alpha = 16 \times 10^{-6} [\frac{1}{^\circ\text{C}}]$ i valori di α^2 e di α^3 sono trascurabili.

Confrontando le relazioni del caso lineare e volumetrico si ottiene, nel caso in cui il materiale sia isotropo, che $[\alpha_v = 3\alpha_l]$.

Invece se il materiale è anisotropo, ovvero dipende dalla direzione cristallografica lungo cui è misurato, il coefficiente di dilatazione volumetrico viene calcolato con la seguente formula:

$$\alpha_v = \frac{1}{V} \frac{\Delta V}{\Delta T}$$

La trattazione diventa più complicata quando la struttura da considerare è composta da più materiali. In questo caso i materiali avranno diverso coefficiente di dilatazione termica e si crea nella struttura un certo grado di stress. Questo stress non è altro che la tensione superficiale espressa appunto in $[MPa]$. Il valore teorico dello stress indicato con σ viene così determinato:

$$\sigma = E\Delta T(\alpha_1 - \alpha_2)$$

Dipende dalla differenza di temperatura, dall'elasticità E e dalla differenza tra i valori di dilatazione. Proprio questi fattori sono determinanti per capire la sollecitazione diversa a cui sono sottoposti i vari materiali della struttura. A tale proposito vengono fatti due esempi composti da due materiali ciascuno.

PRIMO ESEMPIO

Considero di avere due materiali uno sovrapposto all'altro con $\alpha_1 > \alpha_2$. Con l'aumento della temperatura il materiale con α maggiore comincia ad espandersi, mentre quello con α minore si comprime. L'effetto è visibile attraverso la curvatura della struttura.

SECONDO ESEMPIO

Nel secondo caso si supponga che i due materiali disposti sempre nella stessa forma abbiano invece $\alpha_1 < \alpha_2$. L'espansione avviene nello strato con α maggiore mentre la compressione nella zona con α minore. I due esempi si possono analizzare in figura.

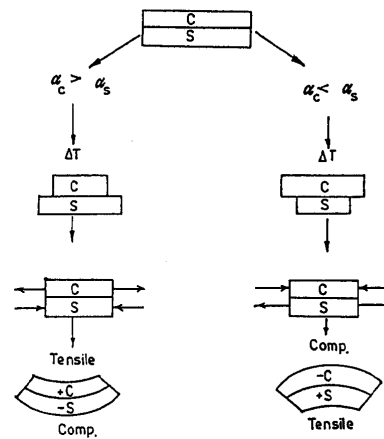


Figura 2.3.1: stress termico

È evidente lo stress residuo nei due materiali, sia nel substrato sia nel rivestimento superficiale.[5]

2.4 EFFETTO DELLA TEMPERATURA

In molte applicazioni l'aumento della temperatura provoca dei cambiamenti nella parte superficiale in cui essa viene prodotta. Il cambiamento più evidente, anche visto ad occhio nudo, è quello del cambiamento del colore. Questo può essere voluto per una buona causa come ad esempio per ragioni strutturali, come l'indurimento di una certa parte attraverso la tempra oppure senza un effetto voluto, come il cambiamento di colore in una piastra o in una pentola in cui viene fornita una certa fonte di calore.

Il riscaldamento di acciaio inox, sia essa un'applicazione specifica come ad esempio la saldatura sia in un'applicazione superficiale di riscaldamento provoca come conseguenza il cambiamento di colore della parte interessata. Esso dipende da diversi fattori che sono legati al valore della resistenza all'ossidazione dell'acciaio. La tinta di colore che si forma è dovuta al progressivo ispessimento dello strato di ossido superficiale. In particolare nell'acciaio si crea un cambio cromatico in funzione della temperatura, infatti all'aumentare della temperatura il colore cambia.

Oltre alla temperatura, altri parametri che influenzano il cambiamento cromatico sono i seguenti: composizione dell'acciaio, atmosfera, tempo e finitura superficiale.

COMPOSIZIONE DELL'ACCIAIO:

il contenuto di cromo è il fattore più importante per determinare la resistenza all'ossidazione. Più alto è il contenuto di cromo più aumenta la resistenza al calore dell'acciaio e quindi il cambiamento di colore avviene in ritardo.

ATMOSFERA:

il livello di ossigeno disponibile per il processo di ossidazione riguarda anche il colore formato. Normalmente nel riscaldamento in aria si assume una percentuale di ossigeno del 20%. In altri processi, come ad esempio nella saldatura si formano altri gas di protezione o rivestimento che possono influenzare il grado di colore della tinta formata.

TEMPO:

il tempo è un altro fattore importante nel processo dell'ossidazione. Infatti all'aumentare del tempo nel materiale viene a crearsi una maggiore temperatura che provoca un cambio di colore. Con tempo si intende anche la ripetibilità della prova; più volte viene ripetuta la prova più significativo sarà il colore ottenuto.

FINITURA SUPERFICIALE:

la finitura superficiale originale sull'acciaio può influenzare la velocità di ossidazione e l'aspetto del colore formato. Superfici più ruvide possono ossidarsi più velocemente e quindi possono apparire con colori più intensi, per un dato insieme di condizioni. Poiché i colori sono formati da interferenze luminose, allora la levigazione della superficie può anche influenzare l'aspetto dei colori formati. Quindi vale la pena notare che la finitura superficiale può influenzare la conclusione del colore visto.

Ci sono quindi, a seconda dei fattori che influenzano il cambiamento cromatico dell'acciaio, diverse tabelle. Considero significativa la tabella in cui vengono messi in relazione i colori con le varie temperature. Nella tabella seguente vengono rappresentati i colori di temperatura che possono formarsi nell'acciaio inox AISI 403 se viene riscaldato in aria.[9]

Tabella 2.1: colore in funzione della temperatura

| COLORE | TEMPERATURA APPROSSIMATA [°C] |
|-------------------|-------------------------------|
| GIALLO PALLIDO | 290 |
| GIALLO PAGLIERINO | 340 |
| GIALLO SCURO | 370 |
| MARRONE | 390 |
| VIOLA MARRONE | 420 |
| VIOLA SCURO | 450 |
| BLU | 540 |
| BLU SCURO | 600 |

2.5 EBOLLIZIONE

Durante il riscaldamento di un liquido in un recipiente posto in contatto con una sorgente di calore si manifesta in determinate circostanze il fenomeno noto come ebollizione.

Si tratta di un cambiamento di fase liquido-vapore che interessa sia la massa di liquido sia la massa che evapora. L'evaporazione inizia quando la temperatura della superficie del recipiente supera quella di saturazione del liquido che la lambisce. Se il liquido è in quiete il moto prodotto dalla massa prende il nome di "pool boiling".

Il processo di ebollizione in realtà è assai complesso, ci sono diversi regimi con meccanismi di scambio termico difficili da studiare e interpretare. Per analizzare il fenomeno si possono descrivere i passaggi dell'ebollizione.

All'aumentare della temperatura superficiale del fondo della pentola, il surriscaldamento dello strato adiacente alla superficie è tale che in esso si originano e crescono rapidamente delle bolle di vapore. Questo regime viene chiamato ebollizione nucleata. Le bolle di vapore si producono contemporaneamente in diversi punti della superficie interna in ordine sparso. Al crescere della temperatura superficiale le bolle aumentano sia in diametro sia in numero, raggiungendo in poco tempo il pelo libero. Ne consegue la formazione di uno strato di vapore che ricopre completamente la superficie. All'inizio i moti sono instabili, si crea all'intero del liquido dei moti convettivi. Essi fanno sì che le colonne di vapore ascendenti vengono separate tra loro dal liquido in moto discendente verso la superficie per prendere a sua volta il posto della massa evaporata. Ad un certo punto lo strato di vapore riempie completamente la superficie interna, e dal bordo interno si staccano con continuità bolle di vapore. Il regime di ebollizione caratterizzato dalla presenza di un film stabile di vapore presso il bordo si dice ebollizione a film.

Nella superficie piana interna si creano le bolle di vapore. Esse si creano in quelli punti che presentano certe cavità microscopiche. Le cavità possono agire da centri di nucleazione, poiché possono trattenere al loro interno vapore. Durante l'ebollizione il liquido all'interfaccia evapora, il vapore nella cavità aumenta di volume, e tende se il liquido è prossimo alla saturazione a staccarsi. Nella cavità rimane però una quantità minima di vapore che formerà subito un'altra bolla.

Capitolo 3

STRUMENTI DI MISURA

Nel seguente capitolo vengono descritti tutti gli strumenti usati per realizzare la postazione di misura. In ordine si parte dall'analisi del linguaggio di programmazione LabView, successivamente la strumentazione fisica usata come termocoppie, l'analizzatore di rete, l'Agilent e i vari componenti dedicati alla connessione. Inoltre vengono studiate le caratteristiche delle strumentazioni adottate.

3.1 INDUTTORE

La ricerca utilizza come fonte di calore un piano cottura ad induzione. Il seguente dispositivo è un piano a induzione professionale fornito dall'azienda Electrolux Professional. Si tratta del modello Foucault a zona singola con potenza massima di 5,2 kW. Esso è composto da un contenitore metallico contenente la parte circuitale, ricoperto nella parte superiore da una lastra in vetro ceramica di colore nero, su cui viene individuata la zona di cottura attraverso una serigrafia di forma circolare che ci permette di posizionare la pentola in modo preciso sopra l'induttore. Le principali caratteristiche sono le seguenti:

- Il modulo ha un generatore ad induzione che fornisce fino a 5.2kW
- Composto da una singola bobina ad induzione dotata di un sensore di temperatura NTC
- Alimentazione trifase 360 - 415V
- Il controllo del modulo della potenza può essere fatto da un potenziometro rotante.
- Dotato di 3 ventole di raffreddamento
- Conformità alle norme di sicurezza : EN60335-1 , EN60335-2-6 , EN60335-2-36
- Temperatura di esercizio 85 ° C
- Grado di inquinamento : 3
- Classe di isolamento: 0

ALIMENTAZIONE

L'alimentazione del dispositivo avviene attraverso la connessione alla rete trifase. È disposto di una morsettiera a molla con 3 fasi e il cavo di terra. I cavi hanno una sezione di 4 mm² e possono sopportare una corrente massima di 32A e una tensione di 630V.

CONTROLLO

La potenza del dispositivo viene comandata da un potenziometro avente 10 posizioni fisse. Il potenziometro è lineare: nella posizione di riposo la resistenza è nulla, mentre nella posizione 10 la resistenza è di 10 kW. La potenza fornita è pertanto regolata da una manopola rotativa avente 10 posizioni, ovvero una posizione di riposo e 9 posizioni di funzionamento fino alla potenza massima di 5,2kW. Nella figura qui sotto è possibile notare l'interpolazione tra i valori di tensione e i rispettivi valori di potenza.

| 5.2kW SW version | | |
|------------------|----------------------|-----|
| Level | Power Request (Watt) | % |
| 0 | 0 | 0 |
| 1 | 166 | 3 |
| 2 | 305 | 6 |
| 3 | 533 | 10 |
| 4 | 736 | 14 |
| 5 | 1500 | 29 |
| 6 | 2100 | 40 |
| 7 | 3000 | 58 |
| 8 | 4000 | 77 |
| 9 | 5200 | 100 |

Tabella 3.1: controllo induttore

Un altro metodo possibile per il controllo della potenza dell'induttore è attraverso un'apposita interfaccia utente: attraverso un bus dati MACS. Questa connessione non è possibile usarla quando è in funzione il potenziometro. Attraverso questo bus di controllo è possibile impostare i dati di ingresso e monitorare dei dati in uscita come la temperatura raggiunta dalla bobina dell'induttore.

SICUREZZA

Nell'induttore sono presenti anche dei led luminosi (rosso e verde) usati per indicare il corretto funzionamento del dispositivo. Ci sono quindi quattro possibili combinazioni: 1. La condizione di OFF quando i due led sono entrambi spenti il dispositivo è spento. 2. Condizione di ON quando il verde è acceso e il rosso spento si ha il corretto trasferimento di potenza alla pentola. 3. Quando il dispositivo è attivo ma non è stata rilevata alcuna pentola, il led verde lampeggia e il led rosso è spento. 4. Il verde lampeggia e il led rosso è attivo, situazione di guasto rilevato. Oltre ai segnali luminosi il dispositivo è dotato di un sensore che monitora il livello di temperatura. Nel funzionamento nominale bisogna fare in modo che la temperatura non superi un certo valore per non evitare lo spegnimento del dispositivo. Se questo avviene è necessario resettare il potenziometro, portandolo prima nella posizione di OFF e successivamente selezionandolo nella potenza desiderata.

Un altro sensore importante al fine del corretto funzionamento è il sensore NTC, ovvero un termistore. Questo dispositivo protegge il circuito elettronico del dispositivo essendo posto sul dissipatore. Ci sono quindi dei limiti di potenza in funzione della temperatura del dissipatore. Pertanto è necessario raffreddare la bobina dell'induttore e il circuito di potenza attraverso delle ventole di raffreddamento posizionate sul lato in modo tale da aspirare aria dall'esterno e iniettarla all'interno del involucro. La temperatura massima dell'aria di ingresso, per permettere di eseguire il dispositivo alla piena potenza è di 40 °C.

BOBINA

La bobina utilizzata nel seguente piano ad induzione ha un diametro di 230 mm e un'induttanza di 220 microH. Di conseguenza il diametro della pentola deve, per ottenere un ottimo accoppiamento, essere dello stesso diametro dell'induttore. Per cui pentole con un diametro minore avranno minore resa, quindi uno scambio minore. [10]

3.2 LABVIEW

LabView (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) è un ambiente di sviluppo per applicazioni principalmente orientate: all'acquisizione di dati, al controllo di strumenti, memorizzazione dati, analisi delle misure ed elaborazione dei segnali.

Elaborato dalla National Instruments, si differenzia da altri ambienti di sviluppo come Basic o C per un aspetto importante: mentre in altri linguaggi si usa un linguaggio testuale, in LabView viene usato un linguaggio di programmazione grafico, il G , attraverso cui i programmi creati hanno la forma di diagrammi.

Il suo contributo specifico allo sviluppo lo si deve al vasto numero di schede di acquisizione e sistemi di misura, dalla quale è usato come principale software attraverso cui interagiscono e vengono programmate.

LabView è un linguaggio di programmazione di tipo grafico denominato “G–Language”, il quale consente di realizzare programmi in forma di diagrammi a blocchi, in quanto utilizza icone invece di linee di testo per creare applicazioni.

Rispetto ad altri linguaggi di programmazione la differenza sostanziale è l’ambiente grafico, sia dell’interfaccia utente sia dell’ algoritmo di elaborazione. Un’altra differenza importante è che un programma LabView non esegue il flusso delle istruzioni, ma bensì , esegue il flusso di dati. Infatti i programmi scritti in LabView tendono a essere data-driver, nel senso che viene seguito il flusso dei dati tra i diversi blocchi operativi rispetto alla sequenza delle istruzioni da eseguire. Rispetto ai linguaggi di programmazione tradizionali LabView ha anche molte similitudini: presenta tutti i tipi di dati e gli operatori predefiniti di uso comune, permette di generare nuovi tipi di dati e di controllare l’esecuzione dei programmi ricorrendo a strutture di controllo come ad esempio con dei classici cicli.

LabView mette inoltre a disposizione del programmatore una serie di librerie di funzioni che possono essere richiamate ed utilizzate all’interno dei programmi; le librerie comprendono funzioni di uso comune(come ad esempio funzioni aritmetiche, logiche, statistiche ecc.), ma anche funzioni specializzate per l’acquisizione e il controllo di strumentazione numerica come ad esempio l’interfaccia IEEE-488, la trasmissione di dati mediante l’uso di porte speciali oppure mediante il protocollo di comunicazione TCP/IP. È possibile inoltre definire nuove funzioni ed arricchire le librerie in dotazione a LabView.[11]

3.2.1 STRUTTURA LABVIEW

I programmi che vengono realizzati in LabView vengono chiamati strumenti virtuali (VI, *Virtual Instrument*). L’utente può modificare il valore di alcune grandezze, agendo su opportune manopole o interruttori visualizzati dal programma, e può osservare il risultato delle elaborazioni condotte su display grafici molto simili a quelli che si trovano sulla strumentazione numerica/digitale. I VI contengono tre componenti principali:

1. pannello frontale
2. schema a blocchi
3. icona/connettori

FRONT PANEL:

il pannello frontale è l’interfaccia utente del VI. Può essere personalizzato dal programmatore per premettere una visione d’insieme immediata e chiara. Viene realizzato con controlli e indicatori, che costituiscono i terminali interattivi d’ingresso e di uscita.[11]

- *Controlli*: variabili di ingresso che possono essere modificate agendo sul pannello frontale, mediante cursori potenziometrici, pulsanti, ed altri dispositivi d’ingresso. Simulano i dispositivi strumentali d’ingresso e forniscono i dati allo schema a blocchi del VI.
- *Indicatori*: variabili d’uscita il cui valore può essere modificato dal programma , e non dall’utente. Questi sono grafici , Led di carattere booleano, indicatori numerici digitale e così via.

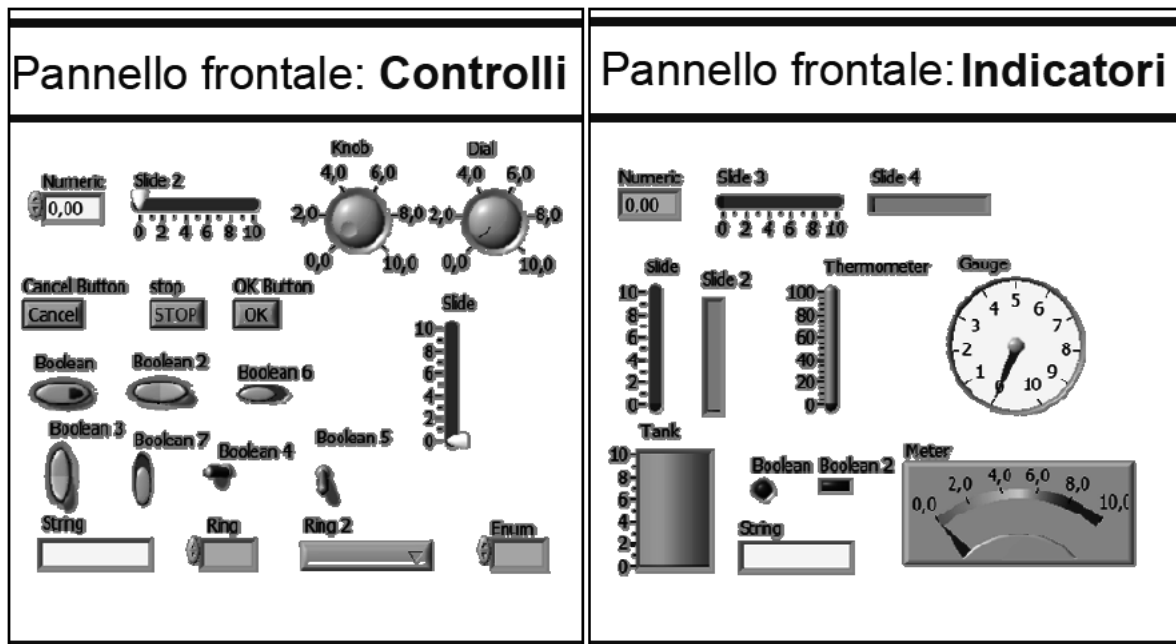


Figura 3.2.1: controlli e indicatori del Front Panel

BLOCK DIAGRAM:

il diagramma a blocchi contiene il codice sorgente in formato grafico. Esso è costituito da degli oggetti opportunamente connessi tramite “fili”. Gli oggetti dello schema a blocchi comprendono terminali, subVI, funzioni, costanti, strutture e collegamenti che trasferiscono i dati ad altri oggetti dello schema a blocchi. Essi possono essere connessi tra loro e possono utilizzare varie funzioni. I terminali sono funzioni di ingresso e di uscita che scambiano informazioni tra il pannello frontale e lo schema a blocchi, i terminali sono paragonabili a parametri e costanti nel linguaggio di programmazione testuale. I terminali possono essere così suddivisi:

- *Terminali di controlli e di indicatori*: sono i corrispondenti dei controlli e indicatori selezionati nel pannello frontale. I dati inseriti nei controlli del pannello frontale si inseriscono nello schema a blocchi tramite i terminali di controllo. I dati passano poi per le varie funzioni. Quando queste completano i loro calcoli, producono nuovi valori di uscita, che arrivano ai terminali indicatori, aggiornando gli indicatori del pannello frontale.
- *Terminali nodo*: oggetti dello schema a blocchi con un numero variabile di ingressi e uscite che compiono delle operazioni quando il VI è in esecuzione. Essi sono analoghi a dichiarazioni, operazioni funzioni e subroutine. Le principali strutture sono ad esempio cicli while e “structure-case” il cui stato di esecuzione dipende dal verificarsi o meno di certi eventi.

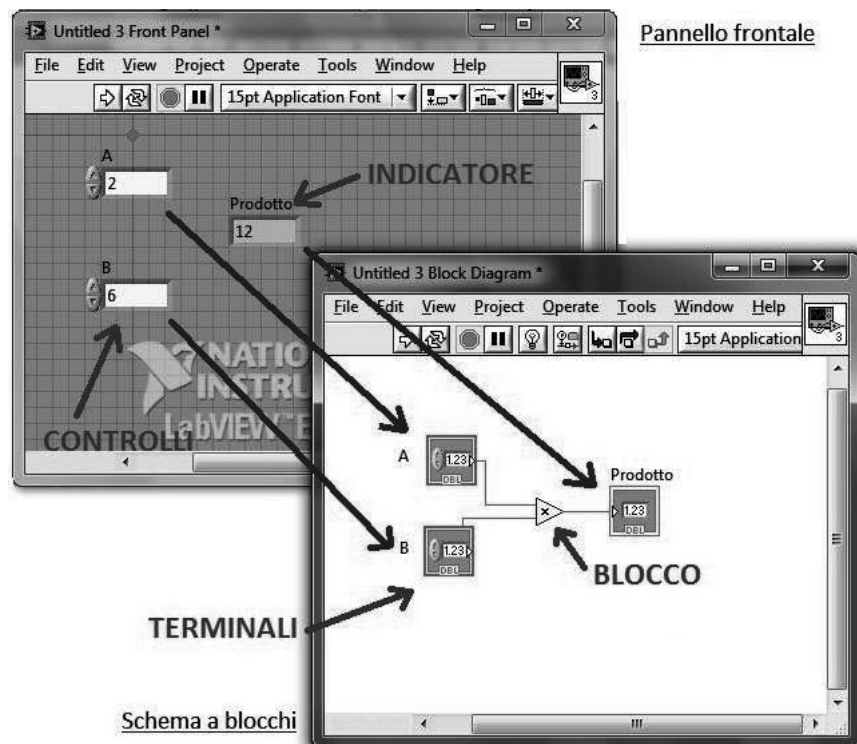


Figura 3.2.2: collegamento tra Block Diagram e Front Panel

ICONA/CONNETTORI:

Essendo LabView un linguaggio di programmazione ad oggetti è facile che un VI venga utilizzato come un sub-VI all'interno di un altro VI. Per fare questo è necessario attribuire al sub-VI le variabili che riceve in ingresso e quelle che restituisce in uscita, compilando il campo di icona/connettori.[11]

- *Icona*: simbolo grafico di piccole dimensioni che rappresenta simbolicamente il VI. L'icona permette di trasformare il programma in un oggetto. È visibile in un angolo in alto a destra sia del Pannello Frontale sia del Block Diagram. Quando il VI viene impiegato all'interno di un altro VI si presenta tramite la propria icona.
- *Connettori*: sono un insieme di terminali che corrispondono al controllo a agli indicatori del VI. Essi stabiliscono i parametri di ingresso e di uscita del VI. In ingresso vengono di solito connessi i controllori, mentre in uscita vengono connessi gli indicatori. Per creare un terminale di ingresso o di uscita, basta, associare ai vari terminali dell'icona un rispettivo terminale di controllo o di indicatori. In questo modo definendo per ogni VI i connettori in ingresso e in uscita è possibile usare ciascun VI come subVI. Così facendo si può semplificare notevolmente il Block Diagram.

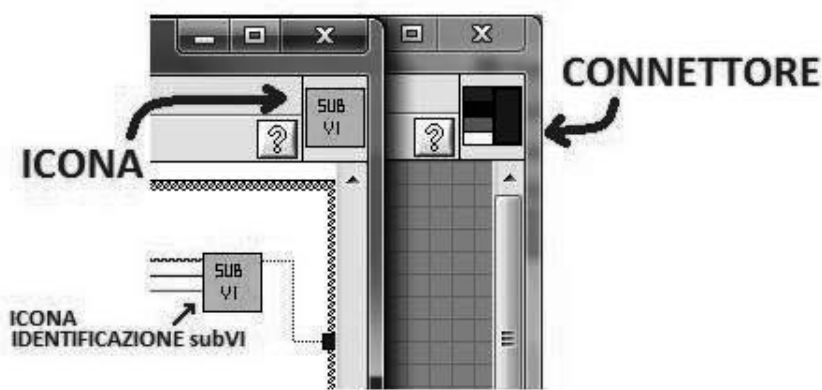


Figura 3.2.3: icone e connettori

3.2.2 TIPI DI DATI E PRINCIPALI STRUTTURE

LabView mette a disposizione un'ampia gamma di tipologie di dati a cui è associato uno specifico colore. Ad esempio verde per i booleani, blu per gli interi, arancio per i double, ecc. ecc.

Lo stesso colore viene associato ai collegamenti che uniscono oggetti e funzioni che operano con dati dello stesso genere. I vari dati si possono a loro volta organizzare in matrici, vettori o Cluster (un insieme eterogeneo di dati). Va inoltre specificato che nella filosofia di LabVIEW i dati viaggiano in pacchetti (data packets) per cui se un pacchetto, per portare l'informazione dovuta, ha la necessità di unire un array con una stringa il programma realizza in automatico un cluster formato da tali elementi.

Oltre ai vari tipi di dato in LabView sono presenti anche diversi tipi di strutture, molto simili ai cicli dei linguaggi testuali, sfruttabili dall'utente per la programmazione.

Ogni struttura o ciclo viene rappresentata con una diversa veste grafica: l'area delimitata dal bordo dimensionale appartenente al corpo del ciclo, mentre i terminali per mezzo dei quali le strutture si connettono ad altri blocchi o strutture sono detti tunnel. Se al tunnel d'ingresso sono disponibili dati validi la struttura viene eseguita automaticamente e al termine dell'elaborazione essa fornisce il risultato al tunnel di uscita. Occorre precisare che i dati d'ingresso vengono letti una sola volta all'inizio del ciclo e che i dati in uscita vengono aggiornati solo quando il ciclo ha termine.

Si descrivono brevemente i principali tipi di strutture:

- **CICLO FOR** Struttura di controllo che esegue iterativamente una porzione di programma per un numero di volte stabilito dall'utente. Esso si distingue dalle altre strutture per mezzo dei terminali "N" e "i" chiamati rispettivamente Count Terminal, indicante il numero di iterazioni da eseguire e quindi variabile d'ingresso, e Iteration Terminal, indicante il numero di iterazioni completate e quindi variabile d'uscita.
- **CICLO WHILE** Ripete una porzione di codice fino al verificarsi di una determinata condizione. Il ciclo viene eseguito fino a quando il Conditional Terminal (variabile di ingresso booleana) assume un determinato valore. L'Iteration Terminal contiene invece il numero di iterazioni completate ed è identico a quello visto per il ciclo For.
- **CASE O IF** Eseguono una parte di codice piuttosto che un'altra a seconda del valore assunto dalla variabile di controllo detta Selector Terminal. Per ottenere una struttura If è sufficiente collegare il Selector Terminal ad una variabile di tipo Boolean. Una struttura Case, invece, si crea con una variabile di tipo Integer, String o di un altro tipo comunque enumerabile.
- **STRUTTURA SEQUENCE** Permettono di controllare il flusso di esecuzione del programma. Essa contiene uno o più sotto-diagrammi (detti frame) che vengono eseguiti in sequenza.

Esistono due tipi di queste strutture, quelle Flat e quelle Stacked, dove le prime visualizzano le operazioni da svolgere in sequenza tutte insieme e una a fianco dell'altra, mentre le seconde una alla volta.

- **STRUTTURA NODE** consente di sfruttare formule ed espressioni derivate dal linguaggio C all'interno del Block Diagram invece di utilizzare i blocchi e le normali funzioni presenti in LabView.[11]

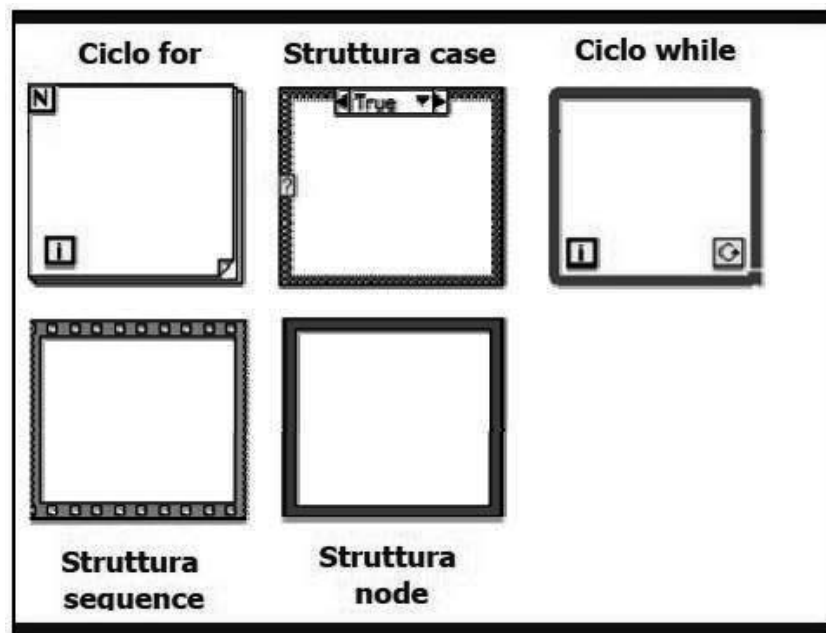


Figura 3.2.4: principali strutture di LabView

3.2.3 CONNESSIONE STRUMENTI

L'ambiente LabView permette di comunicare e di controllare la strumentazione esterna usando gli standard GPIB, RS-232, VXI, Ethernet, USB e altri standard hardware. Utilizzando l'applicazione "Measurement & Automation Explorer" è possibile riconoscere automaticamente gli strumenti collegati, installare i driver ad essi necessari e modificare i driver già installati.

Un driver di strumentazione (Instrument Driver) è un programma che permette di controllare un determinato strumento. Instrument Driver elimina la necessità di conoscere il linguaggio di programmazione a basso livello proprio di ogni singolo strumento.

LabView mette a disposizione alcuni VI che possono essere utilizzati per sviluppare driver per la propria strumentazione. Questi VI possono essere raggruppati nelle seguenti categorie:

- Funzioni Standard VISA.
- Funzioni GPIB.
- Funzioni di comunicazione con Porta Seriale.

VISA è l'acronimo di "Virtual Instrument Software Architecture". Infatti, VISA è una libreria di VI che permette il controllo di tutti gli standard di comunicazione presenti sul PC (GPIB, serial, Ethernet, USB) e opera le chiamate appropriate che dipendono dal tipo di strumento da comandare. VISA opera quindi ad un livello alto e richiama il codice di basso livello per il controllo dell'hardware.

Utilizzando questi strumenti è quindi relativamente semplice realizzare un banco di test che permetta, tramite la gestione di un computer, l'utilizzo di più strumenti contemporaneamente che possano svolgere le operazioni di controllo richieste.[11]

3.3 TERMOCOPPIE

La termocoppia rappresenta lo strumento più utilizzato, sia in ambito industriale sia nell'ambito della ricerca, nella misura della temperatura.

Ponendo a contatto due fili metallici di natura diversa e mantenendo le due giunzioni a diversa temperatura, il sistema genera una forza elettromotrice dell'ordine di alcuni millivolt che provoca, nel caso il circuito sia chiuso, un passaggio di corrente; la nascita di tensione ai capi di un filo metallico dovuta ad una differenza di temperatura è un fenomeno noto come effetto Seebeck mentre il sistema che sfrutta questo effetto è stato denominato termocoppia.

Il valore della forza elettromotrice è strettamente collegata alla differenza di temperatura esistente fra i due giunti.

Ponendo i giunti freddi ad una temperatura di riferimento (per esempio bagno termostatico a 0°C in ghiaccio) e il giunto caldo a contatto con il corpo di cui si vuole conoscere la temperatura, la misura della forza elettromotrice sarà proporzionale alla temperatura al quale si trova il giunto caldo.[6]

3.3.1 FUNZIONAMENTO TERMOCOPPIE

Il principio di funzionamento delle termocoppie è noto come effetto Seebeck . Se prendo un filo metallico avente due temperature differenti alle sue estremità, viene a formarsi una forza elettromotrice nota come Seebeck electromotive force *fem*. Questo fenomeno avviene se il materiale non è tutto alla stessa temperatura.

Una termocoppia è costituita da due fili metallici collegati ad un estremo avente una certa T_1 *hot junction* e aventi all'altro estremo una stessa temperatura T_2 *cold junction*.

La tensione che si va a misurare sul giunto freddo, agli estremi dei due fili è strettamente correlata con la differenza di temperatura tra i due giunti.[6]

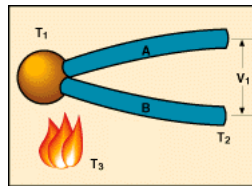


Figura 3.3.1: funzionamento termocoppia

Da quanto detto si sviluppa una differenza di potenziale in ogni filo disposto ad una differenza di temperatura, non è necessario quindi che i due fili siano connessi assieme.

Ogni materiale sviluppa una certa *fem* secondo la seguente legge:

$$E = \int_{T_2}^{T_1} \sigma(T) dT$$

Riscrivibile anche come:

$$E_\sigma = E_\sigma(T_1) - E_\sigma(T_2)$$

dove E_σ è il potenziale dato dal coefficiente di Seebeck assoluto definito come: $\sigma(T) = \frac{dE_\sigma}{dT}$.

In una zona in cui E_σ è sufficientemente lineare e il coefficiente di Seebeck è circa costante, questa equazione è approssimata come:

$$E_{\sigma} = \sigma(T_1 - T_2)$$

Nella pratica però la non linearità della E_{σ} è presa sempre in considerazione. Oltre al coefficiente di Seebeck assoluto viene utilizzato quello relativo. Se prendo una coppia di fili , rispettivamente A e R, a formare una termocoppia tra le T_1 e T_2 , ho la seguente *fem*:

$$E_{\sigma} = \int_{T_2}^{T_1} \sigma_A(T) dT - \int_{T_2}^{T_1} \sigma_R(T) dT$$

quest'ultima è riscrivibile come l'integrale tra T_1 e T_2 di un nuovo coefficiente $\sigma_{AR} = \sigma_A - \sigma_R$

Questo coefficiente è appunto detto coefficiente di Seebeck relativo. Esso è una proprietà intrinseca dei singoli materiali.

Si nota la necessità di costruire la termocoppia dotata di due materiali metallici; ovvero due fili con diverso coefficiente di Seebeck. Infatti la costruzione di una termocoppia con due materiali uguali, con $\sigma_A = \sigma_B$, comporta una tensione ai capi dei due fili nulla.

Il collegamento di un voltmetro ai morsetti della termocoppia, se i terminali del voltmetro sono dello stesso materiale metallico della termocoppia non influisce sulla misura di E , altrimenti si formano altre giunzioni che influenzano sulla misura.[6]

3.3.2 REGOLE DI CONNESSIONE TERMOCOPPIE

Per avere una tensione in uscita utilizzabile nelle applicazioni , una termocoppia deve avere due metalli di tipo diverso, due giunzioni e due temperature diverse. L'inserimento di un terzo metallo non cambia la tensione in uscita, purché le due nuove giunzioni siano alla stessa temperatura e il materiale inserito sia omogeneo. Variazioni di temperatura nei cavi di collegamento non alterano la tensione in uscita, purché i cavi di collegamento siano di materiale omogeneo.

3.3.3 TIPI di TERMOCOPPIE

Per la scelta del tipo di termocoppie bisogna considerare diversi fattori:

- Range di temperatura;
- Accuratezza desiderata;
- Problemi di compatibilità chimica;
- Vincoli d'installazione (dimensione dei cavi);
- Conduzione termica desiderata.

Una volta fatta un'accurata analisi si passa alla scelta della termocoppia. Esistono vari tipi di termocoppie che dipendono da quali materiali sono stati usati per la giunzione. Le termocoppie più utilizzate sono le termocoppie tipo T, J e K. Nella tabella seguente vengono elencate le diverse soluzioni.

| Tipo | Coppie metalli/leghe | Range di funzionamento [°C] |
|------|----------------------|-----------------------------|
| J | ferro/costanrana | -100 a 750 |
| K | cromel/alumel | 0 a 1100 |
| E | cromel/constantana | -150 a 500 |
| T | rame/constantana | -200 a 300 |
| B | Pt80/Rh20/Pt94-Rh6 | 600 a 1650 |
| S | Pt90-Rh10/Pt | 550 a 1500 |
| R | Pt90-Rh10/Pt | 550 a 1500 |
| N | nicrasil/Nichel | 0 a 1300 |

Tabella 3.2: tipi di termocoppie



Figura 3.3.2: termocoppia T

3.4 AGILENT 34972A

Questo strumento viene utilizzato per l'acquisizione e controllo di vari componenti in ambito industriale.

Rispetto ad altri strumenti presenti sul mercato è un sistema di acquisizione e comunicazione in grado di fornire alti standard di misura a basso costo. Viene usato quindi per lettura diretta di termocoppie, termistori, tensione e corrente in continua, tensione e corrente in alternata, resistenza, frequenza e periodo. La lettura visualizzata nel display ha una precisione di 6 digit e mezzo (22bit), accuratezza di base dello 0.004% e rumore di lettura estremamente ridotto.

L'Agilent 34972A è facilmente collegato a un PC attraverso diverse interfacce disponibili: GPIB, RS-232, LAN o USB. Vengono usate le interfacce GPIB e RS-232 per la connessione con i sistemi meno recenti, mentre si usano le porte LAN e USB per la connettività con PC. Attraverso la connessione LAN è possibile sfruttare un'interfaccia grafica Web che permette di configurare le misure e monitorare i risultati tramite un qualsiasi browser Web.

Il costruttore fornisce un Software BenchLink Data Logger che permette di monitorare temperature e tensioni nel tempo eseguendo l'analisi e il collaudo con istantanea archiviazione delle misure lette.

Per l'analisi dei dati l'unità 34972A può contare anche su driver software di supporto per C, Visual Basic, Visual Studio, Agilent VEE e National Instruments LabVIEW.

L'Agilent è fornito di una vasta gamma di moduli con diverse caratteristiche in base al tipo di misura. È possibile scegliere il livello di tensione, corrente, frequenza e velocità di lettura espressa in numero di canali letti al secondo.[13]



Figura 3.4.1: Agilent 34972A

3.5 YOKOGAWA WT210

Strumento di misura monofase per l'acquisizione digitale della potenza (Digital Power Meters) prodotto dalla ditta giapponese Yokogawa, leader nella produzione di strumenti di misura.

Usato per rilevare la potenza fornita al sistema. Rileva corrente, tensione, potenza attiva, potenza reattiva, power factor e angolo di fase. Ha un range di frequenza compreso tra 0.5 Hz a 100kHz. Dotato di tre display ciascuno composto da 7 segmenti per la visualizzazione della misura. Possono essere visualizzate tre misure simultaneamente, per esempio corrente, tensione e potenza attiva.

Inoltre sono presenti delle porte di comunicazione GPIB e interfacce seriali RS-232 con protocollo IEEE Standard 488.2 e codice ASCII.[12]



Figura 3.5.1: Yokogawa WT210

3.6 CONTROLLO DA REMOTO

Per controllare da remoto il piano di cottura ad induzione e stato creato da Electrolux Professional la strumentazione composta da Hardware, software e driver. Attraverso questi sistemi è stata resa possibile la comunicazione con l'induttore Foucoults. In questo modo dunque è possibile effettuare: il controllo dell'alimentazione, regolare la potenza fornita ed infine controllare eventuali anomalie presenti nel sistema. Il programma salva i dati più significativi in una tabella in formato Excel.

3.7 STRUMENTI DI CONNESSIONE

Nelle prove realizzate tra le varie configurazioni di pentola sono stati utilizzati diversi strumenti di connessione. In questo paragrafo verranno descritte le varie caratteristiche.

NASTRO ADESIVO KAPTON

Il nastro adesivo Kapton è un nastro giallo opaco adatto per resistere alle alte temperature. Il nastro utilizzato è prodotto dalla DuPont. Più precisamente è una pellicola poliimmide in grado di mantenersi stabile in un'ampia gamma di temperature, dai -269 ai 400 °C. Il Kapton

viene utilizzato in ambito elettronico, aerospaziale o in ambito elettrico nei circuiti di cablaggi civili o industriale. Il difetto del Kapton è principalmente dovuto alla scarsa resistenza allo stress meccanico.[14]

NASTRO ADESIVO ALLUMINIO

Il nastro adesivo in alluminio è una lamina di alluminio abbinata ad un sistema adesivo acrilico trasparente. Questo nastro di alluminio è studiato per funzioni di sigillatura permanente, tenuta , giunto o mascheratura.

SILICONE TERMICO

Il silicone termico è un sigillante siliconico monocomponente a reticolazione acetica che indurisce rapidamente per effetto dell'umidità atmosferica formando delle giunzioni eccezionalmente elastiche e resistenti. Viene utilizzato in tutte quelle applicazioni in cui si richieda un prodotto in grado di sopportare , a lungo sia temperature elevate sia ambienti umidi. Il range di funzionamento va dai -60 ai 280°C. Questo prodotto ha buona adesione al vetro , ceramica e acciaio.

COLLA BICOMPONENTE

La colla bicomponente è la LOCTITE 4090[15]; è un adesivo ibrido che combina la forza e la velocità di incollaggio, in grado di realizzare gli assemblaggi più difficili. Possiede un'elevata resistenza agli urti , una buona resistenza alle alte temperature e una forte resistenza agli ambienti umidi. Le caratteristiche sono le seguenti:

- Base chimica: ciano/acrilato
- epossidico
- Colore : da bianco opaco a giallo chiaro
- Gioco massimo :5mm
- Tempo di fissaggio : 180 secondi
- Temperatura di esercizio: da -40 a150 °C

3.8 LIQUIDO RISCALDATO

Nelle prove vengono scaldati oltre all'acqua , le cui proprietà sono già state trattate, anche un ulteriore liquido di origine vegetale chiamato Agar Agar. Nel seguente paragrafo vengono descritte le principali caratteristiche chimiche e fisiche.

3.8.1 AGAR

L'agar agar o anche conosciuto semplicemente come agar è un polisaccaride usato come gelificante naturale. Viene estratto da vari tipi di alghe rosse : la Graciliaria e la Gelidium. È stato usato per la prima volta 350 anni fa in Giappone, viene introdotto in Europa solo nel 1859 da Payen, che lo presentò all'accademia delle Scienze di Parigi. Come primo impiego scientifico viene utilizzato come terreno di coltura batterica da Robert Koch. Solo negli ultimi anni ha iniziato timidamente a diffondersi anche nel vecchio continente; usato nel settore alimentare nelle cucine Vegane e Biologiche.

3.8.1.1 PROPRIETÀ AGAR

L'agar è insolubile a freddo ma si scioglie in acqua portata ad ebollizione. Se successivamente viene lasciata raffreddare le sue molecole si legano tra di loro per formare un reticolo che intrappola l'acqua formando un gel. La temperatura per la formazione di gelatina è tra i 30 – 40 [°C]. A differenza di altre sostanze l'agar agar è termo-reversibile: si scioglie se scaldata e si riforma per raffreddamento. L'agar agar viene utilizzata in concentrazioni molto basse, a partire dallo 0.2%. Le concentrazioni tipiche a cui viene utilizzato sono tra lo 0.5% e il 2% rispetto all'acqua. Il fenomeno per cui la temperatura di fusione del gel è diversa dalla temperatura di solidificazione è chiamato isteresi. La temperatura di solidificazione (30 – 40 [°C]) e quella di fusione (80 – 90 [°C]) dipendono sia dal tipo di alga da cui l'agar è stato estratto che dal tipo di concentrazione a cui viene utilizzato. Originariamente la produzione di agar sfrutta il fenomeno chiamato sineresi; durante il congelamento le molecole del polimero si raggruppano in fibre. Quando il ghiaccio si scioglie l'acqua se ne va lasciando una struttura spugnosa costruita dalle fibre del polimero. In commercio l'agar si trova in diverse forme: in polvere, in strisce o a quadretti. Gli ultimi 2 metodi sono più naturali ma hanno proprietà gelificante inferiore rispetto alla polvere.

L'agar è un polisaccaride, un polimero formato da unità più semplici di cui quello fondamentale è l'agarobiosio. Esso è formato da due tipi di polimeri: l'agarosio e l'agaropectina che contribuiscono, in percentuali diverse, a formare l'agar. È l'agarosio la molecola responsabile della gelificazione. Questa avviene attraverso la formazione di legami a idrogeno tra le molecole di agarosio. Questo rende reversibile la trasformazione, a differenza di quanto avviene invece per altri gel di polisaccaridi come l'amido o la pectina. Questa trasformazione può essere ripetuta indefinitamente a meno di avere in soluzione sostanze o condizioni che possano idrolizzare o ossidare l'agarosio, ad esempio pH molto acido (< 2.5). [7]



Figura 3.8.1: agar allo stato solido

Capitolo 4

ELABORAZIONE PROGETTO

Nella cottura professionale sono sempre più necessari alti standard di efficienza e di uniformità termica, sia nella cottura statica sia nella cottura dinamica. Soprattutto quest'ultima richiede tempi di esecuzione e prestazioni eccellenti per ottimizzare le tempistiche e soddisfare al meglio il cliente.

Le prove sperimentali qui trattate sono importanti per comprendere come si comporta una determinata configurazione di pentola. Tali prove sono realizzate simulando una cottura statica, ovvero senza forze esterne che creano un movimento al liquido riscaldato.

In questo capitolo, quindi, vengono illustrati i vari passaggi usati per realizzare il progetto: la configurazione della postazione di misura, le prove eseguite durante la fase sperimentale e il tipo di connessioni tra gli strumenti.

4.1 CONFIGURAZIONE ADOTTATA

Per poter caratterizzare le varie tipologie di pentole sono state eseguite diverse misure: valori di potenza a valle dell'induttore professionale e valori di temperatura con delle termocoppie di tipo T. Tutto ciò è stato realizzato attraverso il linguaggio di programmazione LabView e la connessione di dispositivi di misura. Infine, attraverso l'utilizzo di un Pc portatile, è stato possibile visualizzare istantaneamente gli andamenti di temperatura in funzione del tempo e successivamente salvarli in opportune tabelle Excel.

La configurazione adottata è la seguente:

- n° 1 PC dotato di windows 7;
- n° 1 Multifunction Switch/Measure Unit Agilent mod. 34980A connesso al PC tramite USB;
- n° 1 Multiplexer mod. 34901A (20 canali, velocità di 60 canali al secondo)
- n° 1 Multiplexer mod. 34902A (16 canali, velocità di 250 canali al secondo)
- n° 1 Analizzatore di rete Yokogawa WT210 connesso al PC tramite porta GPIB;
- n° 1 controllo della potenza da remoto tramite AMIGATE
- Termocoppie T (rame/costantina) con le seguenti caratteristiche:
 1. dimensioni esterne 1.4 x 2.4 mm;
 2. Isolamento ciascuno in teflon;
 3. coppia in parallela;
 4. diametro conduttori 0.51mm;



Figura 4.1.1: postazione di misura

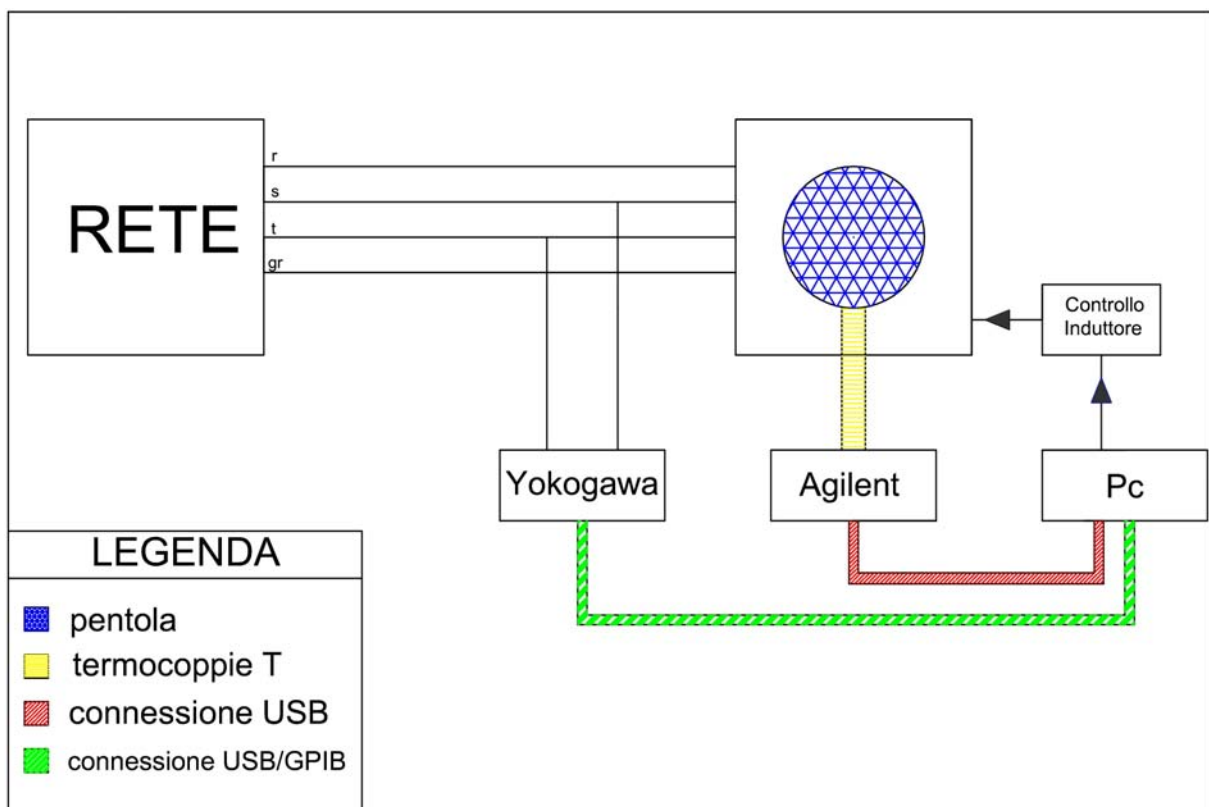


Figura 4.1.2: schema di misura realizzato

4.2 PROVE SVOLTE

Nel lavoro sperimentale sono state svolte diverse misurazioni adatte a definire caratteristiche specifiche delle varie tipologie di pentole.

Gli obiettivi di questa ricerca sono tre: il primo scopo è quello di determinare la pentola più efficiente, ovvero la configurazione che impiega il minor tempo possibile per raggiungere la temperatura richiesta. Il secondo scopo, non meno importante, è lo studio di come le temperature si diffondono nelle diverse tipologie di pentola. Infine il terzo scopo, un po' più ambizioso, è quello di capire come si diffonde la temperatura all'interno del liquido riscaldato. Per capire ciò si è deciso di effettuare quattro prove:

1. La prima prova consiste nel misurare la temperatura esterna delle padelle attraverso 16 termocoppie disposte in maniera simmetrica; sono state disposte 8 termocoppie sul fondo laterale della pentola, mentre le altre 8 termocoppie sul bordo superiore. Inoltre è stata inserita un'ulteriore termocoppia in prossimità del pelo libero dell'acqua per rilevare la temperatura richiesta di fine prova.
2. La seconda prova invece consiste nel misurare la temperatura interna della pentola sempre attraverso 16 punti di misura: sono state dunque posizionate 8 termocoppie sul fondo interno e le restanti 8 sul bordo superiore interno in corrispondenza della reciproca posizione esterna. Anche in questa prova, come nella prova precedente, è stata rilevata la temperatura del liquido scaldato per determinare il tempo di fine prova.
3. La terza prova è stata eseguita con 19 termocoppie all'interno del liquido acqua. Per il posizionamento delle termocoppie è stato creato un sostegno metallico posizionato sulla parte superiore della pentola in modo da non interagire con il corretto funzionamento del piano di cottura ad induzione. Le 19 termocoppie sono state fissate alla struttura con delle fascette di plastica in tre strati diversi. Il primo e il secondo strato sono composti da 9 termocoppie ciascuno, mentre il terzo strato è composto solo da una termocoppia centrale, posizionata in prossimità del pelo libero, necessaria per fermare la prova quando veniva raggiunta la temperatura richiesta.
4. Nell'ultima prova, come nella precedente, è stata utilizzata la struttura metallica per rilevare 19 temperature. Tale prova viene eseguita non più con il liquido base dell'acqua, ma con una sostanza vegetale chiamata Agar. Questa sostanza ha la proprietà di cambiare fase da solido a liquido a una determinata temperatura. Si è quindi focalizzato lo studio sulla stratificazione della temperatura rilevata sempre su due strati: 9 termocoppie in ciascuno strato più un'ulteriore termocoppia sullo strato superiore in prossimità del pelo libero.

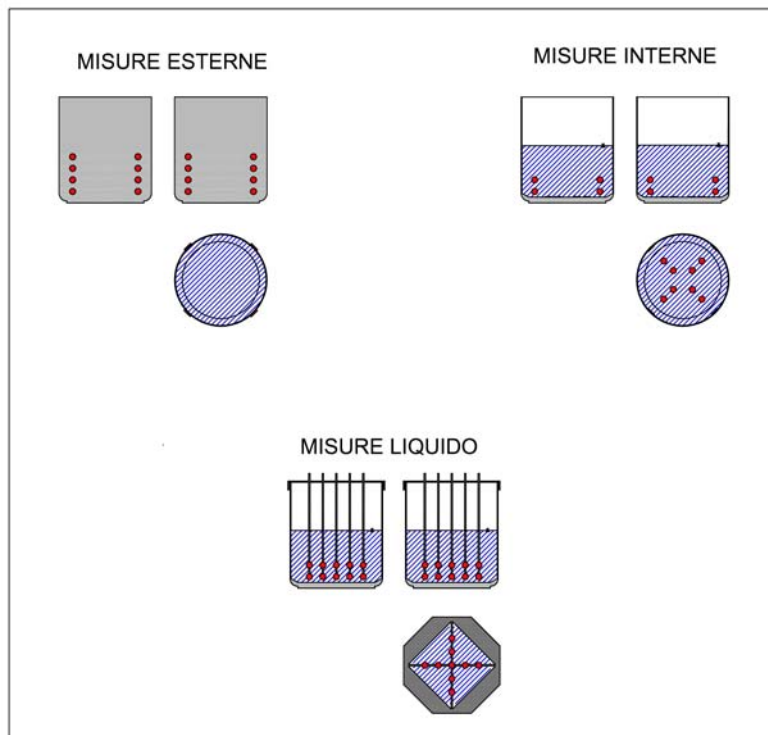


Figura 4.2.1: misure svolte



Figura 4.2.2: sostegno termocoppie

In tutte le prove, indipendentemente dalla sostanza usata, il liquido ha la stessa quantità di 2 litri. Nelle prime tre prove è stato usato come liquido da riscaldare l'acqua alla temperatura ambiente, mentre nell'ultima prova l'Agar in sostituzione dell'acqua. Per preparare questa sostanza è stata aggiunta all'acqua una percentuale di Agar in polvere. Dopo vari tentativi, necessari per trovare la consistenza giusta del composto si è scelto di aggiungere 20gr di Agar. Tuttavia durante varie ripetute il liquido portato a ebollizione evaporava comportando

una diminuzione di volume. Tale perdita è stata di volta in volta compensata nelle giuste proporzioni con l'aggiunta di acqua e di polvere addensante.

Durante la fase sperimentale si è deciso di cambiare la potenza fornita all'induttore. Le tre misure di potenza sono : 1500W, 2000W e 2500W (3L=tre livelli di potenza). Inoltre per comprendere al meglio le caratteristiche delle pentole sono state eseguite tre ripetute per prova(3R=tre ripetute per prova). Infine le pentole utilizzate sono di 4 tipologie diverse.

| | ACC430B | ACC430S | ALL_PRIG | TERM_ALL |
|---------|---------|---------|----------|----------|
| T_INT. | 3L-3R | 3L-3R | 3L-3R | 3L-3R |
| T_EST. | 3L-3R | 3L-3R | 3L-3R | 3L-R |
| T_acqua | 3L-3R | 3L-3R | 3L-3R | 3L-3R |
| T_agar | 3L-3R | 3L-3R | 3L-3R | 3L-3R |

Tabella 4.1: prove svolte

4.2.1 PENTOLE UTILIZZATE

Le prove analizzate nello studio sono quattro con la stessa geometria e stessa forma cilindrica ma composte da materiali diversi. Per riservatezza non è possibile indicare ne le dimensioni ne i materiali utilizzati. Pertanto ,nella seguente trattazione , le pentole verranno indicate con configurazione 1,2,3 e 4.

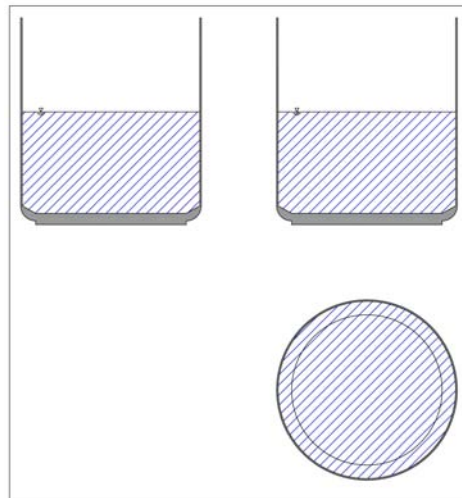


Figura 4.2.3: geometria pentola

4.2.2 CONNESSIONE TERMOCOPPIE

Le termocoppie utilizzate durante tutta la parte sperimentale sono le termocoppie tipo T (rame – costantana). Visto il gran numero di termocoppie, la geometria particolare della pentola e il numero di ripetute si è deciso di standardizzare il terminale delle termocoppie.

I passi realizzati per arrivare ad uno standard sono i seguenti:

1. I due giunti finali di rame e costantana vengono arrotolati per avere una più ampia superficie di contatto.
2. I due giunti vengono stagnati.

3. Il giunto infine viene stagnato su un dischetto di rame di 8mm.

Viene utilizzato un dischetto di rame di 8mm di diametro e spessore 1mm. Utilizzo il rame perché oltre ad essere un buon conduttore elettrico è anche un buon conduttore termico. Questo permette di avere un buon contatto tra superficie e termocoppia. Bisogna però porre attenzione nel calcolo dell'errore della temperatura, dato che ho inserito nel sistema un'inerzia termica.



Figura 4.2.4: terminale termocoppia

Per il fissaggio delle termocoppie alla superficie della padella sono state usate diverse soluzioni a seconda del tipo di prova svolta. Nella prova in cui le termocoppie sono esterne alla pentola è stato usato come fissante del nastro adesivo Kapton. Questa tecnica è risultata fin da subito la migliore per lo scopo. Diversamente è stato fatto per le misure

interne dato che le termocoppie sono a contatto con l'acqua. Riscaldando la sostanza si creano dei moti convettivi: l'acqua sul fondo è più calda, quindi meno densa e più leggera, galleggia sull'acqua più fredda, mentre l'acqua in superficie è più fredda, quindi più densa e più pesante, affonda nell'acqua più calda. Dunque si sono realizzate diverse soluzioni di fissaggio con lo scopo di rendere la termocoppia fissa alla parete. Sono state quindi eseguite più prove così da poter arrivare alla soluzione utilizzata.

- La PRIMA SOLUZIONE è stata quella di fissare le termocoppie alla superficie interna attraverso nastro adesivo Kapton. Questa soluzione è stata scartata essendoci degli spostamenti delle termocoppie dovute ai moti convettivi dell'acqua.
- La SECONDA SOLUZIONE prevede l'utilizzo di nastro di alluminio per il fissaggio delle termocoppie. Anche questa soluzione non è risultata adeguata per i fini richiesti.
- La TERZA SOLUZIONE prevede invece l'utilizzo del silicone termico adatto sia per le alte temperature sia per pareti metalliche. Le termocoppie tendono comunque a staccarsi dalla parete dopo diverse ripetute.
- La QUARTA SOLUZIONE, quella definitiva, utilizza la colla bicomponente. Essa viene usata sia come isolante sia come fissaggio alle parti metalliche. Questa si preferisce alle precedenti per la qualità di fissaggio.

Si possono notare da questi esempi la difficoltà nel misurare la temperatura nel fondo. Devo infatti considerare l'inerzia termica e l'errore introdotto dal fissaggio dovuto al silicone e alla colla bicomponente.

4.3 SCHEMA ACQUISIZIONE IN AMBIENTE LABVIEW

Il programma realizzato per eseguire le misurazioni, `termoT.vi`, è stato creato in ambiente LabView. Tramite un'opportuna interfaccia grafica permette di collegare l'hardware o gli hardware necessari per l'acquisizione dei dati. Il programma è in grado di rilevare n temperature e i valori elettrici in ingresso del sistema.

Il circuito di misura quindi viene schematizzato nelle seguenti figure in cui vengono illustrate il diagramma a blocchi e il pannello frontale.

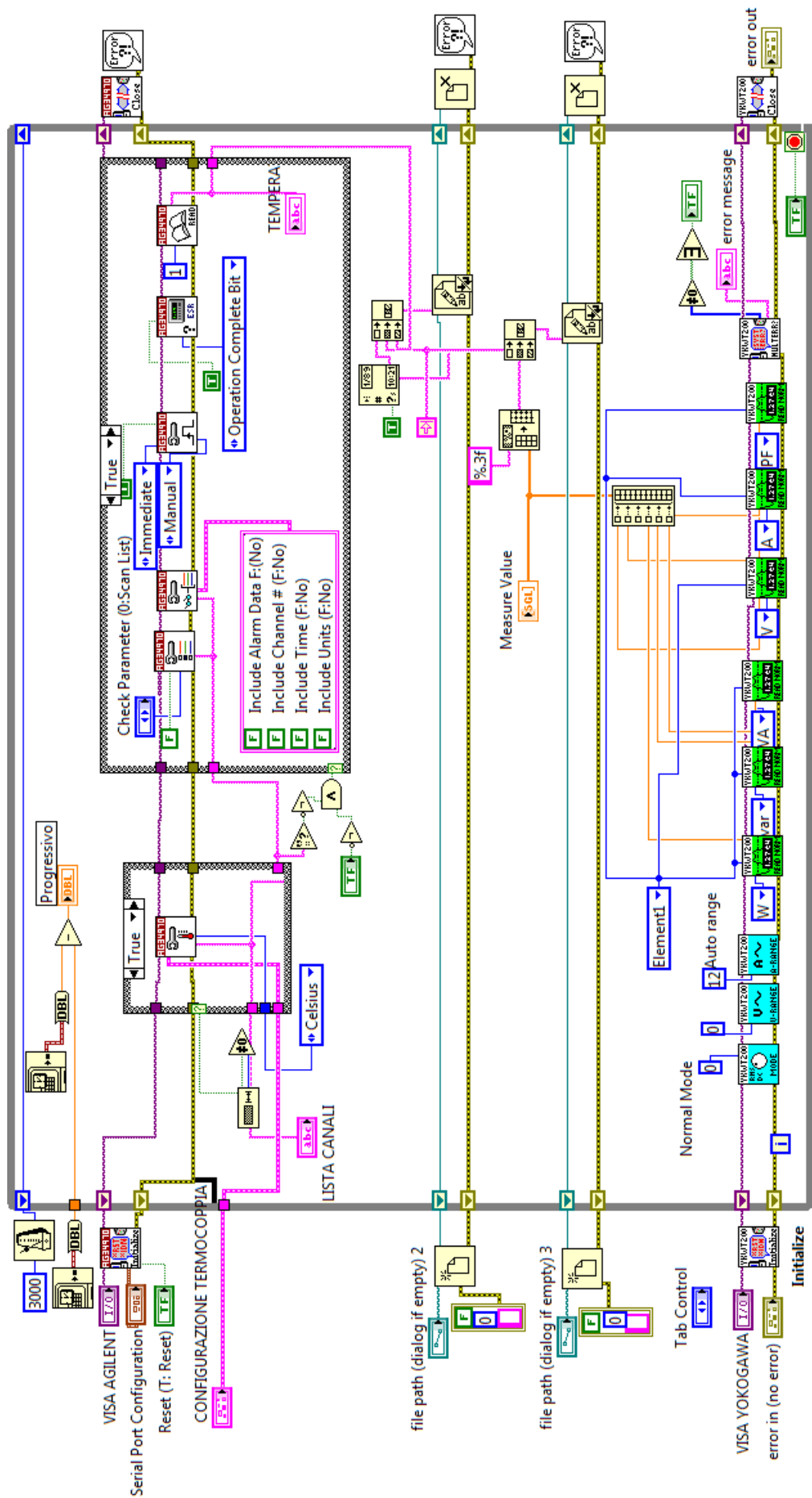


Figura 4.3.1: diagramma a blocchi termoT.vi

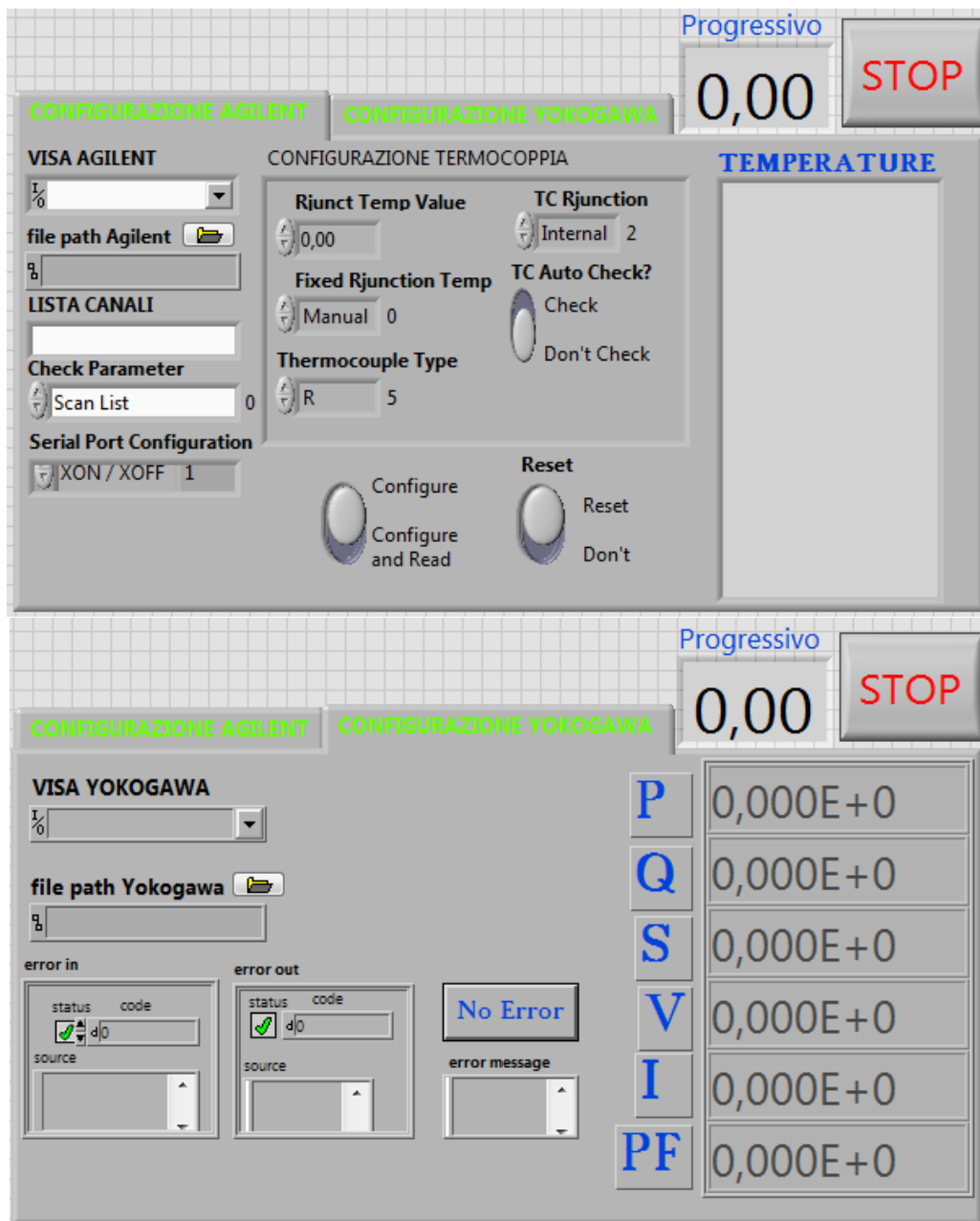


Figura 4.3.2: pannello frontale termoT.vi

Attraverso le librerie si è riuscito a connettere tutta la strumentazione al VI. Nel risultato ottenuto è presente il Pannello frontale e il Diagramma a Blocchi. Il programma è suddiviso in 2 parti, la parte superiore dedicata all'acquisizione della temperatura mentre la parte inferiore del programma dedicata all'acquisizione dei parametri elettrici. In entrambi i casi viene eseguita in ordine sequenziale prima la configurazione dello strumento e successivamente la lettura dei dati. Infine sono presenti anche due parti per la scrittura su file dei parametri letti. Tutto il programma esegue un campionamento dei valori ogni 3 secondi. Per fare questo è stato usato un ciclo while.

4.3.1 CONNESSIONE STRUMENTI USATI

Durante l'allestimento della postazione si è dovuto interfacciare la strumentazione di misura con il PC attraverso un programma scritto in LabView. In questa fase vengono connessi i vari

strumenti attraverso appositi collegamenti e attraverso diversi passaggi.

Per la connessione tra la struttura hardware di un calcolatore e un dispositivo esterno è necessario un dispositivo di interfaccia. Esso è in grado di trasmettere i dati garantendo livelli accettabili di affidabilità, velocità e flessibilità. La realizzazione dell'interfaccia si basa, principalmente, su due tecniche di trasmissione dati:

- Trasferimento seriale: viene trasmesso un bit per volta
- Trasferimento in parallelo: viene trasmesso un insieme di bit per volta

La scelta tra l'una e l'altra viene effettuata tenendo in considerazione pregi e difetti delle due soluzioni: la maggiore velocità del trasferimento in parallelo è accompagnata da una maggiore complessità della struttura di controllo e spesso da problemi di affidabilità su problemi per distanze elevate, per esempio superiori a qualche metro. Per contro, la trasmissione seriale offre, maggiore semplicità nella realizzazione del canale, superiore distanza di trasmissione, al prezzo di una minore efficienza e velocità di trasmissione.

Le principali modalità per la connessione di strumenti elettronici di misura ad un calcolatore sono:

1. Lo standard RS-232;
2. Lo standard IEEE 488.

RS-232

Si tratta di una modalità di trasmissione molto utilizzata nel collegamento fra unità centrale e periferiche di varia natura, ad esempio stampanti, modem e strumentazione elettronica. Tale modalità richiede una struttura di trasmissione molto semplice pertanto è possibile coprire facilmente un'ampia distanza, per esempio una decina di metri. La connessione tra periferica e calcolatore è del tipo "punto a punto" questo significa che sono richiesti cavi e connettori distinti per ogni coppia periferica – calcolatore. Il cavo di collegamento può essere di due tipi: il modello DB-25 a 25 pin maggiormente usato, e la versione minima DB-9 a 9 pin.[8]

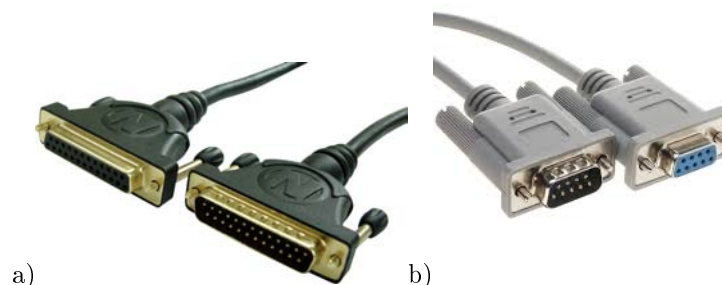


Figura 4.3.3: a) modello a 25 pin. b) modello a 9 pin.

A seconda del modello di connessione, viene assegnato a ciascun pin un ruolo specifico. La semplicità realizzativa è il motivo principale per il quale esse sono state utilizzate per prime allo scopo di dotare strumenti numerici con l'unità centrale. Nei primi Personal Computer è stata utilizzata la connessione seriale per connettere il mouse. La connessione svolta dallo standard seriale è stata progettata per semplici connessioni, ad esempio per plotter e modem, e non per la strumentazione di misura elettronica. Ne consegue che alcuni strumenti, se

collegati ad un calcolatore se connessi per mezzo di una linea seriale, non vengono sfruttati a pieno, sia in termini di funzionalità disponibili, sia in termini di velocità di trasmissione. Per superare le precedenti difficoltà sono stati proposti diversi tipi di canali di interfaccia, organizzati appositamente per la gestione dei dispositivi di misura. Tra questi riveste un ruolo di particolare importanza l'interfaccia IEEE 488.

IEEE 488

Lo standard IEEE-488, conosciuto anche come GPIB (acronimo Purpose Interface Bus) o HI-IB (dal nome della ditta, l'Hewlett-Packard, che lo ha brevettato), consiste fondamentalmente di un bus ad alta velocità e di un certo numero di interfacce, a sé stanti o già integrate nei vari strumenti, che ne consentono l'allacciamento al bus. Lo standard prevede quindi un insieme di segnalazioni (sulle linee del bus di controllo), messaggi (byte di comando inviabili sul bus dati) e processi (da innescare all'interno delle interfacce) che permettono alle medesime d'intendersi nella fase di attivazione del collegamento e durante lo scambio di dati. Una volta che il collegamento è stabilito, lo scambio fisico di dati è gestito automaticamente dalle due interfacce coinvolte, in modo da costituire una struttura del tutto trasparente ai messaggi che gli strumenti così collegati si scambiano. Lo standard IEEE-488 ha posto le basi necessarie per superare lo scoglio dell'incompatibilità tra prodotti di case diverse semplificando l'allestimento di banchi di misura automatici. Inoltre esso ha rivelato doti di versatilità e completezza che ne hanno suggerito l'uso come generico bus di collegamento tra computer e periferiche, o anche per trasferimento di segnali tra personal computer. Da qui l'utilizzo dell' USB/GPIB nei laboratori, la quale consente di collegare PC portatili o fissi a strumentazione come Oscilloscopi, Generatori di segnale, ecc.

Nel seguito verranno descritte le scelte che sono state fatte per la connessione al Pc. Nel dettaglio l'AGILENT è stato connesso con un cavo USB, mentre il wattmetro della YOKOGAWA utilizza una connessione USB/GPIB.[8]

4.3.1.1 AGILENT 97272A

Viene utilizzato l'Agilent 97272A per l'acquisizione delle temperatura attraverso la connessione dei canali di uscita con delle termocoppie. Per fare questo è necessario scrivere il programma in LabView che configuri il tipo di termocoppie, le legga con un certo intervallo di tempo, e salvi i valori in un file Excel. Per eseguire questi passaggi sono state usate le librerie fornite dalla National Instruments. Successivamente è stata connessa l'apparecchiatura con il Pc attraverso la porta seriale USB.[13]

USB

(Universal Serial Bus) è uno standard di comunicazione seriale che consente di collegare al Pc, per mezzo di un singolo cavo composto da una coppia di conduttori, una grande varietà di dispositivi. Negli ultimi anni, infatti, viene usata sostituendo le uscite presenti "storicamente" sul PC, come porte parallele o seriali, e in particolare anche il Bus interno con un Bus esterno per periferiche di tipo digitale, mouse, tastiera, stampanti ed altre, perché consente la trasmissione dei dati a velocità elevata con prestazioni superiori rispetto alle porte seriali o parallele.

Esistono tre versioni dello Standard USB: la versione 1.0, la quale supporta collegamenti a 1.5Mbit/sec, velocità adeguata per dispositivi lenti. La versione 1.1 aggiunge la modalità full speed che innalza la velocità a 12Mbit/sec. La versione 2.0, in cui la velocità di trasferimento arriva anche a 480Mbit/s. La versione 3.0 con velocità di trasferimento di 4.8 Gbit/s, sino alla più recente 3.1 che raggiunge la velocità di 10 Gbit/s.

Oltre al trasferimento dei dati, garantisce anche l'alimentazione per le periferiche: esso è, infatti, in grado di fornire una corrente di 500mA e una tensione di 5V. Tale caratteristica può tranquillamente garantire l'alimentazione per piccole periferiche, che quindi possono fare a meno di batterie e di alimentatori esterni.

Una periferica USB può essere collegata in qualsiasi momento, anche a computer acceso; in quanto il sistema operativo è in grado di riconoscere istantaneamente quando una nuova periferica viene collegata. E' comunque consigliato, prima di collegare il dispositivo per la prima volta al computer, installare i driver forniti con la periferica: dopo questa operazione la periferica è pronta per essere accesa e configurata.

Presenta una flessibilità del protocollo per modalità sincrone nel trasferimento dei dati e asincrone per l'invio dei messaggi, supportandole sullo stesso cavo.

4.3.1.2 YOKOGAWA WT210

Per l'acquisizione della potenza uso un wattmetro, il Yokogawa WT210. In questo caso riesco a leggere i valori monofase all'ingresso del sistema. Anche per questo strumento uso le librerie fornite dalla National Instruments. L'apparecchiatura è stata poi connessa al PC attraverso una porta USB/GPIB.

Si è utilizzato un convertitore USB/GPIB, mostrato in figura, composto da un semplice cavo con un GPIB plug on ad una estremità ed un USB plug on nell'altra, che consente una connessione diretta da una porta USB del PC ad uno strumento dotato di interfaccia GPIB.[12]



Figura 4.3.4: cavo USB/GPIB

Capitolo 5

ANALISI DATI

In questo capitolo verranno trattate le prove svolte con la rispettiva analisi dei dati. Nel dettaglio viene dato un significato matematico alle varie prove, attribuendo a ciascun grafico più indici. Questi poi verranno confrontati tra le varie prove svolte.

Prima di fare ciò è necessario definire i parametri che sono stati misurati. Per ciascuna prova infatti, vengono utilizzati tre strumenti di misura diversi.

Attraverso il wattmetro della YOKOGAWA WT210 sono stati misurati i parametri elettrici a monte dell'induttore, ovvero, tensione, corrente, potenza attiva, potenza reattiva, potenza apparente e fattore di potenza. I valori in questione sono stati rilevati con un wattmetro monofase attraverso la connessione di un'unica fase e del neutro. È possibile eseguire questa connessione dato che il carico risulta simmetrico ed equilibrato.

Con il strumento di acquisizione dell'AGILENT 97272A sono state rilevate le temperature. Questo è stato possibile attraverso delle termocoppie tipo T connesse con lo strumento.

Invece come ultimo strumento è stato utilizzato un dispositivo realizzato dai progettisti interni, connesso al piano di cottura ad induzione attraverso una bus dati. Questo strumento è infatti in grado di operare il controllo e di eseguire l'acquisizione di dati. I dati rilevati sono quelli significativi per capire se all'interno del dispositivo è avvenuta qualche anomalia. Tutti i dati descritti sono campionati ogni 3 secondi.

5.0.2 ERRORE DI MISURA

Prima di descrivere le misure svolte è necessario fare una stima dell'errore. In questo paragrafo, quindi vengono trattati gli errori della strumentazione soffermandoci nel dettaglio sulla catena della misura, ovvero la somma di tutti gli errori di misura presenti nel sistema. Nel sistema realizzato vengono rilevate varie grandezze termiche ed elettriche: temperatura, potenza attiva, reattiva e apparente, corrente e tensione a monte del dispositivo. Tutte queste grandezze fisiche sono soggette ad un errore di misura da non trascurare nelle conclusioni finali. Inoltre deve essere considerato anche l'errore presente negli strumenti di misura usati per il collegamento con il Pc.

AGILENT37972A L'errore del sistema è dato dall'errore della termocoppia e dall'errore della strumentazione. La termocoppia viene realizzata con un dischetto di rame che viene stagnato su di esso. Inoltre bisogna considerare l'errore della strumentazione. All'estremità delle termocoppie è presente il dispositivo per la rilevazione delle temperature. Nei dati di targa dello strumento è indicato l'errore di misura relativo dalle termocoppie: l'errore totale è di 2°C

YOKOGAWAWT210 Questo dispositivo rileva le grandezze elettriche presenti a monte dell'induttore. Le grandezze sono anche in questo caso soggette ad un errore di misura stimato dai dati di targa dell'wattmetro.

5.1 PRIMA PROVA

La prima prova consiste nel misurare la temperatura del liquido riscaldato. Il liquido in questione è una quantità d'acqua che viene portata da una temperatura ambiente di circa 20 °C alla temperatura di 80 °C. Tale prova è stata poi ripetuta per ciascuna tipologia di pentola e per ciascun livello di potenza adottato. I punti di misura adottati sono 19 posizionati all'interno dell'acqua con un apposito sostegno: 1 termocoppia posizionata nel pelo libero dell'acqua, mentre le restanti 18 posizionate in due strati ciascuno composto da 9 punti di misura.

Dalle misure rilevate e dalle caratteristiche fisiche dell'acqua si può notare un uniformità di temperatura in tutti i punti misurati. Questa caratteristica è resa tale dal fatto che l'acqua, come già visto nel capitolo precedente, ha una conduttività termica buona rispetto ad altre sostanze liquide, inoltre è resa omogenea dai moti convettivi che si formano quando entra in contatto con una fonte di calore. I risultati trovati dunque possono essere diagrammati con una retta.

Prendendo una misura di riferimento, ad esempio la prova a 1500 W della pentola uno, è possibile notare che le 19 misure rilevate hanno un andamento in funzione del tempo pressoché lineare. Ogni temperatura in funzione del tempo può essere rappresentata con una retta, essendo però composta da 19 andamenti simili, è possibile prendere la media dei 19 valori e rappresentarla in un unico grafico sempre in funzione del tempo.

Il risultato ottenuto è quindi il valore medio delle 19 termocoppie.

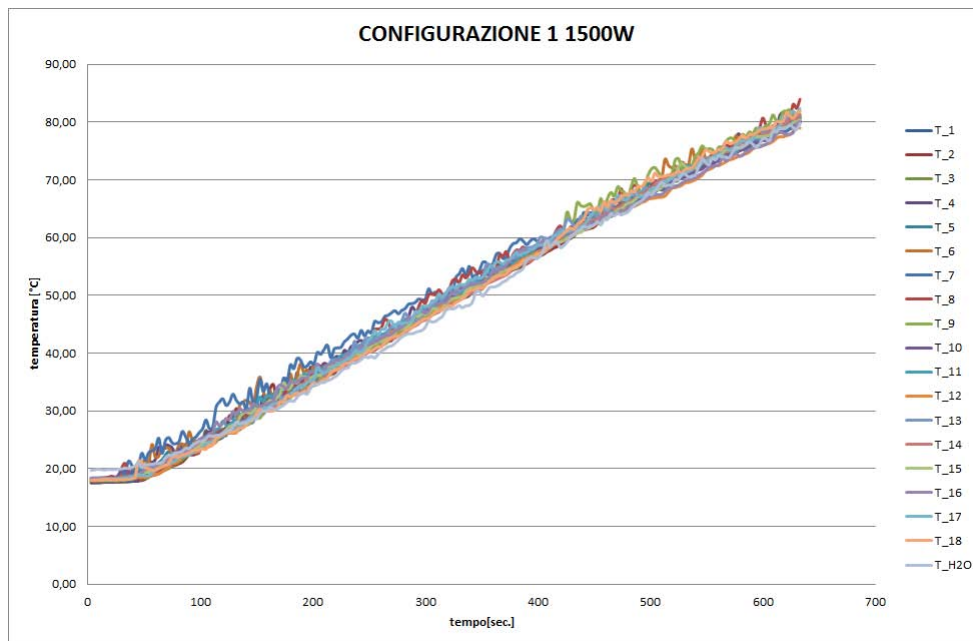


Figura 5.1.1: grafico misure rilevate

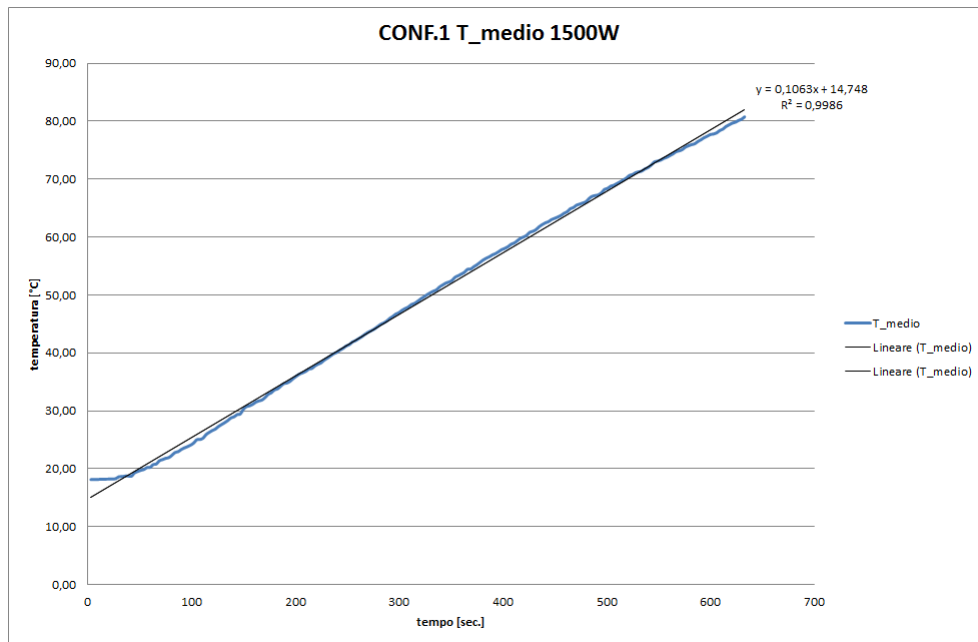


Figura 5.1.2: grafico misura media

Per ogni andamento medio trovato è stata creata una linea di tendenza. La linea di tendenza usata per questa tipologia di prova è una retta in cui sono presenti due indici: q indica la temperatura iniziale dell'acqua, mentre m indica la pendenza della retta.

L'equazione della retta è la seguente:

$$y = m \cdot x + q$$

La linea di tendenza deve rappresentare al meglio i dati trovati: questo viene fatto attraverso un coefficiente di determinazione R^2 . Tale valore è compreso tra 0 e 1. Tanto più il valore è tendente ad 1 tanto più il modello è coerente con i dati sperimentali. Nell'esempio precedente il valore trovato è di 0.9986 questo significa che il modello usato è ottimo.

Le misure svolte possono essere quindi rappresentate con dei grafici in cui sono presenti le linee di tendenza e il coefficiente di determinazione.

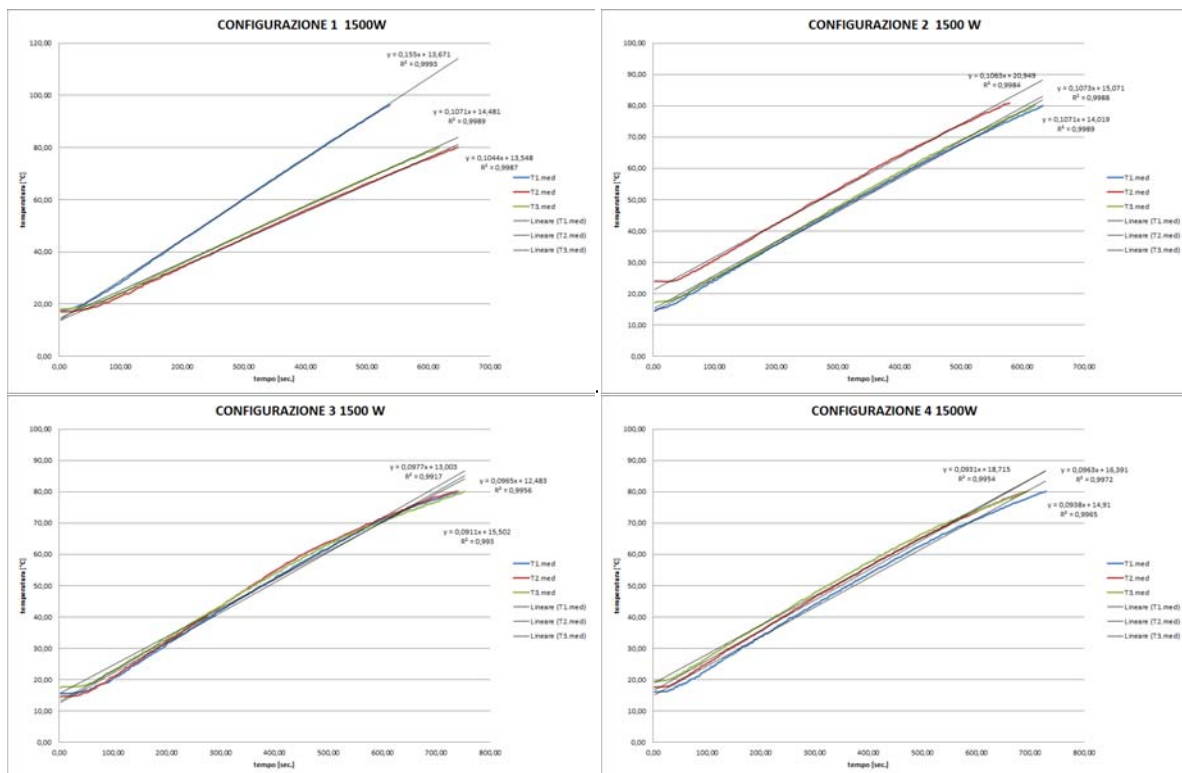


Figura 5.1.3: prove 1500W

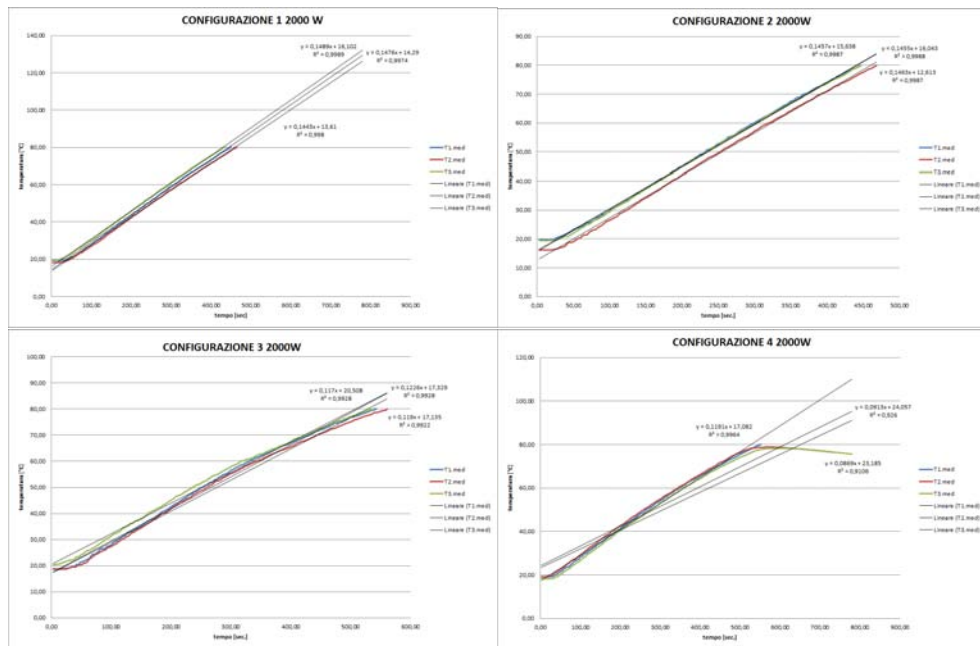


Figura 5.1.4: prove 2000W

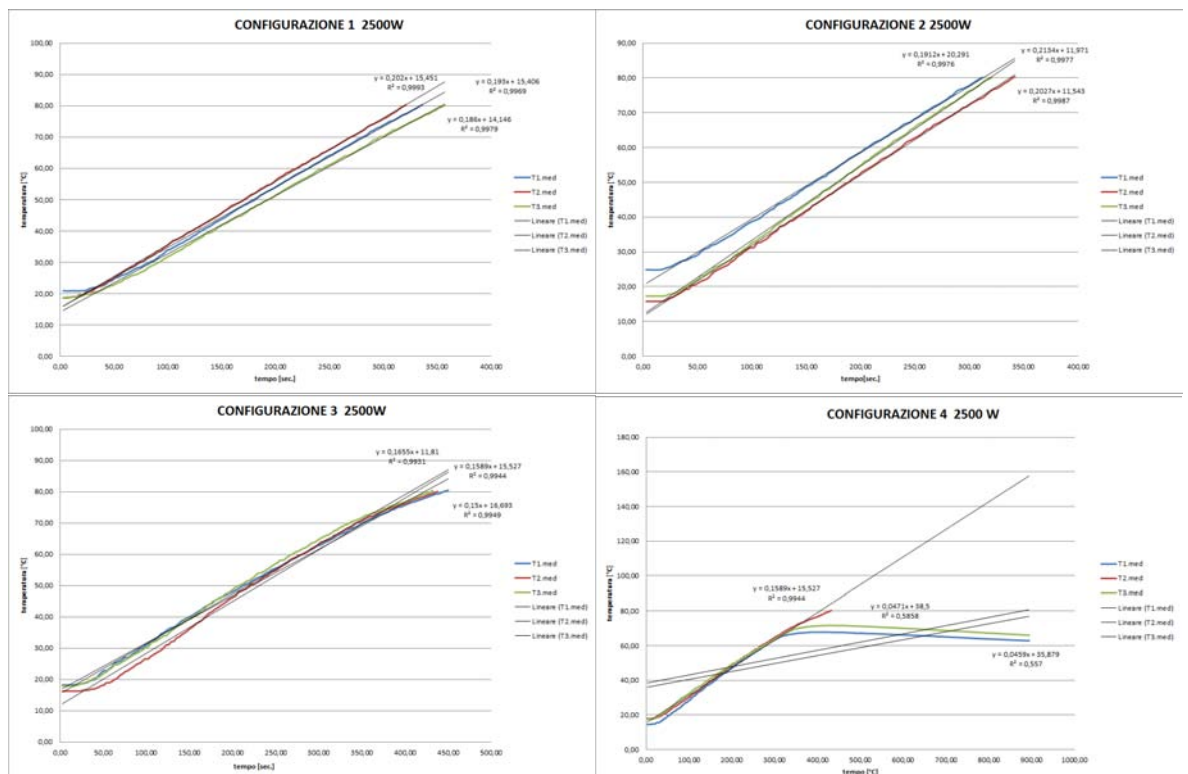


Figura 5.1.5: prove 2500W

Come primo risultato grafico è possibile notare come la pendenza di queste rette sia strettamente legata alla potenza fornita al dispositivo. Infatti la pendenza aumenta in quasi tutti i casi. L'unico caso in cui non è presente un aumento ma bensì una diminuzione è il caso della quarta configurazione.

Un aumento della potenza comporta pertanto un aumento della pendenza e di conseguenza una diminuzione del tempo impiegato per raggiungere la temperatura richiesta.

I dati trovati attraverso i modelli illustrati in tabella possono essere raggruppati in un sistema matriciale in cui sia il termine m sia il termine q sono rappresentati con una matrice diagonale. Pertanto tutte le diagonali sono composte da 3 valori uguali rappresentanti le tre ripetute per ciascuna pentola.

- Prove a 1500W:

- CONFIGURAZIONE 1:

$$\begin{bmatrix} y \\ y \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.155 & 0 & 0 \\ 0 & 0.107 & 0 \\ 0 & 0 & 0.104 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ x \\ x \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 13.7 & 0 & 0 \\ 0 & 14.6 & 0 \\ 0 & 0 & 13.5 \end{bmatrix}$$

- CONFIGURAZIONE 2:

$$\begin{bmatrix} y \\ y \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.106 & 0 & 0 \\ 0 & 0.107 & 0 \\ 0 & 0 & 0.107 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ x \\ x \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 20.95 & 0 & 0 \\ 0 & 15.071 & 0 \\ 0 & 0 & 14 \end{bmatrix}$$

- CONFIGURAZIONE 3:

$$\begin{bmatrix} y \\ y \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.098 & 0 & 0 \\ 0 & 0.096 & 0 \\ 0 & 0 & 0.091 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ x \\ x \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 13 & 0 & 0 \\ 0 & 12.5 & 0 \\ 0 & 0 & 15.5 \end{bmatrix}$$

- CONFIGURAZIONE 4:

$$\begin{bmatrix} y \\ y \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.093 & 0 & 0 \\ 0 & 0.096 & 0 \\ 0 & 0 & 0.094 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ x \\ x \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 18.7 & 0 & 0 \\ 0 & 16.4 & 0 \\ 0 & 0 & 14.9 \end{bmatrix}$$

- Prove a 2000W:

- CONFIGURAZIONE 1:

$$\begin{bmatrix} y \\ y \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.15 & 0 & 0 \\ 0 & 0.15 & 0 \\ 0 & 0 & 0.14 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ x \\ x \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 16 & 0 & 0 \\ 0 & 14.3 & 0 \\ 0 & 0 & 13.6 \end{bmatrix}$$

- CONFIGURAZIONE 2:

$$\begin{bmatrix} y \\ y \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.15 & 0 & 0 \\ 0 & 0.14 & 0 \\ 0 & 0 & 0.15 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ x \\ x \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 15.6 & 0 & 0 \\ 0 & 16 & 0 \\ 0 & 0 & 12.6 \end{bmatrix}$$

- CONFIGURAZIONE 3:

$$\begin{bmatrix} y \\ y \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.12 & 0 & 0 \\ 0 & 0.12 & 0 \\ 0 & 0 & 0.12 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ x \\ x \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 20.5 & 0 & 0 \\ 0 & 17.3 & 0 \\ 0 & 0 & 17 \end{bmatrix}$$

– CONFIGURAZIONE 4:

$$\begin{bmatrix} y \\ y \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.12 & 0 & 0 \\ 0 & 0.09 & 0 \\ 0 & 0 & 0.09 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ x \\ x \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 17 & 0 & 0 \\ 0 & 24 & 0 \\ 0 & 0 & 23.2 \end{bmatrix}$$

• Prove a 2500W:

– CONFIGURAZIONE 1:

$$\begin{bmatrix} y \\ y \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.2 & 0 & 0 \\ 0 & 0.19 & 0 \\ 0 & 0 & 0.19 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ x \\ x \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 15.5 & 0 & 0 \\ 0 & 15.4 & 0 \\ 0 & 0 & 15.2 \end{bmatrix}$$

– CONFIGURAZIONE 2:

$$\begin{bmatrix} y \\ y \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.19 & 0 & 0 \\ 0 & 0.21 & 0 \\ 0 & 0 & 0.2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ x \\ x \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 20.2 & 0 & 0 \\ 0 & 12 & 0 \\ 0 & 0 & 11.5 \end{bmatrix}$$

– CONFIGURAZIONE 3:

$$\begin{bmatrix} y \\ y \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.16 & 0 & 0 \\ 0 & 0.16 & 0 \\ 0 & 0 & 0.15 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ x \\ x \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 11.8 & 0 & 0 \\ 0 & 15.5 & 0 \\ 0 & 0 & 16.7 \end{bmatrix}$$

– CONFIGURAZIONE 4:

$$\begin{bmatrix} y \\ y \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.16 & 0 & 0 \\ 0 & 0.047 & 0 \\ 0 & 0 & 0.04 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ x \\ x \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 15.5 & 0 & 0 \\ 0 & 38.5 & 0 \\ 0 & 0 & 35.8 \end{bmatrix}$$

| | | PENDENZA m | | |
|--------|---------|------------|-------|-------|
| | | 1500W | 2000W | 2500W |
| CONF.1 | 1_PROVA | 0,15 | 0,15 | 0,20 |
| | 2_PROVA | 0,11 | 0,15 | 0,19 |
| | 3_PROVA | 0,11 | 0,14 | 0,19 |
| CONF.2 | 1_PROVA | 0,11 | 0,15 | 0,19 |
| | 2_PROVA | 0,11 | 0,14 | 0,21 |
| | 3_PROVA | 0,11 | 0,15 | 0,20 |
| CONF.3 | 1_PROVA | 0,09 | 0,12 | 0,16 |
| | 2_PROVA | 0,09 | 0,12 | 0,16 |
| | 3_PROVA | 0,09 | 0,12 | 0,15 |
| CONF.4 | 1_PROVA | 0,09 | 0,12 | 0,16 |
| | 2_PROVA | 0,09 | 0,09 | 0,04 |
| | 3_PROVA | 0,09 | 0,09 | 0,04 |

Figura 5.1.6: valori pendenze

| | | temperatura iniziale q | | |
|--------|---------|------------------------|-------|-------|
| | | 1500W | 2000W | 2500W |
| CONF.1 | 1_PROVA | 13,7 | 16,1 | 15,4 |
| | 2_PROVA | 15,5 | 14,3 | 15,4 |
| | 3_PROVA | 13,5 | 13,6 | 14,1 |
| CONF.2 | 1_PROVA | 20,9 | 15,6 | 20,3 |
| | 2_PROVA | 15,00 | 16,00 | 11,9 |
| | 3_PROVA | 14,00 | 12,6 | 11,5 |
| CONF.3 | 1_PROVA | 13,6 | 20,5 | 11,8 |
| | 2_PROVA | 12,5 | 17,3 | 15,5 |
| | 3_PROVA | 15,5 | 17,1 | 16,7 |
| CONF.4 | 1_PROVA | 18,7 | 17,1 | 15,5 |
| | 2_PROVA | 16,4 | 24 | 38,5 |
| | 3_PROVA | 14,9 | 23,2 | 35,8 |

Figura 5.1.7: temperatura iniziale

Come si può notare dai dati rappresentati in tabella e in forma matriciale è possibile effettuare una prima stima della pentola più efficace. In particolare si può subito dire che la tipologia di pentola più efficace è la prima pentola studiata. Quest'ultima infatti ha una pendenza sempre superiore alle altre pentole analizzate.

In tabelle sono riportate anche le prove non andate a buon fine. Nella pentola composta da multistrato alluminio termo diffusore avviene questo quando la potenza applicata è di 2000W e 2500W. Infatti due delle tre prove in questione non raggiungono la temperatura richiesta di 80°C.

A parità di potenza ci sono tre configurazioni, ovvero la prima, la seconda e la terza, in cui la pendenza della retta resta costante. L'unico caso in cui questo non avviene è nell'ultima tipologia.

All'aumentare della potenza la pendenza aumenta, infatti rispetto ai 1500W ottengo:

- CONFIGURAZIONE 1 aumento del 50% (2000W) e aumento del 100%(2500W)
- CONFIGURAZIONE 2 aumento del 50% (2000W) e aumento del 100%(2500W)
- CONFIGURAZIONE 3 aumento del 33% (2000W) e aumento del 77%(2500W)

Da questa prima prova risulta che la pentola più efficiente, in grado di arrivare prima alla temperatura di 80°C è la prima struttura analizzata..

5.1.1 ANALISI ENERGETICA

In questo paragrafo viene trattata l'analisi energetica della pentola, analizzando qual è il flusso energetico del sistema. Questa trattazione è stata fatta in tutte le prove svolte. Essendo il liquido scaldato acqua questo ragionamento è valido anche nelle prove successive. Le varie ripetute vengono eseguite con potenze diverse: 1500, 2000 e 2500 W.

Questa potenza non è la potenza fornita alla pentola. Infatti essendo la nostra pentola composta da un diametro inferiore al diametro ottimale la potenza effettivamente fornita sarà inferiore. Per comprendere qual è l'energia scambiata dal sistema al carico e successivamente

al liquido scaldato viene effettuata un'analisi energetica. Con questi calcoli è possibile avere un'idea del flusso energetico che è presente nel sistema creato.

In primis dai dati elettrici in ingresso alla linea, successivamente viene fatta una stima dell'energia di scambio nella pentola. Il sistema viene monitorato con un wattmetro monofase avendo precedentemente verificato che il sistema è simmetrico ed equilibrato. Dunque la potenza dell'assorbita dal sistema può essere calcolata semplicemente moltiplicando la potenza monofase per 3.

Il modo più semplice per calcolare l'energia scambiata dal sistema è attraverso il liquido scaldato. Infatti l'energia che viene scambiata nel sistema è direttamente proporzionale alla variazione di temperatura.

$$Q = c \cdot m \cdot \Delta T$$

Viene indicato con Q l'energia scambiata espressa in [J], con c il calore specifico [J/kgK], con ΔT la variazione di temperatura [K] ed infine la massa m [kg]. Il valore trovato è un'energia, dunque per ricavare la potenza del sistema basta dividere per il tempo espresso in secondi.

I risultati ottenuti indicano che la potenza scambiata non corrisponde con la potenza in ingresso proprio per il fatto che la pentola utilizzata ha un diametro inferiore della bobina. Infatti è necessario avere un diametro della pentola che copra almeno i 2/3 rispetto alla zona di riscaldamento. Nel caso studiato è inferiore, il diametro della pentola ha un diametro circa la metà del diametro dell'induttore.

| 1500 W | | | | | | | 2000 W | | | | | | | 2500 W | | | | | | |
|------------|----------|-------|---------|----------------|-------------------|-----|------------|----------|-------|---------|----------------|-------------------|-----|------------|----------|-------|---------|----------------|-------------------|-----|
| T_iniziale | T_finale | TIME | Gr. H2O | cal. specifico | Energia Scambiata | | T_iniziale | T_finale | TIME | Gr. H2O | cal. specifico | Energia Scambiata | | T_iniziale | T_finale | TIME | Gr. H2O | cal. specifico | Energia Scambiata | |
| [°C] | [°C] | [sec] | [g] | [J/gK] | [J] | [J] | [°C] | [°C] | [sec] | [g] | [J/gK] | [J] | [J] | [°C] | [°C] | [sec] | [g] | [J/gK] | [J] | [J] |
| 14,45 | 80 | 633 | 2000 | 4,186 | 548784,6 | | 19,67 | 80 | 447 | 2000 | 4,186 | 505082,76 | | 24,85 | 80 | 312 | 2000 | 4,186 | 461715,8 | |
| 23,87 | 80 | 579 | 2000 | 4,186 | 469920,36 | | 16,19 | 80 | 468 | 2000 | 4,186 | 534217,32 | | 15,79 | 80 | 342 | 2000 | 4,186 | 537566,12 | |
| 17,05 | 80 | 621 | 2000 | 4,186 | 527017,4 | | 19,43 | 80 | 447 | 2000 | 4,186 | 507092,04 | | 19,27 | 80 | 321 | 2000 | 4,186 | 508431,56 | |
| 29,31 | 80 | 537 | 2000 | 4,186 | 424376,68 | | 19,47 | 80 | 447 | 2000 | 4,186 | 506757,16 | | 18,94 | 80 | 345 | 2000 | 4,186 | 511194,32 | |
| 17,11 | 80 | 648 | 2000 | 4,186 | 526515,08 | | 18,28 | 80 | 462 | 2000 | 4,186 | 516719,84 | | 20,25 | 80 | 321 | 2000 | 4,186 | 500227 | |
| 18,12 | 80 | 618 | 2000 | 4,186 | 518059,36 | | 19,82 | 80 | 435 | 2000 | 4,186 | 503826,96 | | 18,72 | 80 | 357 | 2000 | 4,186 | 513036,16 | |
| 15,54 | 80 | 741 | 2000 | 4,186 | 539659,12 | | 18,79 | 80 | 543 | 2000 | 4,186 | 512450,12 | | 18,27 | 80 | 450 | 2000 | 4,186 | 516803,56 | |
| 15,5 | 80 | 738 | 2000 | 4,186 | 539994 | | 18,66 | 80 | 561 | 2000 | 4,186 | 513538,48 | | 16,27 | 80 | 438 | 2000 | 4,186 | 533547,56 | |
| 17,43 | 80 | 753 | 2000 | 4,186 | 523836,04 | | 19,67 | 80 | 579 | 2000 | 4,186 | 505082,76 | | 17,94 | 80 | 432 | 2000 | 4,186 | 519566,32 | |
| 16,06 | 80 | 729 | 2000 | 4,186 | 535305,68 | | 19,03 | 80 | 552 | 2000 | 4,186 | 510440,84 | | 14,62 | 67,86 | 405 | 2000 | 4,186 | 463203,06 | |
| 16,6 | 80 | 690 | 2000 | 4,186 | 530784,8 | | 19,19 | 78,91 | 567 | 2000 | 4,186 | 499375,64 | | 17,94 | 80 | 432 | 2000 | 4,186 | 519566,32 | |
| 19,43 | 80 | 696 | 2000 | 4,186 | 507092,04 | | 18,21 | 78,26 | 606 | 2000 | 4,186 | 502738,6 | | 17,62 | 71,6 | 447 | 2000 | 4,186 | 451920,96 | |

Figura 5.1.8: analisi energetica

| 1500 W | | | | | | | 2000 W | | | | | | | 2500 W | | | | | | |
|----------|----------|------|----------|------------|-------------|------|----------|----------|------|----------|------------|-------------|------|----------|----------|------|----------|------------|-------------|------|
| Tensione | Corrente | cosφ | P.attiva | P.reattiva | P.apparente | | Tensione | Corrente | cosφ | P.attiva | P.reattiva | P.apparente | | Tensione | Corrente | cosφ | P.attiva | P.reattiva | P.apparente | |
| [V] | [A] | | [W] | [var] | [VA] | [VA] | [V] | [A] | | [W] | [var] | [VA] | [VA] | [V] | [A] | | [W] | [var] | [VA] | [VA] |
| 230,65 | 1,93 | 0,86 | 384,65 | 223,48 | 444,84 | | 233,13 | 2,51 | 0,90 | 525,79 | 254,23 | 584,03 | | 233,12 | 3,11 | 0,93 | 673,00 | 272,00 | 726,00 | |
| 228,64 | 1,93 | 0,87 | 384,43 | 214,81 | 440,43 | | 233,27 | 2,49 | 0,90 | 521,21 | 258,07 | 581,58 | | 229,44 | 3,33 | 0,93 | 708,34 | 289,09 | 764,98 | |
| 231,85 | 1,92 | 0,86 | 382,11 | 227,74 | 444,88 | | 235,00 | 2,46 | 0,89 | 517,32 | 258,84 | 578,50 | | 229,84 | 3,24 | 0,92 | 689,51 | 281,21 | 744,71 | |
| 227,84 | 1,97 | 0,88 | 395,48 | 213,73 | 437,31 | | 231,56 | 2,54 | 0,91 | 532,92 | 248,45 | 588,02 | | 229,13 | 3,38 | 0,93 | 718,18 | 291,05 | 774,86 | |
| 231,75 | 1,89 | 0,87 | 379,51 | 217,24 | 437,31 | | 233,89 | 2,43 | 0,89 | 508,21 | 255,73 | 568,95 | | 229,49 | 3,33 | 0,92 | 708,64 | 286,65 | 764,43 | |
| 228,42 | 1,90 | 0,88 | 380,18 | 208,57 | 433,65 | | 232,59 | 2,48 | 0,89 | 514,95 | 259,81 | 576,75 | | 229,55 | 3,36 | 0,92 | 714,81 | 288,61 | 770,94 | |
| 230,18 | 1,91 | 0,87 | 383,61 | 215,97 | 440,27 | | 231,56 | 2,54 | 0,91 | 532,92 | 248,45 | 588,02 | | 232,62 | 3,12 | 0,92 | 671,24 | 275,34 | 725,69 | |
| 228,79 | 1,90 | 0,87 | 379,62 | 212,10 | 434,83 | | 233,81 | 2,32 | 0,89 | 479,41 | 251,97 | 541,64 | | 229,84 | 3,24 | 0,92 | 689,51 | 281,21 | 744,71 | |
| 232,71 | 1,87 | 0,85 | 370,94 | 226,53 | 434,63 | | 235,02 | 2,39 | 0,89 | 500,25 | 255,94 | 561,91 | | 229,84 | 3,24 | 0,92 | 689,51 | 281,21 | 744,71 | |
| 232,64 | 1,75 | 0,85 | 344,41 | 216,01 | 406,50 | | 231,56 | 2,54 | 0,91 | 532,92 | 248,45 | 588,02 | | 229,02 | 3,24 | 0,92 | 687,02 | 280,51 | 742,35 | |
| 228,22 | 1,79 | 0,86 | 352,51 | 204,68 | 407,55 | | 233,81 | 2,32 | 0,89 | 479,41 | 251,97 | 541,64 | | 229,70 | 3,13 | 0,92 | 664,06 | 277,81 | 719,89 | |
| 233,50 | 1,77 | 0,85 | 352,97 | 214,11 | 412,86 | | 235,66 | 2,26 | 0,88 | 468,97 | 251,20 | 531,99 | | 231,08 | 3,14 | 0,92 | 669,99 | 278,06 | 725,43 | |

Figura 5.1.9: analisi elettrica

5.2 SECONDA PROVA

La seconda tipologia di prove svolte consiste nel misurare la temperatura esterna della pentola con 16 termocoppie tipo T. Anche in questa prova, come nella precedente, viene usato come liquido l'acqua. La prova giunge quindi al termine al raggiungimento della temperatura dell'acqua di 80 °C.

Queste prove, prese alla stessa distanza in ciascuna pentola possono essere usate per un confronto tra le varie tipologie. Lo scopo di queste misurazione è capire come si diffonde la temperatura all'esterno della pentola in vari punti di essa. In particolare si è focalizzata l'attenzione sul fondo esterno, più a contatto con il piano ad induzione.

Anche in questo caso è possibile confrontare gli andamenti delle temperature in funzione del tempo con dei modelli rappresentativi.

Come primo esempio vengono rappresentati qui sotto tre ripetute delle varie configurazioni, alla potenza di 1500, 2000 e 2500W.

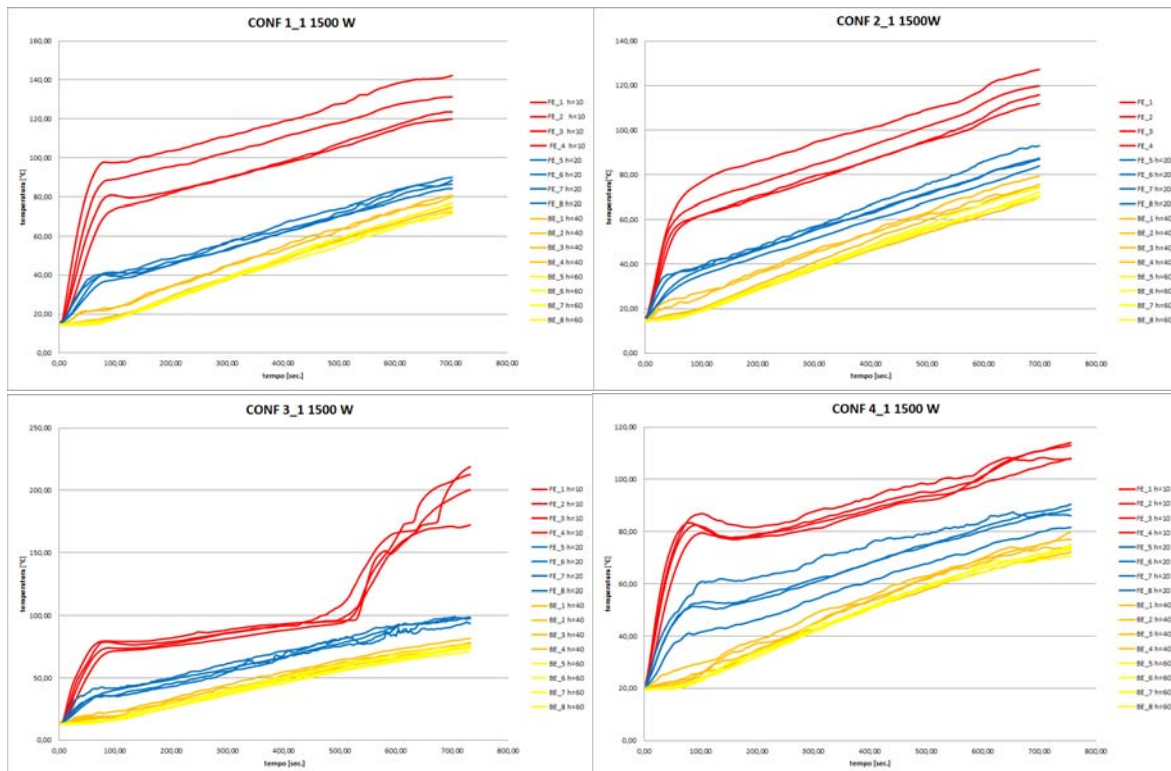


Figura 5.2.1: prima prova T esterne 1500W

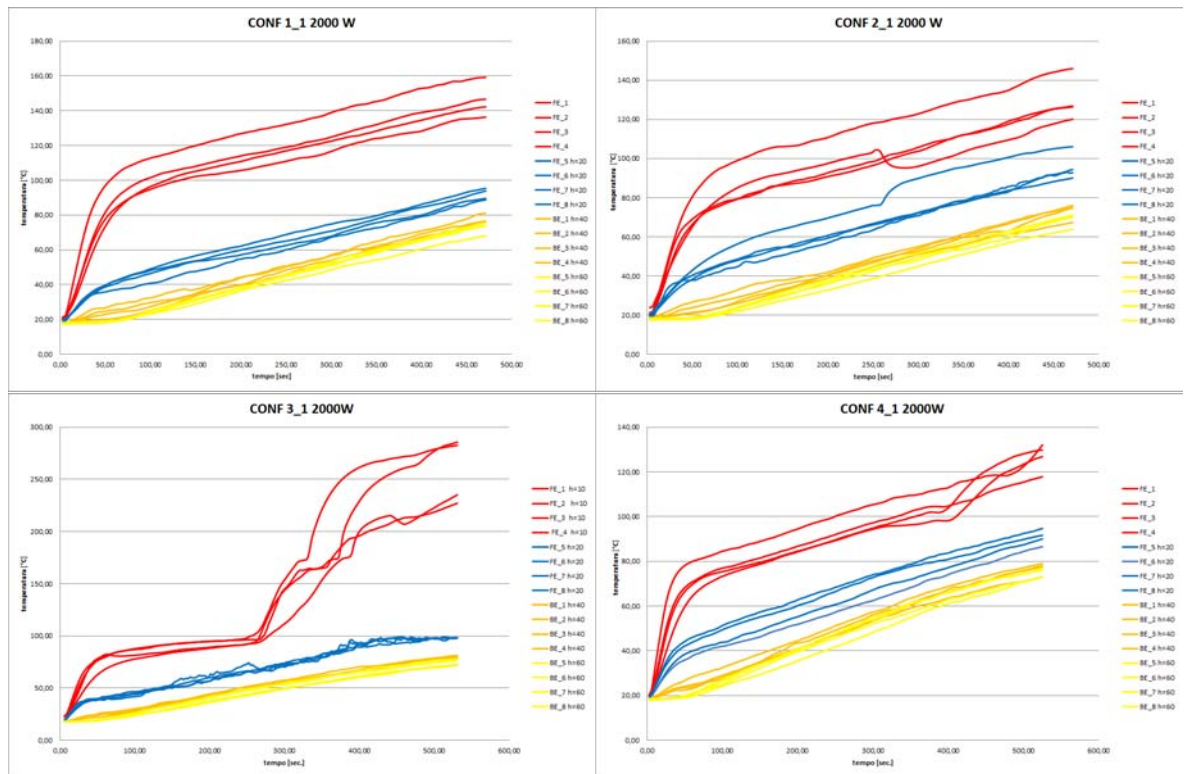


Figura 5.2.2: prima prova T esterne 2000W

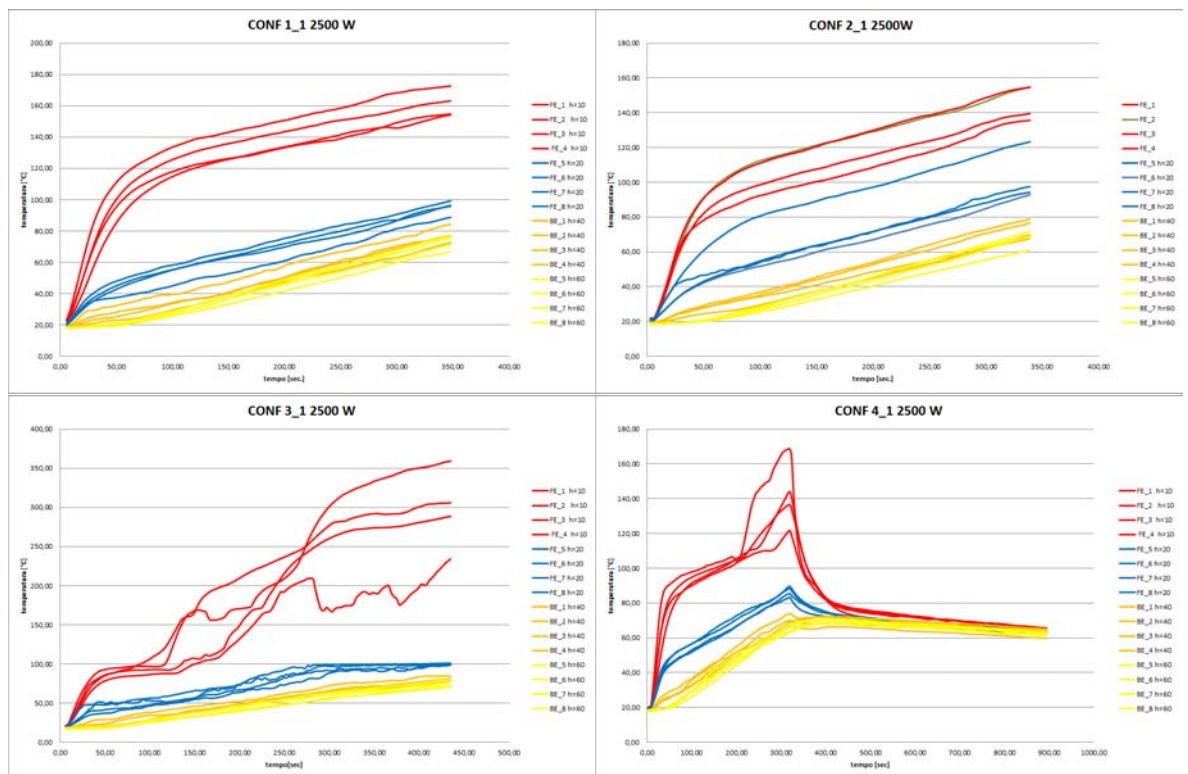


Figura 5.2.3: prima prova T esterne 2500W

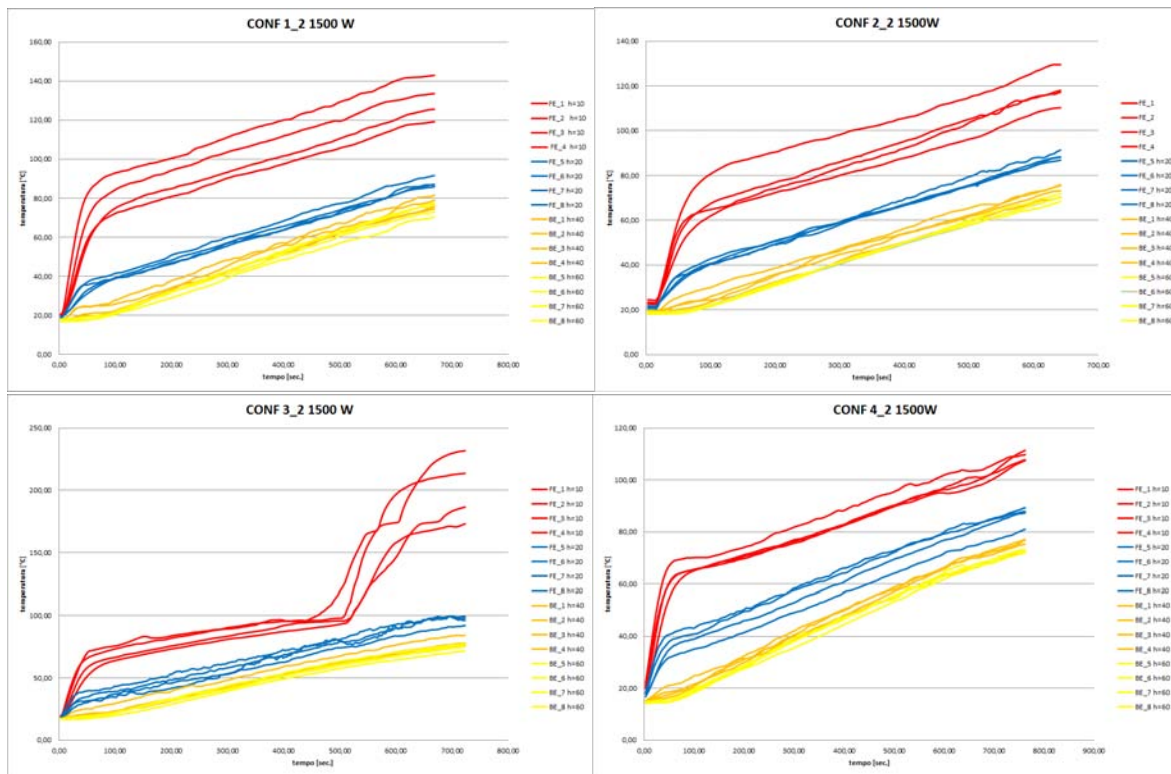


Figura 5.2.4: seconda prova T esterne 1500W

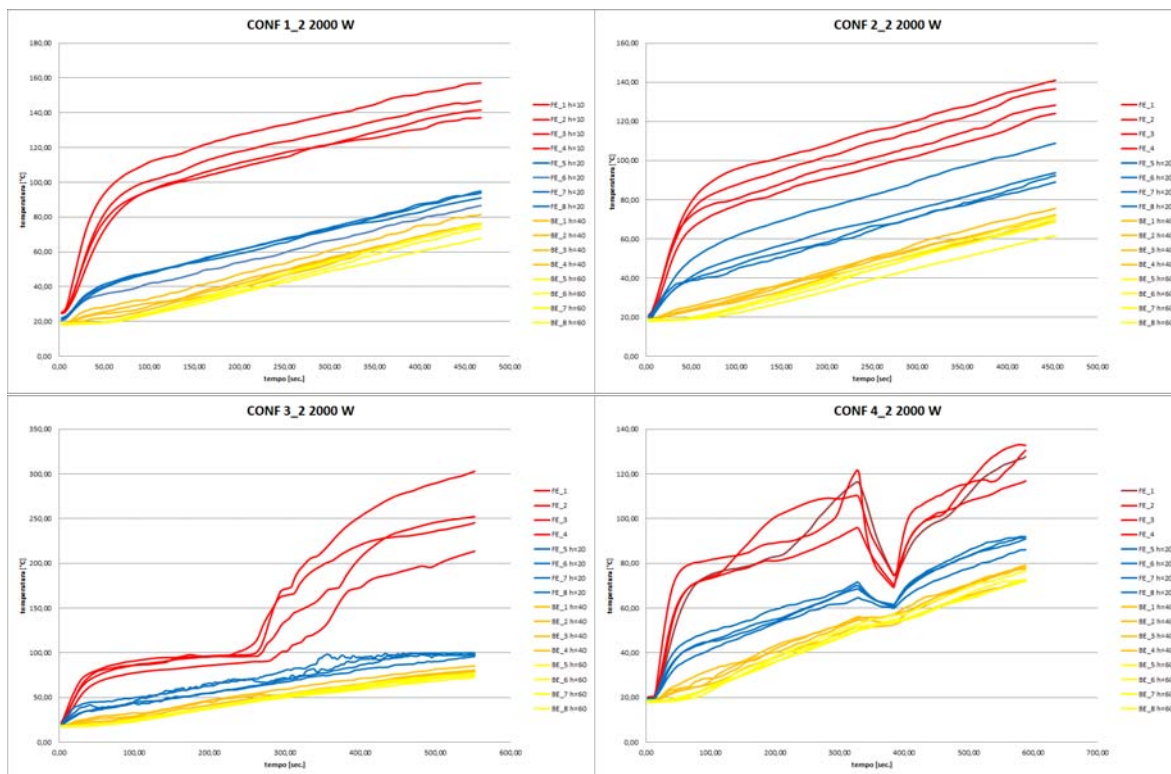


Figura 5.2.5: seconda prova T esterne 2000W

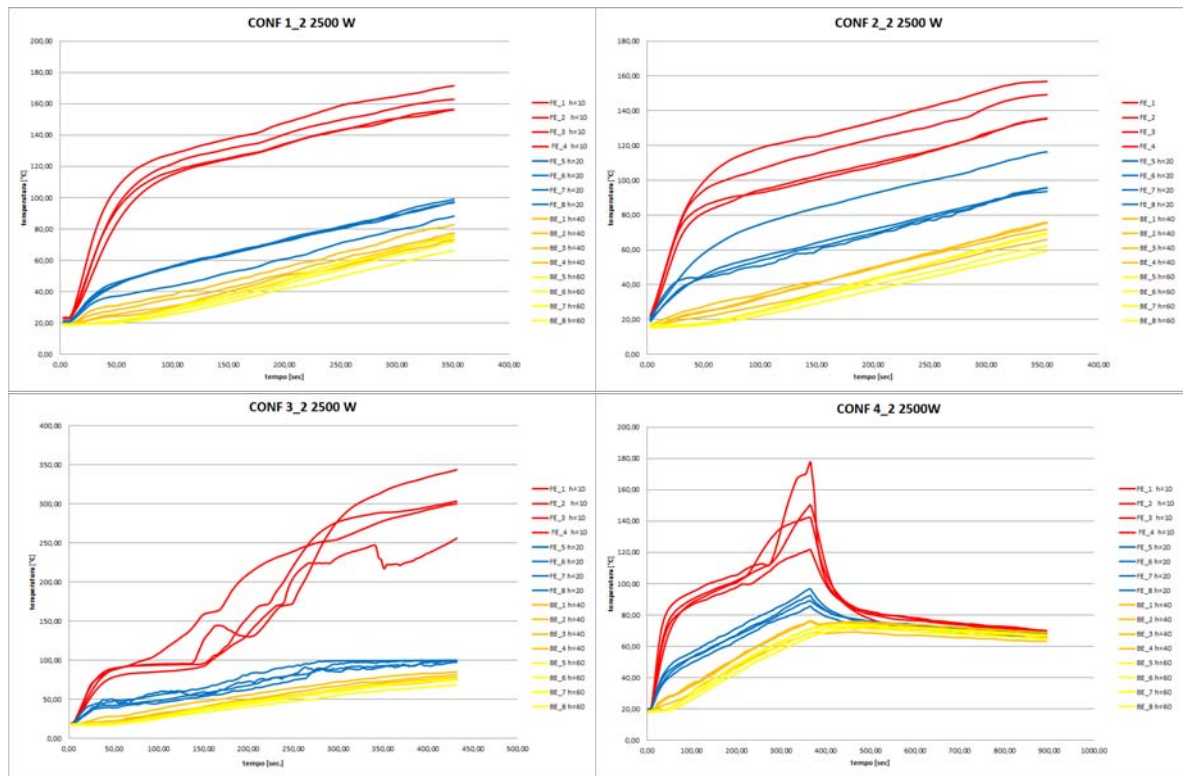


Figura 5.2.6: seconda prova T esterne2500W

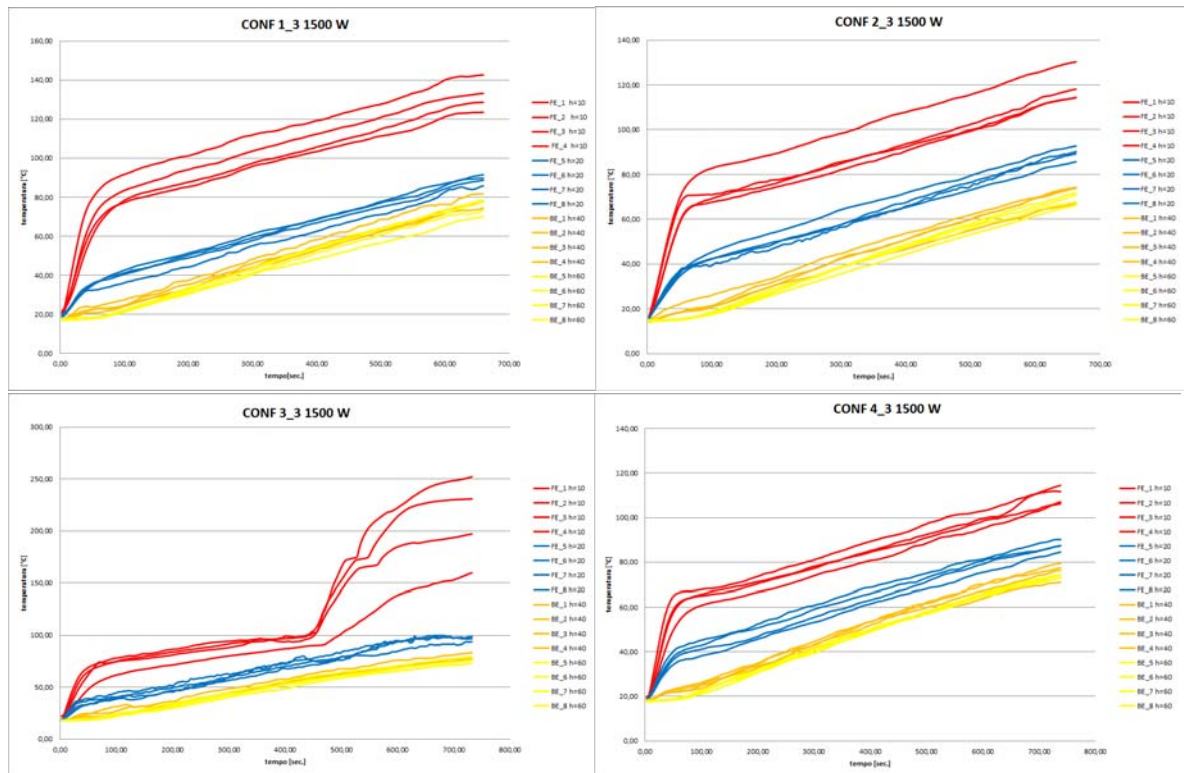


Figura 5.2.7: terza prova T esterne 1500W

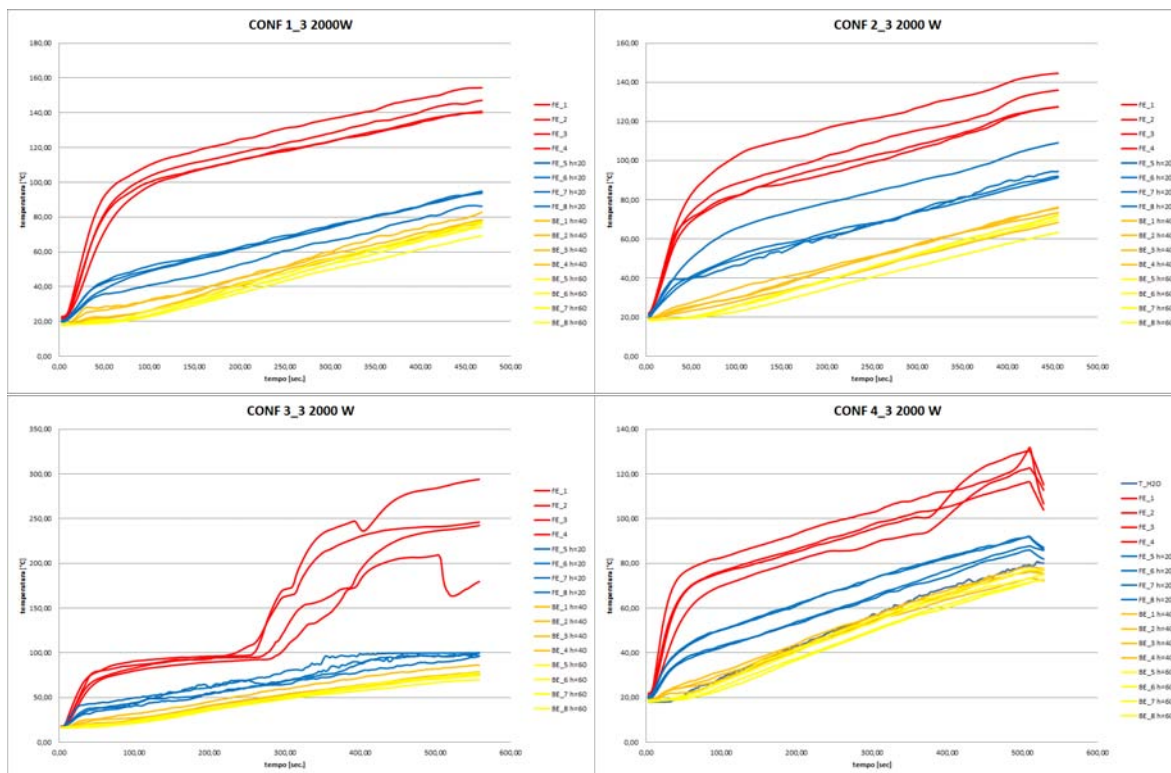


Figura 5.2.8: terza prova T esterne 2000W

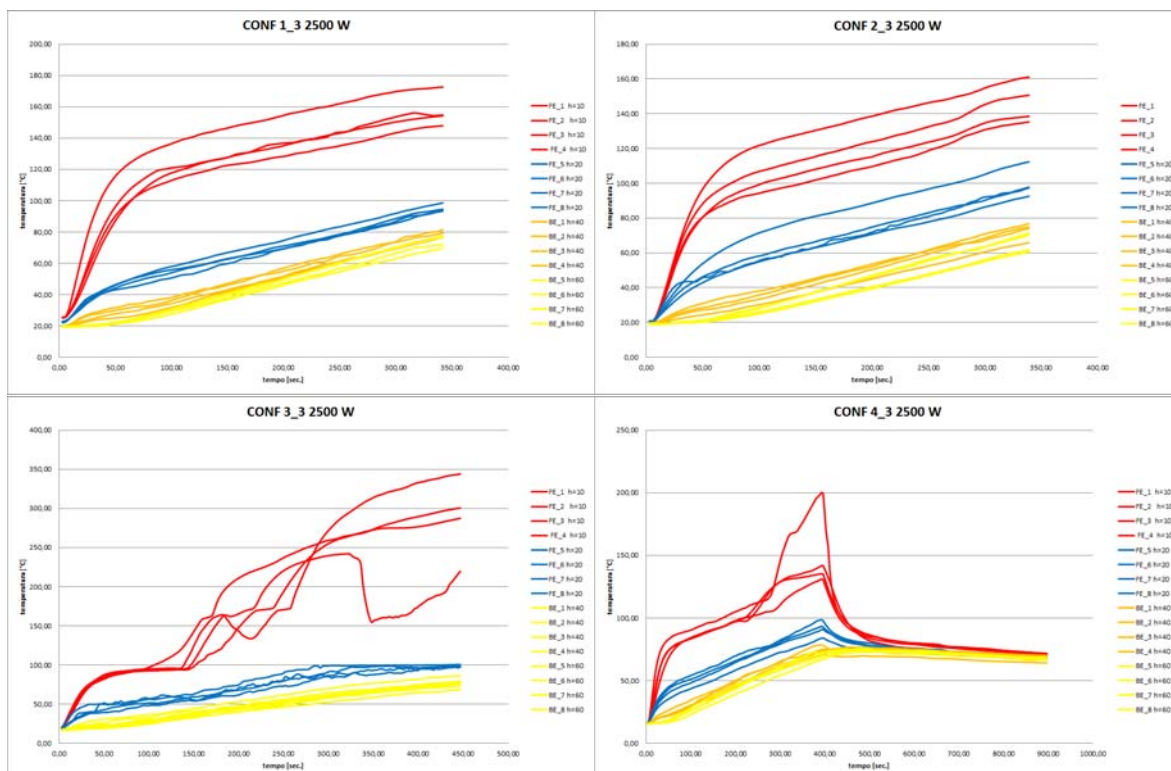


Figura 5.2.9: terza prova T esterne 2500W

Nelle grafici vengono illustrati gli andamenti della temperatura delle termocoppie in funzione del tempo. In particolare è possibile vedere gli andamenti del fondo esterno rispettivamente con i colori rosso , ad un altezza di 10 mm dalla piastra ad induzione, e blu ad un altezza di 20 mm. Inoltre sono rappresentati gli andamenti del bordo esterno con i colori arancione e giallo.

Nei seguenti grafici è possibile notare diversi andamenti tra le varie pentole. In particolare si nota fin da subito quale pentola può essere usata con continuità.

La configurazione numero 1 e numero 2 presentano dei buoni andamenti con le seguenti caratteristiche: si ripetono costanti tra le varie prove , all'aumentare della potenza presentano un aumento di pendenza con conseguente diminuzione del tempo impiegato per raggiungere la temperatura voluta. I trend rilevati possono essere rappresentati con delle linee rette.

La configurazione numero 3 non ha degli andamenti che si ripetono in modo costante nelle diverse prove. Il bordo esterno, colore arancione e giallo, ha un trend lineare dunque anche in questo caso è possibile rappresentarlo con una retta. Diverso è però l'andamento del fondo interno inferiore, colore rosso, dotato di punti con andamenti diversi tra le varie prove. Anche in questa struttura avviene una diminuzione del tempo impiegato in funzione della pendenza del grafico, legato appunto alla potenza fornita. Inoltre con questa particolare struttura ottengo una temperatura finale molto elevata , tendente ad aumentare in funzione della potenza fornita. Si ha, ad esempio un valore massimo raggiunto di 354 °C.

Infine la configurazione numero 4 ha andamenti molto diversi tra le varie prove. Per comprendere al meglio le sue caratteristiche è necessario descrivere il comportamento alle varie potenze. Alla potenza di 1500 W le tre ripetute hanno degli andamenti simili alla prima configurazione con le seguenti differenze: tempo maggiore e pendenza inferiore. Alla potenza di 2000 W le tre prove hanno degli andamenti lineari come nel caso precedente, con la differenza di avere un calo di temperatura 'buco' con il successivo aumento.

Infine la caratteristica più lampante è la prova a 2500 W, nelle tre prove svolte la temperatura non raggiunge il valore richiesto. Questa caratteristica, è dovuta alla deformazione che subisce la pentola all'aumentare della potenza fornita al sistema. La deformazione avviene proprio per il fatto che la struttura è composta da due materiali con diversa conducibilità e deformazione termica. Di conseguenza comporta una deformazione strutturale, con la conseguenza di non essere più a contatto con la piastra ad induzione.

In queste prove è possibile analizzare gli andamenti con dei modelli matematici attraverso delle linee di tendenza. Inoltre per verificare la precisione del modello è stato trovato un coefficiente di determinazione R^2 .

Come è possibile vedere nelle figure gli andamenti presenti su bordo superiore si possono rappresentare con delle linee rette con due coefficienti di determinazione ovvero la pendenza m e il valore iniziale q , mentre con delle polinomiali le funzioni del fondo inferiore. Per confrontare le varie strutture considero dei grafici medi, in cui vengono rappresentati gli andamenti alle diverse altezze rilevate.

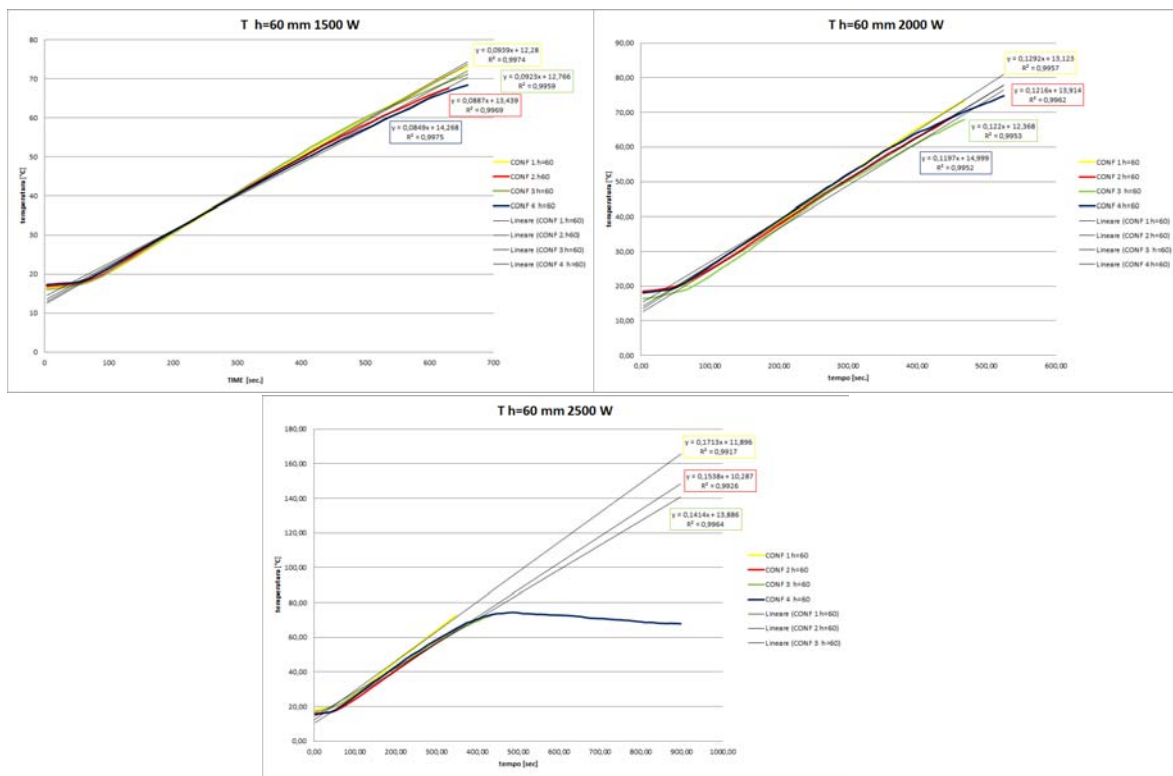


Figura 5.2.10: T medio bordo esterno 60 mm

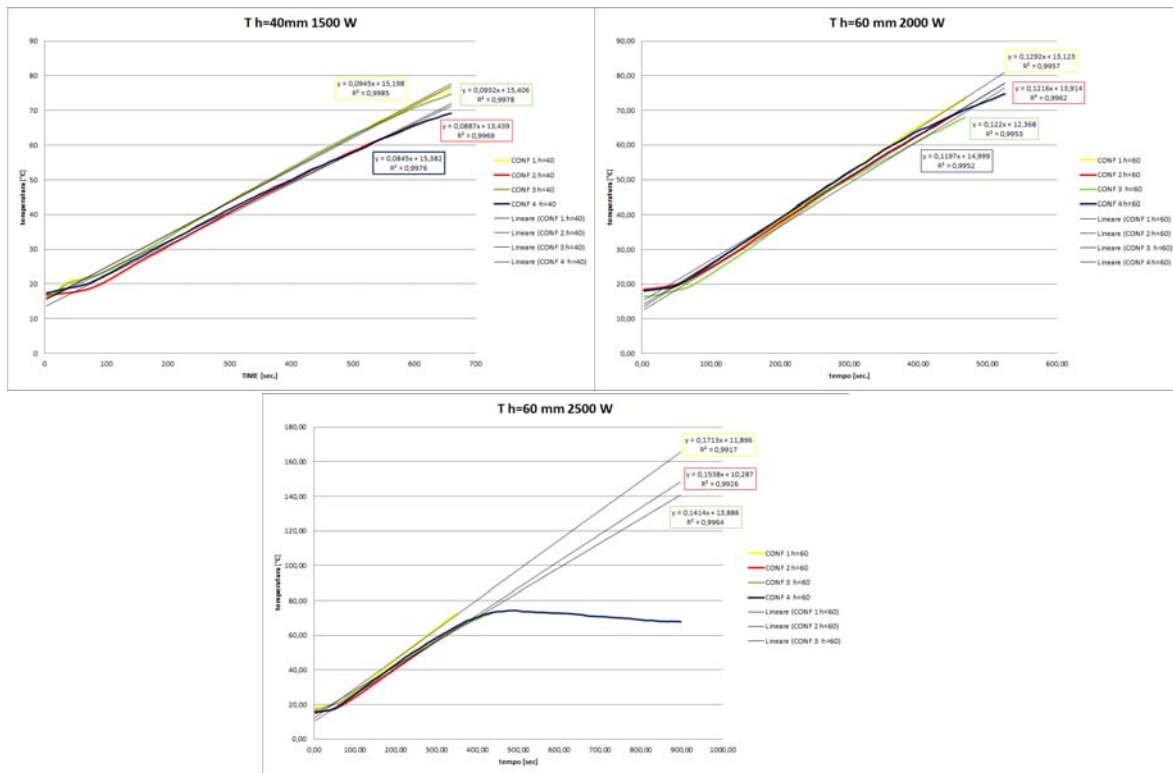


Figura 5.2.11: T medio bordo esterno 40 mm

Da questi grafici è possibile notare, attraverso le linee di tendenza, la migliore struttura.

Essa è la struttura numero due. Le temperature rilevate ad un'altezza di 40 mm vengono perfettamente adattate al modello rispetto alle precedenti rilevate a 60 mm. Con le seguenti prove ottengo le seguenti equazioni riportate in tabella:

| | | T medio h=60mm | T medio h=40mm |
|--------|--------|----------------|----------------|
| 1500 W | CONF.1 | $0,094x+12,3$ | $0,094x+15,2$ |
| | CONF.2 | $0,089x+13,4$ | $0,089x+13,4$ |
| | CONF.3 | $0,085x+14,3$ | $0,085x+15,4$ |
| | CONF.4 | $0,092x+12,8$ | $0,093x+15,4$ |
| 2000 W | CONF.1 | $0,130x+13,1$ | $0,129x+19,5$ |
| | CONF.2 | $0,123x+13,9$ | $0,122x+18,8$ |
| | CONF.3 | $0,120x+14,9$ | $0,120x+18,7$ |
| | CONF.4 | $0,122x+12,4$ | $0,124x+15,8$ |
| 2500 W | CONF.1 | $0,171x+11,8$ | $0,171x+17,8$ |
| | CONF.2 | $0,154x+10,3$ | $0,159x+16,1$ |
| | CONF.3 | $0,140x+13,8$ | $0,144x+18,7$ |
| | CONF.4 | NO | NO |

Figura 5.2.12: andamenti h=60 e 40 mm

I valori qui trovati rappresentano delle rette. Per ogni valore di potenza ottengo un valore di pendenza m abbastanza costante tra le vari pentole. La pendenza maggiore è stata rilevata in tutte le prove svolte sulla configurazione numero 1. Tuttavia essendo queste misure, rilevate sul bordo esterno superiore non incidono particolarmente sulla caratteristica della pentola, essendo il bordo in questione molto sottile.

Quindi è necessario anche fare una stima delle temperature rilevate sul fondo esterno rilevando anche in questo caso gli andamenti medi e trovandone un modello.

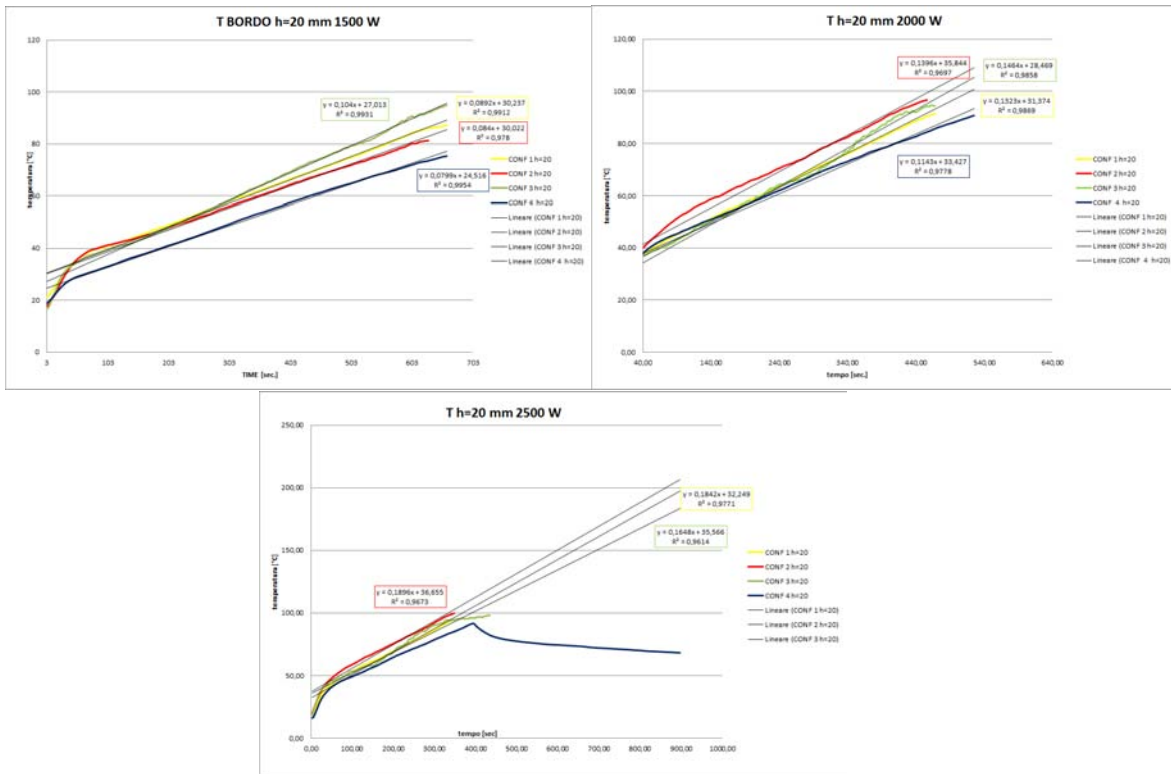


Figura 5.2.13: T medio bordo esterno 20 mm

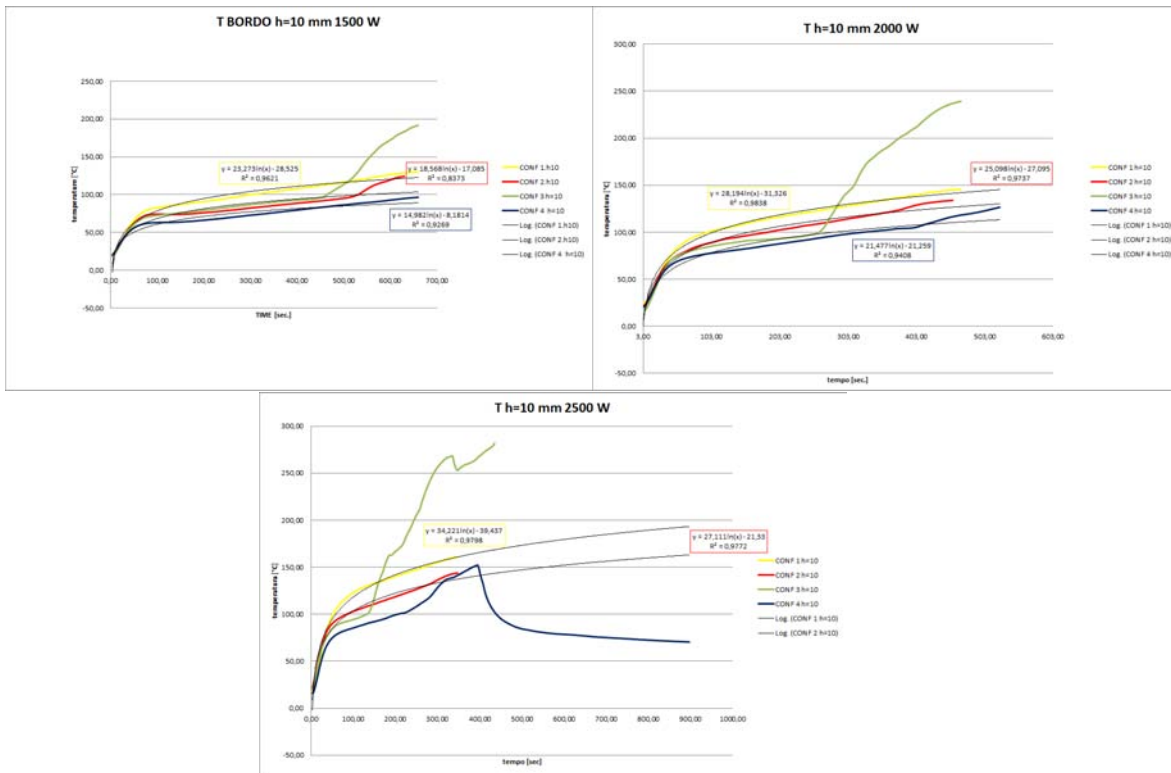


Figura 5.2.14: T medio bordo esterno 10 mm

Dalle misure qui rilevate è possibile notare che gli andamenti possono essere rappresentati con delle linee rette, con $h=20$ mm, mentre possono essere rappresentati con un andamento logaritmico, con $h=10$ mm. Anche in questo caso la struttura numero 4 termo diffusore non raggiunge l'obiettivo della prova, quindi in alcune di queste prove non è possibile attribuire una linea di tendenza. Nelle prove eseguite sulla pentola numero 2 invece si nota, che la temperatura trasmessa dalla superficie esterna ha dei valori superiori rispetto alle altre strutture, tendenti in alcuni casi anche a superare i 350 °C. Nelle prove si osserva quindi la difficoltà di attribuire un modello alla struttura numero 3, pertanto si focalizzerà l'attenzione sulle strutture numero 1 e numero 2.

Le seguenti prove quindi possono essere rappresentate con delle funzioni matematiche rappresentate in tabella:

| | | T medio h=20mm | T medio h=10mm |
|--------|--------|----------------|--------------------|
| 1500 W | CONF.1 | $0,089x+30,2$ | $23,3\ln(x)-28,5$ |
| | CONF.2 | $0,084x+30,0$ | $18,5\ln(x)-17,1$ |
| | CONF.3 | $0,104x+27,0$ | NO |
| | CONF.4 | $0,079x+24,5$ | $14,9\ln(x)-8,18$ |
| 2000 W | CONF.1 | $0,132x+31,4$ | $28,2\ln(x)-31,3$ |
| | CONF.2 | $0,1396x+35,8$ | $25,9\ln(x)-24,1$ |
| | CONF.3 | $0,146x+28,5$ | NO |
| | CONF.4 | $0,114x+33,4$ | $21,5\ln(x)-21,3$ |
| 2500 W | CONF.1 | $0,184x+32,2$ | $34,2\ln(x)-39,4$ |
| | CONF.2 | $0,189x+36,7$ | $27,11\ln(x)-21,3$ |
| | CONF.3 | $0,165x+35,6$ | NO |
| | CONF.4 | NO | NO |

Figura 5.2.15: andamenti $h=20$ e 10 mm

Dai dati trovati risulta che la struttura migliore è la numero 1, infatti ha delle curve logaritmiche, con $h=10$ mm, superiori rispetto alle altre pentole. Mentre dalle prove rilevate ad $h=20$ mm, risulta che la pendenza maggiore è stata rilevata nella topologia numero 3. Questo spiega la temperatura elevata trovata nei grafici.

5.3 TERZA PROVA

Questa prova rileva le temperature interne della pentola con delle termocoppie tipo T. Vengono posizionate le termocoppie in modo speculare alle misure esterne: 8 punti posizionati sul bordo superiore interno, mentre le altre otto sul fondo interno. Lo scopo consiste nel determinare la temperatura del fondo della pentola.

Qui sotto vengono rappresentati i risultati grafici delle varie prove svolte nelle varie configurazioni e alle diverse potenze.

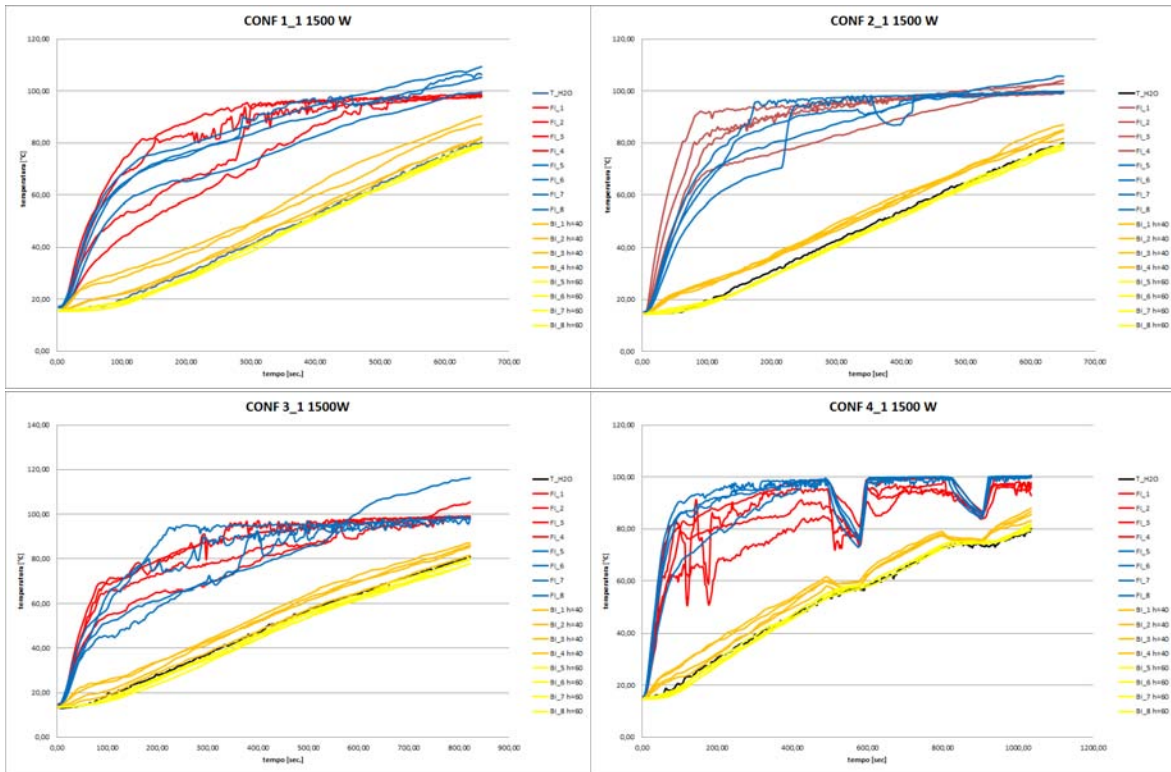


Figura 5.3.1: prima prova T interne 1500W

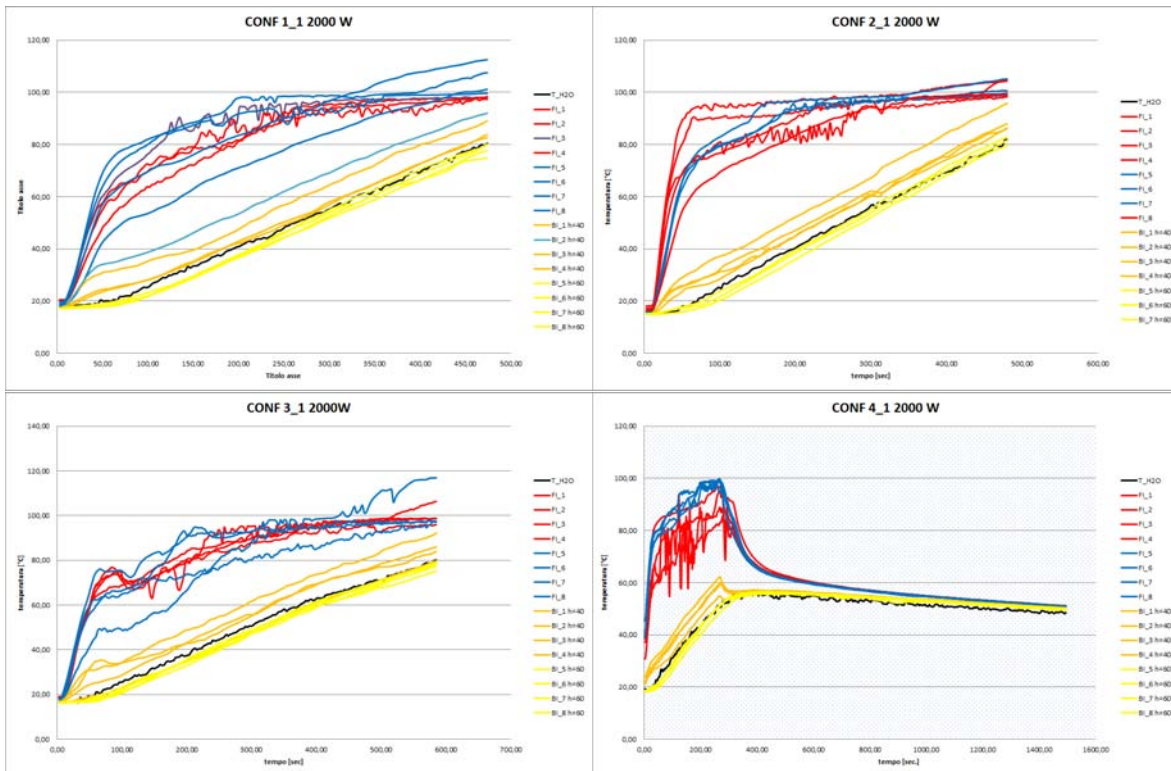


Figura 5.3.2: prima prova T interne 2000W

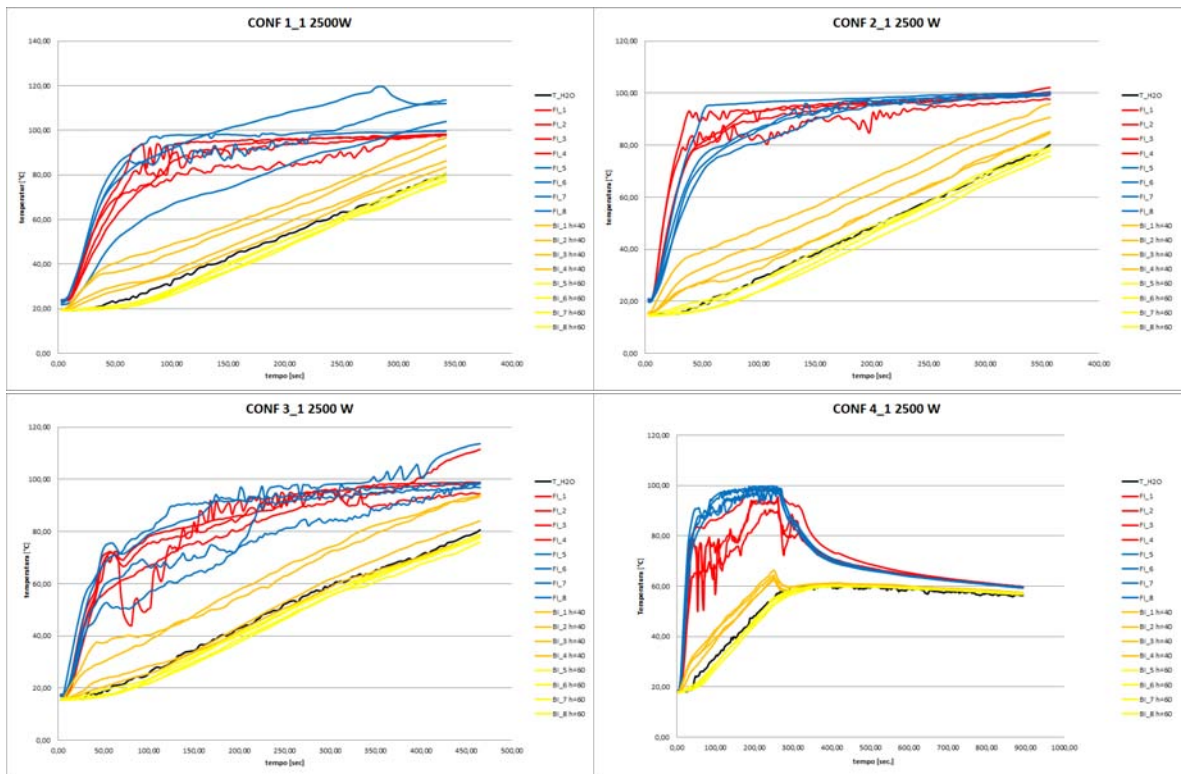


Figura 5.3.3: prima prova T interne 2500W

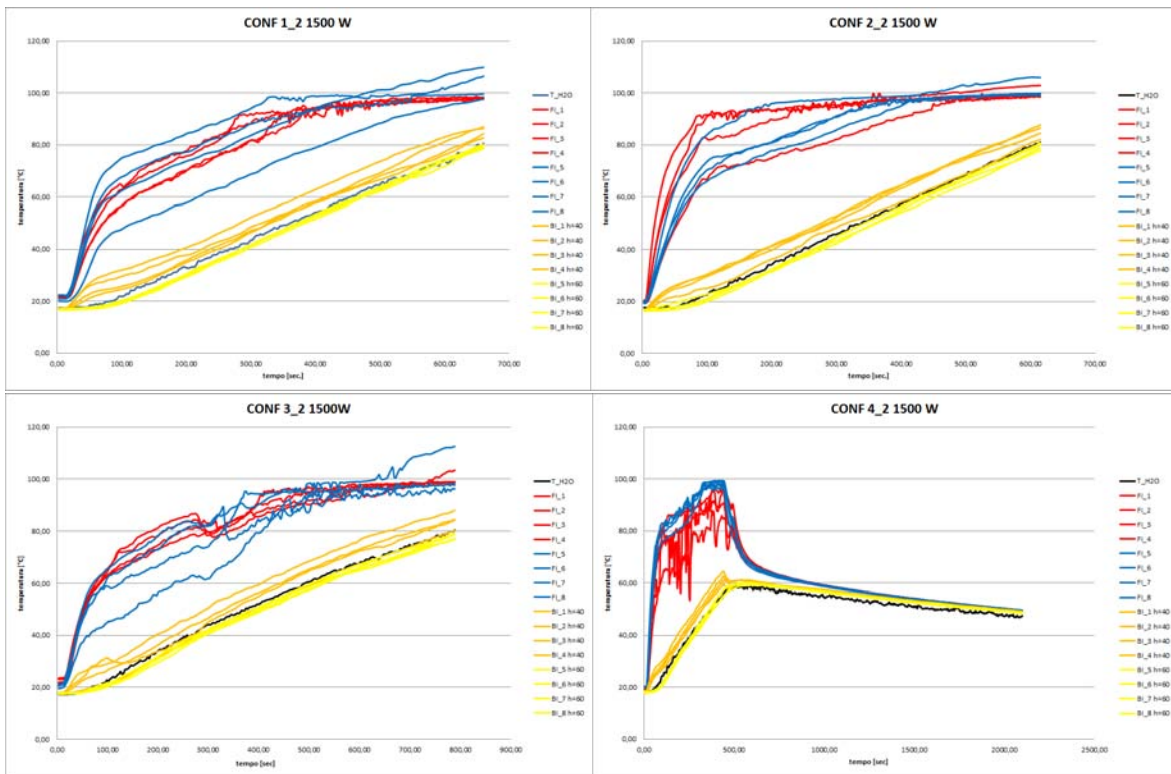


Figura 5.3.4: seconda prova T interne 1500W

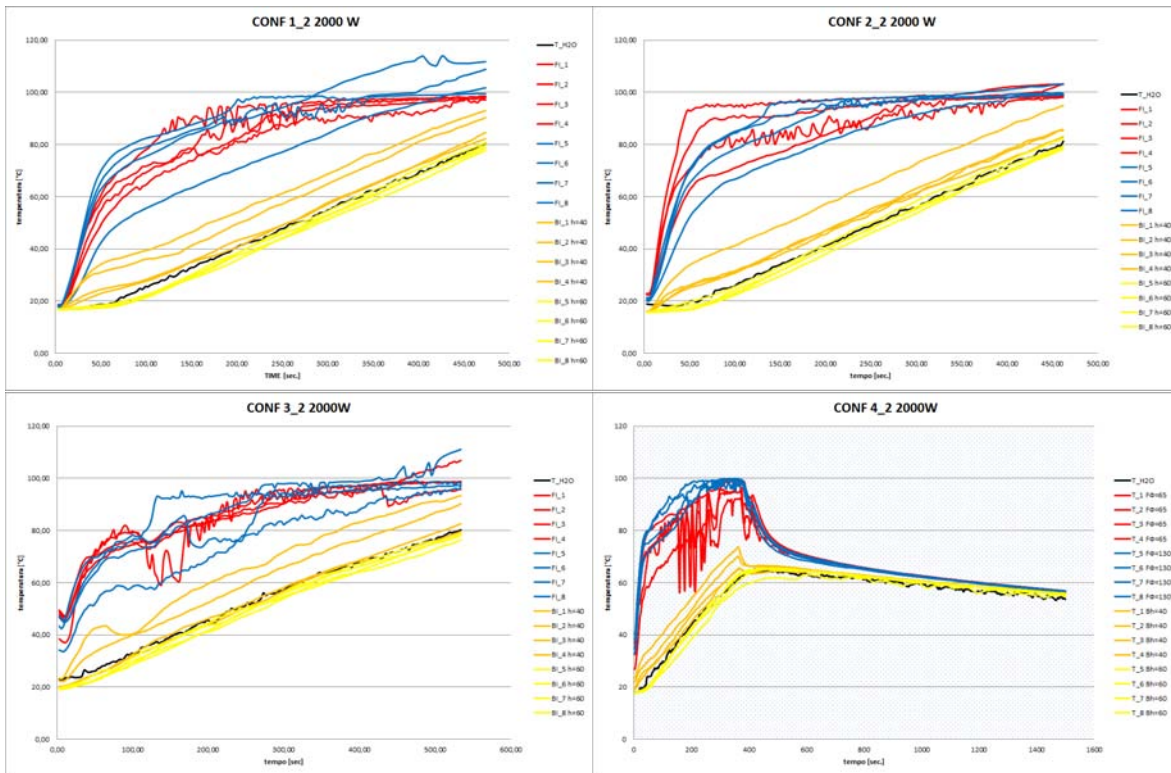


Figura 5.3.5: seconda prova T interne 2000W

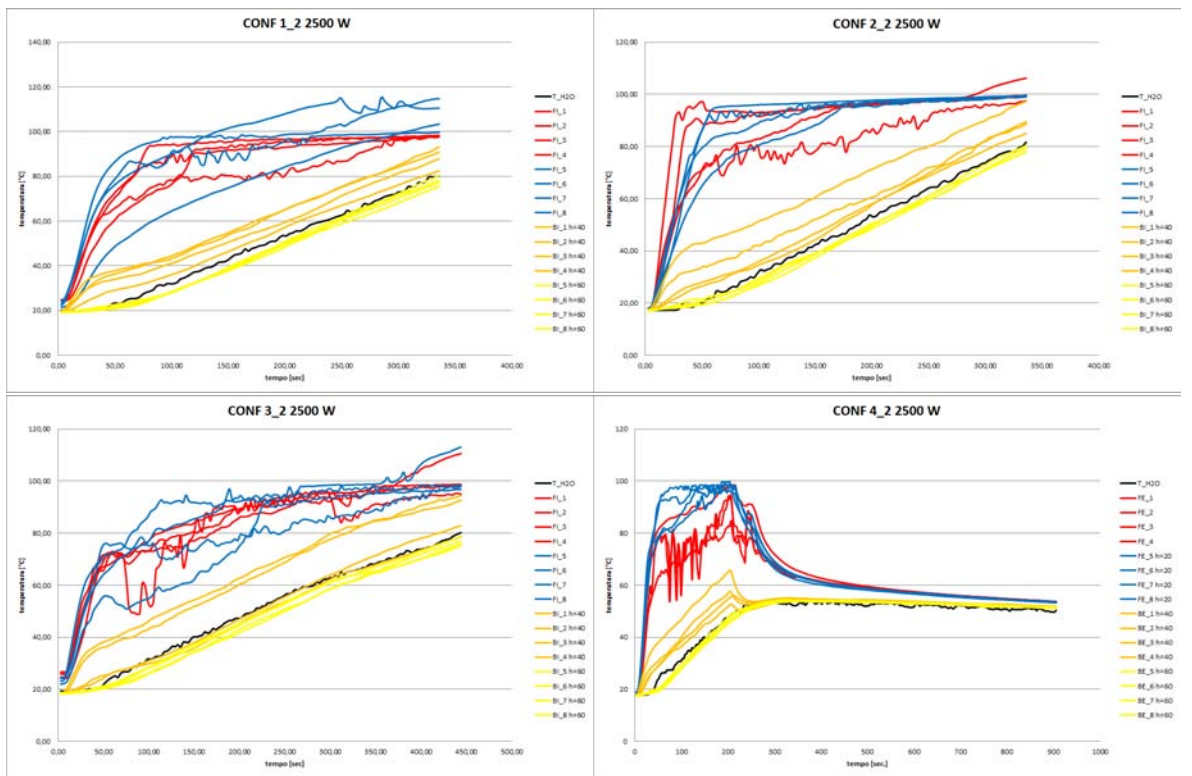


Figura 5.3.6: seconda prova T interne 2500W

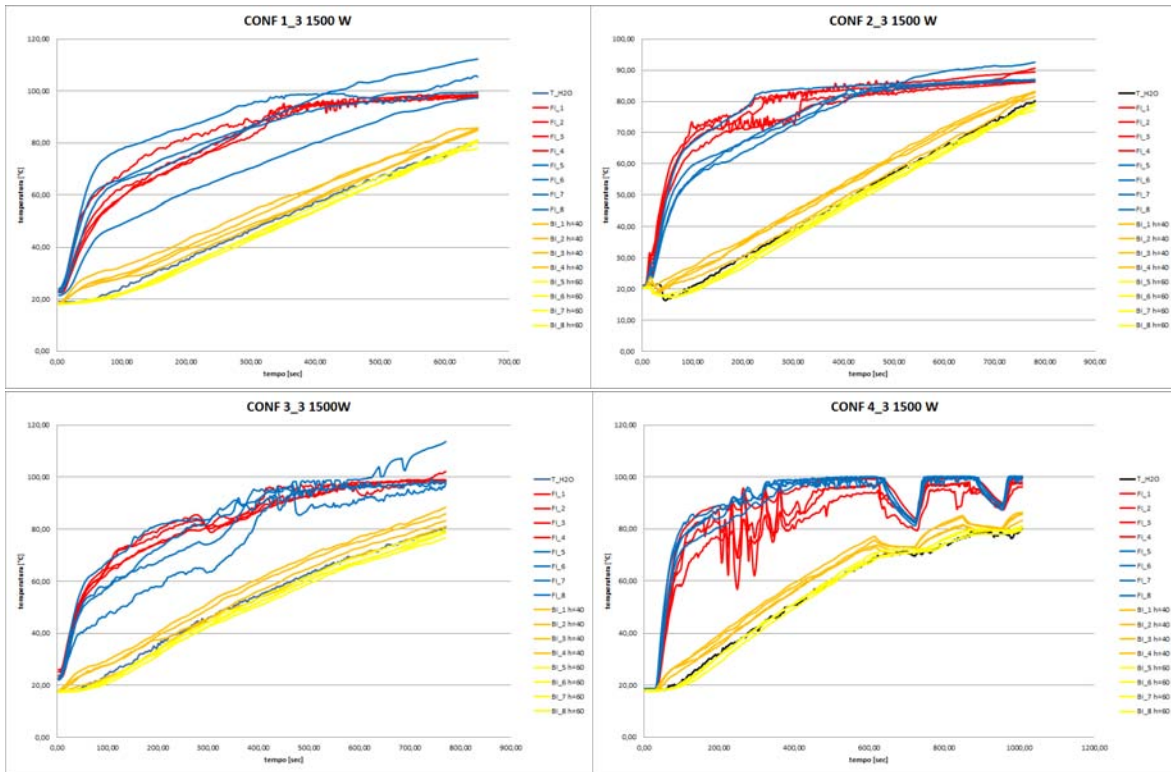


Figura 5.3.7: terza prova T interne 1500W

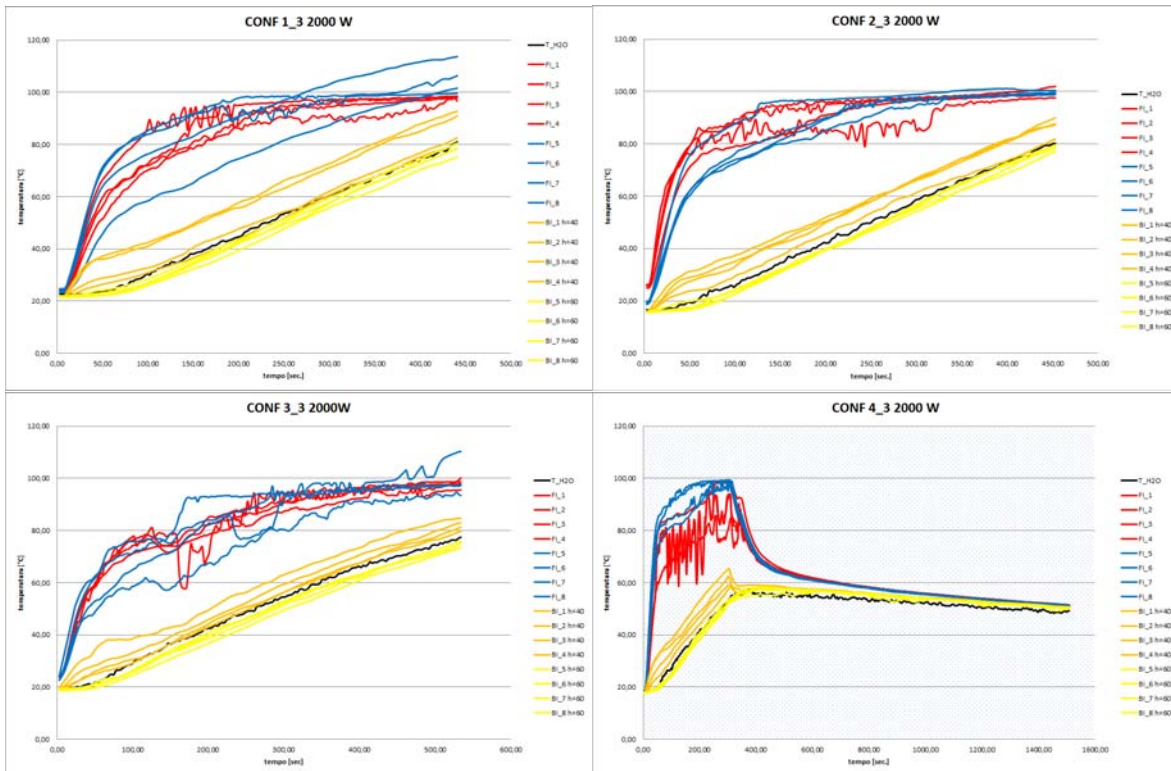


Figura 5.3.8: terza prova T interne 2000 W

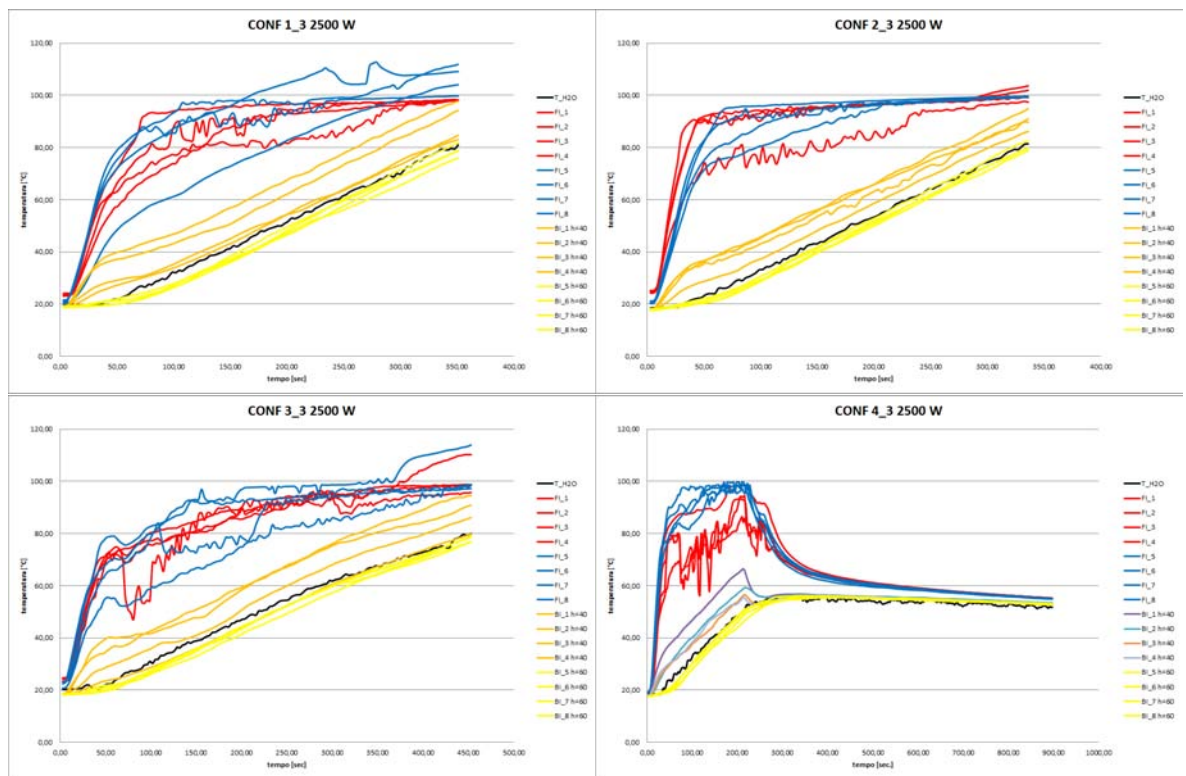


Figura 5.3.9: terza prova T interne 2500 W

In questi grafici vengono indicati con il colore arancione e giallo le temperature del bordo interno rilevate rispettivamente all'altezza di 40 mm e 60 mm, con il colore rosso le temperature centrali del fondo disposte su una circonferenza di diametro 65 mm e con il colore blu le temperature centrali del fondo disposte anche in questo caso su una circonferenza di diametro 130 mm. Infine è stata anche diagrammata la temperatura dell'acqua misurata da una termocoppia disposta in una posizione centrale rispetto al liquido riscaldato. Con una prima analisi grafica è possibile constatare che le temperature misurate su bordo esterno possono essere rappresentate con una retta lineare, mentre le temperature del fondo interno vengono rappresentate con andamenti logaritmici.

Teoricamente questi ultimi valori come è possibile vedere nel grafico rilevano la temperatura a contatto con il fondo, quindi rilevano la temperatura dello strato limite che per ovvie ragioni non supera la temperatura di 100 °C. Tuttavia alcune termocoppie presenti nel sistema, rilevano una temperatura superiore a quella stimata teoricamente.

Per dare un significato alle prove svolte si considera la temperatura media, ad essa verrà poi attribuito un modello matematico.

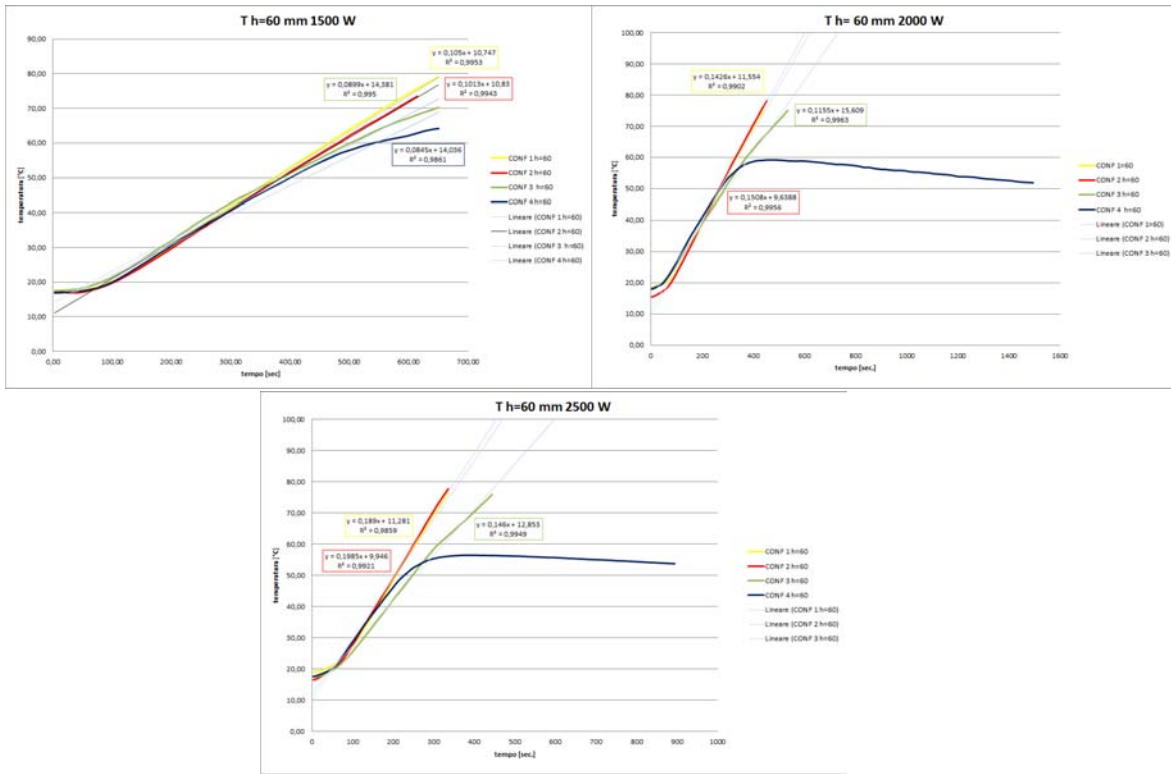


Figura 5.3.10: T medio bordo interno h=60mm

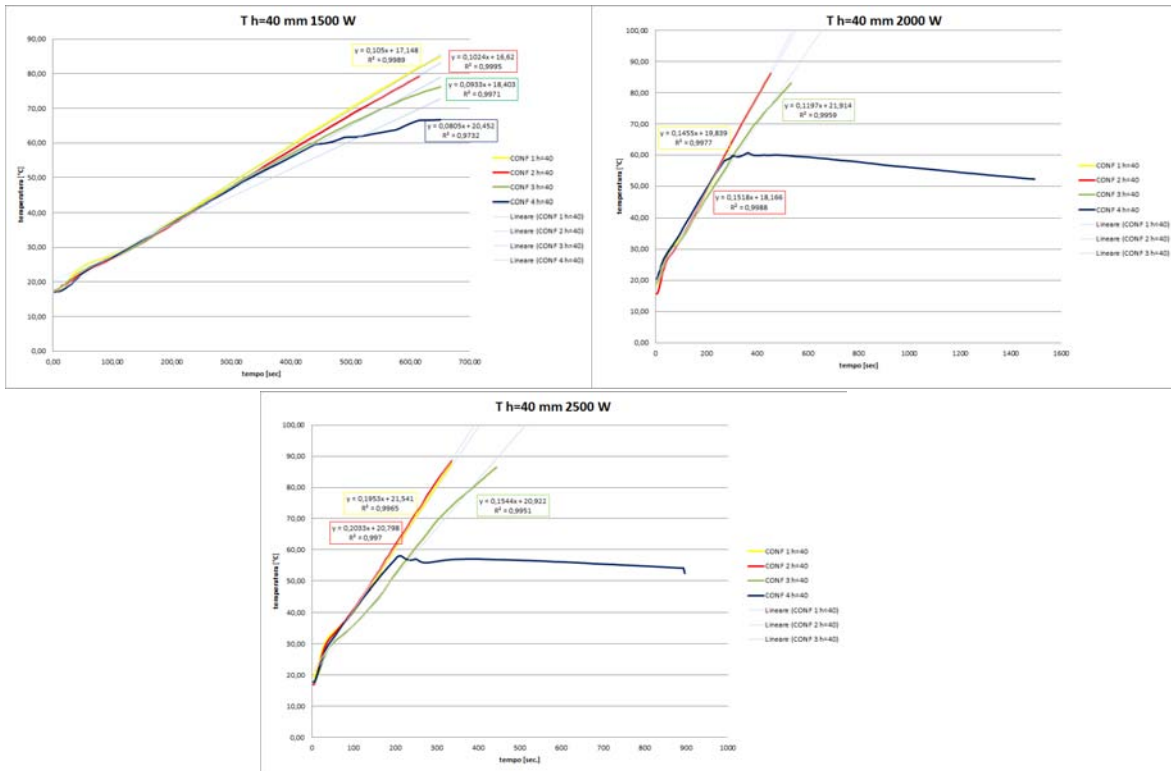


Figura 5.3.11: T medio bordo interno h=40mm

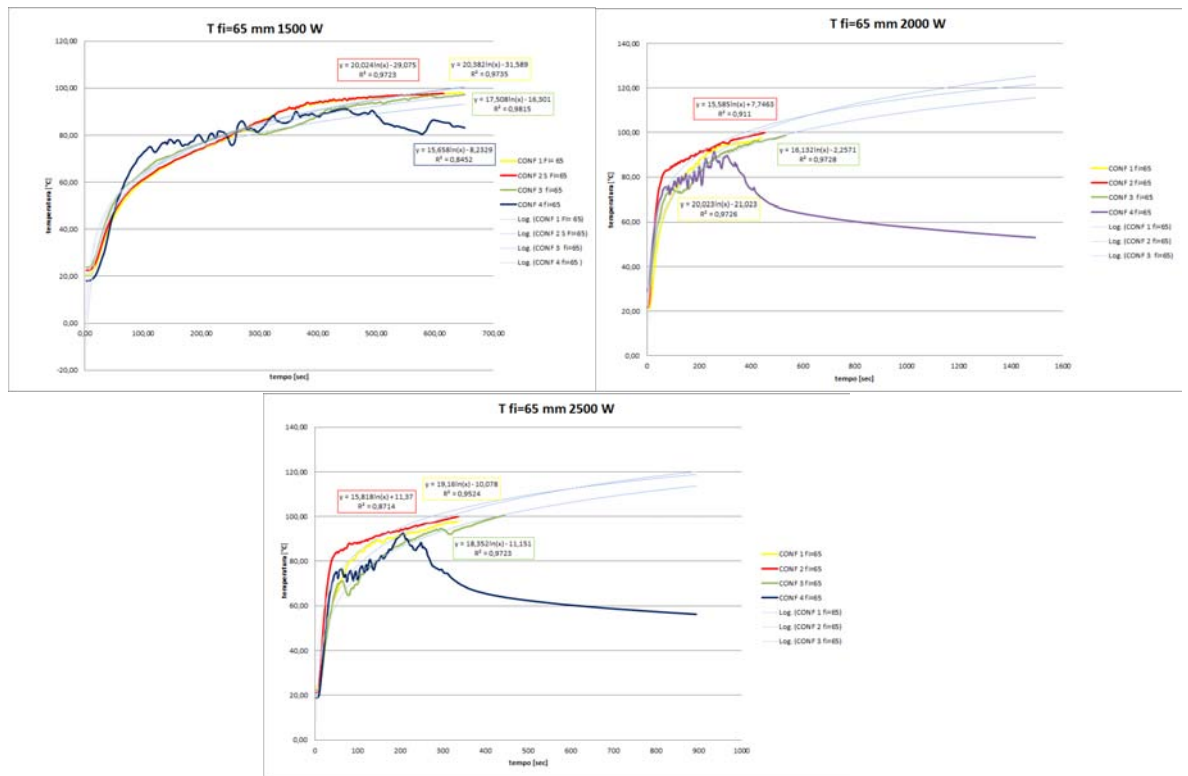


Figura 5.3.12: T medio fondo interno $h=65\text{ mm}$

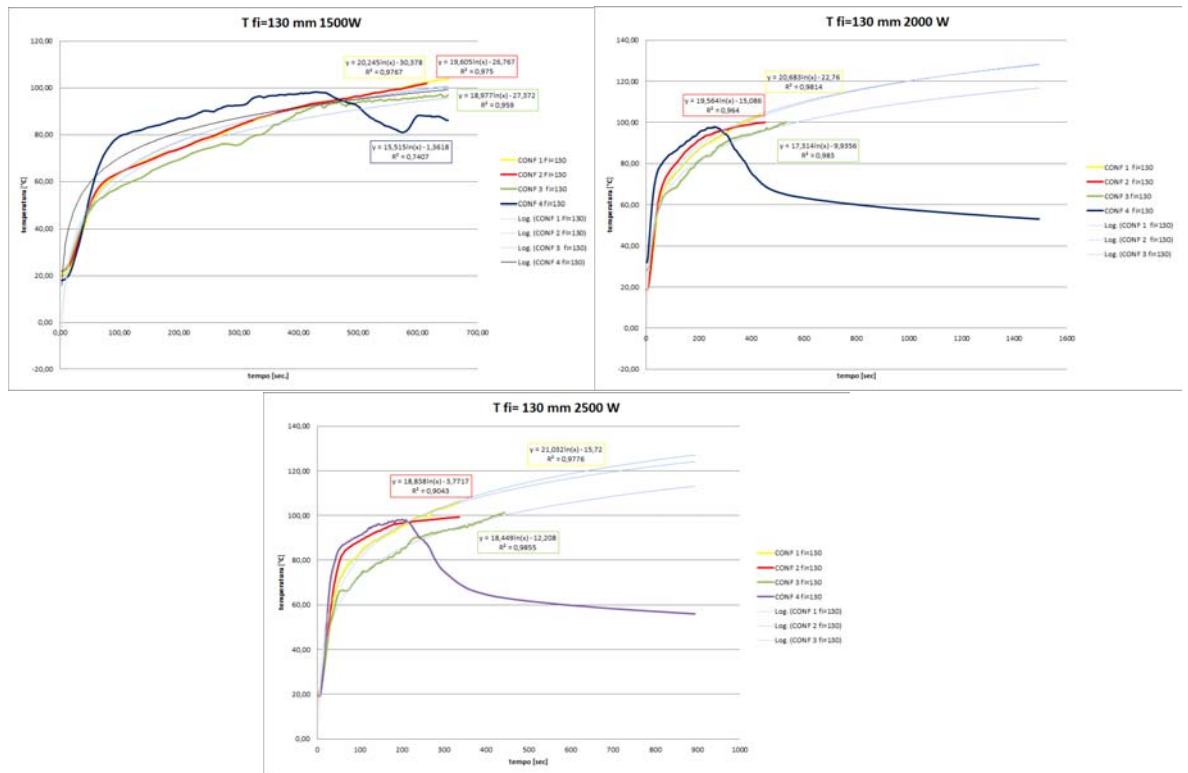


Figura 5.3.13: T medio fondo interno $h=130\text{ mm}$

In queste prove è stato dato un significato attraverso degli andamenti lineari o logaritmici. La struttura numero 4 nella maggior parte delle prove svolte non è stata trattata con una linea di tendenza perché non riesce a raggiungere la temperatura voluta.

Le prove in questione sono riassunte nelle due tabelle qui sotto.

| | | T medio h=60mm | T medio h=40mm |
|--------|--------|----------------|----------------|
| 1500 W | CONF 1 | $0,105x+10,7$ | $0,105x+17,1$ |
| | CONF 2 | $0,101x+10,9$ | $0,102x+16,6$ |
| | CONF 3 | $0,089x+14,4$ | $0,093x+18,4$ |
| | CONF 4 | $0,085x+14,1$ | $0,081x+20,5$ |
| 2000 W | CONF 1 | $0,143x+11,6$ | $0,146x+19,8$ |
| | CONF 2 | $0,151x+9,64$ | $0,152x+18,2$ |
| | CONF 3 | $0,116x+15,6$ | $0,119+21,8$ |
| | CONF 4 | NO | NO |
| 2500 W | CONF 1 | $0,189x+11,3$ | $0,195x+21,5$ |
| | CONF 2 | $0,198x+9,95$ | $0,203x+20,8$ |
| | CONF 3 | $0,146x+12,9$ | $0,155x+20,9$ |
| | CONF 4 | NO | NO |

Figura 5.3.14: andamenti h=60 e 40 mm

| | | T medio $\Phi=65$ mm | T medio $\Phi=130$ mm |
|--------|--------|----------------------|-----------------------|
| 1500 W | CONF 1 | $20,2\ln(x)-30,4$ | $20,4\ln(x)-31,6$ |
| | CONF 2 | $26,8\ln(x)-26,8$ | $20,0\ln(x)-29,1$ |
| | CONF 3 | $18,9\ln(x)-27,4$ | $17,5\ln(x)-16,3$ |
| | CONF 4 | $15,5\ln(x)-1,36$ | $15,6\ln(x)-8,23$ |
| 2000 W | CONF 1 | $20,1\ln(x)-21,1$ | $20,7\ln(x)-22,8$ |
| | CONF 2 | $15,6\ln(x)+7,75$ | $19,6\ln(x)-15,1$ |
| | CONF 3 | $16,1\ln(x)-2,26$ | $17,3\ln(x)-9,94$ |
| | CONF 4 | NO | NO |
| 2500 W | CONF 1 | $19,2\ln(x)-10,1$ | $21,0\ln(x)-15,7$ |
| | CONF 2 | $15,8\ln(x)+11,4$ | $18,8\ln(x)-3,77$ |
| | CONF 3 | $18,4\ln(x)-11,2$ | $18,5\ln(x)-12,2$ |
| | CONF 4 | NO | NO |

Figura 5.3.15: andamenti $\Phi=65$ e 130 mm

Nella prima tabella vengono rappresentate degli andamenti rettilinei ,mentre nella seconda tabella sono state rappresentate delle funzioni logaritmiche. In entrambe si nota che a causa della ripetibilità degli esperimenti, la struttura numero 4 non riesce a soddisfare le esigenze

richieste alla potenza di 2000 e 2500 W. Pertanto a queste prove non viene attribuita una tendenza.

Il risultati che si ottengono mettono in evidenza che per una potenza di 1500 W nelle misure rilevate all'altezza di 60 mm e di 40 mm le rette sono simili e tendono a seguire l'andamento dell'acqua, i risultati migliori si ottengono, come nella prova precedente, nella configurazione numero 4. Alla stessa potenza gli andamenti del fondo sono logaritmici dove prevale la struttura numero 2.

Nelle altre prove eseguite alla potenza di 2000 e 2500 W l'andamento ottimale viene riscontrato nella struttura in numero 2. In queste ultime prove, gli andamenti sono molto simili tra la struttura numero 1 e la struttura numero 2. In quanto esse sono dotate dello stesso fondo ma sono rifinite diversamente.

5.4 QUARTA PROVA

La quarta ed ultima prova è stata come già detto eseguita riscaldando 2 litri di Agar, portando quest'ultima dallo stato solido, presente a temperatura ambiente, allo stato liquido. Per fare ciò, e per permettere a tutto il liquido di cambiare fase è stato riscaldato fino alla temperatura di 100 °C. . Date le numerose ripetute per ciascuna pentola, per velocizzare le varie prove vengono poste le pentole in un abbattitore di temperatura.

Lo scopo della prova è capire attraverso la rilevazione di 19 misure di temperature come si diffonde il liquido all'interno di un liquido diverso dall'acqua, e capire se sono presenti stratificazioni di temperatura. Tutto ciò è reso possibile attraverso 19 termocoppie disposte su tre livelli di altezza collocate su un particolare sostegno. Anche in questa prova sono state eseguite 3 ripetute per pentola per ciascun livello di potenza prestabilito, ovvero 1500, 2000 e 2500 W. I risultati ottenuti sono i seguenti e vengono rappresentati di seguito.

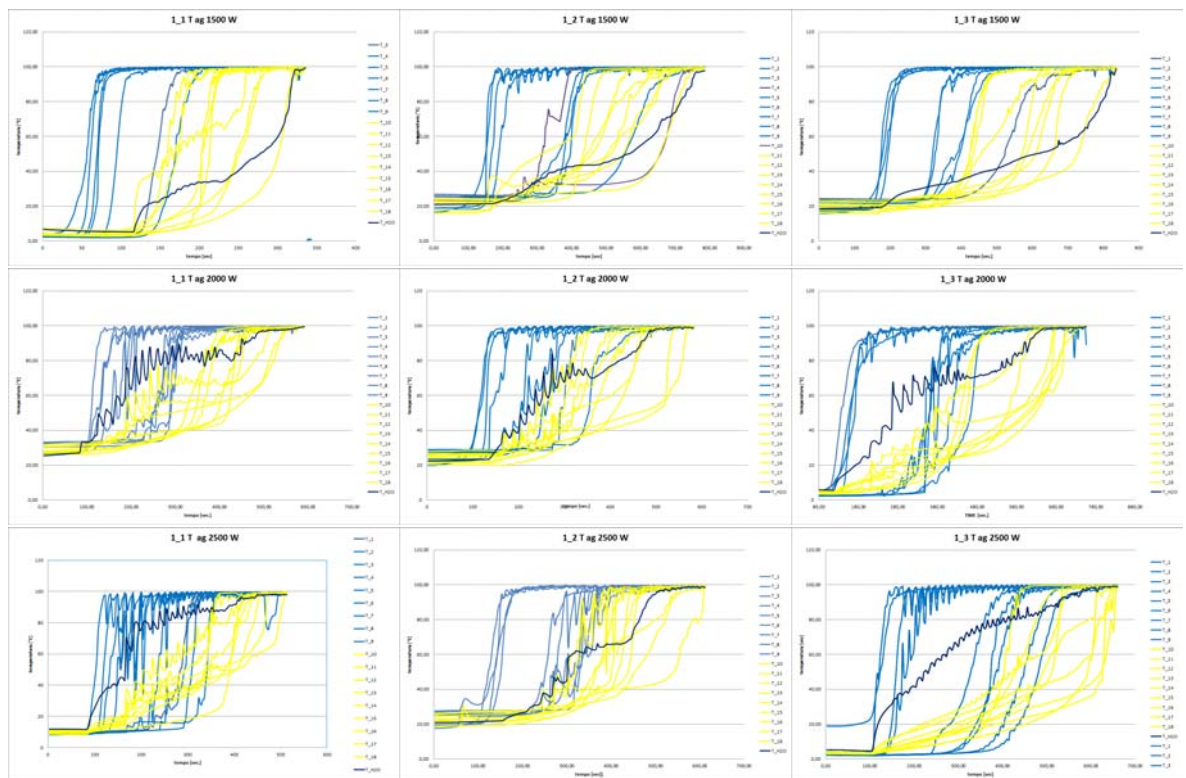


Figura 5.4.1: prima configurazione

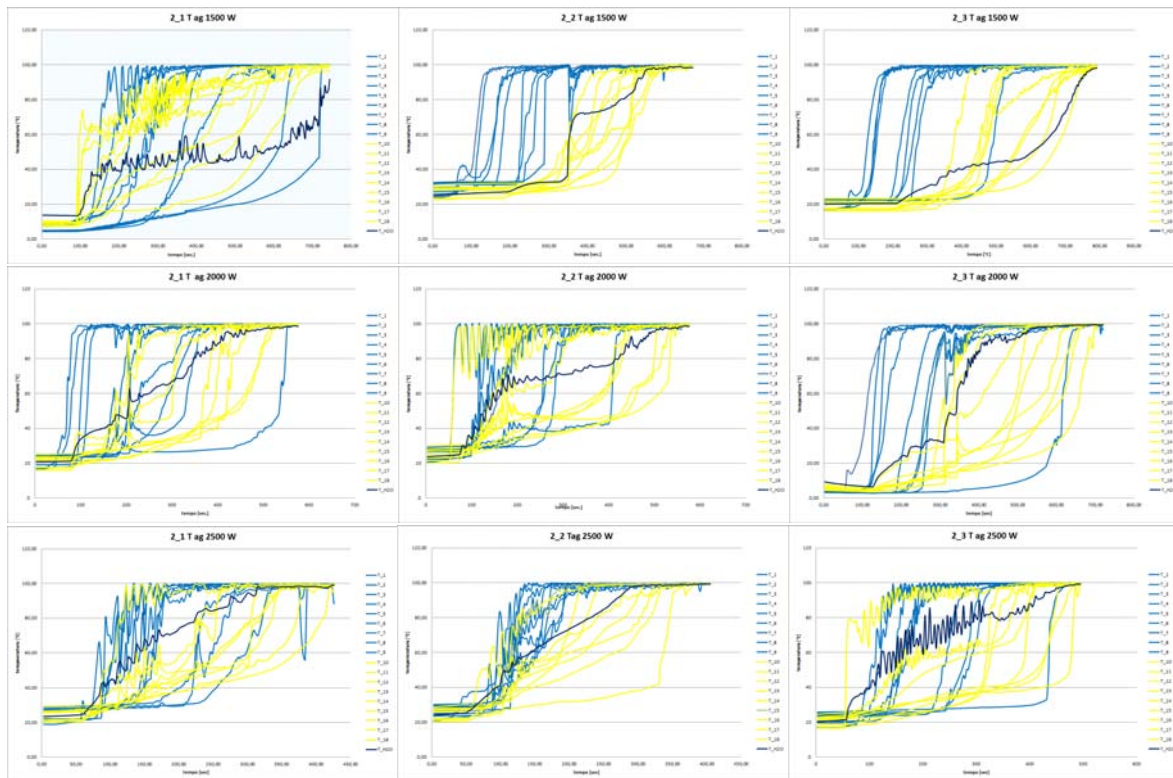


Figura 5.4.2: seconda configurazione

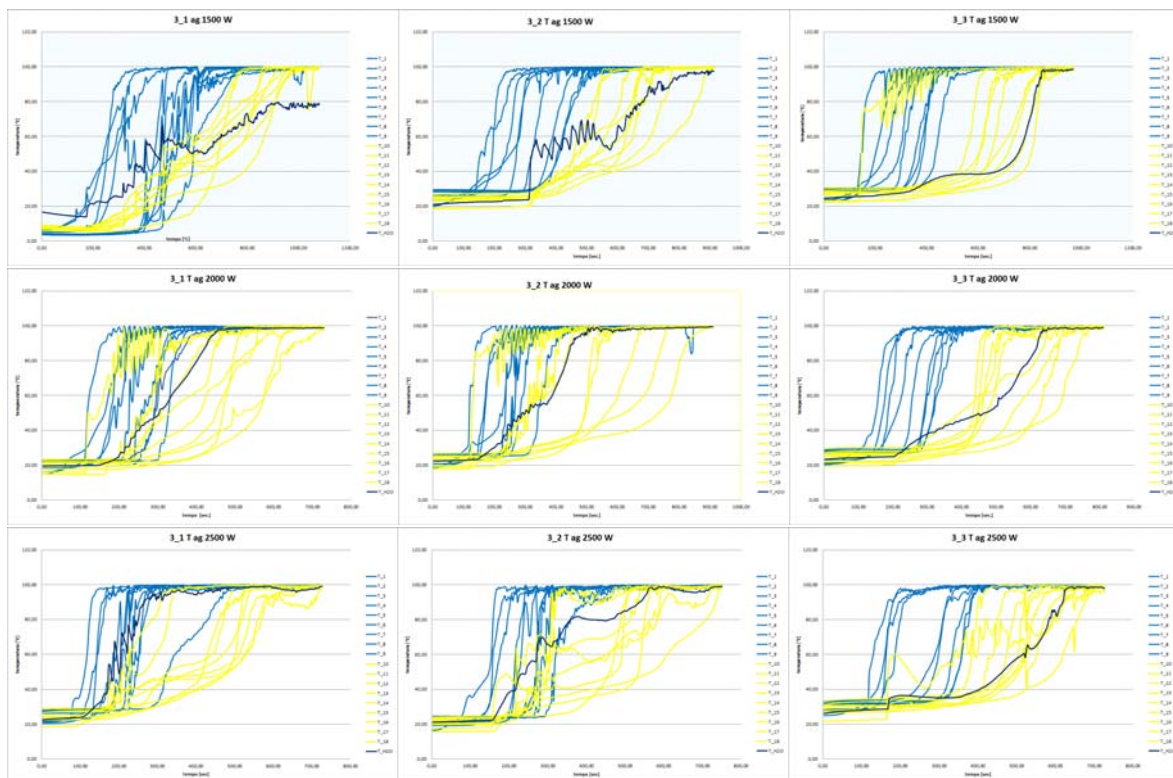


Figura 5.4.3: terza configurazione

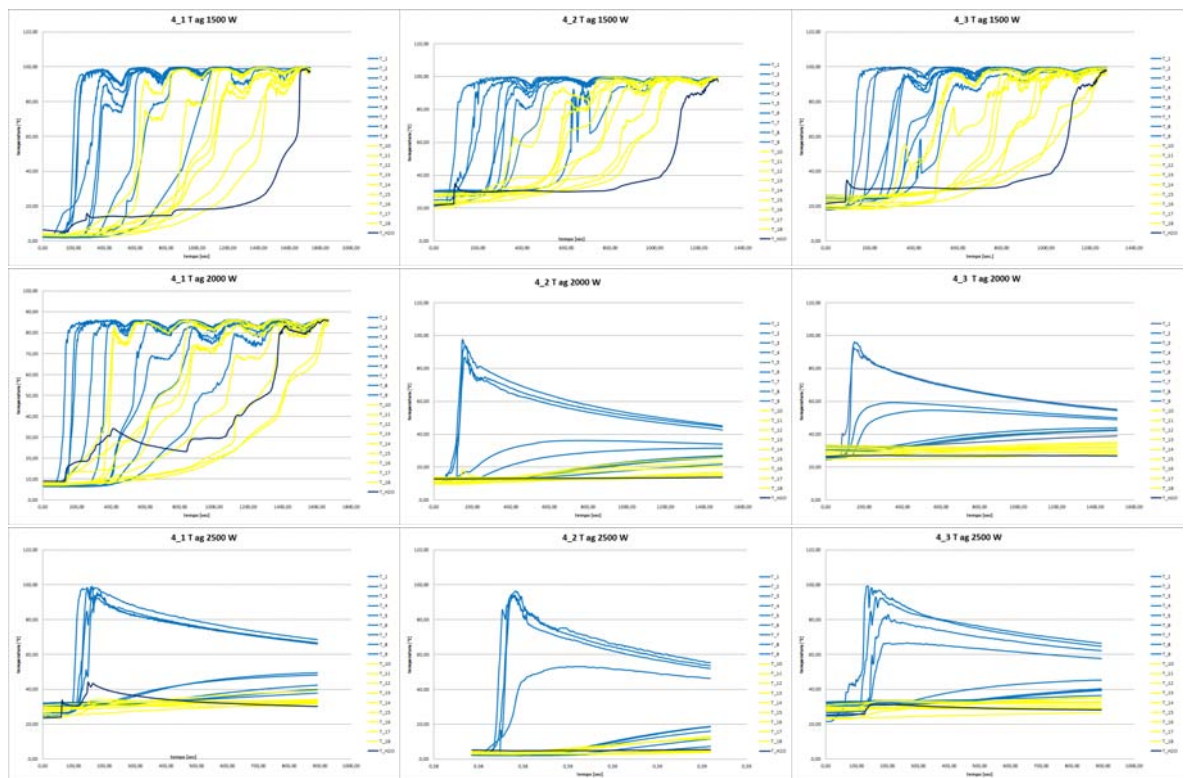


Figura 5.4.4: quarta configurazione

In questi grafici sono rappresentati gli andamenti di temperatura nei due strati diversi, con il colore blu le 9 temperature inferiori in prossimità del fondo, mentre con il colore giallo le 9 temperature superiori. Si nota che i vari andamenti della stessa configurazione non si ripetono nella stessa maniera dunque sono di difficile lettura e analisi. Infatti l'idea era quella di trovare un modello rappresentato da una formula matematica che rispecchi le curve trovate. Il primo tentativo è stato fatto studiando nei primi istanti di tempo quali sono gli andamenti delle temperature, come seconda prova è stata usata la funzione logistica. In entrambi i casi le prove svolte non hanno prodotto nessun risultato. Quindi questa esperienza al fine della ricerca non è significativa.

5.4.1 DILATAZIONI

Un effetto ripetitivo durante tutte le prove è la difficoltà rilevata della quarta configurazione. Essa infatti, nelle prove eseguite alla potenza di 2000 e di 2500 W non riesce a portare a buon fine la prova. Quello che avviene in questa struttura non è altro che la dilatazione termica. La struttura, essendo composta da multistrato al suo interno, risponde in modo particolare all'effetto del calore; i materiali presenti al suo interno hanno delle dilatazioni diverse, quindi l'effetto finale che si crea è una deformazione della superficie di contatto.

Nel caso più estremo, ovvero a 2500 W la superficie di contatto passa da una geometria lineare a una geometria ovalizzata dove l'unico punto di contatto è il centro. In questo caso il bordo esterno in entrambi le estremità della pentola si solleva di 7-8 mm. L'effetto è illustrato nella figura seguente.



Figura 5.4.5: dilatazione termica

Questo effetto, molto frequente nella pentola provoca la variazione della struttura cristallina della pentola, comportando dopo n ripetute una deformazione della geometria anche quando la pentola è a riposo. Quest'ultimo fattore comporterà anche la variazione delle prove successive determinando un mal funzionamento del sistema.

Capitolo 6

CONCLUSIONI

Dalle varie prove svolte è possibile capire come avviene la distribuzione del calore nelle varie strutture analizzate. Le prove studiano come avviene la distribuzione di temperatura nelle diverse pentole.

In queste prove infatti si nota come reagisce il bordo e il fondo delle varie configurazioni. Nella prima prova è stato possibile comprendere quale pentola è più efficiente. Nella seconda e terza prova sono state rilevate diverse temperature. Gli andamenti del bordo sono lineari, seguono l'andamento del liquido riscaldato, mentre il fondo ha un andamento logaritmico. Nell'ultima prova è stata riscaldata l'agar per comprendere come avviene il riscaldamento all'interno del liquido. Purtroppo queste prove non hanno dato nessun risultato concreto.

Si evince che la struttura adatta maggiormente al nuovo tipo di elettrodomestico professionale è la configurazione numero 1. Essa è composta da un materiale pieno con caratteristiche magnetiche adatte al riscaldamento ad induzione. Inoltre, dalle prove svolte, si comprende che è l'unica adatta all'obiettivo prefissato.

Inoltre la configurazione numero 1 non si deforma quando la temperatura aumenta. Dalle prove non è presente una netta differenza tra la struttura numero 1 e la struttura numero 2, le due pentole rispondono alle prove svolte con le stesse caratteristiche.

Dalle configurazioni numero 3 e numero 4 si rileva che non presentano le caratteristiche richieste.

La terza struttura è meno performante perché i tempi di risposta sono superiori. Il calore si disperde nella superficie esterna, raggiungendo delle temperature elevate che provocano un cambiamento di colore e una variazione strutturale del materiale riscaldato. Questo fenomeno di dispersione termica rende la configurazione numero tre poco efficace. Inoltre, dalle osservazioni di questa pentola, composta da materiale multistrato, si rileva una superficie d'appoggio instabile rispetto al piano di cottura dopo numerose prove.

Infine, la quarta pentola, con materiale multistrato, presenta un comportamento instabile. Come è stato dedotto nelle varie prove essa ha comportamenti diversi alle diverse temperature. Nelle prove realizzate con potenza 1500 W, la pentola conduce il calore, ottenendo dei tempi di risposta molto lunghi. Nelle ripetute eseguite a 2000 e 2500 W la pentola tende a deformarsi comportando il distacco della stessa con il piano di cottura. Questo è più evidente con la ripetizione delle prove, con un cambiamento strutturale anche a riposo. Per questo motivo, la pentola numero 4, ideata per il riscaldamento ad induzione, non raggiunge l'obiettivo.

L'obiettivo di creare un metodo di comparazione tra diverse configurazioni di pentole, utilizzando come fonte di riscaldamento un piano ad induzione, ha permesso di raccogliere dei dati sperimentali per ricavare una caratterizzazione termica tra varie configurazioni.

Per raggiungere questo obiettivo viene utilizzato un approccio di ricerca-azione cercando la soluzione, con vari tentativi a volte anche fallimentari, per ricavare un metodo di comparazione. Viene realizzata una postazione di misura attraverso la connessione di termocoppie e di strumenti di acquisizione. Con i dati ricavati dalle varie misurazioni è stato creato un metodo che presenta dei punti di forza e dei punti di debolezza ancora aperti. La ricerca utilizza delle linee interpolanti che descrivono con delle formule matematiche l'andamento delle diverse configurazioni.

Il metodo di comparazione potrebbe essere utilizzato dall'azienda Electrolux per l'acquisizione e l'analisi termica ed energetica dei prossimi elettrodomestici professionali.

Bibliografia

- [1] Sergio Lupi, « Appunti di elettrotermia »
- [2] <http://www.recensioni-piano-cottura-ad-induzione-magnetica.it/>
- [3] N.Mohan T.M.Undeland W.P.Robbins,« Elettronica di Potenza », Hoepli
- [4] C.Bonacina A.Cavallini L.Mattarolo, Trasmissione del calore , 1992 Cleup editore
- [5] J.Mater Sci. Technol, Effect of Differential Thermal Expansion Coefficient of Stresses Generated in Coating, 1999
- [6] Manual on The use of Thermocouples in Temperature Measurement, ASTM
- [7] <http://bressanini-lescienze.blogautore.espresso.repubblica.it/>
- [8] Fondamenti sugli standard di interfaccia RS-232 e IEEE-488, Unicas
- [9] <http://www.bssa.org.uk/>
- [10] <http://www.electrolux.it/>
- [11] <http://www.ni.com/labview/i/>
- [12] <http://www.yokogawa.com/>
- [13] <http://www.agilent.com/>
- [14] <http://www.dupont.com/>
- [15] <http://www.loctite.it/>

RINGRAZIAMENTI

In primis è d'obbligo ringraziare la mia famiglia: mamma Patrizia , papà Sergio e mio fratello Elia sempre pazienti, gentili e disponibili a sostenermi durante la carriera universitaria.

In secondo luogo, ringrazio tutti i compagni di studio che ho conosciuto durante il mio percorso di studi patavini: Alberto, Ermanno e Stefano primi amici di studio; Francesco, Andrea , Devis , Salman e tutti coloro che ho trovato lungo il cammino.

Ringrazio l'azienda Electrolux Professional e i suoi dipendenti per avermi ospitato durante lo svolgimento del tirocinio, in particolare l'ingegnere Michele per il suo affiatamento , l'ingegnere Alessandro per la sua pazienza e l'ingegnere Riccardo per la possibilità che mi ha concesso.

Infine ringrazio il Professore Michele Forzan che mi è stato vicino e mi ha seguito in questo lavoro di tesi.