

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE DII



CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN
INGEGNERIA DELL'ENERGIA ELETTRICA

TESI DI LAUREA MAGISTRALE

SVILUPPO DI TECNICHE
E DISPOSITIVI INNOVATIVI
PER LA COTTURA AD INDUZIONE

RELATORE: Ch.mo Prof. Fabrizio Dughiero

CORRELATORE: Dott. Antonio Marconi

LAUREANDO: Matteo Galenda
1099046

ANNO ACCADEMICO 2016-2017

alla mia famiglia

Indice

Introduzione	ix
1 Piani cottura	1
1.1 Piano cottura a gas	1
1.2 Piano di cottura radiante	4
1.3 Piano di cottura alogeno	6
1.4 Piano di cottura ad induzione	8
1.4.1 Un po' di storia della cottura ad induzione...	10
1.5 Conclusioni	12
2 Riscaldamento ad induzione	15
2.1 Problema elettromagnetico	19
2.1.1 Condizioni al contorno	21
2.1.2 Leggi costitutive	23
2.2 Soluzioni analitiche del problema elettromagnetico	26
2.3 Il problema termico	30
2.3.1 Le equazioni della conduzione termica	31
2.3.2 Equazione generale della conduzione termica	33
2.3.3 Le condizioni al contorno nel problema termico	36
3 Definizione del problema e strumentazione utilizzata	37
3.1 Parametri geometrici	37
3.2 Parametri elettrici e strumenti utilizzati	39
3.2.1 Prova a vuoto	39
3.2.2 Prova a carico	40
4 Prove sperimentali	43
4.0.1 Svolgimento delle prove e formule utilizzate	43
4.1 Prova 1	47
4.1.1 Piano in vetroceramica - Pentola normale	47
4.1.2 Piano in vetroceramica - Pentola rivestita in legno	48
4.1.3 Piano in legno compensato - Pentola normale	49

4.1.4	Piano in legno compensato - Pentola rivestita in legno	50
4.1.5	Conclusioni prova 1	51
4.2	Prova 2	52
4.2.1	Piano in vetroceramica - Pentola normale	52
4.2.2	Piano in vetroceramica - Pentola rivestita in legno	53
4.2.3	Piano in legno - Pentola normale	54
4.2.4	Piano in legno - Pentola rivestita in legno	55
4.2.5	Conclusioni prova 2	56
4.3	Prova 3	57
4.3.1	Piano in vetroceramica - Pentola normale	57
4.3.2	Piano in vetroceramica - Pentola rivestita in legno	57
4.3.3	Piano in legno - Pentola normale	58
4.3.4	Piano in legno - Pentola rivestita in legno	58
4.3.5	Conclusioni prova 3	59
4.4	Prova 4	60
4.4.1	Piano in legno - Pentola normale	61
4.4.2	Piano in legno - Pentola rivestita in legno	61
4.4.3	Conclusioni prova 4	62
4.5	Conclusioni generali sulle prove sperimentali	63
4.6	Ulteriori osservazioni	64
4.6.1	Temperature esterne della pentola rilevate tramite termocoppie . .	64
4.6.2	Temperature esterne della pentola osservate tramite termocamera .	65
4.6.3	Temperature piano di cottura	69
4.6.4	Curve di raffreddamento	70
5	Simulazioni mediante Software FEM	73
5.1	Pre-processing	74
5.2	Solver	78
5.3	Post-processing	78
5.4	Simulazioni magnetiche	79
5.5	Simulazioni termiche	82
5.6	Simulazioni Magneto-Termiche	87
	Conclusioni	93
	Idee e sviluppi futuri	95
	Bibliografia	103

Elenco delle figure

1.1	Piano di cottura a gas	2
1.2	Funzionamento piano di cottura a gas	3
1.3	Resistenza elettrica	4
1.4	Piano di cottura radiante	4
1.5	Funzionamento piano di cottura radiante	5
1.6	Lampada alogena	6
1.7	Piano di cottura alogeno	6
1.8	Funzionamento piano di cottura alogeno	7
1.9	Bobina di induzione	8
1.10	Piano di cottura ad induzione	8
1.11	Funzionamento piano di cottura ad induzione	9
1.12	Primo prototipo di sistema a induzione	10
1.13	Piano di cottura Westinghouse CT2	11
2.1	Esempi configurazione induttore-carico (a) induttore, (b) carico	17
2.2	Elementi principali impianto ad induzione	18
2.3	Dominio Ω e superficie Σ	20
2.4	Conservazione della componente tangenziale del vettore campo elettrico .	21
2.5	Conservazione della componente normale del vettore B	22
2.6	Sistema induttore e carico cilindrici	26
2.7	Andamento di H	28
2.8	Andamento di G	29
2.9	Andamento di W	29
2.10	Superfici isoterme di un corpo	32
3.1	LCR meter	39
3.2	Strumentazione elettrica utilizzata	41
4.1	Postazione di lavoro	45
4.2	Posizionamento termocoppie nella pentola	46
4.3	Posizionamento termocoppie sulla base del piano cottura	46
4.4	Piano vetroceramica pentola normale, 7.3 mm	47
4.5	Piano vetroceramica pentola rivestita in legno, 7.3 mm	48

4.6	Piano legno compensato pentola normale, 7.3 mm	49
4.7	Piano legno compensato pentola rivestita in legno, 7.3 mm	50
4.8	Piano vetroceramica pentola normale, 17 mm	52
4.9	Piano vetroceramica pentola rivestita in legno, 17 mm	53
4.10	Piano legno pentola normale, 17 mm	54
4.11	Piano legno pentola rivestita in legno, 17 mm	55
4.12	Dettaglio foro per fuoriuscita vapore	60
4.13	Confronto temperature pareti	64
4.14	Immagini termocamera pentola normale	66
4.15	Immagini termocamera pentola rivestita in legno(1)	67
4.16	Immagini termocamera pentola rivestita in legno(2)	68
4.17	Temperature della vetroceramica durante il riscaldamento	69
4.18	Confronto curve di raffreddamento	70
5.1	Modellizzazione del circuito elettrico in Flux	76
5.2	Mesh	78
5.3	Modello rappresentato in Flux	83
5.4	Perdite simulazioni termico	84
5.5	Andamento delle temperature transitorio termico Flux, pentola normale	85
5.6	Andamento delle temperature transitorio termico Flux, pentola in legno	86
5.7	Modello rappresentato in Flux	88
5.8	Perdite simulazioni magneto-termico	89
5.9	Confronto temperature sperimentali vs Flux	90
5.10	Temperatura simulazioni magnetotermiche in Flux, pentola normale	90
5.11	Temperatura simulazioni magnetotermiche in Flux, pentola rivestita in legno	91
5.12	Pentola innovativa	96
5.13	Avvolgimenti per alimentazione dispositivi ausiliari	97
5.14	Alimentazione dispositivi ausiliari	97
5.15	Modello circuito in Flux e linee di flusso	100

Elenco delle tabelle

1.1	Confronto tra tipologie di piani cottura	13
-----	--	----

3.1	Dimensioni del sistema induttore e pentola	38
3.2	Resistenza e induttanza a vuoto; V alimentazione = 1 V	39
4.1	Prova 2 L, distanza 7.3 mm, Piano vetroceramica - pentola normale	47
4.2	Prova 2 L, distanza 7.3 mm, Piano vetroceramica - pentola rivestita in legno	48
4.3	Prova 2 L, distanza 7.3 mm, Piano legno compensato - pentola normale . .	49
4.4	Prova 2 L, distanza 7.3 mm, Piano legno compensato - pentola rivestita in legno	50
4.5	Riassunto prova 1	51
4.6	Prova 2 L, distanza 17 mm, Piano vetroceramica - pentola normale	52
4.7	Prova 2 L, distanza 17 mm, Piano vetroceramica - pentola rivestita in legno	53
4.8	Prova 2 L, distanza 17 mm, Piano legno - pentola normale	54
4.9	Prova 2 L, distanza 17 mm, Piano legno - pentola rivestita in legno	55
4.10	Riassunto prova 2	56
4.11	Prova 3 L, distanza 17 mm, Piano vetroceramica - pentola normale	57
4.12	Prova 3 L, distanza 17 mm, Piano vetroceramica - pentola rivestita in legno	57
4.13	Prova 3 L, distanza 17 mm, Piano legno - pentola normale	58
4.14	Prova 3 L, distanza 17 mm, Piano legno - pentola rivestita in legno	58
4.15	Riassunto prova 3	59
4.16	Prova evaporazione totale 2.75 L, distanza 17 mm, Piano legno - pentola normale	61
4.17	Prova evaporazione totale 2.75 L, distanza 17 mm, Piano legno - pentola rivestita in legno	61
4.18	Riassunto prova 4	62
4.19	Confronto tempi di raffreddamento	71
5.1	Caratteristiche magnetiche dei materiali in Flux	75
5.2	Caratteristiche delle regioni in Flux, problema magnetico	76
5.3	Distanza induttore pentola 7.3 mm	80
5.4	Distanza induttore pentola 17 mm	81
5.5	Rendimento al variare della distanza	81
5.6	Caratteristiche termiche dei materiali in Flux	83
5.7	Perdite simulazioni termiche	84
5.8	Perdite simulazioni magneto-termiche	89
5.9	Alimentazione dispositivi ausiliari 31 spire, distanza 7.3 mm	98
5.10	Alimentazione dispositivi ausiliari 73 spire, distanza 7.3 mm	98
5.11	Alimentazione dispositivi ausiliari 31 spire, distanza 17 mm	98
5.12	Confronto potenze distanza 7.3 mm	100
5.13	Confronto potenze distanza 17 mm	100

Introduzione

La seguente tesi ha per oggetto l'analisi del possibile miglioramento del sistema di cottura dei cibi tramite l'utilizzo di pentole innovative impiegabili su piastre ad induzione magnetica. Il rendimento di questo tipo di cucina è estremamente elevato se confrontato con gli altri processi di cottura e dipende, lato elettrico, dalle perdite nel sistema di conversione e dall'accoppiamento induttore-pentola, lato termico, dalla quantità di calore che si riesce a trattenere nella pentola stessa. Attualmente sul mercato sono presenti molte pentole utilizzabili su piani di cottura ad induzione, tuttavia queste e, gli attuali sistemi di cottura, presentano alcuni svantaggi. Le pentole che normalmente vengono utilizzate si scaldano allo stesso modo di quelle tradizionali presenti in commercio, continuando così a costituire un pericolo per l'utilizzatore. Inoltre, contrariamente al sistema a gas, in questo tipo di cucina non è possibile capire in modo visibile se la pentola è sottoposta a riscaldamento. In secondo luogo, essendo appoggiate sulla vetroceramica, le pentole trasmettono parte del loro calore anche ad essa. Questa, indirettamente, raggiungerà temperature elevate divenendo fonte di pericolo, specialmente una volta rimossa la pentola e lasciata la zona scoperta.

L'attività svolta è consistita nell'eseguire prove sperimentali su pentola commerciale e su una "pentola innovativa" rivestita, entrambe collocate sul piano di cottura in vetroceramica. Il corpo esterno di rivestimento della pentola innovativa deve essere termicamente isolante e amagnetico o diamagnetico, si è quindi pensato di utilizzare il legno, essendo anche un materiale naturale. Un'applicazione di tale sistema risulta possibile poiché il processo di riscaldamento ad induzione utilizza sorgenti di calore prive di fiamme libere, perciò non si incontrano pericoli riguardo l'eventuale combustione del legno. Il modello utilizzato per le prove, pur se artigianale, ha permesso di capire la convenienza di questo sistema di cottura. E' da sottolineare che trattandosi di un'idea nuova, non si hanno a disposizione misure e dati con cui confrontare gli esperimenti e i risultati ottenuti.

Infine, i dati ricavati dalle prove sperimentali sono stati confrontati tra loro e con le simulazioni ottenute mediante software agli elementi finiti (Flux) in modo tale da valutare le perdite termiche che si hanno durante il processo di riscaldamento.

Capitolo 1

Piani cottura

L'abilità tra i fornelli gioca un ruolo fondamentale in cucina, ma non è l'unica cosa che rende grande un cuoco. Gli ingredienti che vengono scelti, le ricette che si seguono ma anche le pentole e le padelle che si utilizzano possono avere un certo impatto sulla cucina. Tali variabili tuttavia non sono le uniche in gioco e anche le modalità in cui si fornisce il calore necessario alla cottura può rivestire un ruolo determinante. Si analizzano, di seguito, le diverse tecnologie di piani cottura presenti in commercio: gas, alogeno, elettrico ed induzione [1].

1.1 Piano cottura a gas

Un piano di cottura a gas è costituito da un gruppo bruciatore collegato ad una valvola di apertura del gas e quindi alla linea di distribuzione principale. Al ruotare della manopola la valvola di aspirazione si apre e il gas fluisce attraverso un tubo di Venturi, un condotto con una restrizione nel mezzo. Il gas entra attraverso una estremità, passando nella sezione ristretta aumenta la sua pressione mentre nella zona più larga è presente un piccolo foro dove la pressione di uscita fa sì che venga richiamata aria e quindi ossigeno, rendendo possibile la combustione dopo l'avvenuta miscelazione. Questa miscela passerà poi nel bruciatore che sarà semplicemente un disco metallico cavo con fori praticati attraverso il suo perimetro e quindi andrà a scaldare la pentola.

Tramite semplice accendino o una scintilla sviluppata in un lato del bruciatore viene innescata la combustione della miscela aria/gas che fluisce attraverso i fori del bruciatore. Ruotando la manopola verso un valore più alto di calore, verrà aumentato il flusso comburente-combustibile e la fiamma si svilupperà maggiormente.

I bruciatori a gas, sono in grado di funzionare sia con gas metano che con una miscela di propano/butano, gas che sono i principali componenti del GPL. Entrambi sono idrocarburi e il loro contenuto di idrogeno fa sì che la fiamma sia blu nelle condizioni ideali, mentre una fiamma gialla o arancione indica una carenza di ossigeno ed una temperatura inferiore con presenza di particelle di carbonio incombuste. Se la fiamma appare addirittura rossa la temperatura sarà ancora inferiore ed è probabile che la valvola di

aspirazione sia intasata e si abbia deposito di fuliggine sul fondo delle pentole causato dalla combustione incompleta.

Alcune aziende hanno recentemente iniziato a produrre dei piani di cottura a gas i cui bruciatori hanno la particolarità di portare una “fiamma diretta” a scaldare le pentole poggiate sui fuochi. Questi bruciatori verticali, come sono comunemente chiamati, indipendentemente dai vari nomi commerciali, hanno il vantaggio di una minore dispersione di calore che si traduce in una riduzione del 20-25% dei tempi di cottura e una sensibile diminuzione dei consumi di gas (circa il 20%). Un altro vantaggio della fiamma diretta è l’uniformità di cottura: i piatti cucinati saranno cotti con maggiore omogeneità in ogni punto rispetto al sistema gas tradizionale. Un piano cottura a gas tradizionale è riportato in Figura 1.1 e lo schema di funzionamento in Figura 1.2.

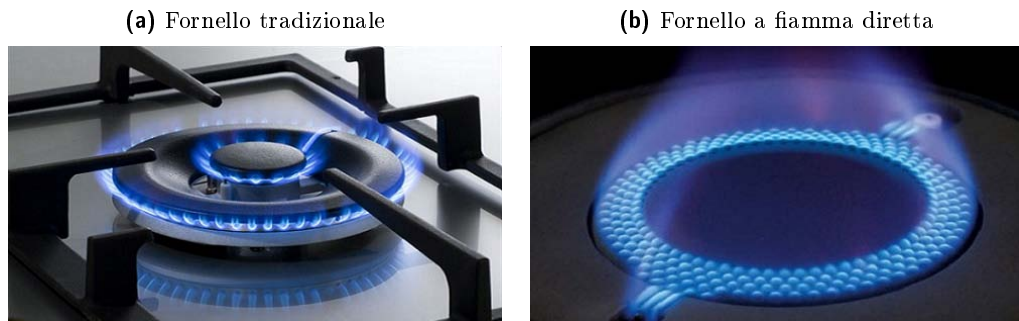


Figura 1.1: Piano di cottura a gas

Vantaggi del piano di cottura a gas

- costo di acquisto basso
- funzionamento anche in caso di blackout elettrico
- possibilità di utilizzare qualsiasi tipo di pentola, anche con fondo irregolare
- presenza di valvola di sicurezza o termocoppia per bloccare la fuoriuscita di gas nel caso in cui si dovesse verificare uno spegnimento accidentale della fiamma
- possibilità di variare in modo istantaneo il calore fornito semplicemente ruotando una manopola
- i nuovi tipi di fornelli, a “fiamma diretta” hanno rendimenti che possono raggiungere il 65%

Svantaggi del piano di cottura a gas

- scarsa sicurezza, l’uso di fiamme libere e del gas per la combustione richiede molta attenzione, infatti in caso di perdite risulta essere pericoloso e può provocare morte per asfissia o esplosioni

- la pulizia dei fuochi delle griglie richiede più tempo rispetto ai piani in vetroceramica
- pericolo di ustioni nel toccare le griglie di supporto del pentolame o il fornello
- il bruciatore potrebbe rimanere a lungo acceso in caso di dimenticanza, in presenza o in assenza della pentola nel fornello
- degrado delle prestazioni nel tempo, causa otturazione degli ugelli e quindi necessità di frequente pulizia
- consistenti perdite termiche, il calore generato dalla fiamma non scalda solamente la pentola, ma anche l'aria intorno al fornello. Fino al 60% dell'energia generata da un bruciatore può essere dispersa
- possibilità di non avere a disposizione il combustibile gpl in quanto risulta più difficile il trasporto rispetto all'energia elettrica, rimane comunque possibile avere un serbatoio per il suo stoccaggio

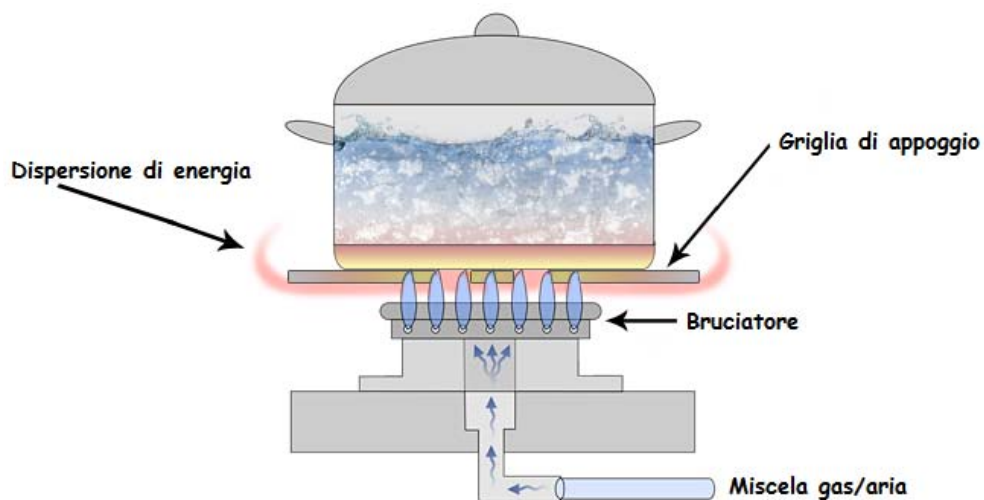


Figura 1.2: Funzionamento piano di cottura a gas

1.2 Piano di cottura radiante

Il principio del piano di cottura radiante consiste nello scaldare per effetto Joule, una resistenza a forma di spirale appiattita. Tale resistore è collocato sotto un piano realizzato in vetroceramica o viene posto direttamente a contatto con la pentola. Nei piani in vetroceramica l'intensità del calore può essere gestita tramite manopole o comandi Touch Control, ad una intensità di calore maggiore, corrisponderà un più elevato assorbimento di corrente elettrica. In questo tipo di piano il trasferimento di energia avviene sempre da una sorgente esterna poiché il calore generato dalla resistenza scalda prima la vetroceramica e poi per conduzione il pentolame.

Un piano cottura di tale tipo è riportato in Figura 1.3 e Figura 1.4 mentre lo schema di funzionamento in Figura 1.5.



Figura 1.3: Resistenza elettrica



Figura 1.4: Piano di cottura radiante

Vantaggi del piano di cottura in vetroceramica radiante

- alimentando il piano tramite corrente elettrica, non sussistono i rischi del gas quali fughe e conseguenti esplosioni
- essendo la superficie del piano perfettamente piana, il rischio di ribaltamento del pentolame è limitato
- non si hanno ugelli, perciò non c'è il pericolo di avere otturazioni

Svantaggi del piano di cottura in vetroceramica radiante

- prezzo di acquisto più elevato rispetto ai piani di cottura a gas
- pentolame deve avere fondo necessariamente piatto
- il 47% del rendimento, sommato al costo dell'energia elettrica, comporta un costo di gestione più alto rispetto ai piani di cottura a gas
- una zona di cottura potrebbe rimanere accesa anche in assenza di pentolame da riscaldare con spreco di energia e rischio di contrarre gravi ustioni

- terminata la cottura delle pietanze e dopo aver rimosso il pentolame dalle zone di cottura, è bene prestare molta attenzione, in quanto la temperatura della superficie in vetroceramica è ancora molto elevata, comportando il rischio di ustioni più o meno gravi
- in impianti elettrici standard da 3.3 kW, in caso di uso di più zone cottura e contemporaneamente di altri elettrodomestici, è possibile che si superi il massimo assorbimento consentito, causando il distacco dalla rete di alimentazione
- in caso di mancata erogazione di energia elettrica non è possibile la cottura dei cibi
- il controllo della temperatura non è agevole poiché gli elementi riscaldanti reagiscono più lentamente rispetto agli altri tipi di piani

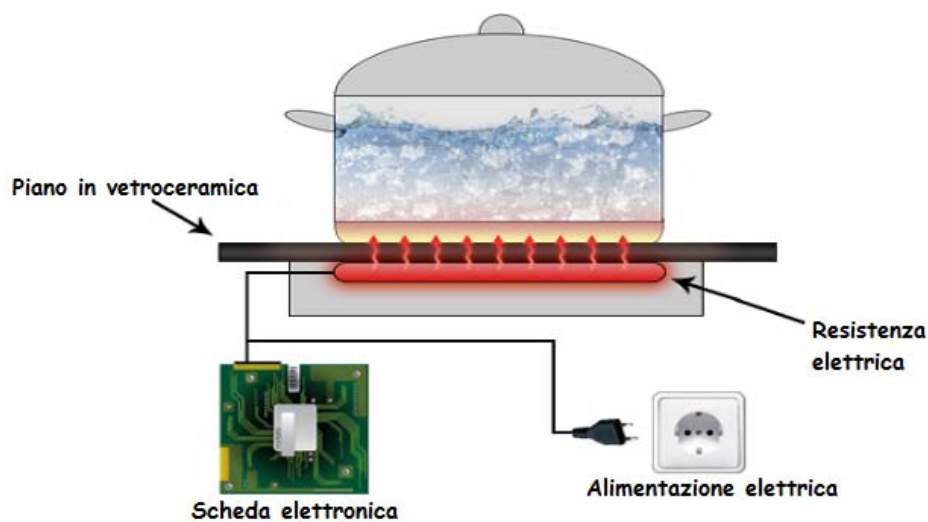


Figura 1.5: Funzionamento piano di cottura radiante

Come riportato in Figura 1.5 il piano di cottura radiante è caratterizzato da pochi e semplici componenti, ovvero una resistenza elettrica di valore prefissato dal costruttore e da un sistema di controllo basato su scheda elettronica. Questo permette ad esempio di poter controllare in modo retro azionato la temperatura misurata in un punto, ed andare a modulare la potenza attiva assorbita dalla resistenza riscaldante con semplici ma efficaci logiche di tipo ON/OFF.

1.3 Piano di cottura alogeno

I piani di cottura alogeni riscaldano il pentolame attraverso delle potenti lampade alogene ad alta efficienza collocate al di sotto del piano cottura in vetroceramica ed alimentate ad elettricità. Trattandosi di luci infrarosse, il calore trattenuto dal piano in vetroceramica è inferiore rispetto a quanto accade con i piani cottura radianti, ne consegue un rendimento maggiore. Inoltre può essere presente una resistenza situata nel bordo esterno in modo tale da garantire un'uniformità del calore ancora maggiore.

Le figure 1.6 e Figura 1.7 presentano i componenti e l'estetica di un piano di cottura alogeno, mentre la Figura 1.8 evidenzia il suo funzionamento.



Figura 1.6: Lampada alogena



Figura 1.7: Piano di cottura alogeno

Vantaggi del piano di cottura alogeno

- assenza di fiamma
- non sussistono i rischi connessi all'impiego del gas, essendo alimentato a corrente elettrica
- rischio di ribaltamento di teglie limitato essendo la superficie di appoggio piana
- tempi di reazione alla cottura molto più rapidi dei piani radianti
- assenza di ugelli che possono otturarsi

Svantaggi del piano di cottura alogeno

- prezzo di acquisto più elevato rispetto ai piani di cottura a gas ma simile a quelli a resistori
- il pentolame deve avere fondo necessariamente piatto e opaco per non riflettere la luce delle lampade
- il 58% del rendimento, sommato al costo dell'energia elettrica, comporta un costo di gestione più alto rispetto ai piani di cottura a gas
- la durata delle lampade è limitata e il loro costo risulta elevato
- una zona di cottura potrebbe rimanere accesa anche in assenza di pentolame da riscaldare con spreco di energia e rischio di contrarre gravi ustioni

- terminata la cottura delle pietanze e dopo aver rimosso il pentolame dalle zone di cottura, è bene prestare molta attenzione, in quanto la temperatura della superficie della vetroceramica è elevata
- viene richiesto più tempo per portare in temperatura il pentolame rispetto ai piani a gas, ma meno dei piani radianti
- in impianti elettrici domestici tipici da 3,3 kW massimi, è possibile che si superi il massimo assorbimento consentito, con distacco dalla rete di alimentazione se si utilizzano più zone cottura contemporaneamente
- in caso di mancata erogazione di energia elettrica non è possibile cucinare nessun cibo

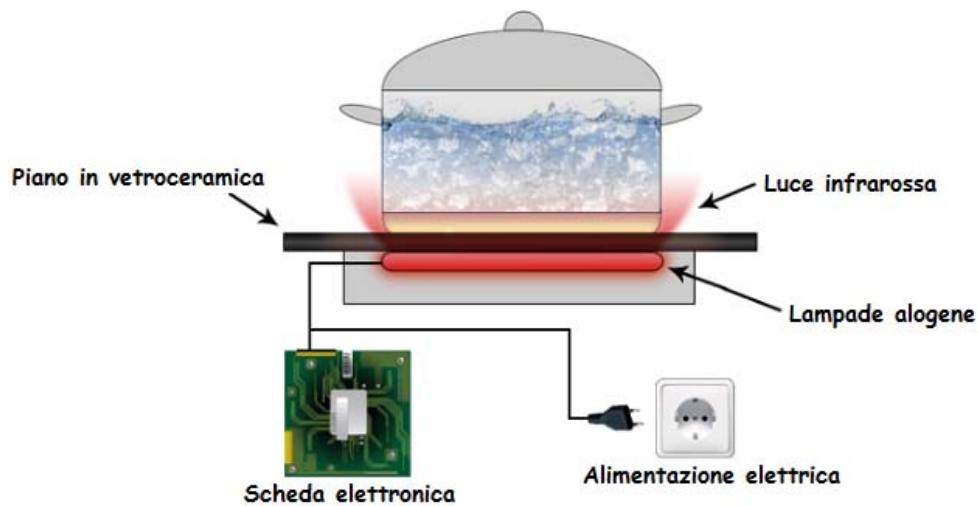


Figura 1.8: Funzionamento piano di cottura alogeno

1.4 Piano di cottura ad induzione

Con la tecnologia ad induzione, il calore viene generato direttamente nella pentola stessa, e non nell'elemento riscaldante. Alimentando una bobina induttrice collocata al di sotto di un piano in vetroceramica tramite una corrente alternata, Figura 1.9, viene generato un campo magnetico variabile nel tempo. Quest'ultimo concatena il fondo della pentola costituito di materiale ferromagnetico, il quale genera a sua volta delle correnti parassite, dette di Foucault, provocandone il riscaldamento per effetto Joule. L'innalzamento della temperatura si origina solo nel recipiente, e si mantiene circoscritto alla base dello stesso, Figura 1.10. Una volta rimossa la pentola il piano si raffredda abbastanza velocemente. Tale sistema di cottura permette una serie di importanti vantaggi tra i quali elevato rendimento dovuto alla minore dissipazione di energia, ma rende necessario, ad esempio, l'acquisto di pentolame speciale dotato di fondo ferromagnetico.



Figura 1.9: Bobina di induzione



Figura 1.10: Piano di cottura ad induzione

Vantaggi del piano di cottura ad induzione

- dispersione di calore assente tra bobina e pentola, lo sviluppo del riscaldamento avviene direttamente nella pentola senza dover attraversare la vetroceramica
- controllo molto preciso della variazione di temperatura grazie ai tempi di risposta alla modifica dell'intensità di corrente istantanei
- limitato rischio di rovesciamento del pentolame, essendo la superficie di appoggio piana
- facilità di pulizia e assenza di ugelli che possono ostruirsi
- design accattivante, affascinante e moderno
- le zone di cottura, dotate di riconoscimento automatico della pentola, si attivano solo in presenza di pentole ferromagnetiche
- la parte del piano che circonda la zona di cottura resta fredda con rischio di scottature ridotto

- rendimenti molto elevati, circa 85% del calore generato rimane confinato nella padella
- i tempi di cottura per portare il pentolame in temperatura sono considerevolmente ridotti rispetto a tutti i precedenti piani descritti
- la cottura risulta uniforme grazie alla buona distribuzione del calore su tutto il fondo del pentolame

Svantaggi del piano di cottura ad induzione

- prezzo di acquisto più elevato rispetto ai piani di cottura a gas ma simile a quelli radianti e alogeni
- il pentolame deve avere fondo necessariamente piatto e ferromagnetico
- in impianti elettrici standard da 3,3 kW, in caso di uso di più zone cottura e contemporaneamente di altri elettrodomestici, è possibile che si superi il massimo assorbimento consentito, causando il distacco dalla rete di alimentazione
- in caso di blackout non è possibile l'utilizzo di tale cucina

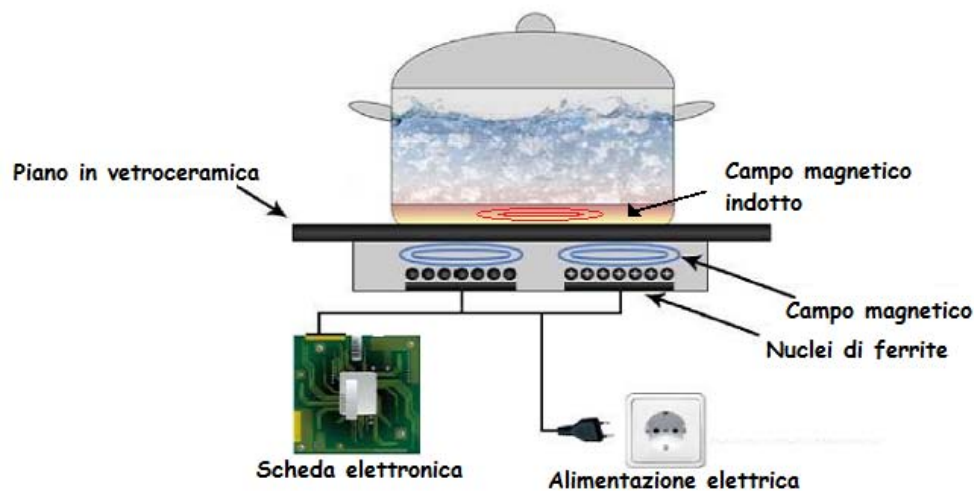


Figura 1.11: Funzionamento piano di cottura ad induzione

La Figura 1.11 evidenzia come il calore venga generato direttamente nella base della pentola tramite campo elettromagnetico accoppiato e non ci sia trasferimento dall'esterno. La piastra in vetroceramica ha soltanto la funzione di elemento di supporto e isolare la pentola dai circuiti sottostanti, non serve a condurre calore come nei precedenti due casi.

1.4.1 Un po' di storia della cottura ad induzione...

Il primi brevetti risalgono agli inizi del 1900 ma tecnologia di cottura ad induzione fu introdotta alla Fiera del Mondo nel 1933 al Chicago "Century of Progress", dove il tema della manifestazione era l'innovazione tecnologica. Le prime dimostrazioni furono fatte negli anni '50 dalla divisione Frigidaire della General Motors durante una visita nella fabbrica in Nord America. Fu interposto un giornale tra la pentola riempita d'acqua e il nucleo magnetico per dimostrare come fosse possibile ottenere il riscaldamento del materiale soprastante, Figura 1.12.

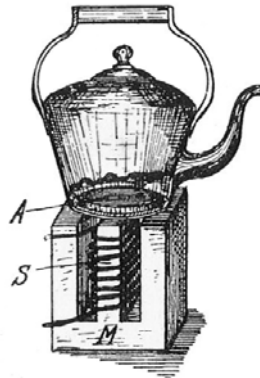


Figura 1.12: Primo prototipo di sistema a induzione,
A pentola, S bobina, M nucleo magnetico

Questa unità tuttavia non fu mai messa in produzione. In realtà, la NASA sviluppò un piano cottura ad induzione con l'intento di usarlo per il programma spaziale e successivamente più unità furono sviluppate negli Stati Uniti, ma vennero riscontrati problemi come scarsa affidabilità ed eccessivo rumore dei componenti.

Lo sviluppo moderno risale ai primi anni del 1970, con il lavoro svolto presso il Centro Ricerche e Sviluppo Westinghouse Electric Corporation a Churchill Borough, nei pressi di Pittsburgh. Questo lavoro fu mostrato al pubblico in una mostra nel 1971 dalla National Association of Home Builders in un convegno a Houston, in Texas, come parte della mostra Westinghouse Consumer Products Division. Il singolo-bruciatore autonomo venne chiamato Cool Top Induction Range. Disponeva di transistor in parallelo Delco Electronics sviluppati per i sistemi automobilistici per accensione elettronica in modo tale da raggiungere una frequenza di 25 kHz. Westinghouse decise poi di produrre qualche centinaio di unità denominate Cool Top 2 (CT2) Induction Ranges, in modo da far conoscere al pubblico questo nuovo sistema di riscaldare il cibo, tale piano è mostrato in Figura 1.13. Il lavoro di sviluppo fu svolto nello stesso luogo dove fu prodotto il primo prototipo, da un team guidato da Bill Moreland e Terry Malarkey e il prezzo era di 1.500 \$, e comprendeva una serie di pentole di alta qualità in Quadraply, costituite da, in ordine dall'esterno verso l'interno, un laminato di acciaio inossidabile, acciaio al carbonio, alluminio e un altro strato di acciaio inossidabile. La produzione avvenne dal 1973 al

1975 anno in cui la Westinghouse Consumer Products Division to White Consolidated Industries Inc venne venduta. Il piano di cottura CT2 disponeva di quattro zone ciascuno da circa 1.600 W. Il top gamma disponeva di una lastra di vetroceramica circondato da una cornice in acciaio inossidabile, sul quale quattro potenziometri regolavano i cursori corrispondenti. Questa configurazione consentiva di eliminare le cadute accidentali del pentolame essendo il piano uniforme. La parte elettronica era costituita da quattro moduli identici raffreddati da ventole, che consentivano di convertire, tramite raddrizzatori controllati, i 240 V a frequenza 60 Hz in valori tra i 20 e 200 V continui. Tale corrente continua generata, veniva a sua volta convertita in una frequenza 27 kHz con corrente di picco di 30 A tramite due array da sei transistor in configurazione a mezzo ponte che andavano a pilotare un circuito risonante LC serie. L'elettronica di controllo includeva protezioni ad esempio contro il surriscaldamento del pentolame e contro i sovraccarichi, inoltre era dotata di un sistema di rilevamento automatico della padella e si era provveduto a limitare i campi elettromagnetici generati in modo da non arrecare danni alla salute delle persone. Vennero rilasciati numerosi brevetti ed il CT2 vinse diversi premi, nel 1972 fu eletto miglior prodotto della ricerca industriale e fu citato dalla United States Steel Association. Raymond Baxter in una prova condotta alla televisione BBC dimostrò come il CT2 potesse cucinare attraverso una lastra di ghiaccio. A metà degli anni 80, Sears Kenmore mise in vendita un piano cottura con quattro superfici dedicate alla cottura. L'unità era caratterizzata da un forno autopulente, temporizzatore allo stato solido, pulsanti di controllo capacitivo touch (sistema avanzato per l'epoca). Le unità erano ovviamente più costose di piani di cottura standard. Nel 2009 Panasonic sviluppò un piano ad induzione con un design della bobina differente e una frequenza di funzionamento superiore, per permettere il riscaldamento di pentole composte da metalli non ferromagnetici. Tuttavia, le unità funzionavano con una ridotta efficienza di accoppiamento e quindi l'idea venne abbandonata [2].



Figura 1.13: Piano di cottura Westinghouse CT2

1.5 Conclusioni

Analizzando le maggiori caratteristiche dei moderni piani di cottura odierni, si evincono i notevoli vantaggi derivanti dall'utilizzo della tecnologia ad induzione confrontata a quella tradizionale. Nonostante la commercializzazione dei piani cottura ad induzione già da diversi anni, la sua diffusione è tuttavia ancora contenuta e ciò è dovuto principalmente al fatto che il mercato da sempre favorito le tecnologie convenzionali e più collaudate. Anche l'aspetto economico è un ulteriore fattore di limitazione della vendita, il prezzo d'acquisto è frequentemente considerato eccessivo distogliendo così l'acquirente dalla scelta del piano cottura più efficiente. Spesso chi acquista una nuova cucina non conosce completamente tutti gli aspetti positivi della cottura ad induzione valutando di conseguenza in modo errato il ritorno dell'investimento iniziale e soprattutto i benefici derivanti dal suo utilizzo. Lo sviluppo e la produzione dei nuovi piani di cottura rimane comunque attuale; rafforzato dal fatto che il riscaldamento della pentola avviene in modo molto più rapido rispetto alle altre tipologie, l'induzione ha il vantaggio di soddisfare il radicale cambiamento degli stili di vita probabilmente diventando in futuro il modo di cottura più utilizzato. Una delle ultime novità introdotte è la tecnologia "Zoneless" che da ai piani cottura ad induzione il vantaggio di non dipendere da forme e dimensioni del contenitore degli alimenti. Con tale idea l'intera zona di cottura diventa attiva per cui è possibile sfruttare tutta la superficie ed avere allo stesso tempo una distribuzione di calore uniforme grazie alla sola attivazione di micro bobine su cui viene appoggiata la pentola. In molti nuovi piani di cottura ad induzione la superficie si adatta alle pentole in uso durante la cottura: grazie alle speciali "Bridge Zones", le zone riscaldanti possono funzionare singolarmente o in modo combinato, permettendo l'utilizzo di teglie e pentole di grandi dimensioni con garanzia di cottura omogenea. Si hanno risparmi anche nei consumi, in particolar modo se si dispone di una abitazione dotata di impianto fotovoltaico. E' doveroso specificare che risulta difficile fornire dati certi relativi al funzionamento dei diversi piani di cottura data la molteplicità di dati disponibili da differenti costruttori o fonti consultabili. A livello indicativo, utilizzando le informazioni reperibili nei siti web, si possono comparare i piani cottura descritti precedentemente. In Tabella 1.1 vengono riportati consumi, tempi e rendimenti per fare giungere ad ebollizione 2 litri d'acqua da una temperatura iniziale di $25^{\circ}C$, fornendo in tutti i casi una potenza di circa $2 kW$. Si può subito notare come i valori siano nettamente diversi tra loro.

Si ha:

Tabella 1.1: Confronto tra tipologie di piani cottura

Piano cottura	Tempo [<i>min</i>]	Consumi [<i>Wh</i>]	Rendimento [%]
induzione	5.30	210	80 - 90
alogeno	9	270	58 - 60
radiante	9.50	320	45 - 47
gas	7	390	35 - 40

In alcuni piani cottura ad induzione è altresì presente la funzione booster che permette di portare in temperatura la pentola in tempi ulteriormente più brevi fornendo una maggiore potenza per un periodo limitato di tempo. Come scritto precedentemente, questo non è sufficiente a ritenere i nuovi fornelli vantaggiosi essendo un investimento per il quale bisogna ancora fare precise valutazioni riguardo la convenienza o meno nell'installazione, soprattutto in Italia. Sapendo che la richiesta di potenza per un piano ad induzione può avvicinarsi a 3 kW e nel nostro paese la maggioranza delle abitazioni dispone di una potenza elettrica installata dello stesso valore, ovvero 3.3 kW massimi, la presenza di un tale elettrodomestico in casa può comportare la richiesta di un adeguamento del contratto di fornitura dell'energia elettrica a 4.5 o 6 kW in modo da permettere l'assorbimento istantaneo della potenza necessaria [3]. Da non dimenticare che in molti piani è presente una funzione di limitazione della potenza che permette di autolimitare l'assorbimento di corrente elettrica del piano scegliendo tra tre livelli di soglia massima. Questo andrà a gravare nei costi in bolletta, sia per le quote fisse e per la richiesta di adeguamento, che per quelle al consumo, inoltre risulta poco conveniente passare ad un livello di potenza maggiore se i consumi non sono eccessivamente elevati. Perciò il costo maggiore dell'energia elettrica in Italia, confrontato con molti altri paesi, non rende al momento completamente conveniente una spesa di questo tipo, a meno che non si disponga di un proprio impianto di generazione di energia, quale ad esempio il fotovoltaico. Ci si potrebbe però trovare anche nella condizione in cui la casa non sia raggiunta dalla rete del gas, come succede per esempio nei paesi di montagna. In una circostanza di questo tipo un'alternativa che riesce a soddisfare il bisogno di cucinare può essere data esattamente dall'utilizzo dei piani di cottura ad induzione.

Capitolo 2

Riscaldamento ad induzione

Il riscaldamento ad induzione è al giorno d'oggi un processo largamente utilizzato per il riscaldamento di corpi elettricamente conduttori, normalmente costituiti da materiali metallici [4]. Le correnti indotte in un materiale e causanti perdite di energia vengono dette “parassite”, poiché dando luogo all'effetto Joule riducono il rendimento del dispositivo elettromagnetico. Applicazioni industriali come i trattamenti superficiali dei metalli, i forni ad induzione per la fusione dell'acciaio o applicazioni domestiche come la cottura, sfruttano le correnti di Foucault per generare elevate densità di potenza direttamente all'interno del pezzo.

Le motivazioni dell'affermazione di sistemi di riscaldamento ad induzione sono dovute in particolare ai seguenti punti forza:

- sviluppo del calore che avviene direttamente all'interno del corpo da riscaldare;
- possibilità di localizzare il calore in zone specifiche del corpo sottoposto a riscaldamento in base alle diverse esigenze applicative;
- ripetibilità dei trattamenti termici e quindi la costanza delle caratteristiche del prodotto finito;
- bassa deformazione del pezzo dopo il riscaldamento;
- possibilità di mettere in gioco potenze specifiche elevate;
- riscaldamenti realizzabili in tempi brevissimi e conseguente aumento della produzione;
- possibilità di ottenere, in alcuni casi specifici, risultati altrimenti non conseguibili con altri processi;
- rendimento di processo complessivo molto elevato per lavorazioni molto brevi poiché il calore ceduto all'ambiente viene drasticamente ridotto;
- possibilità di sfruttare una vasta gamma di frequenze che interessano le applicazioni industriali mediante l'uso di convertitori statici;

I settori più tradizionali dove viene utilizzato il riscaldamento ad induzione sono:

- processi di tempra, totale o localizzata, di acciai e ghise e i processi di rinvenimento degli stessi;
- lavorazioni a caldo dei metalli come operazioni di laminazione, forgiatura, stampaggi;
- saldatura e brasatura;
- forni industriali per la fusione dei metalli;
- **piani di cottura ad induzione.**

Gli altri metodi che caratterizzano oggi l'elettrotermia comprendono i procedimenti detti tradizionali, quali:

- riscaldamenti ad arco
- riscaldamenti per resistenza (diretto, indiretto e a raggi infrarossi)
- riscaldamenti per perdite dielettriche e a microonde

e quelli speciali e per tecnologie di punta come:

- riscaldamenti a plasma
- riscaldamenti con fascio di elettroni
- riscaldamenti con laser di potenza
- riscaldamenti mediante bombardamento ionico

Tutti questi procedimenti hanno come risultato finale la trasformazione dell'energia elettrica in calore con applicazioni estremamente interessanti e diversificate caratterizzate da valori molto diverse di:

- temperature;
- densità di potenza;
- frequenze utilizzate.

Il riscaldamento ad induzione avviene esponendo il corpo da lavorare ad un campo magnetico variabile nel tempo, creato utilizzando una o più bobine induttrici, quindi senza che ci sia contatto fisico tra le parti. Le correnti indotte, dette di Foucault, e definibili mediante le leggi di Maxwell, creano un riscaldamento del materiale conduttore dovuto all'effetto Joule. La distribuzione delle sorgenti di calore, risulta sempre disuniforme a causa dell'effetto pelle, il quale è funzione dei materiali impiegati e dipende dalla frequenza di lavoro, e di prossimità. La possibilità di concentrare le correnti indotte in porzioni

limitate e quindi le sorgenti di calore, dipende dalla frequenza, potenza e geometria dell'induttore, motivo per cui, la definizione di importanti variabili quali la forma della bobina, la potenza impiegata, la regolazione della temperatura di esercizio, permettono di ottenere i risultati meccanici accurati, garantendone la ripetibilità nel tempo.

A seconda della conformazione geometrica del corpo da riscaldare e del tipo di lavorazione da realizzare, possono essere utilizzati differenti forme dell'induttore, come messo in evidenza nella Figura 2.1. Potenze di qualche MW sono facilmente raggiungibili da un

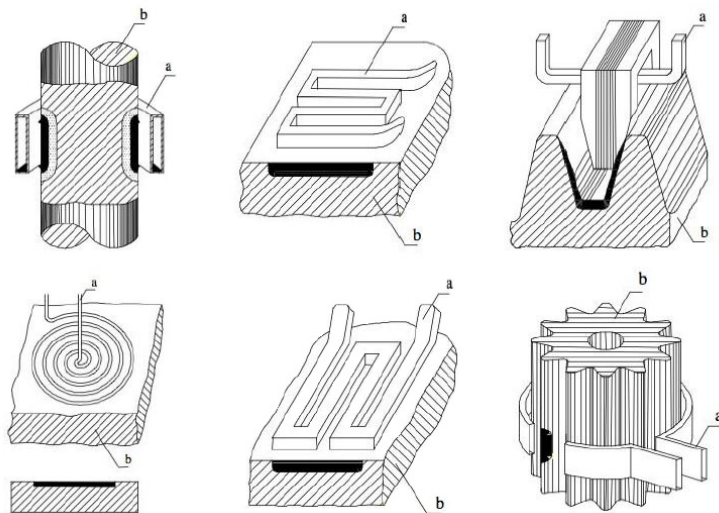


Figura 2.1: Esempi configurazione induttore-carico
(a) induttore, (b) carico

impianto di riscaldamento ad induzione per trattamenti termici con frequenze racchiuse in un range tra 50 Hz e 450 kHz, conseguite mediante:

- convertitori statici a tiristori, fino a 20 kHz;
- convertitori statici a transistori, fino a 300 kHz;
- oscillatori di potenza a triodi, fino a decine di MHz;

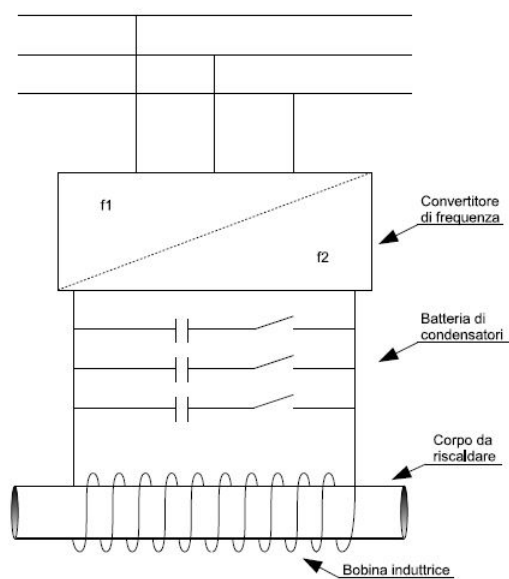


Figura 2.2: Elementi principali di un impianto di riscaldamento ad induzione

Dal momento in cui il fattore di potenza conseguente dal sistema induttore-carico è sempre modesto, diviene necessaria la presenza di batterie di condensatori, come riportato in Figura 2.2.

2.1 Problema elettromagnetico

Per comprendere, progettare ed ottimizzare un processo ad induzione è necessario risolvere il problema ai campi elettromagnetici per il quale, le equazioni di Maxwell, e la loro risoluzione permettono proprio di risolverlo nella sua complessità [5]. Le quattro equazioni di Maxwell correlano, secondo equazioni fondamentali, il campo magnetico \mathbf{H} [A/m], campo di induzione magnetica \mathbf{B} [T], campo elettrico \mathbf{E} [V/m] e il vettore spostamento elettrico \mathbf{D} [As/m^2]. La sorgente di questi campi è la carica elettrica e la corrente elettrica, di solito espresse come grandezze differenziali quali, densità di carica δ e densità di corrente \mathbf{J} [A/m^2].

Legge di Ampere generalizzata:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (2.1)$$

Legge di Faraday:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2.2)$$

Legge di Gauss per il campo di induzione magnetica:

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (2.3)$$

Legge di Gauss per il campo di spostamento:

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \delta \quad (2.4)$$

E risulta semplice scrivere un'ulteriore equazione data dalla combinazione di 2.1 e 2.4, detta equazione di continuità.

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = -\frac{\partial \delta}{\partial t} \quad (2.5)$$

Le formulazioni puntuali non sono le uniche possibili. Dai teoremi di Stokes e di Green risulta possibile esprimere le equazioni di Maxwell in forma integrale.

Dopo aver definito una superficie arbitraria Σ che supporta un percorso chiuso $\partial\Sigma$, Figura 2.3, la legge di Faraday 2.2 si trova di solito scritta come integrale di superficie del rotore campo elettrico:

$$\int_{\Sigma} \nabla \times \mathbf{E} dV = \oint_{\partial\Sigma} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Sigma} \mathbf{B} \cdot \mathbf{n} dS$$

che si trova scritta anche come:

$$fem = -\frac{\partial \Phi}{\partial t} \quad (2.6)$$

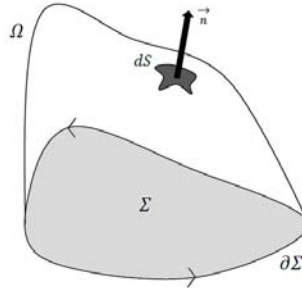


Figura 2.3: Dominio Ω e superficie Σ

con $\Phi [Wb]$ è il flusso magnetico attraverso la superficie Σ .

Lo stesso procedimento può essere svolto per l'equazione di Ampere generalizzata 2.1:

$$\oint_{\partial\Sigma} \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \int_{\Sigma} \mathbf{J} \cdot \mathbf{n} dS + \frac{\partial}{\partial t} \int_{\Sigma} \mathbf{D} \cdot \mathbf{n} dS$$

Dall'equazione della divergenza 2.3, si sa che non si può avere generazione o annullamento di cariche, anche questa risulta esprimibile come:

$$\int_{\Omega} \nabla \cdot \mathbf{B} dV = \int_{\partial\Omega} \mathbf{B} \cdot \mathbf{n} dS = 0$$

Tale equazione implica che il flusso magnetico attraverso la superficie chiusa $\partial\Omega$ che include la regione di volume Σ deve essere nullo:

$$\Phi_{\partial\Omega} = 0 \quad (2.7)$$

Infine, l'equazione di continuità 2.4 definisce la conservazione della carica elettrica, e ci permette di ottenere la seguente relazione tra corrente totale e la totale carica elettrica.

$$\int_{\partial\Omega} \mathbf{J} \cdot d\mathbf{s} = -\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \delta dV$$

riscrivibile nella forma:

$$I = -\frac{\partial Q}{\partial t} \quad (2.8)$$

con $Q [C]$ che indica la totale carica elettrica all'interno del volume Ω e $I [A]$ la totale corrente nella superficie $\partial\Omega$.

2.1.1 Condizioni al contorno

Le formulazioni integrali appena definite permettono di capire cosa accade lungo e attraverso due materiali diversi. Ad esempio, in un dominio Ω , è possibile trovare due o più materiali che sono caratterizzati da comportamenti del campo completamente diversi. Dalle equazione di Maxwell è possibile derivare, per i campi elettrici e per quelli magnetici, i principi di conservazione delle componenti normali e/o tangenziali.

Conservazione componente tangenziale del campo elettrico \mathbf{E}

Nel caso generale di una variazione temporale del vettore di induzione magnetica, $\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \neq 0$, è possibile integrare il rotore del campo elettrico in una superficie Σ , come evidenziato in figura . Viene preso un rettangolo Σ dove la larghezza è maggiore dell'altezza e per tale motivo è possibile trascurare i termini di ordine superiore. La struttura rettangolare passa attraverso il contorno di due regioni differenti, Ω_1 and Ω_2 .

$$\int_{\Sigma} \nabla \times \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = \oint_{\partial\Sigma=l} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{\partial\Phi}{\partial t}$$

Risulta quindi possibile ottenere la conservazione della componente tangenziale a meno della differenza dovuta alla variazione del vettore induzione magnetica.

$$\mathbf{E}_1 \cdot \mathbf{t} = \mathbf{E}_2 \cdot \mathbf{t} - \frac{\partial\Phi}{\partial t} \quad (2.9)$$

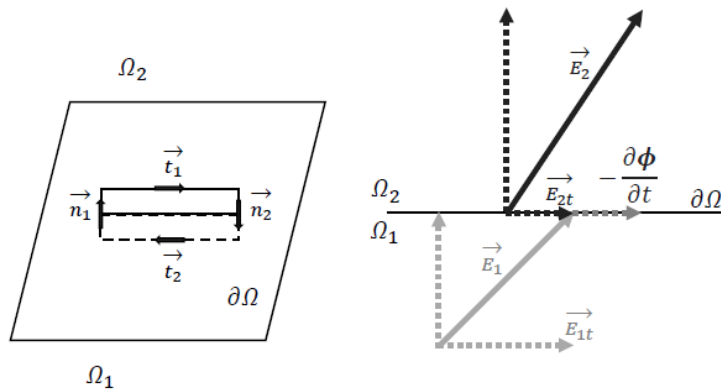


Figura 2.4: Conservazione della componente tangenziale del vettore campo elettrico \mathbf{E}

Conservazione componente tangenziale del campo magnetico \mathbf{H}

Dalla presenza di una densità di corrente \mathbf{J} è possibile capire che il rotore del vettore magnetico non è nullo. Risulta quindi possibile integrare lungo il rettangolo Σ ed ottenere la conservazione della componente tangenziale del campo magnetico con l'ipotesi che la derivata del vettore spostamento sia nulla o trascurabile $\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \approx 0$. E' bene notare che questa approssimazione non è vera a priori, bensì è vera per valori di frequenza non eccessivamente elevate. Per processi come quello dell'induzione, per cui la frequenza massima è inferiore ad 1 MHz, questa approssimazione risulta sempre valida.

$$\mathbf{H}_1 \cdot \mathbf{t} = \mathbf{H}_2 \cdot \mathbf{t} + \int_{\Sigma} \mathbf{J} \cdot \mathbf{n} dS \quad (2.10)$$

La differenza tra la densità di corrente nella prima e nella seconda regione è dovuto alla corrente attraverso la superficie.

Conservazione componente normale del vettore induzione magnetica \mathbf{B}

La conservazione della componente normale del vettore \mathbf{B} è ottenuta dalla divergenza del campo di induzione magnetica. In un piano $\partial\Omega$ preso come interfaccia tra due differenti regioni di due materiali differenti μ_1 e μ_2 è possibile costruire un cilindro come da Figura 2.5, dove il raggio è preso molto più grande dell'altezza. E' possibile quindi integrare nella totale superficie dell'oggetto Σ e trascurare i termini di secondo ordine:

$$\oint_{\Sigma} \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = \mathbf{B}_1 \cdot \mathbf{n}_1 S_1 + \mathbf{B}_2 \cdot \mathbf{n}_2 S_2 = 0$$

Ciò comporta la conservazione della componente normale del campo di \mathbf{B} attraverso il contorno.

$$\mathbf{B}_1 \cdot \mathbf{n} = \mathbf{B}_2 \cdot \mathbf{n} \quad (2.11)$$

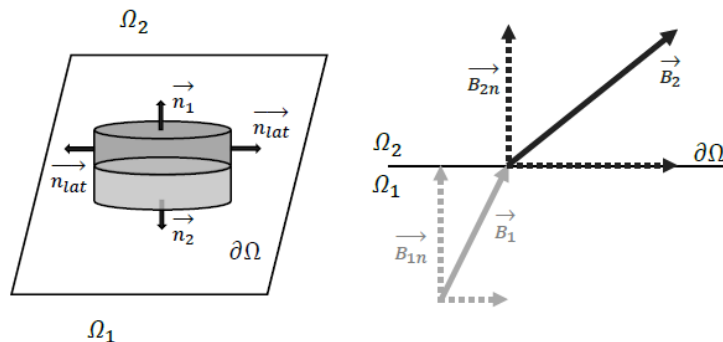


Figura 2.5: Conservazione della componente normale del vettore B

Conservazione componente normale del vettore spostamento elettrico \mathbf{D}

Come nel modo appena visto, è possibile integrare la divergenza del vettore spostamento elettrico nello stesso cilindretto.

$$\oint_{\Sigma} \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} = \mathbf{D}_1 \cdot \mathbf{n}_1 S_1 + \mathbf{D}_2 \cdot \mathbf{n}_2 S_2 = 0$$

la quale equazione implica la conservazione della componente normale del vettore \mathbf{D} .

$$\mathbf{D}_1 \cdot \mathbf{n} = \mathbf{D}_2 \cdot \mathbf{n} \quad (2.12)$$

Conservazione componente normale del vettore densità di corrente \mathbf{J}

Dall'equazione di continuità risulta semplice osservare come la componente normale del vettore densità di corrente dipenda strettamente dalla densità di carica, nel caso generale in cui $\frac{\partial \delta}{\partial t} \neq 0$.

$$\mathbf{J}_1 \cdot \mathbf{n} = \mathbf{J}_2 \cdot \mathbf{n} - \frac{\partial Q}{\partial t} \quad (2.13)$$

Con la presenza di un termine dovuto alla totale carica elettrica all'interno del cilindro.

2.1.2 Leggi costitutive

Accanto alle equazioni di Maxwell, si devono aggiungere quelle costitutive del materiale, che, nel caso più semplice sono:

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (2.14)$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (2.15)$$

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E} \quad (2.16)$$

Con $\mu = \mu_r \mu_0$ permeabilità magnetica data da $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} [H/m]$, permeabilità magnetica del vuoto e μ_r permeabilità magnetica relativa.

Possiamo scrivere la conducibilità elettrica come $\sigma = \frac{1}{\rho} [S/m]$ con $\rho [\Omega/m]$ resistività elettrica e la permittività elettrica $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$, con $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} [F/m]$ permittività dielettrica del vuoto.

Questa approssimazione ci permette di trascurare la costante dielettrica, che lega il campo di spostamento a quello elettrico. Per risolvere in modo accurato un problema alle correnti indotte diventa in altro modo importante la conoscenza di parametri elettromagnetici dei materiali come conducibilità elettrica e permeabilità magnetica. Queste considerazioni possono essere facilmente dimostrate: si consideri un modello dove viene trascurata la derivata del vettore spostamento elettrico, $\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \approx 0$, con sorgente sinusoidale dove è possibile assumere un valore medio dei parametri dei materiali.

$$\mathbf{D} = \epsilon_0 \epsilon_r \mathbf{E} + \mathbf{P}$$

con \mathbf{P} vettore polarizzazione magnetica.

Per materiali conduttori $\mathbf{P} \ll \epsilon_0 \mathbf{E}$ ed è così possibile studiare il problema con la trasformata di Steinmetz.

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} = \sigma_e l \mathbf{E} + j\omega \epsilon_0 \mathbf{E} = (\sigma_e l + j\omega_r \omega_0) \mathbf{E}$$

e considerando l'induttore accoppiato con una semplice billetta:

$$\sigma_{Steel} \approx 10^6 [S/m] \quad \epsilon_{Steel} \approx 10^{-11} [F/m] \quad \omega_{alim} \approx 10^5 [rad/s]$$

dove la parte immaginaria del numero complesso può essere trascurata $Im(\nabla \times \mathbf{H}) = j\omega_r \omega_0 \mathbf{E}$.

E' possibile scrivere le equazioni in condizioni quasi stazionarie:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (2.17)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2.18)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (2.19)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = 0 \quad (2.20)$$

Si può dunque scrivere un'unica equazione che analizza completamente il problema elettromagnetico utilizzando il vettore potenziale magnetico \mathbf{A} e il potenziale scalare elettrico V . Dalla divergenza nulla del campo di induzione magnetica e dall'equazione 2.17, esiste un potenziale vettore magnetico \mathbf{A} il cui rotore ricostruisce integralmente il campo di induzione magnetica \mathbf{B} :

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (2.21)$$

L'equazione appena scritta non identifica un unico potenziale vettore, ma esistono infiniti vettori \mathbf{A} che risolvono l'equazione $\nabla \cdot \mathbf{B} = \nabla \cdot \nabla \times \mathbf{A} = 0$ per ogni $\mathbf{A} = \mathbf{A}' + \nabla \Lambda$. Per avere un'unica soluzione è possibile usare le formulazioni di Coulomb e Lorentz. Ulteriormente, dall'equazione (2.18) è possibile trovare una nuova formulazione del campo elettrico \mathbf{E} , descrivendolo come effetto di entrambi i potenziali:

$$\mathbf{E} = -\nabla V - \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \quad (2.22)$$

Combinando la formulazione per campi elettrici e magnetici nella equazione 2.17 e considerando le leggi costitutive per il campo elettrico e magnetico $\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$ e $\mathbf{H} = \frac{1}{\mu} \mathbf{B}$

$$\begin{aligned} \nabla \times \mathbf{H} &= \mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \\ \nabla \times \frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A} &= -\sigma \nabla V - \sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \end{aligned}$$

E la stessa cosa può essere fatta per la $\nabla \cdot \mathbf{J} = 0$:

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = \nabla \cdot \sigma \mathbf{E}$$

$$\nabla \cdot \sigma \nabla V = -\nabla \cdot \sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}$$

Queste due equazioni descrivono completamente le condizioni quasi stazionarie. Il sistema finale dell'equazione per avere una unica soluzione sarà:

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A} + \sigma \nabla V + \sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} = 0 \quad (2.23)$$

$$\nabla \cdot \sigma \nabla V = 0 \quad (2.24)$$

2.2 Soluzioni analitiche del problema elettromagnetico

I problemi elettromagnetici sono risolvibili in modo analitico mediante opportune semplificazioni che vengono solitamente eseguite prima di determinare la soluzione numerica per valutare alcuni parametri del calcolo. Si ipotizzi di studiare un insieme formato da un cilindro massiccio di materiale conduttore infinitamente lungo (dove resistività e permeabilità rimangono costanti) sul quale viene avvolto un induttore percorso da corrente sinusoidale. E' possibile la sua rappresentazione con un modello monodimensionale e assialsimmetrico, Figura 2.6 [4].

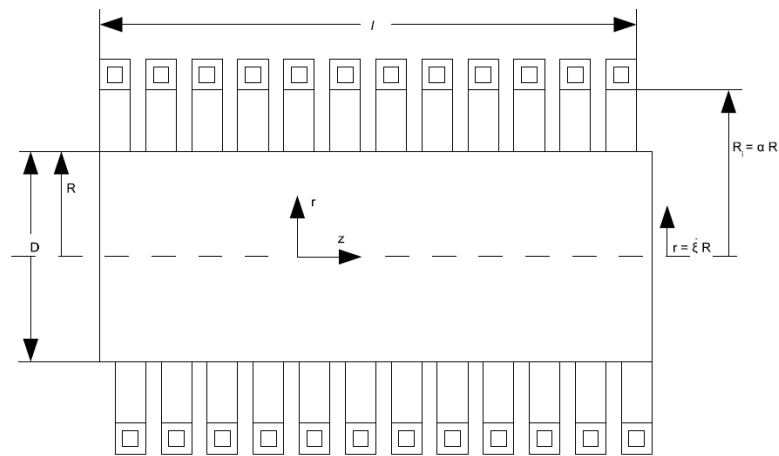


Figura 2.6: Sistema induttore-carico cilindrici

Assumendo un sistema di riferimento in coordinate cilindriche (r, φ, z) , vengono definiti i seguenti parametri adimensionali:

$$\xi = \frac{r}{R} \quad ; \quad \alpha = \frac{R_i}{R}$$

dove:

R_i Raggio interno della bobina induttrice [m]

R, r Raggio del cilindro in riscaldamento e raggio di una generica circonferenza interna ad esso, concentrica alla bobina [m]

L'intensità del campo magnetico nello spazio vuoto, compreso tra l'induttore ed il cilindro ha direzione secondo l'asse z e modulo circa uguale a quello di una bobina in assenza di carico:

$$\mathbf{H}_0 = \frac{N I}{l} \quad (2.25)$$

l	lunghezza assiale del tratto di sistema esaminato [m]
N	numero di spire della bobina induttrice
I	valore efficace della corrente che circola nella bobina [A]
$\omega = 2\pi \cdot f$	pulsazione della corrente I [$\frac{rad}{s}$]
ρ	resistività [$\Omega \cdot m$]
μ	permeabilità magnetica relativa del materiale costituente il cilindro [$\frac{H}{m}$]
$\mu_0 = 4\pi 10^7$	permeabilità magnetica del vuoto [$\frac{H}{m}$]
$j = \sqrt{-1}$	unità immaginaria

Le correnti di spostamento possono essere trascurate essendo le frequenze in gioco molto elevate. Pertanto, le equazioni di Maxwell in regime armonico possono essere scritte come:

$$\begin{cases} \nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} = \frac{\mathbf{E}}{\rho} \\ \nabla \times \mathbf{E} = -j\omega\mu_0\mu\mathbf{H} \end{cases}$$

Dato il sistema di coordinate impiegato e vista la geometria della configurazione, risultano diverse da zero solo le componenti H_z ed \mathbf{E}_φ dei rispettivi fasori, si può scrivere l'equazione:

$$\frac{d^2 H_z}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dH_z}{dr} - j \frac{\omega\mu\mu_0}{\rho} H_z = 0 \quad (2.26)$$

Introducendo lo spessore di penetrazione δ e il parametro adimensionale m :

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu\mu_0}} \simeq 503 \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}} \quad ; \quad m = \frac{\sqrt{2}R}{\delta}$$

l'equazione diventa:

$$\frac{d^2 \mathbf{H}_z}{d\xi^2} + \frac{1}{\xi} \frac{d\mathbf{H}_z}{d\xi} - jm^2 \mathbf{H}_z = 0 \quad (2.27)$$

E' da sottolineare che l'equazione differenziale risultante è stata sensibilmente semplificata, poiché il campo magnetico ora risulta scritto in forma scalare e non più vettoriale e ora una sola equazione descrive l'intero modello semplificato. Le equazioni di Bessel forniscono la soluzione al problema:

$$\mathbf{H}_z = \mathbf{H}_0 \frac{ber(m\xi) + jbei(m\xi)}{ber(m) + jbei(m)} \quad (2.28)$$

Analizzando l'equazione 2.28 e come presentato in Figura 2.7 si può notare come le linee di campo siano particolarmente concentrate sulla superficie del cilindro, comportamento dovuto all'effetto pelle presente e ancor più evidente ad elevati valori di m . Servendoci delle equazioni di Bessel del primo ordine J_1 , vale la relazione:

$$\frac{\mathbf{E}}{\mathbf{E}_0} = \frac{\mathbf{G}}{\mathbf{G}_0} = \frac{J_1 \sqrt{-jm\xi}}{J_1 \sqrt{-jm}} \quad (2.29)$$

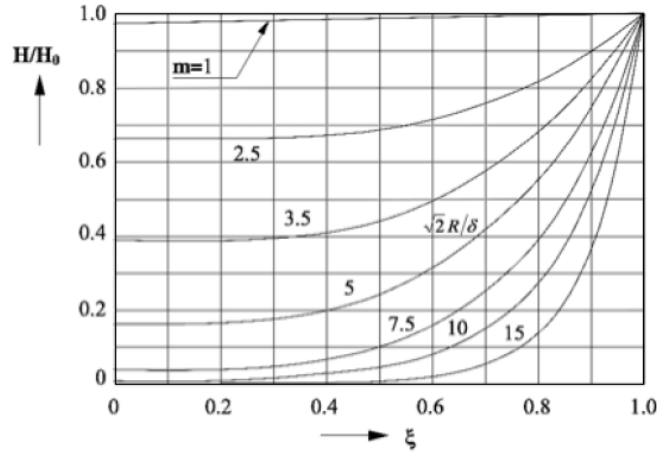


Figura 2.7: Andamento dell'intensità del campo magnetico H lungo il raggio r riferito al valore superficiale di H_0 , al variare di m

E la densità di corrente \mathbf{G} può essere determinata come:

$$\mathbf{G} = \frac{\mathbf{E}_\varphi}{\rho} = -\frac{\mathbf{H}_0}{R} m \frac{ber'(m\xi) + jber'(m\xi)}{ber(m) + jbei(m)} \quad (2.30)$$

E' evidente come la densità di corrente decresca dall'esterno in direzione del centro del conduttore e dipenda da m , Figura 2.8. Più elevato è il valore di m , che cambia al variare della permeabilità e resistività del corpo sottoposto a riscaldamento e dalla frequenza di alimentazione dell'induttore, minore è la zona dove è condensata la corrente. Tale fenomeno, che si presenta sempre in presenza di corrente alternata, è denominato "effetto pelle". La distribuzione della densità di corrente può essere rappresentata, da una prima approssimazione, tramite la seguente formula:

$$\mathbf{G} = \mathbf{G}_0 \cdot e^{-\frac{x}{\delta}} \quad (2.31)$$

dove:

$x = R - r$ distanza dalla superficie del conduttore verso il centro della sezione [m]

\mathbf{G}_0 densità di corrente sulla superficie [A/m]

Dalla equazione 2.30 viene ottenuta la distribuzione della potenza specifica indotta per unità di volume:

$$w = \rho \mathbf{G}^2 = w_0 \frac{ber'^2(m\xi) + jber'^2(m\xi)}{ber^2(m) + jbei^2(m)} \quad (2.32)$$

Come per la densità di corrente, anche per la densità di potenza il valore è nullo in prossimità dell'asse e si addensa nello spessore di penetrazione δ , Figura 2.9. Rispetto al caso precedente, la potenza si riduce con un legge quadratica, andamento visibile

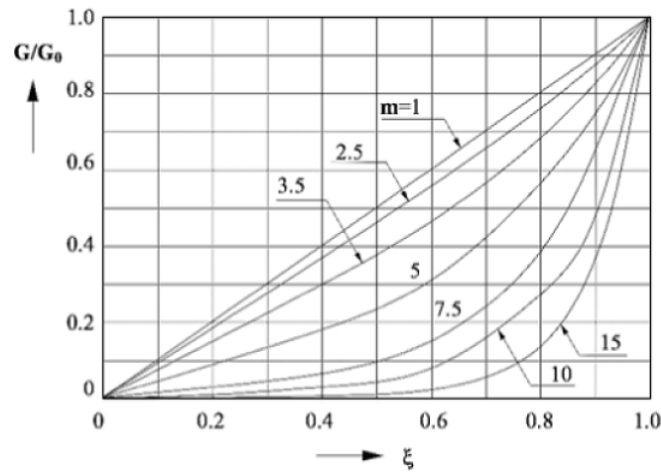


Figura 2.8: Andamento dell'intensità di corrente G lungo il raggio r riferito al valore superficiale di G_0 , al variare di m

in particolar modo per alti valori del parametro m . Lo spessore di penetrazione viene definito in termini matematici come la distanza dalla superficie in direzione del centro della sezione del conduttore, nella quale la corrente si attenua fino a raggiungere $\frac{1}{e}$ volte il proprio valore superficiale. Per quanto concerne la densità di potenza, questa alla distanza δ decresce di $\frac{1}{e^2}$ volte il proprio valore in dipendenza da quello assunto superficialmente. Perciò nello strato superficiale di spessore δ sarà presente il 63% della corrente e l'86% della potenza.

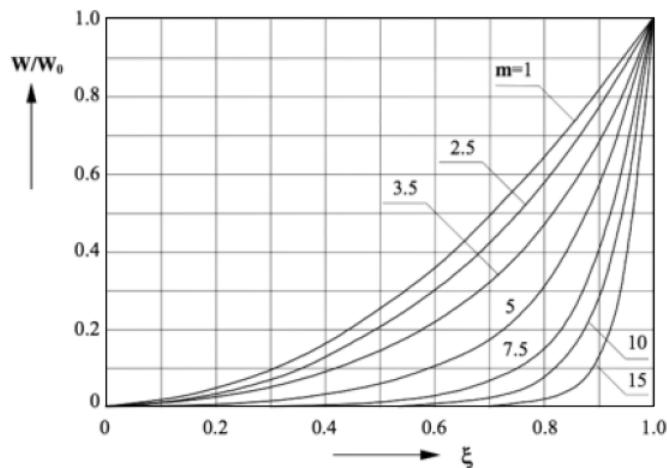


Figura 2.9: Andamento della potenza specifica per unità di volume w lungo il raggio r riferito al valore superficiale w_0 , al variare di m

2.3 Il problema termico

Il calore è una forma di energia che si manifesta nel passaggio da un corpo ad un'altro, quando tra i due vi è una differenza di temperatura. Dal primo principio della termodinamica viene descritta l'equivalenza tra le varie forme di energia, invece la direzione e il verso di trasferimento spontaneo del calore da un oggetto che si trova a temperatura maggiore rispetto ad uno a temperatura minore, vengono descritti nel secondo [6]. I modi di trasmissione del calore sono tre, elencandoli:

- conduzione
- convezione
- irraggiamento

Il flusso termico attraverso una parete di separazione di due fluidi avviene per convezione e per irraggiamento sulle due superfici e per conduzione internamente alla parete, dovuto ai gradienti termici presenti all'interno del corpo. Può verificarsi che uno dei tre modi sia preponderante rispetto agli altri cosicché diventi lecito trascurare quelli di minore importanza mentre in molte occasioni i tre modi di trasmissione del calore coesistono. Considerando una lastra piana di sezione A e spessore l , nel momento in cui si ha l'esistenza di un gradiente termico tra le due facce, si ha l'insorgere di un flusso termico normale alle sezioni A rappresentabile come:

$$q = \frac{\lambda A(T_1 - T_2)}{l} \quad (2.33)$$

Il trasporto di calore derivante dal movimento macroscopico di un fluido che scorre lungo la superficie del solido da riscaldare definisce la convezione termica. La determinazione del coefficiente di convezione termica, α_c [$\frac{W}{m^2K}$], avviene tramite conoscenza della tipologia di fluido e del tipo di moto (libero o forzato) cui il solido è sottoposto. La relazione di Newton determina, mediante conoscenza di α_c , il flusso termico che arriva alla superficie solida:

$$q = \alpha_c A(T_1 - T_2) \quad (2.34)$$

Il coefficiente di convezione termica non è tanto proprietà del fluido, quanto delle condizioni di deflusso. Durante la vaporizzazione e la condensazione, ovvero il cambiamento di fase, si verificano particolari condizioni di convezione termica. I valori di α_c possono raggiungere massimi dell'ordine di parecchie decine di migliaia in unità del sistema S.I. nei liquidi in ebollizione e nei metalli fusi in convezione forzata, per arrivare a valori di poche unità per gas in convezione naturale. Mediante propagazione di onde elettromagnetiche nel vuoto o attraverso sostanze almeno parzialmente trasparenti si ha infine la trasmissione del calore per irraggiamento. Il flusso di energia radiante scambiato da un corpo ad una temperatura assoluta T , rispetto a quella ambiente T_∞ , si determina, per un corpo nero, attraverso la costante di Stefan-Boltzmann, σ_n [$\frac{W}{m^2K^4}$], ottenendo l'uguaglianza:

$$q = \sigma_n A(T^4 - T_\infty^4) \quad (2.35)$$

Tipicamente i flussi termici per convezione e irraggiamento si determinano in modo separato, ma può risultare utile stabilire il flusso termico complessivamente scambiato da una superficie, che dipenderà contemporaneamente da fenomeni di convezione ed irraggiamento, mediante un'unica formula. Dopo aver descritto il coefficiente di scambio termico superficiale complessivo, α $\left[\frac{W}{m^2K}\right]$ è possibile, sommando le equazioni 2.34 e 2.35 scrivere:

$$q = \alpha A(T_1 - T_2) \quad (2.36)$$

Questo approccio richiede un'attenta validazione sperimentale poiché la potenza termica persa per irraggiamento nella sua forma comune è funzione della temperatura superficiale alla quarta, mentre in questa formula invece è stata linearizzata. Perciò il coefficiente di irraggiamento dovrà essere opportunamente corretto.

2.3.1 Le equazioni della conduzione termica

Il trasferimento di energia tra due punti di un corpo che si trovano a temperature differenti che avviene senza apprezzabile trasporto di materia, prende il nome di trasmissione del calore per conduzione. Nell'analisi usuale della conduzione le proprietà fisiche dell'oggetto inerenti ai fenomeni termici sono pensate il più delle volte note e tempo invarianti. Nella realtà, la temperatura di ogni particella di materia nella porzione del corpo soggetto al fenomeno, dipende della posizione e dall'istante considerato. Dato un sistema di coordinate cartesiane si può scrivere:

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

E' possibile individuare delle superfici isoterme nel corpo (termine che indica che ciascuna superficie presenta punti alla medesima temperatura), le quali non si intersecano mai e presentano, forma e distribuzione solitamente variabili nel tempo. La trattazione generale della conduzione termica presuppone avere un modello continuo, uniforme, isotropo, e con proprietà fisiche non variabili con temperatura e tempo. Supponendo di avere due superfici parallele isoterme, rispettivamente a temperatura T e $T + \Delta T$ e situate ad una distanza x e $x + \Delta x$, e definito il flusso termico $q = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{Q}{\Delta t}$ la 2.33 si può scrivere in forma differenziale come:

$$q = -\lambda A \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta T}{\Delta x} = -\lambda A \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.37)$$

Nota come legge di Fourier della conduzione termica. In accordo con il secondo principio della termodinamica, il segno meno presente nel secondo membro significa che viene considerato positivo il flusso termico q nel verso delle x crescenti. Si prenda un corpo continuo, uniforme e isotropo e nello stesso una superficie isoterma alla temperatura T dove su di essa viene preso un elemento di area ΔA comprendente il punto P . Venga considerata la normale alla superficie in P , denominata n , ed una seconda isoterma a temperatura $T + \Delta T$ che determini nella normale il segmento Δn , Figura 2.10.

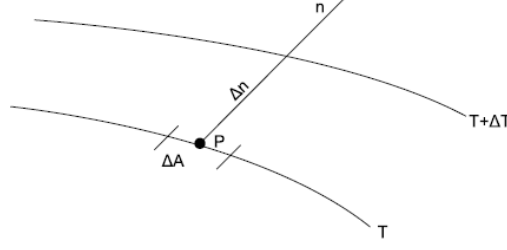


Figura 2.10: Rappresentazione di due superfici isoterme in un corpo

Tracciando un cilindretto di base ΔA con generatrici parallele ad n , trascurando il flusso disperso attraverso la superficie laterale, secondo le equazioni 2.33 e 2.37, e per $\Delta n \rightarrow 0$, si ricava:

$$q = -\lambda \Delta A \frac{\partial T}{\partial n} \quad (2.38)$$

L'espressione appena scritta rappresenta il flusso termico che attraversa una superficie isoterma nell'intorno del punto P . Considerando il rapporto $\frac{q}{\Delta A}$, con $\Delta A \rightarrow 0$, risulta:

$$q^* = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{q}{\Delta A} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \quad (2.39)$$

espressione rappresentante il flusso termico specifico o densità di flusso termico attraverso l'isoterma nel punto in esame P e utilizzabile anche se il mezzo non è omogeneo, ma permanga continuo ed isotropo. L'equazione 2.39 scritta in termini vettoriali sottolinea che, si ha l'esistenza di un vettore densità di flusso \mathbf{q}^* , di modulo $\lambda \frac{\partial T}{\partial n}$, direzione perpendicolare alla superficie isoterma in P ed orientato nel verso delle temperature decrescenti per ogni punto P del dominio in esame. Si può perciò esprimerla come:

$$\mathbf{q}^* = -\lambda \nabla T = -\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial T}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial T}{\partial z} \mathbf{k} \right) \quad (2.40)$$

dove i termini $q_x^* = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x}$, $q_y^* = -\lambda \frac{\partial T}{\partial y}$, $q_z^* = -\lambda \frac{\partial T}{\partial z}$, individuano le componenti del vettore densità di flusso nella direzione degli assi di riferimento. Per il calcolo del flusso termico specifico nel punto P , in una superficie orientata, non isoterma, avente vettore unitario normale \mathbf{n} , si dovrà scrivere:

$$\mathbf{q}_n^* = \mathbf{q}^* \cdot \mathbf{m} = -\lambda \nabla T \cdot \mathbf{n} \quad (2.41)$$

dal calcolo vettoriale:

$$\frac{\partial T}{\partial n} = \nabla T \cdot \mathbf{n} \quad (2.42)$$

$$q_n^* = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \quad (2.43)$$

con $\frac{\partial}{\partial n}$ indicante la derivazione in direzione normale alla superficie considerata. Le precedenti relazioni non sono più applicabili nel caso in cui le proprietà termofisiche siano dipendenti dalla direzione circostante il punto considerato, ovvero venga a mancare la condizione di isotropia. Se il corpo è anisotropo, il verso del vettore densità di flusso in un punto non è più normale alla superficie isoterma. Assumendo che ogni componente del vettore densità di flusso sia una combinazione lineare di tutte le componenti del vettore gradiente in quel punto, dalla legge di Fourier si ha:

$$q_x^* = -\left(\lambda_{xx}\frac{\partial T}{\partial x} + \lambda_{xy}\frac{\partial T}{\partial y} + \lambda_{xz}\frac{\partial T}{\partial z}\right) \quad (2.44)$$

$$q_y^* = -\left(\lambda_{yx}\frac{\partial T}{\partial x} + \lambda_{yy}\frac{\partial T}{\partial y} + \lambda_{yz}\frac{\partial T}{\partial z}\right) \quad (2.45)$$

$$q_z^* = -\left(\lambda_{zx}\frac{\partial T}{\partial x} + \lambda_{zy}\frac{\partial T}{\partial y} + \lambda_{zz}\frac{\partial T}{\partial z}\right) \quad (2.46)$$

Scegliendo adeguatamente gli assi, alcuni dei coefficienti λ delle relazioni precedenti possono annullarsi, ottenendo:

$$q_y^* = -\lambda_{yy}\frac{\partial T}{\partial y} \quad (2.47)$$

$$q_z^* = -\lambda_{zz}\frac{\partial T}{\partial z} \quad (2.48)$$

λ_{xx} , λ_{yy} , λ_{zz} , hanno il significato di conduttività termica nel momento in cui il flusso termico sia monodimensionale e parallelo ad un asse di simmetria.

2.3.2 Equazione generale della conduzione termica

Dalla risoluzione della funzione che unisce la distribuzione della temperatura ai parametri spaziali e temporali nel mezzo studiato, $T = f(x, y, z, t)$ è possibile andare a determinare la quantità di calore scambiato mediante conduzione. Servendoci del principio di conservazione dell'energia riferito ad un insieme di volume finito, e prendendo un intervallo temporale infinitesimo dt , la determinazione della funzione sopra scritta si può scrivere come:

$$dQ_e + dQ_g = dU \quad (2.49)$$

in cui:

- Q_e quantità di calore netta scambiata
- Q_g la quantità di calore generata internamente al sistema
- U variazione di energia interna del sistema

Per l'equazione appena scritta 2.49, bisognerà scrivere analiticamente le diverse componenti. Dato un volume V racchiuso in una superficie A del corpo sede del fenomeno di conduzione termica, viene descritto con \mathbf{n} il vettore unitario normale al generico elemento superficiale infinitesimo dA , considerato positivo se uscente dalla regione di spazio racchiusa. Perciò la quantità di calore dQ_e entrante nel volume V è data da:

$$dQ_e = -dt \int_A \mathbf{q}^* \cdot \mathbf{n} \cdot dA \quad (2.50)$$

In un qualsiasi volume, utilizzando il teorema della divergenza si può scrivere:

$$\int_A \mathbf{q}^* \cdot \mathbf{n} dA = \int_V \nabla \cdot \mathbf{q}^* dV \quad (2.51)$$

per cui l'equazione 2.50 risulta:

$$dQ_e = -dt \int_A \mathbf{q}^* \cdot \mathbf{n} dA = -dt \int_V \nabla \cdot \mathbf{q}^* dV \quad (2.52)$$

Dato che dQ_g è causato dalla auto generazione di calore dovuta ad effetto Joule, o reazioni chimiche, definendo per ogni punto P del volume considerato Q_g la totale potenza generata all'interno del volume ΔV e $W = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{Q_g}{\Delta V}$ intensità di generazione interna, si ottiene:

$$dQ_g = dt \int_V W dV \quad (2.53)$$

Infine, il termine dell'equazione di conservazione dell'energia dU , ovvero la variazione di energia interna, viene espresso come:

$$dU = dt \int_V c\rho \frac{\partial T}{\partial t} dV \quad (2.54)$$

nella quale c indica il calore specifico a volume costante, e ρ la densità. Sostituendo quanto appena ottenuto nell'equazione 2.49, risulta:

$$-dt \int_V \nabla \cdot \mathbf{q}^* dV + dt \int_V W dV = dt \int_V c\rho \frac{\partial T}{\partial t} dV \quad (2.55)$$

$$-\nabla \cdot \mathbf{q}^* + W = c\rho \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.56)$$

la quale è l'equazione generale della conduzione termica, essendo il volume V diverso da zero. Dall'equazione 2.40, ritenendo λ costante e utilizzando le due equazioni di seguito riportate è possibile la scrittura della 2.56 si scrive in una uguaglianza matematicamente più utile al nostro problema, equazione 2.57.

$$\nabla \cdot \mathbf{q}^* = \nabla(-\lambda \nabla T) = -\lambda \nabla \nabla T$$

riscrivibile come

$$\nabla \cdot \mathbf{q}^* = -\lambda \nabla(\nabla T) = -\lambda \nabla^2 T$$

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \nabla^2 T + W \quad (2.57)$$

detta equazione generale della conduzione termica, scrivibile ancora come:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + W \quad (2.58)$$

Nei casi elencati si hanno altre semplificazioni, esattamente quando:

1. Non è presente generazione di calore all'interno del corpo

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \nabla^2 T \quad (2.59)$$

detta equazione di Fourier.

2. Ogni punto del corpo è in equilibrio termico, ovvero si ha costanza della temperatura nel tempo

$$\lambda \nabla^2 T + W = 0 \quad (2.60)$$

detta equazione di Poisson.

3. Se i punti 1 e 2 vengono soddisfatti entrambi

$$\lambda \nabla^2 T = 0 \quad (2.61)$$

detta equazione di Laplace.

Nel caso in cui venisse a mancare l'ipotesi di costanza della conduttività termica, λ , quindi si è legati alla temperatura, si scriverà $\nabla \cdot \mathbf{q}^* = \nabla \cdot (-\lambda \nabla T)$. In coordinate cartesiane infine l'equazione 2.56, è scrivibile come:

$$-\nabla \cdot (\lambda \nabla T) + c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = W \quad (2.62)$$

ovvero:

$$-\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = W \quad (2.63)$$

2.3.3 Le condizioni al contorno nel problema termico

Le temperature in ogni punto del dominio ed il flusso termico attraverso le superfici sono determinabili mediante la soluzione dell'equazione 2.57. Le condizioni al contorno istante per istante e quelle di partenza saranno necessarie per risolvere il problema. Perciò:

- Condizione al contorno di Dirichelet: quando si fissa la temperatura sulla superficie del dominio:

$$T_s = f(x, y, z, t) \quad (2.64)$$

Normalmente funzione del tempo e dello spazio. In casi fortunati può dipendere solamente da una delle due precedenti grandezze o essere costante.

- Condizione al contorno di Neumann: quando viene fissata la derivata della temperatura normale alla superficie, questa può essere funzione del tempo e dello spazio:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial n}\right)_s = f(x, y, z, t) \quad (2.65)$$

Questa condizione equivale a fissare il flusso termico attraverso la superficie. In particolare se il corpo è termicamente isolato è:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial n}\right)_s = 0 \quad (2.66)$$

- Condizione al contorno di Robin: quando si fissa una combinazione lineare fra la temperatura della superficie e la derivata normale alla superficie stessa:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial n}\right)_s = bT_s = f(x, y, z, t) \quad (2.67)$$

Fisicamente questo ha il significato di specificare che vi è una trasmissione di calore per convezione fra la superficie del corpo ed il fluido esterno la cui temperatura può variare sia con il tempo sia con la posizione lungo la superficie. Si può scrivere un bilancio dell'energia su un elemento di superficie s_i :

$$-\lambda_i \left(\frac{\partial T}{\partial n}\right)_{s_i} = \alpha_i (T_{s_i} - T_f) \quad (2.68)$$

equivalentemente:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial n}\right)_{s_i} + \frac{\alpha_i}{\lambda_i} T_{s_i} = \frac{\alpha_i}{\lambda_i} T_{s_i} T_f = f(x, y, z, t) \quad (2.69)$$

Nel caso in cui il coefficiente di convezione sia infinitamente elevato, l'equazione 2.69 indica che la temperatura superficiale T_{s_i} , risulta pari a quella del fluido esterno, T_{f_i} , ritrovandoci nella condizione di Dirichelet.

Capitolo 3

Definizione del problema e strumentazione utilizzata

Il problema che si è andato ad analizzare riguardava lo studio della variazione delle grandezze elettriche e termiche in presenza di un rivestimento applicato ad una pentola di uso commerciale. In particolare è stata posta una copertura in legno esternamente alla pentola ed osservato se questa costituiva un vantaggio in termini di rendimento e quindi di utilizzo di energia. Sono stati utilizzati alcuni strumenti, che verranno dettagliatamente presentati nei paragrafi successivi, per il rilevamento delle grandezze elettriche durante le prove sperimentali, sia nel funzionamento a vuoto che in quello a carico. Al fine di andare a determinare, ad esempio, le perdite termiche mediante simulazioni con software FEM, è stata necessaria la rilevazione delle grandezze del sistema reale utilizzato per lo svolgimento degli esperimenti. Innanzitutto sono state rilevate le grandezze geometriche degli elementi che costituiscono il tutto, ovvero ferriti, induttore, pentola e le distanze che intercorrono tra di esse.

3.1 Parametri geometrici

Come prima cosa, sono state rilevate le grandezze geometriche del sistema per riprodurlo in modo bidimensionale nel software a disposizione. Essendo la struttura già stata assemblata e non essendo stato possibile scomporre l'induttore in tutte le sue parti per non provocare rotture, la precisione con cui sono state rilevate le grandezze non è stata essere assoluta. Inoltre alcune misure sono state determinate in modo indiretto basandosi su altre o eseguendo una media tra più misure. Una situazione di questo tipo si è presentata, per esempio, nella determinazione della grandezza dell'induttore, per quanto riguarda il raggio interno, esterno, diametro e fattore di riempimento. Questo perché il filo Litz di cui è composto la bobina è facilmente deformabile a causa della sua struttura e nell'avvolgere una spira, questa può essere più o meno avvolta regolarmente, andando ad aumentare la difficoltà nella misura del diametro del filo. La determinazione delle grandezze dell'induttore è tuttavia essenziale se si vuole andare a rappresentare un mo-

dello prossimo alla realtà.

L'induttore è incluso in una struttura plastica di forma circolare che ha il compito di supportare le ferrite e l'induttore stesso, isolandolo dalle parti sottostanti. Sono presenti sei ferrite disposte a raggiera in modo da convogliare maggior flusso in direzione della pentola. Sopra l'induttore si ha un "gap" d'aria dell'ordine di qualche millimetro, prima di trovare la vetroceramica, o legno su cui poggia la pentola. In modo tale da rendere le prove più comparabili possibili, si è cercato di avere una distanza costante tra induttore e fondo della vetroceramica, inserendo dei supporti anch'essi in legno tra le due parti che sono sempre rimasti presenti in tutte le prove.

Le grandezze geometriche dell'induttore vengono riportate in Tabella 3.1, scrivendole come nel software Flux:

Tabella 3.1: Dimensioni del sistema induttore e pentola

Grandezza	Descrizione	[mm]
x ferrite	spazio asse - ferrite	25
wd ferrite	larghezza ferrite	58
th ferrite	altezza ferrite	4
x bobina	spazio asse - bobina	25
wd bobina	larghezza bobina	58
th bobina	altezza bobina	1.5
th mica	distanza ferriti - bobina	0.4
th supporto in legno	spazio bobina - piano di appoggio	3.3
th vetro	spessore vetroceramica	4
air gap	spazio bobina - base pentola	th supporto in legno + th vetro
wd base pentola inf	larghezza inferiore base pentola	72.5
wd base pentola sup	larghezza superiore base pentola	77.5
th base pentola	altezza parte ferromagnetica	10
th inox	spessore acciaio inox	0.5
th pentola	altezza bordo pentola	140
wd coperchio	larghezza coperchio	90
th base legno	spessore legno sotto pentola	9.7
th legno	spessore legno laterale	23
th coperchio legno	spessore legno coperchio	18

3.2 Parametri elettrici e strumenti utilizzati

Sono state effettuate misure elettriche sull'induttore, a vuoto e a carico. Le prime misure hanno lo scopo di andare a determinare i parametri da inserire nel circuito elettrico in Flux per quanto riguarda la resistenza e la determinazione della permeabilità equivalente delle ferriti dalla conoscenza dell'induttanza. Le misure a carico, invece, sono necessarie per conoscere la corrente da imporre al modello in modo da cercare di avere circa la stessa potenza nella bobina e trasferita al fondo della pentola.

3.2.1 Prova a vuoto

La rilevazione delle grandezze elettriche a vuoto è stata eseguita tramite LCR meter GW instek LCR-819 di Figura 3.1. Collegandolo all'induttore, esso alimenta la bobina ad una frequenza e tensione imposta, andando così a misurare la corrente che circola. Conoscendo parte reale e immaginaria della tensione e corrente, il microprocessore presente al suo interno, determina il valore dell'impedenza in modulo e fase, quindi la resistenza e l'induttanza, visualizzandola sul display. Lo schema circuitale è molto semplice, si tratta di andare a collegare direttamente la bobina allo strumento mediante i coccodrilli presenti nei suoi ingressi. Bisogna porre attenzione all'eventuale presenza di altre parti metalliche vicine, oltre all'induttore, che potrebbero andare a modificare la misura. La Tabella 3.2 riporta il valore di resistenza e induttanza alla frequenza alla quale è stata eseguita la simulazione per determinare la permeabilità equivalente della ferrite, vicina alla frequenza di risonanza. Nell'eseguire le misure, da 1 Hz a 100 kHz , si è visto correttamente che, la resistenza dell'avvolgimento aumenta con la frequenza, in quanto è maggiore l'effetto pelle e di prossimità, mentre l'induttanza diminuisce in quanto si ha un maggiore flusso disperso alle alte frequenze. Con una misura volt-amperometrica, la resistenza in corrente continua della bobina era stata valutata pari a $0.127\ \Omega$, valore che è stato riportato a 120°C , temperatura raggiunta a regime dall'induttore per poi essere inserita in Flux.



Figura 3.1: LCR meter

Tabella 3.2: Resistenza e induttanza a vuoto;
V alimentazione = 1 V

Frequenza [kHz]	Resistenza [Ω]	Induttanza [mH]
22.222	0.1767	0.09687

3.2.2 Prova a carico

Le misure delle grandezze elettriche a carico vengono effettuate mediante:

- Power Analyzer Chauvin Arnoux 8335
- Wattmetro Yokogawa PZ4000
- Oscilloscopio digitale Tektronix TDS 2024B

Il Power Analyzer Figura 3.2(a) è stato utilizzato per osservare la potenza complessivamente assorbita dalla rete dopo aver inserito una seconda morsettiera in parallelo alla presa di corrente. Il Wattmetro Yokogawa PZ4000 Figura 3.2(b), invece, è stato posto in serie nel circuito di alimentazione della bobina. In tal modo è stato possibile visualizzare il valore delle grandezze necessarie per le simulazioni in Flux. In questo caso, non è stato possibile collegare direttamente gli ingressi amperometrici allo strumento, ma è stato necessario l'utilizzo di un TA, con rapporto di trasformazione pari a 10, per provvedere ad una riduzione della corrente in modo da evitare di danneggiare lo strumento. Infine, per la conoscenza della frequenza di funzionamento è stato utilizzato un oscilloscopio digitale Figura 3.2(c) dove, per portare il segnale in ingresso, è stato necessario l'utilizzo di una sonda Rogowsky Figura 3.2(d). Tale sonda consiste in un cavo conduttore ordinatamente avvolto in foggia elicoidale su un supporto flessibile, per formare una bobina solenoidale di lunghezza adeguata. Una estremità del solenoide viene riportata all'origine della bobina passando il cavo di ritorno all'interno del solenoide stesso, accorgimento costruttivo che consente di mantenere libera una estremità della bobina, risultando facilmente avvolgibile intorno al un conduttore sul quale si vuole effettuare la misura, evitando di interferire con lo stesso. Il principio di funzionamento della sonda si basa sulla Legge di Ampere: all'interno della bobina sarà, infatti, indotta una tensione proporzionale alla derivata temporale della corrente misurata.

Per monitorare la temperatura, è stato utilizzato un modulo di acquisizione della HP, Agilent 34970A Figura 3.2(e), collegato al computer tramite RS232. Sono state inserite in ingresso 2 termoresistenze PT100 e più termocoppie di Tipo K. Le acquisizioni sono state fatte ogni secondo in ogni prova. Tutti gli strumenti elencati sono visibili in Figura 3.2.

(a) Power Analyzer



(b) Wattmetro PZ4000



(c) Oscilloscopio digitale



(d) Sonda di tensione



(e) HP Benchlink Datalogger Agilent 34970A



Figura 3.2: Strumentazione elettrica utilizzata

Capitolo 4

Prove sperimentali

4.0.1 Svolgimento delle prove e formule utilizzate

Viene di seguito riportata la procedura operativa utilizzata per lo svolgimento di tutte le prove sperimentali in modo da essere sempre nelle stesse condizioni ed avere misure quanto più confrontabili tra loro. Prima dell'inizio delle prove, sono state accuratamente posizionate tutte le termocoppie e le strumentazioni che consentono il rilevamento delle grandezze termiche ed elettriche. Per avere la certezza che tutto il sistema fosse in equilibrio con l'ambiente, punto di partenza della prova, e successivamente l'acqua fosse giunta ad ebollizione, sono state inserite due termoresistenze PT100 internamente all'acqua e più termocoppie tipo K nella pentola e nel rivestimento in legno, tutte collegate ad un Data Logger. Sono stati creati due fogli di calcolo, con i valori delle grandezze elettriche date dal Power Analyzer e termiche date dal Data Logger.

Il "modus operandi" è stato il seguente: facendo riferimento al tempo indicato dal Data Logger, veniva registrato l'istante di accensione del piano cottura, successivamente dalle due termoresistenze inserite all'interno dell'acqua, e posizionate sempre allo stesso livello nelle diverse prove, veniva mantenuto sotto controllo la temperatura. L'istante finale era fornito dal raggiungimento dei $100^{\circ}C$, dato dalla media del valore indicato dalle temperature delle due termoresistenze PT100. Terminata la prova di riscaldamento, veniva osservato il tempo impiegato dall'acqua a raggiungere l'ebollizione, ovvero dall'istante iniziale fino al raggiungimento dei $100^{\circ}C$, andando ad individuare nei parametri elettrici l'istante finale per conteggiare la potenza assorbita e necessaria. Tutte le prove sono state condotte in assenza di agitazione interna alla pentola e in condizioni statiche. E' stato mantenuto questo standard per tutte i test.

La quantità d'acqua inserita in ogni prova veniva sempre controllata tramite bilancia elettronica con precisione al centesimo di grammo ($\pm 0.01g$). La portata massima della bilancia era di $2kg$, perciò, considerando anche la massa del contenitore, ed impostandola come tara, è stata necessaria la suddivisione in due o tre pesate, a seconda che si andasse ad utilizzare due o più litri d'acqua rispettivamente. Si è posta attenzione a posizionare la pentola sempre nella stessa zona al di sopra dell'induttore (tramite calibro), in modo da risentire minori variazioni della potenza indotta.

Formule utilizzate

Le formule utilizzate nei calcoli vengono di seguito elencate.

Per quanto riguarda la potenza media assorbita dal piano cottura, il Power Analyzer, rileva ogni secondo la potenza fornita dalla rete, quindi si tratta di andare ad eseguire una media tramite foglio di calcolo elettronico di tutti i valori letti:

$$\text{Potenza media assorbita } [W] = \frac{\sum \text{Potenza istantanea}}{\text{tempo arrivo a } 100^{\circ}C}$$

Per l'energia si avrà:

$$\text{Energia assorbita } [W] = \int P \cdot dt = \text{Potenza media assorbita} \cdot \text{tempo}$$

La quantità di energia teorica richiesta dall'acqua per raggiungere l'ebollizione, denominata "Energia ebollizione", ed "Energia acqua" nelle tabelle conclusive di ogni prova, sarà data da:

$$\text{Energia ebollizione } [W] = m \cdot c_{acqua} \cdot (\Delta T) = m \cdot c \cdot (T_{finale} - T_{iniziale})$$

con T iniziale e T finale data dalla media delle temperature indicate dalle due PT100 all'interno dell'acqua negli istanti iniziale e finale del processo e, c_{acqua} , calore specifico dell'acqua [7].

La quantità di energia dissipata durante il processo viene calcolata come:

$$\text{Energia dissipata } [W] = \text{Energia assorbita} - \text{Energia ebollizione}$$

E' possibile riportare le grandezze in wattora:

$$[Wh] = \frac{\text{Energia}}{3600}$$

Per quanto riguarda il rendimento termico, questo viene calcolato come:

$$\text{Rendimento termico} = \frac{\text{Rendimento totale}}{\text{Rendimento elettrico}}$$

Dove il rendimento totale è dato dal rapporto:

$$\text{Rendimento totale} = \frac{\text{Energia ebollizione}}{\text{Energia assorbita}}$$

Il rendimento elettrico è stato valutato come:

$$\text{Rendimento elettrico} = \frac{\text{Potenza bobina}}{\text{Potenza assorbita}}$$

Per ricavare quest'ultimo rendimento sono stati eseguiti più rapporti tra le potenze indicate nello stesso istante dal Wattmetro Yokogawa e il Power Analyzer, in modo da avere più parametri confrontati e fare una media di questi. Si è visto che si assestava attorno al $91 \div 92\%$, perciò risultava plausibile assumere un valore medio del rendimento elettrico del 91.5% .

Tale rendimento tiene conto solamente dell'efficienza del sistema di conversione all'interno del piano cottura, e non dell'efficienza di trasferimento di potenza tra bobina e pentola. Per avere un valore indicativo di quest'ultimo si può solamente ricorrere alle simulazioni. Come verrà illustrato nel Capitolo 5, esso risultava circa pari a 93% in caso di distanza tra bobina e fondo pentola di 7.3 mm , mentre all'aumentare della distanza e quindi al venire meno delle condizioni di migliore accoppiamento questo si riduceva assestandosi comunque attorno all' 88% . Si tratta quindi di efficienze molto elevate. Valori non raggiungibili tramite nessun altro tipo di sistema di riscaldamento.

In Figura 4.1 viene riportata una immagine dell'insieme degli strumenti utilizzati durante le varie prove.

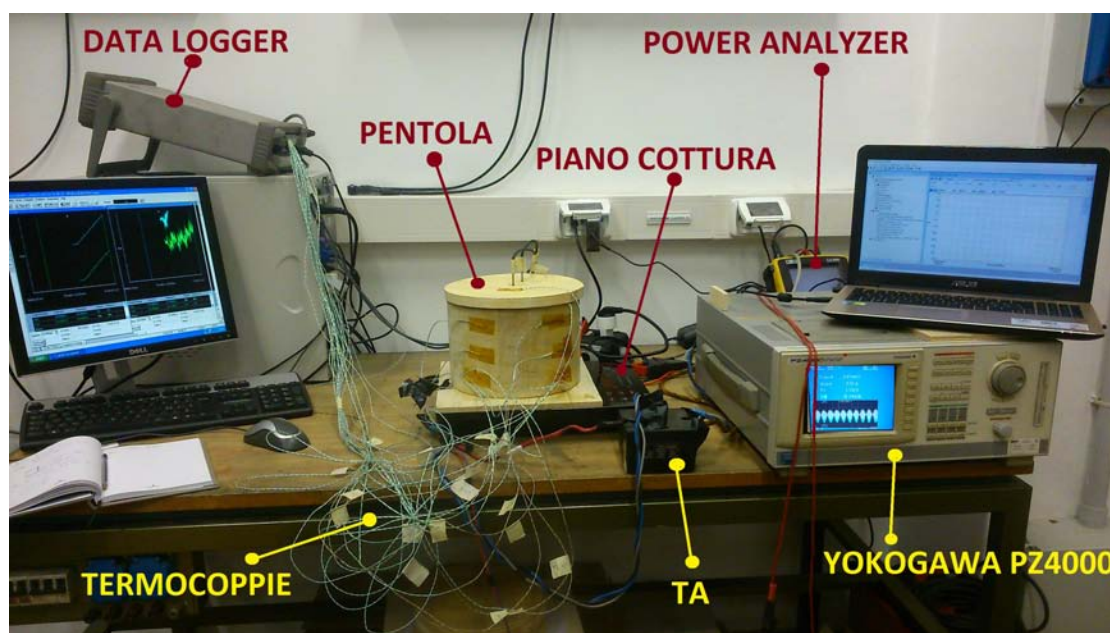


Figura 4.1: Postazione di lavoro

Al fine di osservare quale fosse la soluzione più vantaggiosa, sono state studiate quattro varianti operative. Inizialmente si è utilizzata la soluzione attualmente presente in commercio, ovvero piano di cottura in vetroceramica e pentola normale. Alla pentola poi è stato applicato un rivestimento in legno di abete, mantenendo invariata la configurazione del piano, ovvero posizionandola direttamente sulla vetroceramica. Successivamente è stata posizionata la pentola normale su piano in legno ed infine la pentola rivestita in legno con base in legno. In tal modo si riesce ad avere un'idea di come variano le energie ed

il rendimento in tutte le configurazioni possibili. Per quanto riguarda la strumentazione elettrica a disposizione, è stato inserito il Power Analyzer a monte di tutto, ovvero creato un collegamento in derivazione alla presa di corrente dove il piano veniva collegato. Il wattmetro Yokogawa invece era posizionato ai capi della bobina induttrice responsabile della creazione del campo magnetico e del riscaldamento della pentola. Per monitorare la parte termica, le termocoppie sono state posizionate internamente ed esternamente al rivestimento in legno sempre secondo un preciso schema e mantenuto tale in tutte le prove. Ovviamente nelle prove con pentola normale, erano presenti solo le termocoppie a contatto con la pentola e non quelle nel rivestimento. Le Figura 4.2 e Figura 4.3 specificano il posizionamento delle stesse. TCH_n indica la temperatura dell'ingresso ("channel") n-esimo in cui è connessa la termocoppia, le grandezze sono espresse in centimetri.

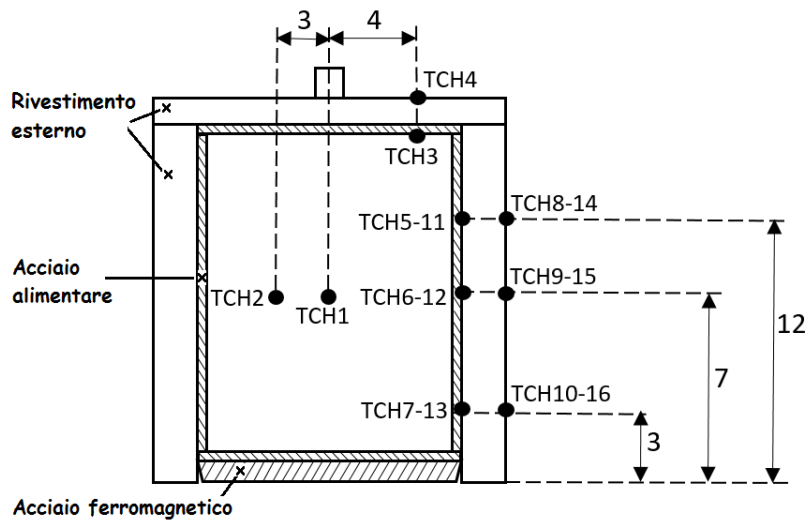


Figura 4.2: Posizionamento termocoppie nella pentola

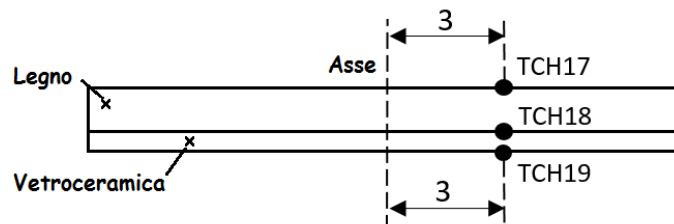


Figura 4.3: Posizionamento termocoppie sulla base del piano cottura

4.1 Prova 1

In queste prime quattro prove sono stati inizialmente effettuati dei test mantenendo il piano in vetroceramica utilizzando prima la pentola normale in acciaio e poi rivestita in legno. Successivamente le prove sono state ripetute modificando il fondo, ossia utilizzando anziché la vetroceramica, un legno compensato dallo stesso spessore. Come si potrà notare dalle potenze assorbite e ai capi della bobina, lo spessore del legno sarà leggermente maggiore della vetroceramica. Tuttavia la differenza è solamente di una ventina di Watt, su circa 2000 W (circa un 1.5%) e si possono trovare risultati interessanti e confrontabili. In questo primo gruppo di prove la pentola è stata riempita con 2 litri d'acqua quindi portata ad ebollizione.

4.1.1 Piano in vetroceramica - Pentola normale

Inizialmente è stata eseguita una prova in configurazione standard ovvero, quanto si ha in un normale processo di cottura domestico. Sono stati ottenuti i seguenti risultati:

Tabella 4.1: Prova 2 L, distanza 7.3 mm, Piano vetroceramica - pentola normale

Grandezza	Unità di misura	Valore
Potenza media assorbita	[W]	2002.22
Tempo raggiungimento 100°C	[s]	397
Energia assorbita	[Wh]	220.80
Energia ebollizione	[Wh]	173.10
Energia dissipata	[Wh]	47.69
Rendimento termico	[%]	85.7
Temperatura acqua iniziale	[°C]	25.63



Figura 4.4: Piano in vetroceramica e pentola normale

4.1.2 Piano in vetroceramica - Pentola rivestita in legno

Si è quindi andato ad inserire la pentola all'interno del rivestimento in legno di abete di spessore 2.3 cm e il coperchio, sempre in legno di abete, avente spessore 1.8 cm. Il tutto poggia su piano in vetroceramica. Anche in questo caso, avvalendoci del valore di temperatura dato dalle termocoppie posizionate internamente ed esternamente del rivestimento in legno, si è aspettato che tutto il sistema fosse in equilibrio per poi iniziare la prova. Sono stati ricavati i seguenti dati:

Tabella 4.2: Prova 2 L, distanza 7.3 mm, Piano vetroceramica - pentola rivestita in legno

Grandezza	Unità di misura	Valore
Potenza media assorbita	[W]	2004.37
Tempo raggiungimento 100°C	[s]	402
Energia assorbita	[Wh]	223.82
Energia ebollizione	[Wh]	172.42
Energia dissipata	[Wh]	51.40
Rendimento termico	[%]	84.2
Temperatura acqua iniziale	[°C]	25.89

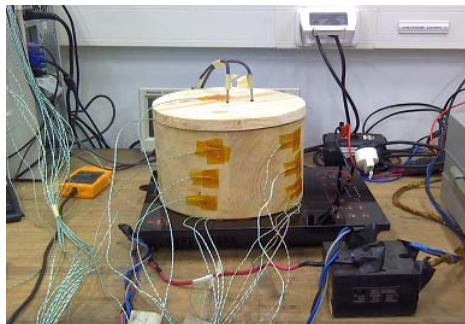


Figura 4.5: Piano in vetroceramica e pentola rivestita in legno

4.1.3 Piano in legno compensato - Pentola normale

Al piano in vetroceramica si è ora sostituito il legno. Si tratta di legno compensato di pioppo, spesso circa 4 mm. Dalle misure con il calibro in diversi punti, lo spessore risultava essere uguale alla vetroceramica, tuttavia le potenze assorbite sono leggermente minori. Questo molto probabilmente significa che il legno usato aveva spessore qualche decimo di millimetro maggiore rispetto alla vetroceramica. Ovviamente, se lo spessore dei materiali fosse stato lo stesso, non sarebbe variata la potenza trasferita, in quanto dato che il materiale interposto è amagnetico, non va a variare la potenza trasmessa al carico. Tuttavia le prove risultano essere comparabili con le precedenti due.

Tabella 4.3: Prova 2 L, distanza 7.3 mm, Piano legno compensato - pentola normale

Grandezza	Unità di misura	Valore
Potenza media assorbita	[W]	1974.38
Tempo raggiungimento 100°C	[s]	394
Energia assorbita	[Wh]	216.1
Energia ebollizione	[Wh]	171.57
Energia dissipata	[Wh]	44.51
Rendimento termico	[%]	86.8
Temperatura acqua iniziale	[°C]	26.33

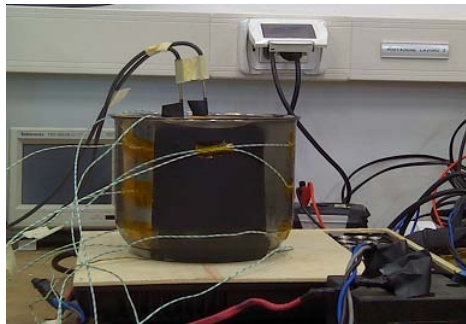


Figura 4.6: Piano in legno compensato e pentola normale

4.1.4 Piano in legno compensato - Pentola rivestita in legno

In questa prova si ha la stessa configurazione precedente solamente che anche la pentola ora è rivestita in legno.

Tabella 4.4: Prova 2 L, distanza 7.3 mm, Piano legno compensato - pentola rivestita in legno

Grandezza	Unità di misura	Valore
Potenza media assorbita	[W]	1964.86
Tempo raggiungimento $100^{\circ}C$	[s]	398
Energia assorbita	[Wh]	217.23
Energia ebollizione	[Wh]	172.54
Energia dissipata	[Wh]	44.68
Rendimento termico	[%]	86.8
Temperatura acqua iniziale	[$^{\circ}C$]	25.96



Figura 4.7: Piano in legno compensato e pentola rivestita in legno

4.1.5 Conclusioni prova 1

E' possibile ricavare delle conclusioni confrontando queste prime quattro prove. I dati raccolti non indicano significative variazioni tra le quattro configurazioni, tuttavia, si può osservare, come, con il fondo in legno, si abbia una minore energia dissipata e quindi un inferiore consumo di energia rispetto al caso di avere la vetroceramica come base su cui poggia la pentola. In entrambi i casi, specialmente con il piano in vetroceramica, si riscontra che l'inserimento della pentola all'interno del rivestimento in legno, quest'ultimo sottrae parte di energia utile al riscaldamento dell'acqua, seppure in quantità minima. Questo, che sembra essere una perdita di energia, è dovuto al fatto che si va a riscaldare anche il rivestimento di legno fino a che non si raggiunge una situazione di equilibrio. Questa energia non è quindi "persa" ma viene immagazzinata dal legno e verrà poi utilizzata durante il processo, restituendo il calore accumulato al cibo presente all'interno del pentolame. La Tabella 4.5 riporta un riassunto di tutti i risultati.

Tabella 4.5: Riassunto prova 1

Piano/ Pentola	Potenza media [W]	Tempo 100°C [s]	Energia assorbita [Wh]	Energia acqua [Wh]	Energia dissipata [Wh]	Rendimento termico [%]
VETRO/ NORMALE	2002.22	397	220.80	173.10	47.69	85.7
VETRO/ LEGNO	2004.37	402	223.82	172.42	51.40	84.2
LEGNO/ NORMALE	1974.38	394	216.10	171.57	44.51	86.8
LEGNO/ LEGNO	1964.86	398	217.23	172.54	44.68	86.8

4.2 Prova 2

In questo secondo insieme di prove, è stata aumentata la distanza tra il fondo della pentola e la bobina, portandola 17 mm utilizzando sempre 2 litri d'acqua. E' stato interposto uno spessore in legno con lo scopo di simulare il rivestimento della pentola anche nella parte inferiore del fondo della stessa, soluzione che realmente si vuole realizzare in futuro. Anche in questo caso sono state confrontate tra di loro le quattro possibili configurazioni. Le potenze risultano ridotte di circa il 50 % rispetto alle situazioni con distanza 7.3 mm ma le prove sono tra loro tutte comparabili in quanto in tutti i casi la potenza assorbita si assesta attorno ai 1090 W. Così facendo i tempi si allungano e si può vedere se i risultati sono in accordo con quelli della prova precedente.

4.2.1 Piano in vetroceramica - Pentola normale

Nella prima prova di questa seconda serie, si ha la pentola che poggia sul piano in vetroceramica di 4 mm di spessore e questo è distanziato dalla bobina di 3.3 mm dovuti ai supporti in legno di balsa (sempre presenti) e ulteriori 9.7 mm dovuti allo spessore del legno posto al di sotto del vetro. Sono stati ricavati i seguenti dati:

Tabella 4.6: Prova 2 L, distanza 17 mm, Piano vetroceramica - pentola normale

Grandezza	Unità di misura	Valore
Potenza media assorbita	[W]	1088.00
Tempo raggiungimento 100°C	[s]	766
Energia assorbita	[Wh]	231.67
Energia ebollizione	[Wh]	165.68
Energia dissipata	[Wh]	65.99
Rendimento termico	[%]	78.2
Temperatura acqua iniziale	[°C]	28.85

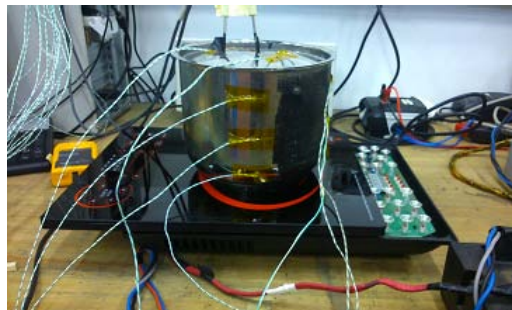


Figura 4.8: Piano in vetroceramica e pentola normale

4.2.2 Piano in vetroceramica - Pentola rivestita in legno

Inserendo ora la pentola all'interno rivestimento in legno di abete che poggia su piano in vetroceramica. Sono stati ricavati i seguenti dati:

Tabella 4.7: Prova 2 L, distanza 17 mm, Piano vetroceramica - pentola rivestita in legno

Grandezza	Unità di misura	Valore
Potenza media assorbita	[W]	1095.49
Tempo raggiungimento 100°C	[s]	776
Energia assorbita	[Wh]	236.14
Energia ebollizione	[Wh]	165.77
Energia dissipata	[Wh]	70.36
Rendimento termico	[%]	76.7
Temperatura acqua iniziale	[°C]	28.78

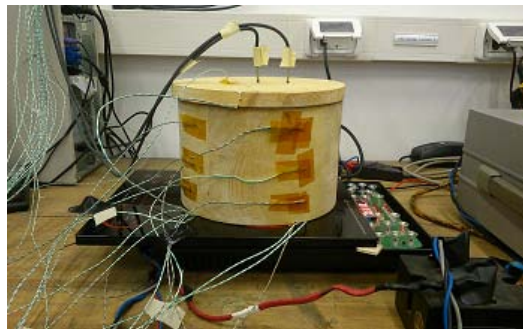


Figura 4.9: Piano in vetroceramica e pentola rivestita in legno

4.2.3 Piano in legno - Pentola normale

Viene ora sostituito la vetroceramica con il legno. Si tratta in questo caso di legno di abete, spesso circa 9.7 mm misurato con il calibro in diversi punti. In questa prova e nella successiva è stata scambiata la disposizione ed è stata messa la vetroceramica al posto del legno. Perciò la pentola ora poggia su legno spesso 9.7 mm, la prova risulta comunque confrontabile con le precedenti due in quanto la distanza complessiva tra pentola e induttore rimane fissata a 17 mm.

Tabella 4.8: Prova 2 L, distanza 17 mm, Piano legno - pentola normale

Grandezza	Unità di misura	Valore
Potenza media assorbita	[W]	1096.62
Tempo raggiungimento 100°C	[s]	761
Energia assorbita	[Wh]	231.81
Energia ebollizione	[Wh]	168.49
Energia dissipata	[Wh]	63.31
Rendimento termico	[%]	79.4
Temperatura acqua iniziale	[°C]	27.85

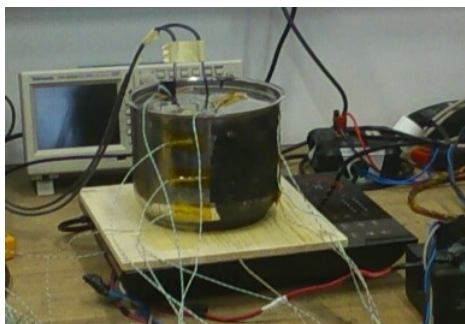


Figura 4.10: Piano in legno e pentola normale

4.2.4 Piano in legno - Pentola rivestita in legno

Stessa configurazione precedente solamente che viene applicato il rivestimento in legno alla pentola.

Tabella 4.9: Prova 2 L, distanza 17 mm, Piano legno - pentola rivestita in legno

Grandezza	Unità di misura	Valore
Potenza media assorbita	[W]	1093.25
Tempo raggiungimento 100°C	[s]	773
Energia assorbita	[Wh]	234.75
Energia ebollizione	[Wh]	167.63
Energia dissipata	[Wh]	67.11
Rendimento termico	[%]	78.0
Temperatura acqua iniziale	[°C]	28.00

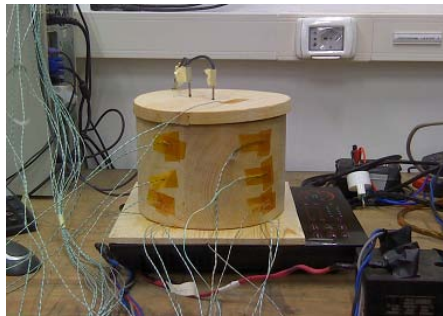


Figura 4.11: Piano in legno e pentola rivestita in legno

4.2.5 Conclusioni prova 2

Come nelle precedenti prove, anche in questo caso non si evidenziano differenze macroscopiche tra le quattro varianti. In ogni caso appare interessante valutare l'effetto della presenza/assenza del fondo isolante, con la presenza che sembra migliorare leggermente le prestazioni del sistema. E' altresì doveroso osservare che lo spessore di tale fondo, rappresenta il limite massimo ammissibile (per il sistema indagato) oltre il quale si perde l'accoppiamento induttore-pentola e dunque rappresenta le condizioni meno favorevoli tra quelle possibili. In Tabella 4.10 è possibile avere un immediato riscontro di quanto stato fatto durante queste prove.

Tabella 4.10: Riassunto prova 2

Piano/ Pentola	Potenza media [W]	Tempo 100°C [s]	Energia assorbita [Wh]	Energia acqua [Wh]	Energia dissipata [Wh]	Rendimento termico [%]
VETRO/ NORMALE	1088.00	766	231.67	165.68	65.99	78.2
VETRO/ LEGNO	1095.49	776	236.14	165.77	70.36	76.7
LEGNO/ NORMALE	1096.62	761	231.81	168.49	63.31	79.4
LEGNO/ LEGNO	1093.25	773	234.75	167.63	67.11	78.0

4.3 Prova 3

Nella terza prova, la pentola è stata riempita con 3 litri d'acqua, in modo da allungare ulteriormente i tempi del processo di riscaldamento. Anche in questo caso, partendo da temperatura ambiente ed aspettando che si uniformi, è stata raggiunta l'ebollizione. La configurazione delle prove effettuate è esattamente uguale a quella della prova 2.

4.3.1 Piano in vetroceramica - Pentola normale

Tabella 4.11: Prova 3 L, distanza 17 mm, Piano vetroceramica - pentola normale

Grandezza	Unità di misura	Valore
Potenza media assorbita	[W]	1090.05
Tempo raggiungimento 100°C	[s]	1104
Energia assorbita	[Wh]	334.28
Energia ebollizione	[Wh]	244.40
Energia dissipata	[Wh]	89.88
Rendimento termico	[%]	79.9
Temperatura acqua iniziale	[°C]	29.95

4.3.2 Piano in vetroceramica - Pentola rivestita in legno

Tabella 4.12: Prova 3 L, distanza 17 mm, Piano vetroceramica - pentola rivestita in legno

Grandezza	Unità di misura	Valore
Potenza media assorbita	[W]	1097.38
Tempo raggiungimento 100°C	[s]	1120
Energia assorbita	[Wh]	341.41
Energia ebollizione	[Wh]	247.44
Energia dissipata	[Wh]	93.96
Rendimento termico	[%]	79.2
Temperatura acqua iniziale	[°C]	29.10

4.3.3 Piano in legno - Pentola normale

Viene ora sostituita la vetroceramica con il legno.

Tabella 4.13: Prova 3 L, distanza 17 mm, Piano legno - pentola normale

Grandezza	Unità di misura	Valore
Potenza media assorbita	[W]	1066.47
Tempo raggiungimento 100°C	[s]	1139
Energia assorbita	[Wh]	337.42
Energia ebollizione	[Wh]	249.67
Energia dissipata	[Wh]	87.75
Rendimento termico	[%]	80.8
Temperatura acqua iniziale	[°C]	28.44

4.3.4 Piano in legno - Pentola rivestita in legno

In questa prova si ha la stessa configurazione precedente solamente che anche la pentola ora è inglobata nel rivestimento in legno.

Tabella 4.14: Prova 3 L, distanza 17 mm, Piano legno - pentola rivestita in legno

Grandezza	Unità di misura	Valore
Potenza media assorbita	[W]	1085.09
Tempo raggiungimento 100°C	[s]	1135
Energia assorbita	[Wh]	342.11
Energia ebollizione	[Wh]	249.64
Energia dissipata	[Wh]	92.46
Rendimento termico	[%]	79.8
Temperatura acqua iniziale	[°C]	28.48

4.3.5 Conclusioni prova 3

Le conclusioni che si possono trarre sono analoghe alle precedenti. L'inserimento del legno nella parte sottostante la pentola, fa diminuire l'energia dissipata verso il basso. Purtroppo, l'aver una potenza media assorbita di 30 W inferiore per un tempo di 1139 secondi, fa sì che il consumo in Wh della prova con solo piano in legno, sia più elevato rispetto all'aver il piano in vetroceramica, ma l'energia dissipata continua ad essere inferiore rispetto agli altri casi. In Tabella 4.15 è possibile avere un immediato confronto di quanto stato fatto durante queste prove.

Tabella 4.15: Riassunto prova 3

Piano/ Pentola	Potenza media [W]	Tempo 100°C [s]	Energia assorbita [Wh]	Energia acqua [Wh]	Energia dissipata [Wh]	Rendimento termico [%]
VETRO/ NORMALE	1090.05	1104	334.28	244.40	89.88	79.9
VETRO/ LEGNO	1097.38	1120	341.41	247.44	93.96	79.2
LEGNO/ NORMALE	1066.47	1139	337.42	249.67	87.75	80.8
LEGNO/ LEGNO	1085.09	1135	342.11	249.64	92.46	79.8

4.4 Prova 4

Al fine di aumentare in modo consistente la durata del processo ed osservare se effettivamente si riscontra una variazione in termini di efficienza, nelle seguenti due prove è stato cambiato il tipo di esperimento, ovvero, anziché portare semplicemente l'acqua da temperatura ambiente a 100°C , si è portata la stessa ad evaporazione completa. Questo processo può essere visto come una simulazione di cotture lunghe dove è richiesta la permanenza del tegame sul fornello anche fino a 7-8 ore, con notevole dispendio di energia. Sono stati utilizzati 2.75 litri d'acqua e, tramite foro praticato sulla sommità del coperchio, Figura 4.12, si è resa possibile la fuoriuscita controllata del vapore generato durante l'evaporazione. Il coperchio della pentola era stato sigillato con silicone resistente ad alte temperature cosicché, avendo il vapore lo stesso spazio per fuoriuscire, si ottengono prove tra loro confrontabili. Essendo già stato provato nelle prove precedenti che il fondo in legno introduce un miglioramento nei processi di riscaldamento della pentola, gli esperimenti sono stati eseguiti solamente con tale tipo di base.

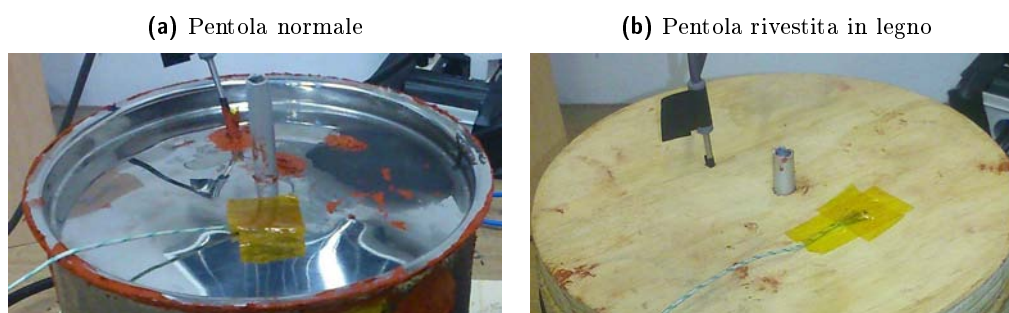


Figura 4.12: Dettaglio foro per fuoriuscita vapore

In questo caso, per conoscere l'energia necessaria all'acqua per raggiungere lo stato di ebollizione ed evaporare completamente, bisogna sommare due termini. Un primo che considera l'energia da fornire all'acqua per portarla dallo stato liquido ad ebollizione ed un secondo che tiene conto del calore latente di evaporazione ovvero del passaggio di stato dell'acqua da liquido a vapore.

Formule utilizzate

$$\text{Energia ebollizione} = m \cdot c_{\text{acqua}} \cdot (\Delta T) = m \cdot c \cdot (T_{\text{finale}} - T_{\text{iniziale}})$$

Energia necessaria per il cambiamento di fase:

$$\text{Energia evaporazione} = m \cdot \lambda$$

con m massa sottoposta a riscaldamento e λ calore latente di evaporazione pari a 2272 kJ/kg per l'acqua. Perciò l'energia totale da fornire sarà:

$$\text{Energia totale} = \text{Energia ebollizione} + \text{Energia evaporazione}$$

$$Energia\ dissipata = Energia\ assorbita - Energia\ totale$$

$$Rendimento\ totale = \frac{Energia\ totale}{Energia\ assorbita}$$

Dal quale si ricava poi il rendimento termico secondo le formule già presentate.

4.4.1 Piano in legno - Pentola normale

Tabella 4.16: Prova evaporazione totale 2.75 L, distanza 17 mm, Piano legno - pentola normale

Grandezza	Unità di misura	Valore
Potenza media assorbita	[W]	1100.5
Tempo evaporazione totale	[s]	8619
Energia assorbita	[Wh]	2633.96
Energia totale	[Wh]	1969.16
Energia dissipata	[Wh]	664.80
Rendimento termico	[%]	81.7
Temperatura acqua iniziale	[°C]	26.96

4.4.2 Piano in legno - Pentola rivestita in legno

Tabella 4.17: Prova evaporazione totale 2.75 L, distanza 17 mm, Piano legno - pentola rivestita in legno

Grandezza	Unità di misura	Valore
Potenza media assorbita	[W]	1100.8
Tempo evaporazione totale	[s]	8385
Energia assorbita	[Wh]	2564.26
Energia totale	[Wh]	1969.44
Energia dissipata	[Wh]	594.82
Rendimento termico	[%]	83.9
Temperatura acqua iniziale	[°C]	26.87

4.4.3 Conclusioni prova 4

I dati raccolti evidenziano come il sistema pentola rivestita - piano in legno abbia permesso di fare evaporare la massa d'acqua in un tempo minore rispetto al sistema pentola classica - piano in legno (circa 4 minuti più rapido). I valori di energia dissipata confermano la bontà del primo sistema rispetto al secondo, ciò suggerisce che la presenza del rivestimento in legno abbia un'effettiva funzione di isolamento termico, consentendo un migliore confinamento e sfruttamento dell'energia fornita.

La Tabella 4.18 rende immediatamente possibile apprezzare i risultati ottenuti.

Tabella 4.18: Riassunto prova 4

Piano/ Pentola	Potenza media [W]	Tempo evap [s]	Energia assorbita [Wh]	Energia totale [Wh]	Energia dissipata [Wh]	Rendimento termico [%]
LEGNO/ NORMALE	1100.5	8616	2633.96	1969.16	664.80	81.7
LEGNO/ LEGNO	1100.8	8385	2564.26	1969.44	594.82	83.9

4.5 Conclusioni generali sulle prove sperimentali

Un processo che intende simulare l'esperienza della cottura di un cibo, può essere scomposto in più fasi successive. La prima vede il riscaldamento dell'intero sistema mentre nelle successive si ha il mantenimento della temperatura per ultimare la cottura. Gli esperimenti condotti nelle prime tre prove, possono essere visti come esempi di riscaldamento mentre la prova 4 come mantenimento di temperatura.

I risultati delle prove di riscaldamento, come sopra riportato, non evidenziano significative differenze tra le quattro varianti proposte, tranne il fatto che la presenza del fondo in legno aumenta leggermente l'efficienza, favorendo una minore dispersione di calore sul fondo stesso. Questo è pensabile anche osservando i coefficienti di conducibilità termica che, a $20^{\circ}C$, sono circa: $0.026 W/mK$ per l'aria in quiete, $0.15 \div 0.20 W/mK$ e dipendenti della direzione delle fibre per il legno e $1 \div 1.5 W/mK$ per la vetroceramica. Perciò si avrà una maggiore conduzione del calore verso la parete in legno rispetto all'aria, con una maggiore asportazione di calore dalla pentola e una più elevata conduzione di calore dal fondo della pentola verso la vetroceramica rispetto al legno.

Vi è da specificare inoltre un aspetto importante legato alla sperimentazione della fase di riscaldamento e cioè il fatto che il tutto è stato condotto in un ambiente in assenza di ventilazione. La staticità dell'aria circostante la pentola ha fatto sì che la dispersione di calore fosse relativamente limitata. Si può ragionevolmente supporre che tale condizione sia scarsamente verificabile nella realtà a causa dello spostamento d'aria che può essere causato da persone presenti nelle vicinanze della cucina, correnti d'aria dovute a finestre o porte lasciate aperte oppure semplicemente dal movimento d'aria prodotto dalla cappa di aspirazione. Pertanto si ipotizza che il sistema meno isolato (pentola non rivestita) subisca dissipazioni ben maggiori del sistema isolato (pentola rivestita) con conseguente miglioramento delle prestazioni relative di quest'ultimo.

In secondo luogo, il sistema pentola rivestita in legno - fondo in legno, palesa un significativo miglioramento sulla fase di mantenimento/evaporazione garantendo una netta diminuzione della dissipazione di calore e un aumento del rendimento.

4.6 Ulteriori osservazioni

4.6.1 Temperature esterne della pentola rilevate tramite termocoppie

Come anticipato ad inizio paragrafo, sono state posizionate anche delle termocoppie in modo da andare a rilevare le temperature istante per istante. Risulta interessante osservare come, grazie al rivestimento, la temperatura esterna venga notevolmente più attenuata rispetto al caso di pentola tradizionale in semplice acciaio, riducendo se non addirittura eliminando il rischio di scottature e rendendo così possibile la presa e lo spostamento del tegame direttamente senza utilizzo di protezioni contro il calore. Ovviamente la temperatura esterna andrà ancora a ridursi utilizzando legni con conducibilità minore o spessori maggiori. Da ricordare che, per la temperatura del legno, è stata eseguita una media tra sei termocoppie posizionate a diverse altezze nella pentola (3 cm, 7 cm e 12 cm), in quanto delle zone si scaldavano di più mentre altre rimanevano più fredde, con differenze di temperatura anche di 20°C . Questo a causa dell'imprecisione nella costruzione del rivestimento che, evidentemente, da alcune parti rimaneva più a contatto con l'acciaio e della diversa conducibilità termica del legno a seconda della direzione delle fibre. Queste ultime presentano una maggiore conducibilità termica quando il flusso di calore le attraversa in modo longitudinale. Le temperature massime erano di circa 65°C nelle zone più calde. La Figura 4.13 riporta la temperatura media delle pareti della pentola normale e del legno per un processo di evaporazione totale di 2.75 litri d'acqua.

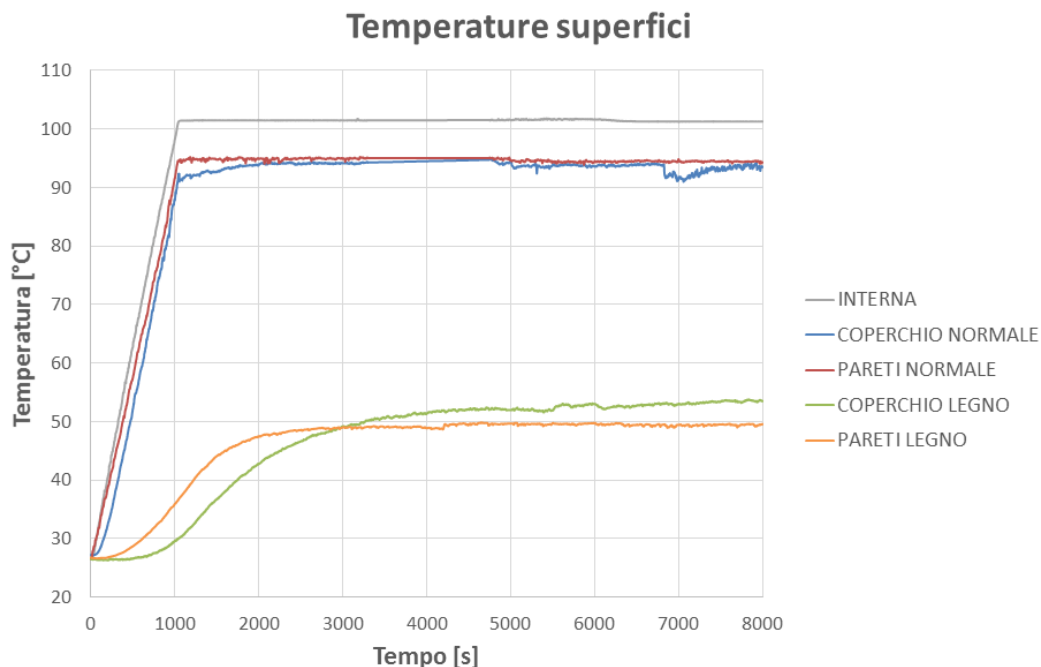


Figura 4.13: Confronto temperature pareti

4.6.2 Temperature esterne della pentola osservate tramite termocamera

Con la termocamera FLIR a disposizione presso il laboratorio, è stato possibile scattare alcune istantanee in diversi momenti del processo. Le Figure 4.14, 4.15 e 4.16 mostrano le temperature delle pentole durante il processo di evaporazione totale. Per quanto riguarda la pentola rivestita in legno, vengono rappresentate le immagini riguardanti le zone più calde, in quanto come detto il legno non si scaldava tutto in modo uniforme. Per avere valori di temperatura quanto più vicini alla realtà bisognava porre attenzione ad inserire l'esatto valore di emissività nello strumento. E' stato impostato un coefficiente pari a 0.99 per la pentola normale, mentre per il legno, il valore è stato impostato pari a 0.93. Lo 0.99 deriva dal fatto che la pentola è stata verniciata di nero in alcune zone e quindi la sua emissività si avvicina a quella di un corpo nero. Questo per consentire una buona rilevazione della temperatura evitando di leggere valori errati a causa di riflessi inevitabilmente presenti nella struttura lucida dell'acciaio. I dati rilevati per mezzo delle immagini permettono un confronto tra le due configurazioni indagate. Si può notare, osservando le immagini di Figura 4.14 rispetto a quelle delle Figura 4.15 e Figura 4.16 come, in condizioni simili, la temperatura esterna della pentola rivestita sia sempre significativamente inferiore alle temperature della pentola tradizionale, suggerendo quindi una maggiore capacità isolante e una superiore sicurezza contro le ustioni.

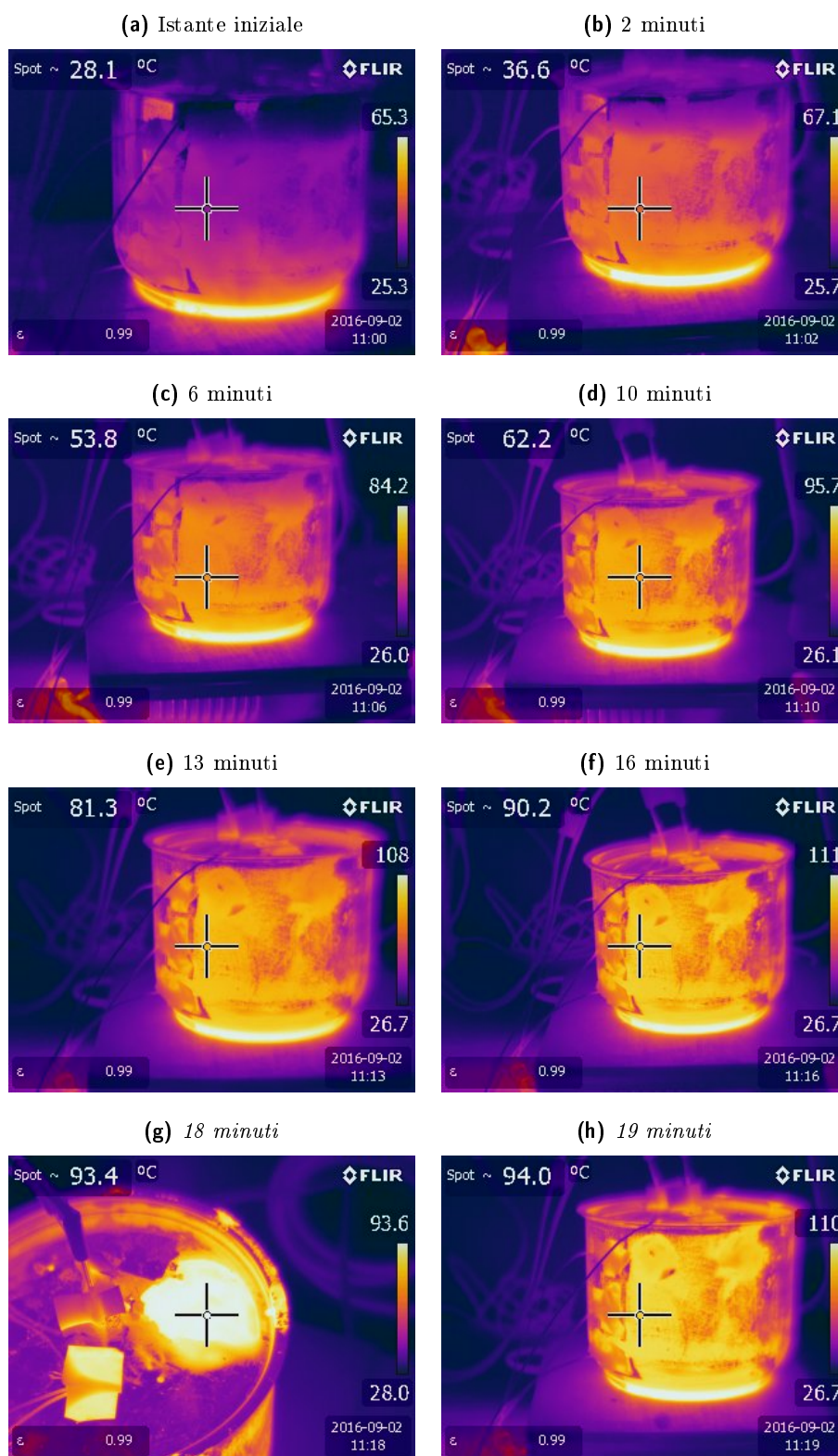


Figura 4.14: Immagini termocamera pentola normale

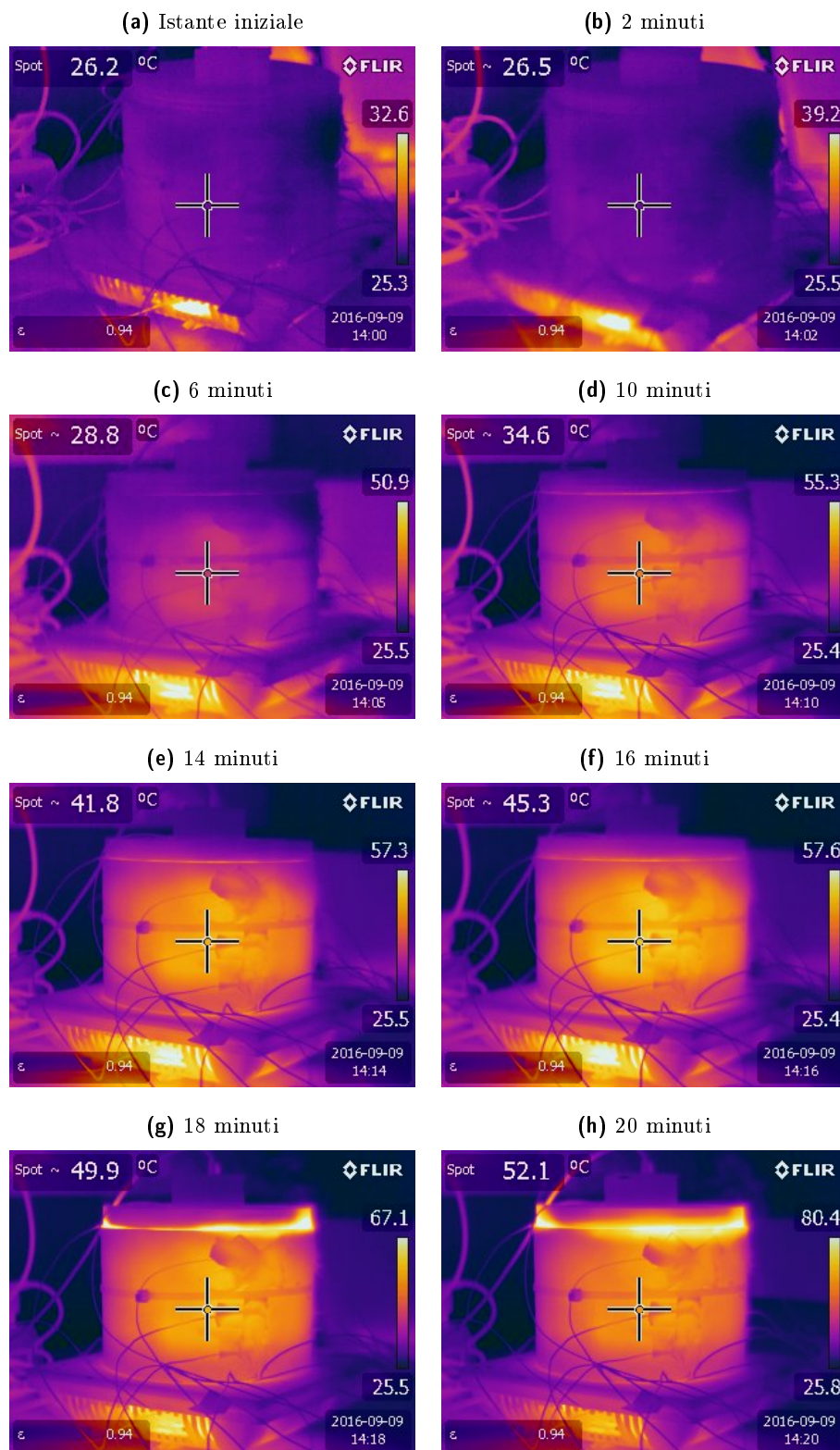


Figura 4.15: Immagini termocamera pentola rivestita in legno(1)

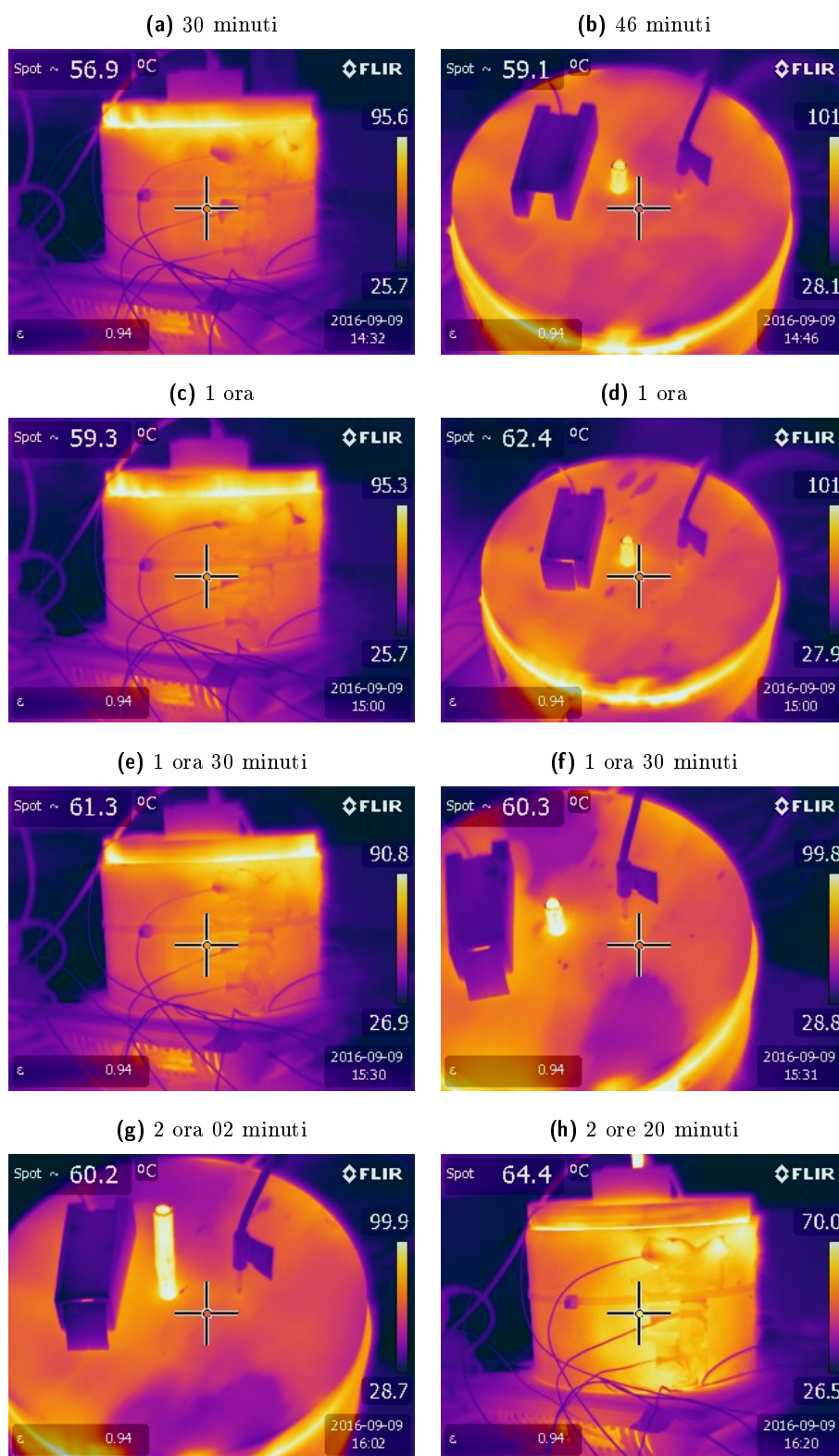


Figura 4.16: Immagini termocamera pentola rivestita in legno(2)

4.6.3 Temperature piano di cottura

Oltre ad evitare scottature quando si va ad afferrare la pentola o la si urti in modo accidentale, la presenza del legno, in particolare in questo caso sul fondo, va a ridurre la temperatura sulla vetroceramica durante la cottura. In questo caso infatti le prove sperimentali evidenziano che, in un processo di lunga durata, le temperature raggiungono un asintoto, portandosi a circa 97°C per la base in legno e circa 115°C per il processo normale, ma soprattutto arrivano a regime più lentamente. Ciò significa che in un processo di cottura, la temperatura che si ha sulla vetroceramica sarà di circa 20°C gradi minore che in un processo normale. La Figura 4.17 evidenzia quanto appena detto.

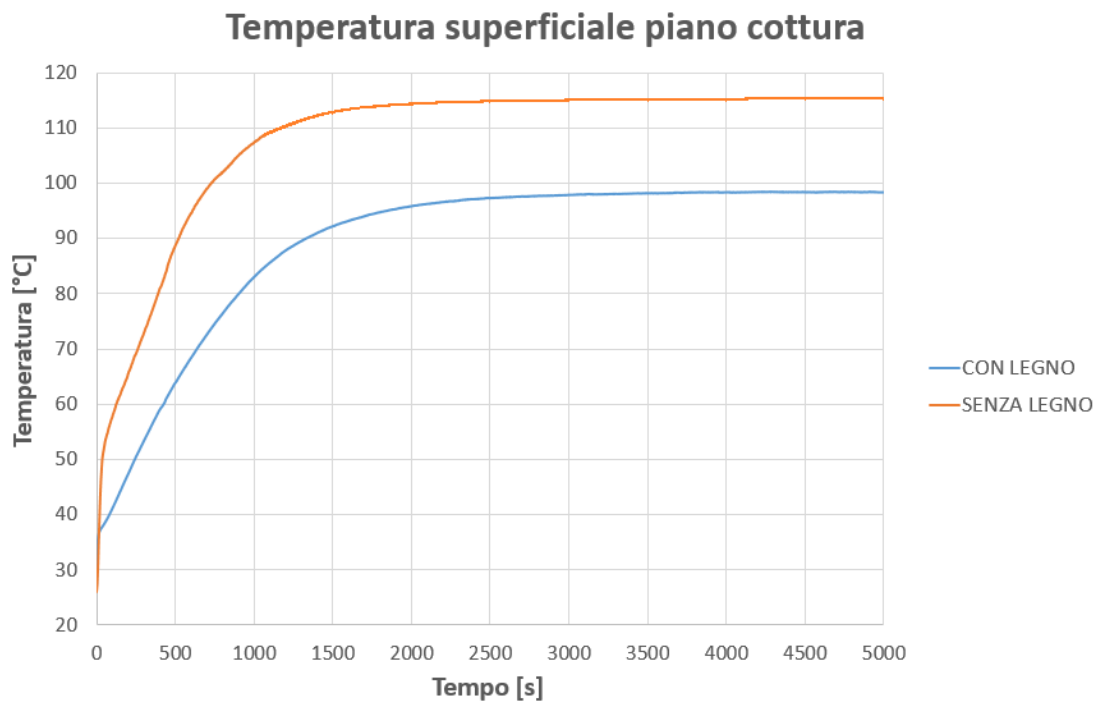


Figura 4.17: Temperature della vetroceramica durante il riscaldamento

4.6.4 Curve di raffreddamento

E' interessante confrontare anche il tempo impiegato dall'acqua presente internamente alla pentola per raffreddarsi. In Figura 4.18 vengono riportate le due curve di deriva, e, come facilmente pensabile, si può riscontrare che la temperatura interna viene mantenuta molto più a lungo nel caso di pentola rivestita in legno. In entrambe le prove, sono stati utilizzati 2.5 litri d'acqua e portati ad ebollizione. Dopo aver raggiunto lo stato di ebollizione, l'acqua è stata mantenuta a 100°C per circa 5 minuti in entrambi i casi, quindi complessivamente il piano di cottura è rimasto acceso per 20 minuti. Sono state analizzate due situazione dove, in un caso si aveva la pentola completamente rivestita in legno (compreso il fondo, composto di legno di abete di spessore 9.7 mm), nell'altro la pentola normale e il piano di cottura in vetroceramica. La distanza tra induttore e fondo della pentola per queste due prove era di 17 mm.

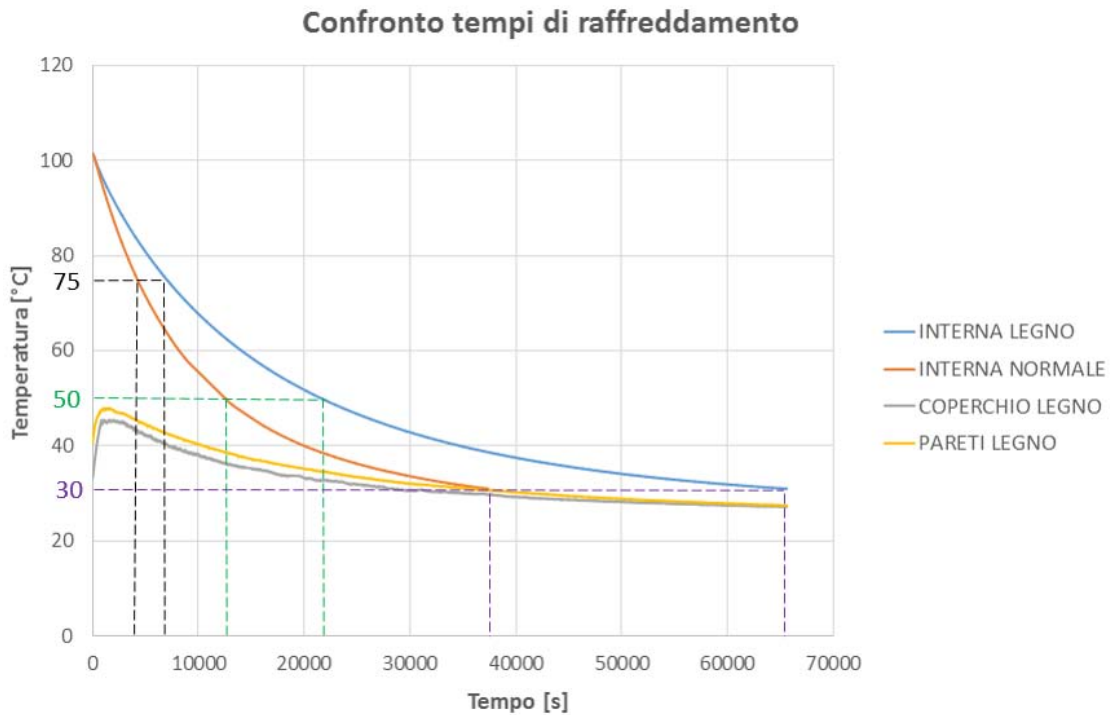


Figura 4.18: Confronto curve di raffreddamento

Tabella 4.19: Confronto tempi di raffreddamento

Configurazione	Tempo raggiungimento		
	75°C [h : min]	50°C [h : min]	30°C [h : min]
Normale	1 : 10	3 : 20	10 : 22
Legno	1 : 56	6 : 00	18 : 11

La Tabella 4.19 mette in risalto come il tempo per cui il liquido all'interno della pentola permane a temperatura più elevata sia notevolmente più lungo nel caso di isolamento, facendo così pensare ad un sostanziale risparmio in termini energetici dovuto alla non necessaria riaccensione del piano cottura per riportare il cibo in temperatura dopo essere stato cucinato in tempi antecedenti al suo utilizzo. Questo in generale può essere visto come un beneficio per qualsiasi cibo presente all'interno della pentola.

Capitolo 5

Simulazioni mediante Software FEM

Il metodo degli elementi finiti è un procedimento numerico per la determinazione di soluzioni approssimate delle equazioni differenziali per mezzo di opportune condizioni al contorno. Tale strumento viene frequentemente utilizzato per risolvere problemi fisici, ingegneristici e matematici essendo estremamente utile per la risoluzione di modelli con geometrie complicate e proprietà dei materiali quali non linearità, non omogeneità ed anisotropia. Modelli per i quali è difficile ottenere risultati mediante soluzioni analitiche. Il sistema FEM, applicando metodi variazionali, riesce a minimizzare l'errore di una funzione al fine di ottenere una soluzione stabile, suddividendo un problema complesso in una successione equivalente di problemi più semplici da risolvere. In questo modo, un oggetto viene scomposto in molti altri di dimensioni minori, detti appunto elementi finiti, nel quale ognuno è connesso a quello vicino in un punto, risolvendo così le equazioni di ogni singolo elemento il software va a ricostruire la soluzione per l'intera geometria. Il software utilizzato è Flux, versione 11.1.2. Tale programma riesce a garantire ottimi risultati sia dal punto di vista elettromagnetico che termico. Tuttavia come verrà spiegato in seguito, ci saranno delle limitazioni per quanto riguarda la soluzione del nostro modello magneto termico, a causa dell'impossibilità di realizzare ad esempio i moti convettivi che si sviluppano all'interno dell'acqua e nell'aria sotto la vetroceramica.

Il principio di funzionamento si sviluppa in tre fasi, qui elencate:

1. *pre-processing*

fase nella quale si definiscono la configurazione e le caratteristiche del problema da esaminare:

- (a) tipologia di analisi da effettuare (magnetica, elettrica, termica, accoppiata);
- (b) tipo di modello (presenza di simmetrie);
- (c) geometria del modello (rappresentazione della struttura);
- (d) descrizione delle caratteristiche dei materiali (resistività, permeabilità magnetica...);
- (e) inserimento dei materiali alle varie facce della geometria;

- (f) applicazioni delle condizioni al contorno;
- (g) creazione del circuito elettrico applicato al modello;
- (h) imposizione delle grandezze impresse (quali correnti o tensioni);
- (i) creazione di una mesh adeguata all'oggetto da analizzare.

2. *solver*

Step nel quale avviene lo svolgimento della simulazione: il programma, risolvendo un sistema algebrico di equazioni, compie il calcolo del problema e fornisce la soluzione approssimata nei nodi degli elementi finiti in cui è stato suddiviso il modello.

3. *post-processing*

Visualizzazione dei risultati mediante:

- (a) grafici rappresentanti le grandezze in esame;
- (b) parametri nelle zone di interesse del dominio.

Analizzando le diverse fasi:

5.1 Pre-processing

In questo primo punto si rappresenta la geometria del modello in 2D nel caso di simmetrie o 3D per i problemi più complessi e asimmetrici.

Inizialmente è stato rappresentato solo il modello magnetico, dove è stata imposta una corrente sinusoidale, ovvero uno *Steady State AC magnetic*. Importante osservare la presenza di simmetrie internamente alla struttura da rappresentare, in modo tale da alleggerire i calcoli e rendere possibile aumentare la mesh aumentando di conseguenza la precisione dei risultati nelle zone di interesse. Senza andare troppo nel dettaglio, si può dire che è presente una simmetria di tipo geometrico, intuibile dalla composizione del sistema, ed una condizione di simmetria delle sorgenti, che ci rende possibile rappresentare solamente una metà del sistema. Questa seconda osservazione è data considerando la condizione di Dirichlet sull'asse di simmetria, ovvero il potenziale vettore $\mathbf{A} = 0$. Le simmetrie vengono infatti trattate in termini di potenziale vettore magnetico, essendo possibile esprimere $\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$ [10]. Una volta definite le geometrie, utilizzando le grandezze indicate nel Capitolo 4, si va a costruire un modello parametrizzato, in modo tale che se si ha l'occorrenza di variare una grandezza, basta semplicemente cambiare il valore di un parametro evitando dover ricostruire il modello. Questo accorgimento permette di andare a variare in modo immediato le distanze presenti tra bobina e fondo pentola utili per studiarne i vari casi oppure se si ha una variazione delle grandezze della pentola. Sono stati utilizzati due sistemi di riferimento, quello di default di Flux e uno appositamente creato, denominato "Sistema pentola"; il tutto per evitare di dover sommare troppi punti, soprattutto quando si va a costruire nel modello termico la parte superiore della pentola.

Dopo aver quindi creato i punti, si uniscono le linee e si creano gli oggetti, costruendo le facce.

Nel problema elettromagnetico, è molto importante definire il dominio esterno o infinite box, dove il FEM va ad integrare. Se questo non venisse fatto, ci si troverebbe in condizioni di “open boundary”, dove, anziché considerare solamente la sorgente presente nel dominio, si dovrebbero valutare anche gli effetti dovute a sorgenti esterne. Non esiste un modo univoco nella determinazione dell’infinite box, ma questo deve essere fatto a discrezione dell’utente, con la distanza tra il sistema e la superficie interna dell’infinite box che almeno uguale alla dimensione del dispositivo in tale direzione. Inoltre l’estensione dell’infinite box dipende dalla mesh che si vuole ottenere, se si pone l’interesse ai fenomeni interni all’oggetto, non è necessario perfezionare la mesh nell’infinite box, altrimenti bisogna ricorrere ad una mesh più fitta.

Si passa quindi allo step successivo che riguarda la creazione delle caratteristiche dei materiali [8], riportate in Tabella 5.1.

Tabella 5.1: Caratteristiche magnetiche dei materiali in Flux

Materiale	Permeabilità magnetica [H/m]	Resistività [$\Omega \cdot m$]
Rame	1	$2.2 * 10^{-8}$
Ferrite	15.5	isolante
Acciaio	variabile	$6 * 10^{-7}$ @ $20^{\circ}C$
AISI 409	funzione del campo	$7.6 * 10^{-7}$ @ $200^{\circ}C$ $9.1 * 10^{-7}$ @ $400^{\circ}C$
Acciaio Alimentare	1	$7.2 * 10^{-7}$ @ $20^{\circ}C$ $7.8 * 10^{-7}$ @ $100^{\circ}C$ $8.6 * 10^{-7}$ @ $200^{\circ}C$

Per la ferrite è stato necessario determinare una permeabilità magnetica equivalente $\mu_{ferrite\ eq}$, essendo disposte in modo equidistante a forma di raggiera al di sotto dell’avvolgimento induttore. Tale $\mu_{ferrite\ eq}$ è stata ricavata per mezzo di una simulazione a vuoto parametrica, con parametro μ , alla frequenza di 22222 Hz, vicina alla frequenza di lavoro del piano cottura, e a corrente impressa. Il valore che è stato assegnato alla ferrite è quello che va a riprodurre un valore di induttanza il più vicino possibile a quello che è stato determinato sperimentalmente alla stessa frequenza, tramite LCR meter. Essendo un problema lineare, è stata imposta nel circuito una corrente di 1 A, in modo da avere direttamente, dal risultato del flusso ottenuto, il valore dell’induttanza. L’induttanza è stata valutata in tre differenti modi:

- tramite sensore

- $L1 = \frac{2 \cdot \text{Energia magnetica dominio}}{I^2}$
- $L2 = \frac{\text{Flusso dominio}}{\sqrt{2} \cdot I}$

Da tale simulazione risultava che con valore di permeabilità 15 l'induttanza è $L = 0.968 \text{ mH}$, e quella misurata con LCR meter $L_{LCR \text{ meter}} = 0.09687 \text{ mH}$. E' stato così inserito una $\mu_{ferrite \text{ eq}} = 15.5$.

Dopo aver creato i materiali, sono state definite le caratteristiche delle regioni che vengono schematicamente riassunte in Tabella 5.2.

Tabella 5.2: Caratteristiche delle regioni in Flux, problema magnetico

Regione	Tipo	Materiale
Ferrite	magnetico non conduttivo	ferrite
Induttore	conduttore intrecciato	rame
	26 spire fattore di riempimento = 0.45	
Acciaio magnetico	conduttore massiccio no circuit	AISI 409
Acciaio inox	conduttore massiccio no circuit	acciaio inox
Aria	Aria o vuoto	Aria
Infinite	Aria o vuoto	

Fatto ciò, è stato creato il circuito che rappresenta lo schema circuitale, riportato in Figura 5.1, essendo che il piano cottura a disposizione viene controllato in corrente.

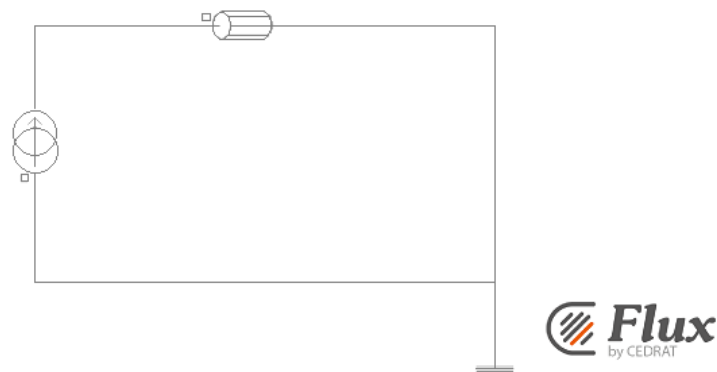


Figura 5.1: Modellizzazione del circuito elettrico in Flux

Al generatore di corrente è stato assegnato un valore efficace medio, ricavato tramite osservazione dei valori della corrente indicati dal wattmetro Yokogawa, che si hanno durante il processo di funzionamento.

La frequenza è all'incirca quella a cui lavora il piano cottura, ed osservata tramite oscilloscopio, mentre per il "Coil Conductor", è stata imposta la resistenza determinata in corrente continua, e riportata ad un valore di temperatura a cui lavora l'induttore a regime. Infine, per concludere la fase di pre-processing, è stata eseguita una mesh, di fondamentale importanza per la corretta risoluzione del problema. Generalmente, essa viene costruita mappata dove si concentra la maggior parte del campo magnetico e dove si possono avere effetti di bordo, è comunque da preferirsi ad una automatica in modo da ridurre il numero di elementi. Molto importante risulta andare a determinare lo spessore di penetrazione δ sul quale si distribuiscono le correnti indotte sul fondo ferromagnetico della pentola:

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu\mu_0}}$$

Come si nota dalla formula questo è fortemente dipendente dalla frequenza e dalle caratteristiche di resistività e permeabilità del materiale. Per avere una buona mappatura della zona, è consigliabile avere tre elementi per ogni spessore di penetrazione.

Assumendo come valori di partenza per l'acciaio ferromagnetico:

- frequenza = 25 kHz
- permeabilità magnetica relativa = 1100
- resistività = $7 \cdot 10^{-7} \Omega \cdot m$

si trova che $\delta = 8.03 \cdot 10^{-5} m$

Per la riuscita di una buona mesh, la dimensione massima di un elemento, deve essere al più cinque volte la dimensione minima. Nella realizzazione del modello, sono stati soddisfatti i vincoli di avere più elementi per spessore di penetrazione e anche delle rapporto tra le dimensioni. Particolare attenzione è stata posta nei bordi delle varie zone, in particolare quando si cambiava la dimensione della mesh tra due elementi contigui, in modo tale da evitare di avere zone su cui viene il calcolo delle grandezze risulta errato. La ferrite, la bobina e l'infinite box, sono state a loro volta mappate, mentre per lo spazio circostante la mesh è stata lasciata automatica, come nella zona interna della pentola e nell'acciaio inox. La Figura 5.2 riporta la modellizzazione e mesh del sistema induttore pentola.

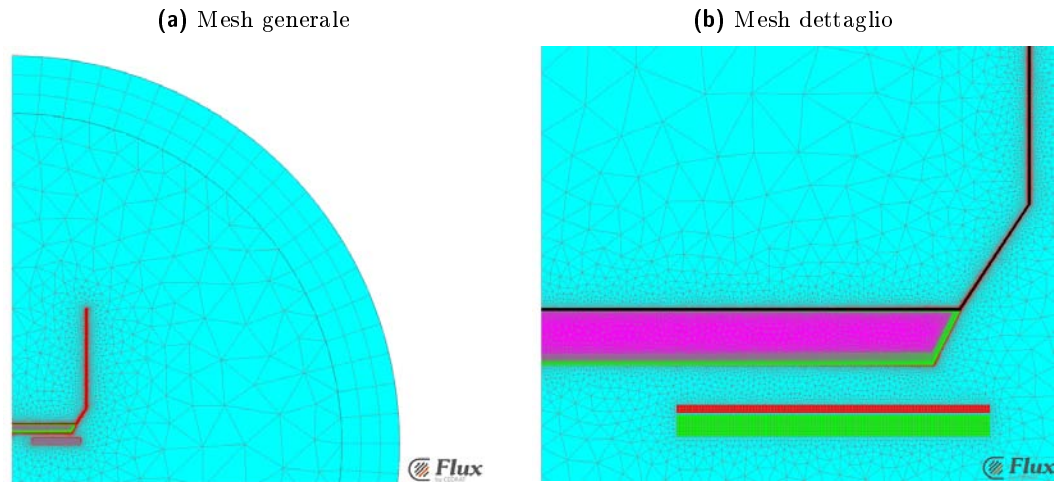


Figura 5.2: Mesh

5.2 Solver

La risoluzione del sistema è stata fatta tramite metodo ICCG (Incomplete Choleski Coniugate Gradient) per la risoluzione dei sistemi non lineari, mentre per quanto riguarda la risoluzione dei sistemi non lineari, è stato utilizzato il metodo di Newton Raphson, al quale è stato imposto una precisione di 10^{-4} .

5.3 Post-processing

In ogni simulazione magnetica, sono state ricavate le grandezze utili a permetterci di andare a confrontare il modello con il sistema reale e vedere se studiato correttamente.

- Valore efficace della tensione ai capi dell'induttore
- Potenza totale ai capi della bobina
- Potenza trasferita alla pentola
- Energia magnetica nell'intero dominio
- Resistenza equivalente
- Induttanza equivalente

Alcuni valori sono stati ricavati tramite sensore, mentre altre grandezze sono direttamente indicate dal circuito.

Per le grandezze termiche invece si è andato a valutare le perdite termiche nelle zone di nostro interesse. Si vedrà in seguito meglio in dettaglio.

5.4 Simulazioni magnetiche

Durante il funzionamento del piano cottura, tramite wattmetro e oscilloscopio, sono state osservate le grandezze ai capi dell'induttore:

- Valore efficace della tensione
- Valore efficace della corrente
- Potenza
- Frequenza

Utilizzando le formulazioni riportate di seguito è possibile andare a determinare altre grandezze utili per confrontare i risultati:

Potenza apparente [VA]:

$$S = VI$$

Potenza reattiva [Var]:

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2}$$

$\cos \varphi$:

$$\cos \varphi = \frac{P}{S}$$

Resistenza equivalente [Ω]:

$$R_{eq} = \frac{P}{I^2}$$

Induttanza equivalente [mH]:

$$L_{eq} = \frac{Q}{2\pi f I^2}$$

Ed è quindi possibile andare a valutare la bontà delle simulazioni mediante le formule, questi dati serviranno poi nelle simulazioni magnetotermiche poiché minori sono le differenze percentuali, più attendibili saranno i risultati:

Differenza di tensione percentuale:

$$\Delta V\% = \frac{V_{lab} - V_{Flux}}{V_{lab}} \cdot 100$$

Differenza di potenza attiva percentuale:

$$\Delta W\% = \frac{P_{lab} - P_{Flux}}{P_{lab}} \cdot 100$$

Differenza di potenza reattiva percentuale:

$$\Delta Q\% = \frac{Q_{lab} - Q_{Flux}}{Q_{lab}} \cdot 100$$

Differenza di potenza apparente percentuale:

$$\Delta S\% = \frac{S_{lab} - S_{Flux}}{S_{lab}} \cdot 100$$

Differenza di resistenza percentuale:

$$\Delta R\% = \frac{R_{lab} - R_{Flux}}{R_{lab}} \cdot 100$$

Differenza di induttanza percentuale:

$$\Delta L\% = \frac{L_{lab} - L_{Flux}}{L_{lab}} \cdot 100$$

Efficienza %, data direttamente dai sensori inseriti in Flux:

$$\eta \% = \frac{\text{Potenza bobina}}{\text{Potenza pentola}} \cdot 100$$

Minori sono le differenze percentuali, migliore sarà la bontà del modello costruito.

Le Tabelle 5.3 e 5.4 riportano i valori che si ottengono nelle varie prove. Le simulazioni sono state eseguite imponendo una corrente pari a 20.4 A nel caso di distanza tra bobina e pentola di 7.3 mm e 20.38 A nel caso di 17 mm di distanza e distanze variabili. La frequenza invece è stata imposta di 23300 Hz. Dalle differenze percentuali si può vedere chiaramente come i risultati ottenuti mediante software FEM siano molto vicini alla realtà.

Tabella 5.3: Distanza induttore pentola 7.3 mm

Grandezza	Unità di misura	Misure sperimentali	Simulazioni	Differenza percentuale
V_{eff}	[V]	276.38	268.01	3.03
P	[W]	1858.46	1802.84	2.99
S	[VA]	5638.15	5467.44	3.03
Q	[Var]	5323.05	5161.66	3.03
R_{eq}	[Ω]	4.4657	4.3321	2.99
L_{eq}	[mH]	8.737 * 10 ⁻⁵	8.473 * 10 ⁻⁵	3.03
P pentola	[W]		1675.88	
η	[%]		92.96	

Tabella 5.4: Distanza induttore pentola 17 mm

Grandezza	Unità di misura	Misure sperimentali	Simulazioni	Differenza percentuale
V_{eff}	[V]	287.61	276.56	3.84
P	[W]	1023.53	1005.78	1.73
S	[VA]	5861.49	5636.29	3.84
Q	[VA _r]	5771.43	5545.83	3.91
R_{eq}	[Ω]	2.4643	2.42155	1.73
L_{eq}	[mH]	9.492 * 10 ⁻⁵	9.121 * 10 ⁻⁵	3.91
P pentola	[W]		878.91	
η	[%]		87.39	

Un'idea della variazione del rendimento derivato dall'aumentare della distanza tra fondo pentola e bobina, è data dalla risoluzione di un modello parametrico L'intervallo di variazione studiato è dai 7.3 mm in configurazione standard per il piano utilizzato, a 19.3 mm, con incrementi di 1 mm. Si nota, dalla Tabella 5.5 un decremento del rendimento del 8% tra le due configurazioni estreme, perciò per la determinazione dello spessore del fondo dovranno essere fatte opportune considerazioni osservando la diminuzione del rendimento elettrico e il conseguente incremento di quello termico.

Tabella 5.5: Rendimento al variare della distanza

Air gap	Potenza bobina	Potenza pentola	Rendimento
[mm]	[W]	[W]	[%]
7.3	1799.24	1672.48	93.0
8.3	1689.95	1563.17	92.5
9.3	1588.13	1461.33	92.0
10.3	1493.27	1366.47	91.5
11.3	1405.00	1278.11	91.0
12.3	1322.74	1195.87	90.4
13.3	1246.15	1119.28	89.8
14.3	1174.86	1047.96	89.2
15.3	1108.39	981.49	88.6
16.3	1046.47	919.58	87.9
17.3	988.78	861.89	87.2
18.3	935.04	808.14	86.4
19.3	884.96	758.07	85.7

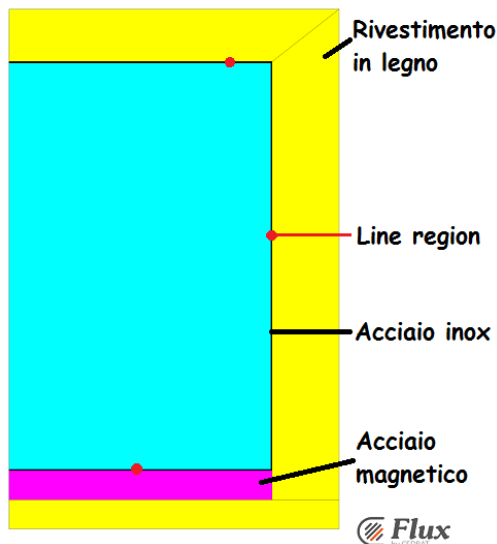
5.5 Simulazioni termiche

Oltre alle simulazioni magnetiche, sono state eseguite simulazioni solamente di carattere termico con un modello di pentola semplificato. In tutte le simulazioni, è stata imposta una variazione di temperatura lineare fino al raggiungimento di 100°C in un tempo di 600 secondi, ovvero dieci minuti, e il mantenimento di tale temperatura per 5400 secondi, un ora e trenta minuti, simulando così un processo di notevole durata in condizioni di regime. E' stata pertanto creata una "line region interna" nelle pareti interne del acciaio inox della pentola e imposta una funzione "trapezia", con temperatura di partenza 20°C e arrivo a 100°C nei suddetti tempi. Inoltre è stata creata una seconda "line region esterna", dove è stato posto il coefficiente di scambio termico con l'aria è pari a 10, tipico dell'aria in regime stazionario e temperatura ambiente di 20°C . I valori di emissività sono stati inseriti diversi tra acciaio, legno e vetroceramica, anche se, date le basse temperature in gioco, si può ritenere questo un parametro trascurabile. Per quanto riguarda le caratteristiche dei materiali utilizzati, sono stati inseriti valori medi per la vetroceramica e il legno, mentre per l'acciaio sono disponibili valori tabulati molto più precisi. La Tabella 5.6 riporta le caratteristiche termiche utilizzate per i materiali, dove per completezza sono state inserite anche le caratteristiche di materiali non utilizzati in questa simulazione, ma nel problema magnetotermico. Alcune grandezze sono state trovate direttamente in specifici siti web [8] mentre altre derivano da simulazioni parametriche eseguite al calcolatore. I valori che consentivano un avvicinamento delle grandezze simulate a quelle reali sono stati poi inseriti nel modello creato. Le Figure 5.3 presentano le configurazioni utilizzate nelle simulazioni, vengono riportate quelle con la base in legno. Per la vetroceramica basta sostituire le caratteristiche della parte in legno sotto la pentola. Il grafico 5.4 riporta le perdite di potenza in Watt, che si hanno durante il processo simulato. Perdite calcolate mediante valutazione della grandezza "dExchangeS" sulla "Line region esterna" della pentola nell'intero dominio. Si può vedere come le perdite a regime siano notevolmente inferiori nel caso di pentola completamente rivestita in legno, di circa 70 W , un 50% rispetto la pentola normale. Si possono inoltre apprezzare visivamente, dalle Figure 5.5 e 5.6 l'andamento delle temperature nello stesso istante nei diversi casi. Queste simulazioni ci hanno permesso di valutare le perdite termiche che si hanno nelle diverse situazioni e di eseguire un confronto incrociato tra di esse, simulando le condizioni di lavoro imposte dall'acqua in ebollizione.

Tabella 5.6: Caratteristiche termiche dei materiali in Flux

Materiale	Conducibilità $\left[\frac{W}{m \cdot K}\right]$	Capacità termica volumetrica $\left[\frac{J}{m^3 \cdot K}\right]$	Densità $\left[\frac{Kg}{m^3}\right]$
Acciaio AISI 409	24.9	3588000	7800
Acciaio Inox	15.0 @ 20°C 16.3 @ 100°C 17.5 @ 200°C	4000000	7900
Vetroceramica	1.3	2100000	2520
Legno	0.165	1012500 4186000	450
Acqua	$9 \cdot 10^9$	$1 \cdot 10^{12} J \cdot m^3$ en di transizione di fase 2 Gaussian standard deviation 107°C temp di transizione di fase	1000
Vapore	0.3 @ 20°C 0.5 @ 50°C 10 @ 90°C	1800	0.9
Aria termica	$9 \cdot 10^4$	1000	1

(a) Modello legno-legno



(b) Modello normale-legno

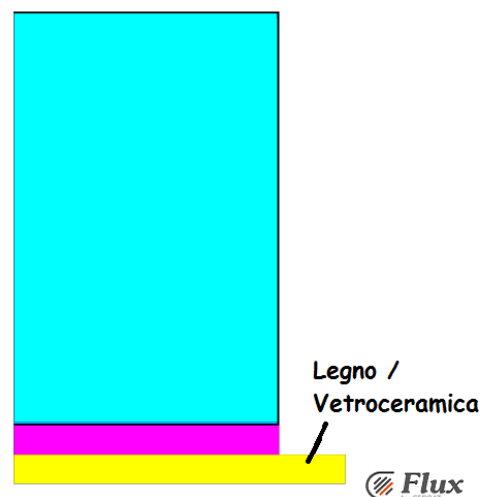
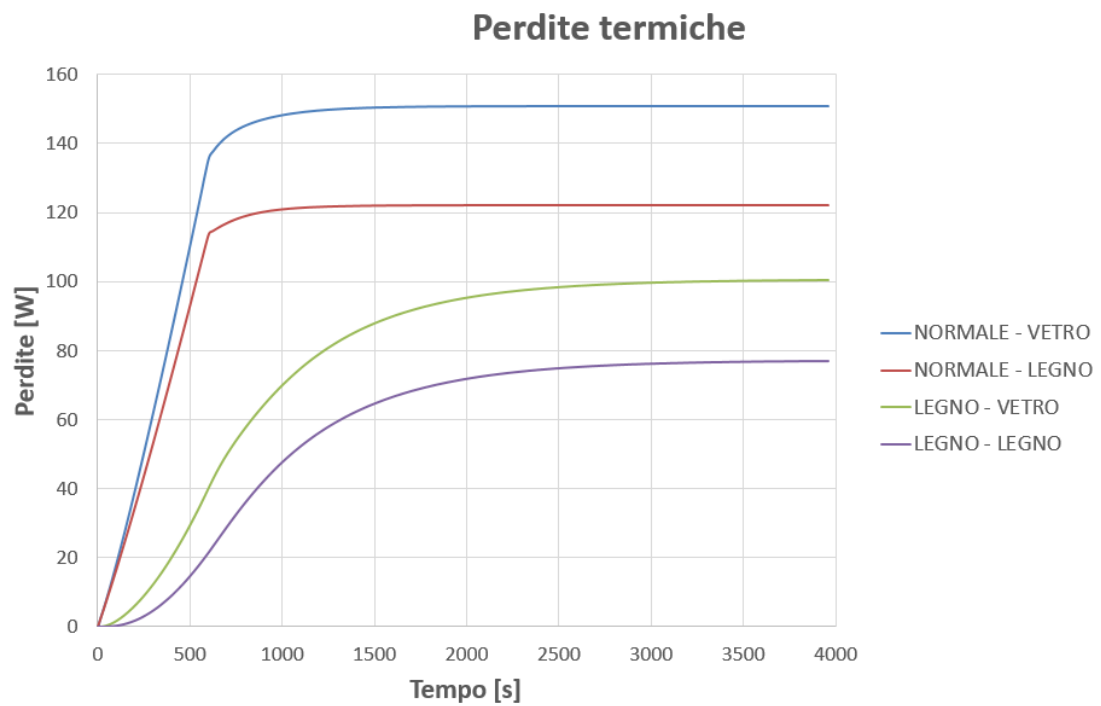
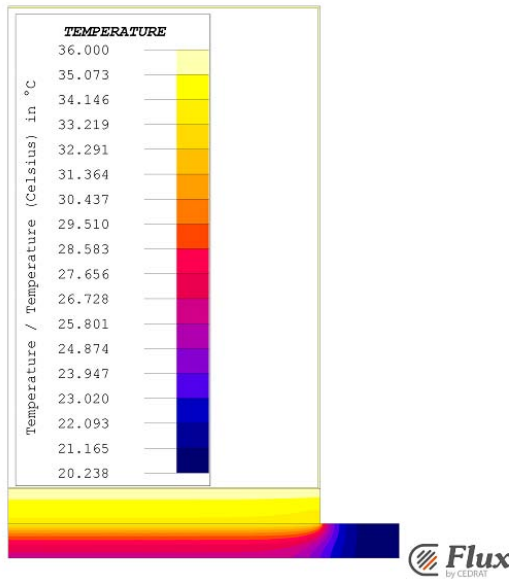
**Figura 5.3:** Modello rappresentato in Flux

Tabella 5.7: Perdite simulazioni termiche

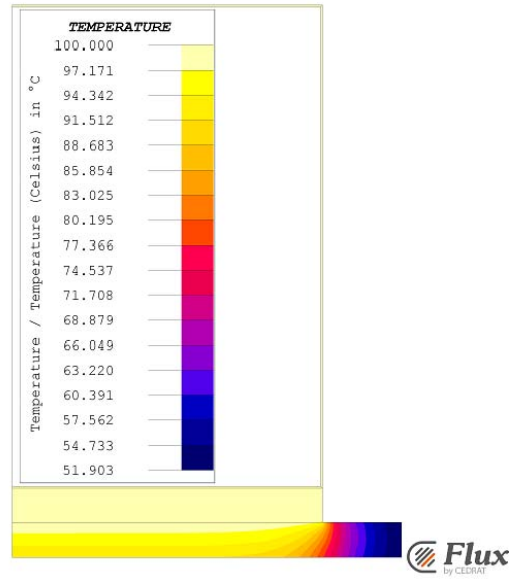
Pentola/ Piano	Potenza dissipata [W]
LEGNO/ LEGNO	77
LEGNO/ VETRO	100
NORMALE/ LEGNO	122
NORMALE/ VETRO	150

**Figura 5.4:** Perdite simulazioni termico

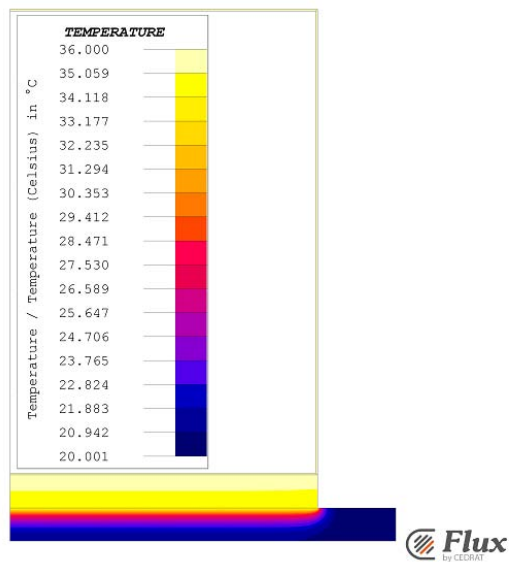
(a) 120 s normale-vetro



(b) 3600 s normale-vetro



(c) 120 s normale-legno



(d) 3600 s normale-legno

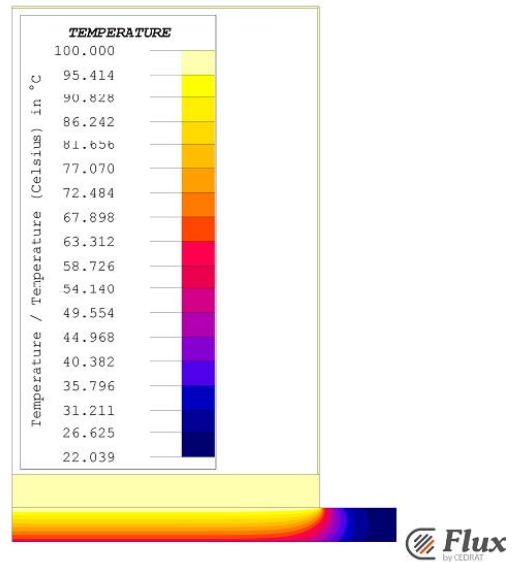
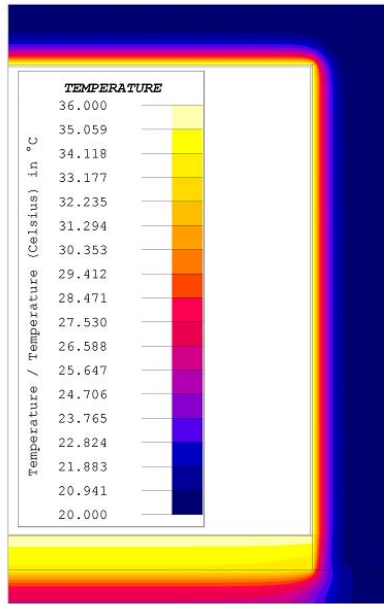
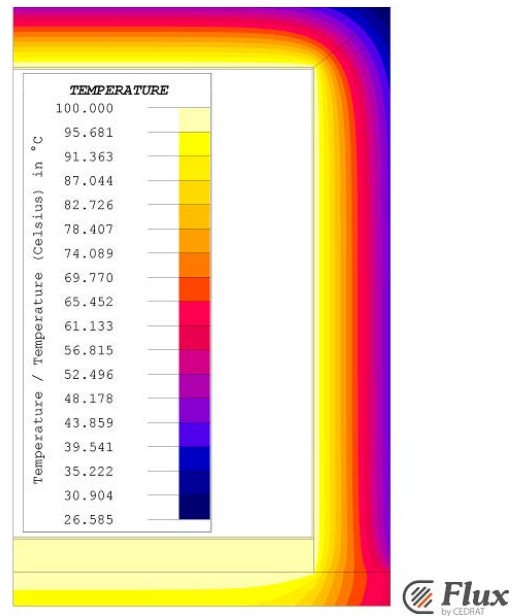


Figura 5.5: Andamento delle temperature transitorio termico Flux, pentola normale

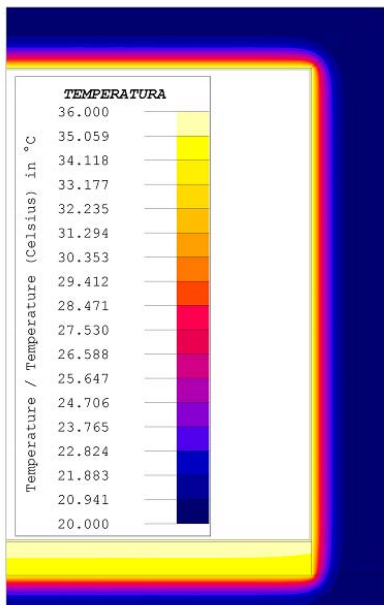
(a) 120 s legno-vetro



(b) 3600 s legno-vetro



(c) 120 s legno-legno



(d) 3600 s legno-legno

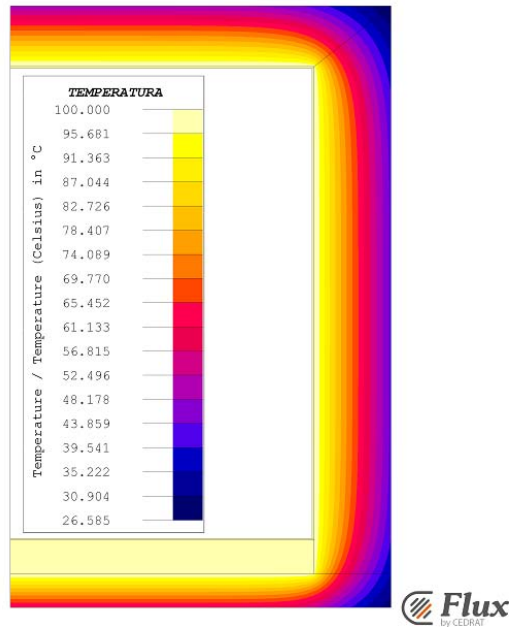


Figura 5.6: Andamento delle temperature transitorio termico Flux, pentola in legno

5.6 Simulazioni Magneto-Termiche

Oltre alle simulazioni solamente magnetiche e termiche, sono state eseguite delle simulazioni di tipo magneto-termico per osservare il fenomeno in modo più “realistico”, basandoci sempre sulle grandezze della pentola in analisi e della corrente circolante nella bobina di alimentazione. Il fenomeno rappresentato tuttavia non riproduce fedelmente realtà, ma è stata necessaria l'introduzione di alcune semplificazioni di seguito descritte. Come prima cosa, non è stato possibile simulare il processo di riscaldamento che avviene nella parte inferiore del piano in vetroceramica. Questo elemento si scalda a causa della presenza dell'induttore ma essendoci la ventola di raffreddamento posizionata sotto la bobina si ha avuto la difficoltà nel simulare questo processo di scambio termico in Flux. E' stato pensato pertanto di avere solamente il riscaldamento delle parti causato dalle correnti indotte nel fondo della pentola.

Tra la parte inclinata di acciaio della pentola e il legno è stata inserita una zona denominata aria termica, di conducibilità molto elevata e con le caratteristiche dell'aria. Nella realtà tale zona presente sperimentalmente non si scalda istantaneamente con il fondo della pentola, ma in maniera leggermente più lenta. E' stato imposto in tutte le simulazione un coefficiente di convezione pari a 10 in tutta la superficie esterna della pentola e del piano cottura, tranne che nella parte inferiore della vetroceramica, dove è stato imposto 5 proprio per cercare di trattenere maggiormente il calore sviluppato dalla pentola, non avendo come precedentemente detto, la generazione di calore dovuta dal riscaldamento dell'induttore sottostante. Le simulazioni sono state fatte rappresentando il modello reale che aveva la distanza tra fondo pentola e induttore di 17 mm. E' stata imposta una corrente nell'induttore di 20.4 A in grado di sviluppare una potenza di 1006 W e trasferire alla pentola 802 W. La Figura 5.7 mostra le configurazioni impiegate nelle simulazioni con rappresentata la mesh adeguatamente realizzata. Anche in questo caso, vengono riportati solo due schemi, basterà poi sostituire il legno con la vetroceramica e viceversa. I parametri elettrici sono riportati in Tabella 5.1 mentre quelli termici in Tabella 5.6. Con tale simulazione si è quindi stati in grado di osservare le perdite termiche, ancora una volta determinate mediante formula “dExchangeS” su una “Line region” esterna al sistema complessivo, in un processo simile alla realtà. Sono state indicate con “perdite pentola e piano”, la potenza dissipata nella parte esterna del legno nel caso di pentola rivestita. Nel caso di pentola normale e piano in vetro invece tale perdite riguardano la zona di acciaio inox a contatto con l'aria e la parte di vetro in sostituzione alla base di legno. Come si può osservare dalla Figura 5.8 le perdite termiche sono minori nel caso di pentola completamente rivestita in legno rispetto alla pentola normale e con base in vetroceramica, di 60 W a regime. La Tabella 5.8 riporta i valori a regime delle potenze dissipate, a fronte dei circa 800 W trasferiti alla pentola.

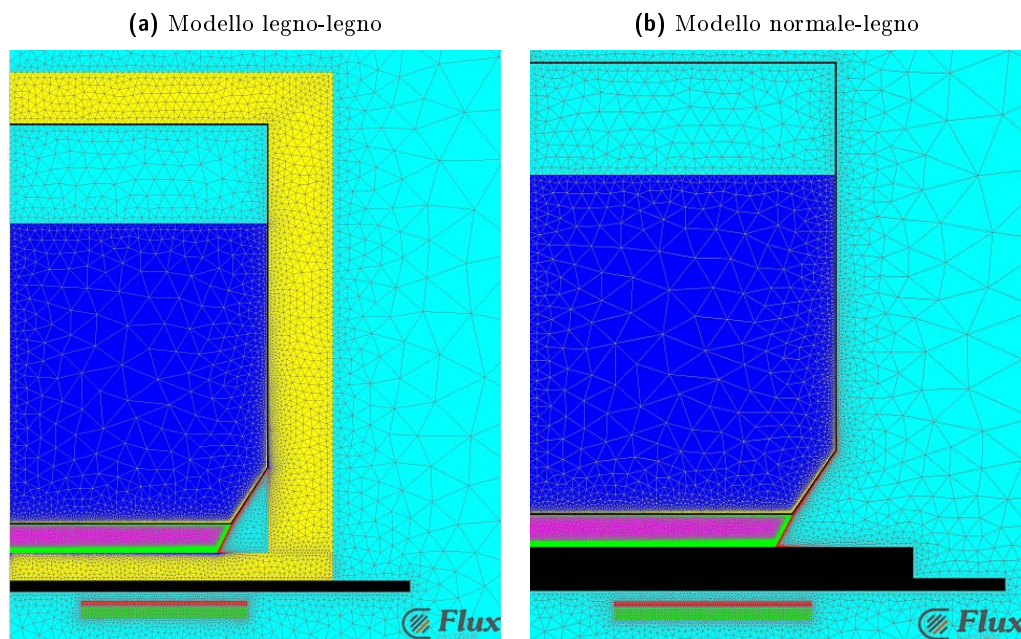
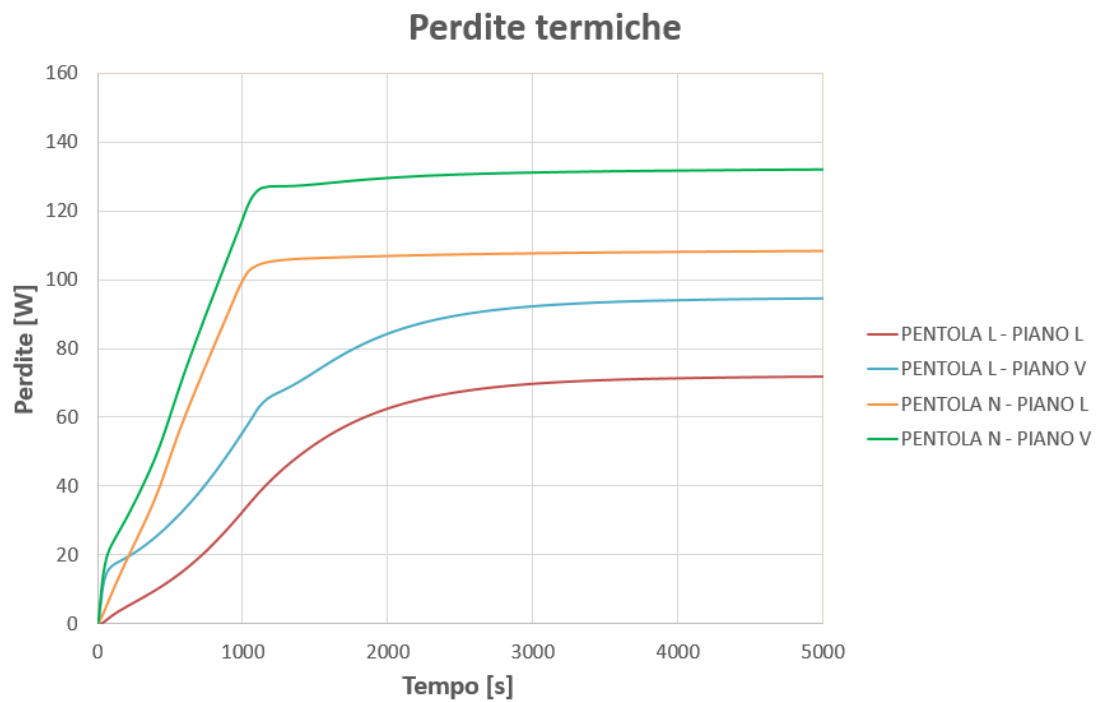


Figura 5.7: Modello rappresentato in Flux

Dalla Figura 5.9 è inoltre possibile osservare come le temperature, valutate tutte tramite sensori utilizzabili nel programma Flux, e le tempistiche del processo di riscaldamento reale, non si discostino molto da quello simulato, unica eccezione, per la temperatura sotto la vetroceramica e tra di essa e la base del legno, che differiscono di circa 20°C dalle temperature reali. Per quanto riguarda le temperatura dell'acqua e del vapore, questa è stata determinata come una media tra quattro sensori posizionati all'interno delle corrispondenti zone. Per la superficie laterale in legno, è stata fatta una media tra tre sensori posizionati a diverse altezze sulla superficie esterna del legno, a contatto con l'aria. Per la temperatura sul coperchio esterno e sotto la pentola il sensore è stato inserito a 4 cm dall'asse della pentola e a contatto con l'aria esterna nel primo caso e a 4 cm dall'asse e nelle zone di confine tra i materiali nel secondo. Le configurazioni seguono quanto fatto sperimentalmente, con le termocoppie posizionate negli stessi punti. Le linee tratteggiate fanno riferimento al processo simulato, mentre quelle continue, a quello reale. Le Figure 5.10 e 5.11, danno un'idea della propagazione del calore all'interno delle zone in alcuni istanti.

Tabella 5.8: Perdite simulazioni magneto-termiche

Pentola/ Piano	Potenza dissipata [W]
LEGNO/ LEGNO	72
LEGNO/ VETRO	94
NORMALE/ LEGNO	108
NORMALE/ VETRO	132

**Figura 5.8:** Perdite simulazioni magneto-termico

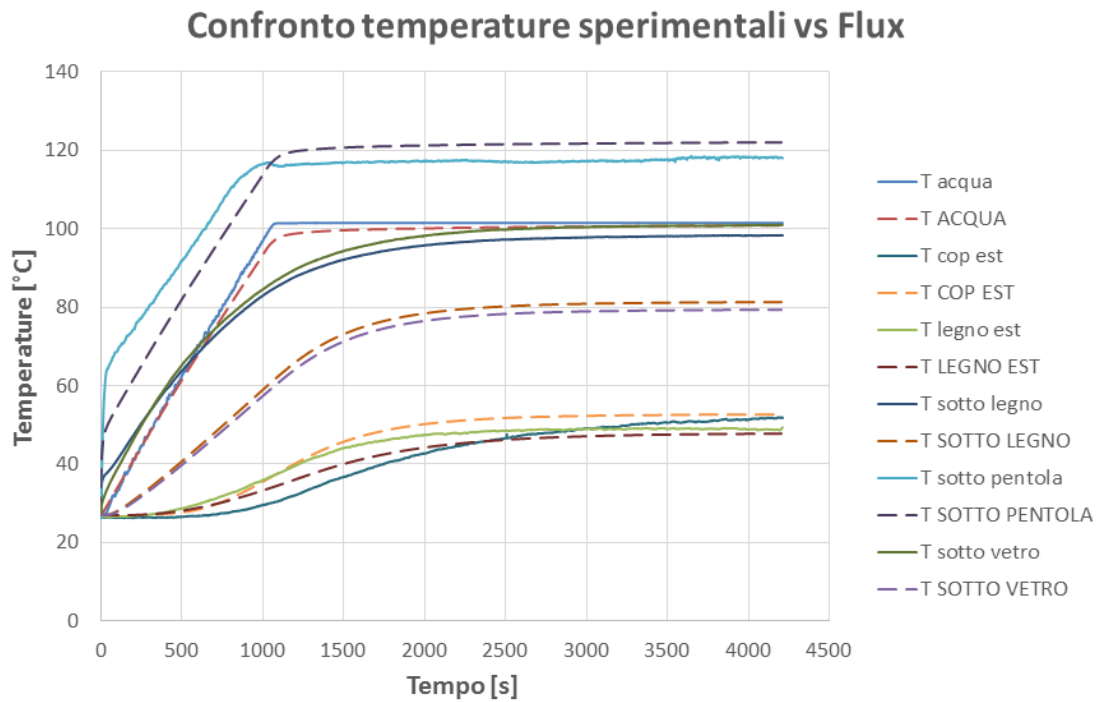


Figura 5.9: Confronto temperature sperimentali (—) vs Flux (- - -)

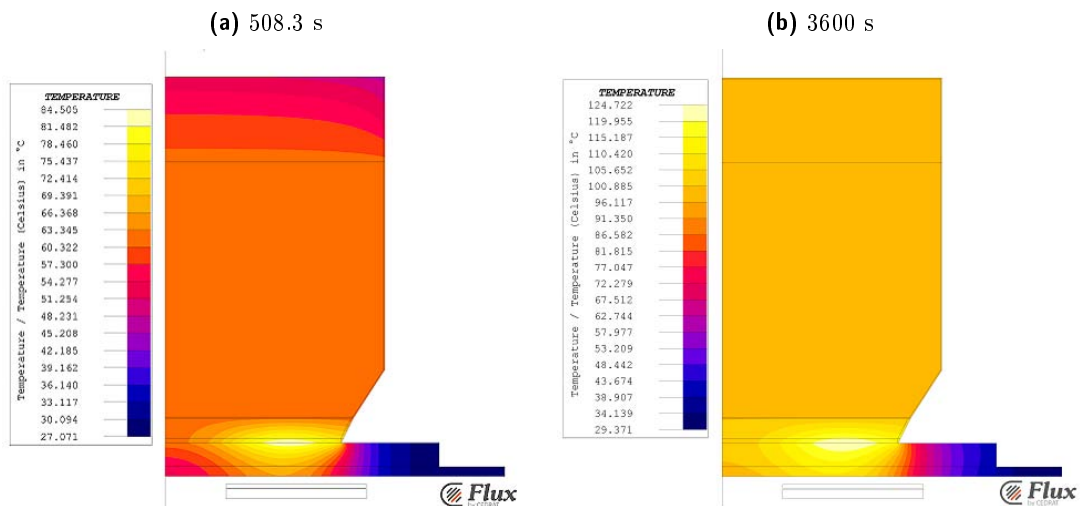


Figura 5.10: Temperatura simulazioni magnetotermiche in Flux, pentola normale

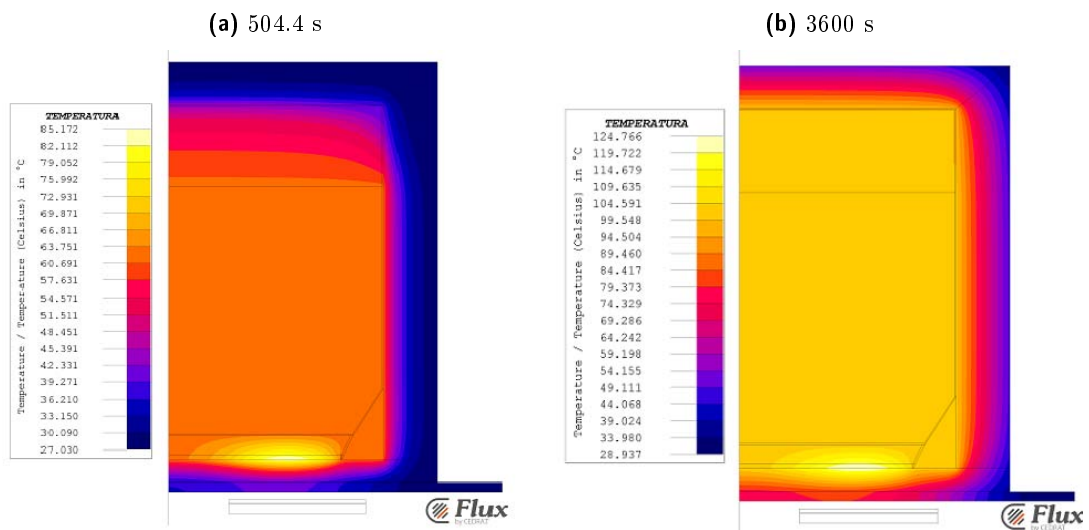


Figura 5.11: Temperatura simulazioni magnetotermiche in Flux, pentola rivestita in legno

Conclusioni

L'attività svolta durante il periodo di tesi ha permesso di ottenere indicazioni interessanti circa l'implementazione della tecnologia del riscaldamento di pentole ad induzione. Nelle prove eseguite la pentola in acciaio è stata inserita all'interno di un involucro isolante, a tale scopo è stato utilizzato come materiale il legno. Le prove sperimentali, riguardanti la fase di riscaldamento, hanno consentito di osservare come non si abbiano significative variazioni in termini di consumi nelle quattro configurazioni studiate. Tuttavia si è notato come la presenza del fondo in legno comporti un leggero miglioramento delle prestazioni. La successiva fase di mantenimento della temperatura, invece, ne beneficia in termini di rendimento termico. E' risultato infatti, che l'inserimento della pentola internamente al mezzo isolante riduceva significativamente le perdite di energia verso l'esterno, diminuendo così anche i consumi. Da sottolineare che tutte le prove sono state svolte in condizioni statiche, è probabile che nella normale situazione di cottura, con pentola sottoposta a correnti d'aria o presenza di cappe di aspirazione, il beneficio del rivestimento aumenti ulteriormente. Altro vantaggio da non sottovalutare, è l'aspetto legato alla sicurezza. I valori delle temperature, confortati dalle immagini termografiche, indicano come tali parametri misurati esternamente al rivestimento, siano significativamente inferiori rispetto al caso "pentola normale", addirittura quasi accettabili per la presa diretta con mano dell'oggetto. Altro dato interessante riguarda le curve di raffreddamento, esse hanno evidenziato una ben più lenta dispersione del calore verso l'esterno e quindi un prolungato mantenimento della temperatura raggiunta internamente. Questo fa pensare ad un beneficio in termini energetici in caso di pietanza cucinata in un momento precedente al consumo, contribuendo al suo mantenimento in temperatura. Il rivestimento in legno permette inoltre la realizzazione di un design moderno e in linea con i nuovi modelli di cucine. Infine, la fase di studio al calcolatore, ha permesso la valutazione delle grandezze di interesse quali potenze e temperature raggiunte nelle zone critiche. I valori sperimentali sono risultati paragonabili a quelli simulati ed hanno confermato il minor utilizzo di energia in caso di pentola rivestita in legno. E' stata infine verificata la fattibilità di un sistema che utilizza parte del flusso disperso generato dall'induttore per alimentare alcuni dispositivi ausiliari atti a migliorare le condizioni di cottura, come riportato nella sezione seguente, Idee e Sviluppi futuri.

Idee e sviluppi futuri

Un tale design della pentola, consente di pensare ad alcune soluzioni innovative atte a facilitare e migliorare la cottura dei cibi quando viene utilizzata una piastra ad induzione. Si può pensare, ad esempio, di sfruttare parte del flusso disperso prodotto dall'induttore per alimentare qualche dispositivo ausiliario. Questo può avvenire tramite inserimento di almeno una bobina circolare, posizionata in uno spazio apposito internamente al legno, che si propaga per quasi l'intera larghezza del fondo o una o più bobine localizzate in porzioni limitate del fondo stesso. Sono infatti presenti in commercio pentole provviste di timer elettronici utili a tenere sotto controllo la fase della cottura, o in generale pentole dotate di dispositivi elettrici di mescolamento per muovere in modo continuo il contenuto. Entrambe le apparecchiature citate sono in genere rimovibili al fine di permettere un normale lavaggio della pentola senza incorrere in rischi per le parti elettriche, con i timer generalmente alimentati a batteria e i dispositivi di mescolamento di norma alimentati da cavi elettrici. Queste soluzioni non sono tuttavia prive di inconvenienti. Se il sistema è alimentato da batterie, si ha l'incognita che queste possano scaricarsi proprio durante una cottura delicata, mentre, se presenti fili elettrici di collegamento, questi possono entrare in contatto con parti troppo calde per l'isolamento dell'oggetto, danneggiandolo e mettendo a rischio l'incolumità della persona ai fornelli. Da questi problemi nasce l'idea di realizzare un insieme pentola-dispositivi ausiliari alimentati direttamente dal campo elettromagnetico prodotto dal piano cottura. L'energia necessaria per il loro funzionamento, verrà garantita da contatti elettrici del tipo spina-presa senza necessitare di cavi o batterie. I dispositivi potranno essere di diverso genere. Si può pensare ad un meccanismo di trattamento meccanico posizionato nel coperchio o nel bordo del recipiente ed idoneo ad esercitare un'azione di tritamento o mescolamento del cibo presente internamente. Altra forma costruttiva può essere la presenza di un sensore di misurazione di grandezze, come un rilevatore di pressione o di temperatura interna al recipiente oppure un apparecchio di controllo programmabile che permetta di gestire il funzionamento della pentola in base ad informazioni precedentemente memorizzate nella scheda di memoria o inviate tramite controllo remoto. Si può avere inoltre la possibilità di rendere la cottura più uniforme utilizzando, ad esempio, una o più lampade IR poste al di sotto del coperchio così da riscaldare il contenuto posto internamente alla pentola non solo verso il basso, ma anche da altre direzioni. Tra i dispositivi sopracitati e la bobina di alimentazione, potrà essere presente anche un adattatore di tensione e/o frequenza. Infatti, queste ultime due grandezze, dipendono dal campo elettromagnetico generato

dalla piastra ad induzione e quindi sarà opportuno riportarle a valori atti a consentire il funzionamento degli apparecchi installati. Da queste idee, nascono alcuni brevetti per invenzione da poco presentati dal nome “Pentola utilizzabile su piastre ad induzione”. La Figura 5.12 mostra una soluzione in particolare.

Per verificare sperimentalmente il possibile conseguimento di una tale idea, è stato avvolto manualmente del filo di rame nello spazio compreso tra il fondo della pentola e il legno esterno, formando così 31 spire, ed utilizzato come carico una lampadina con filamento al tungsteno in grado di produrre 60 W nominali con tensione applicata 220 V. Successivamente è stato realizzato e sostituito al precedente un ulteriore avvolgimento con del filo smaltato e collegato allo stesso carico, in modo tale da occupare minore spazio e sfruttare un maggiore flusso. Entrambi gli avvolgimenti sono visibili in Figura 5.13. È stato utilizzato anche in questo caso lo Yokogawa PZ4000 per esaminare le grandezze del piano cottura; utilizzando due canali di ingresso, in uno è stato collegato il carico, nell'altro la bobina induttore. Il Power Analyzer, invece, ha consentito di valutare la potenza totale assorbita. Utilizzando il modello magnetico in Flux creato precedentemente ed inserendo una nuova zona nel bordo della pentola come “coil conductor” con i corretti valori di numero di spire, resistenza e fattore di riempimento, si è andato a determinare alcune grandezze di interesse riferite al carico applicato e alla potenza trasferita, rappresentate in Tabella 5.9, 5.10 5.11.

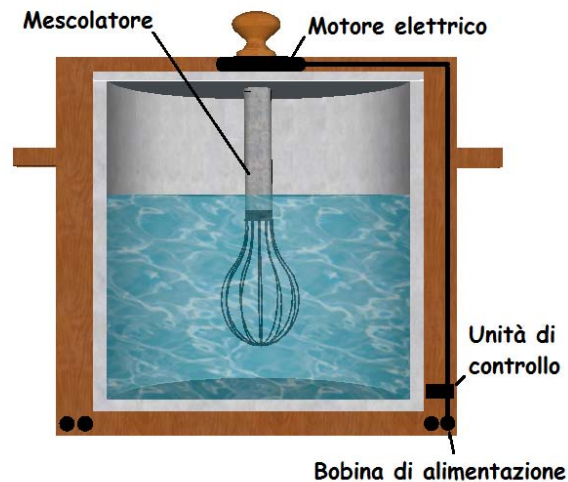
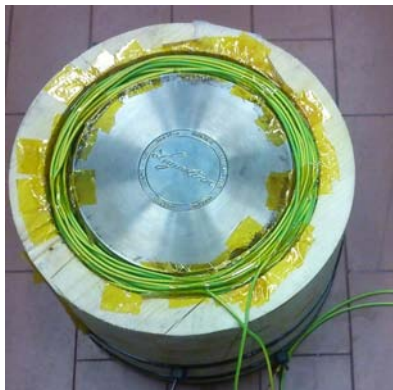


Figura 5.12: Pentola innovativa

(a) Avvolgimento 31 spire



(b) Avvolgimento 73 spire

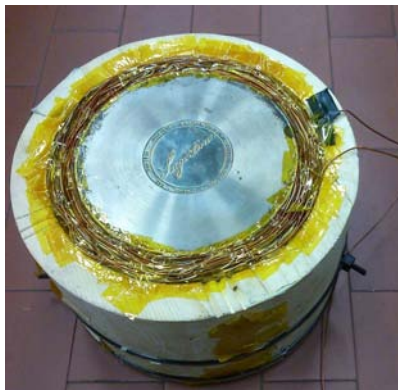


Figura 5.13: Avvolgimenti per alimentazione dispositivi ausiliari

(a) 31 spire, distanza 7.3 mm



(b) 31 spire, distanza 17 mm



(c) 71 spire, distanza 7.3 mm

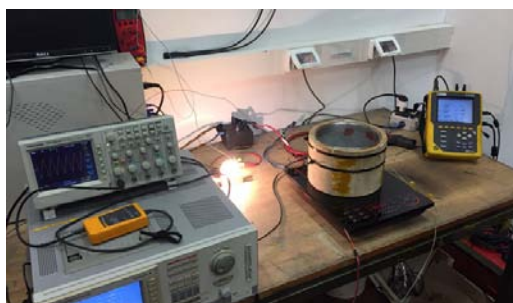


Figura 5.14: Alimentazione dispositivi ausiliari

Tabella 5.9: Alimentazione dispositivi ausiliari 31 spire, distanza 7.3 mm

Grandezza	Unità di misura	Misure sperimentali	Simulazioni	Differenza percentuale
V carico	[V]	102.94	103.58	-0.62
I carico	[mA]	173.5	174.6	-0.64
P carico	[W]	18.09	17.85	-1.35
P bobina	[W]	1840	1792	2.56

Tabella 5.10: Alimentazione dispositivi ausiliari 73 spire, distanza 7.3 mm

Grandezza	Unità di misura	Misure sperimentali	Simulazioni	Differenza percentuale
V carico	[V]	231.72	231.72	0
I carico	[mA]	267.4	267.4	0
P carico	[W]	62.20	62.24	-0.06
P bobina	[W]	1870	1807	3.34

Tabella 5.11: Alimentazione dispositivi ausiliari 31 spire, distanza 17 mm

Grandezza	Unità di misura	Misure sperimentali	Simulazioni	Differenza percentuale
V carico	[V]	92.64	85.16	-8.78
I carico	[mA]	170.9	157.3	-8.65
P carico	[W]	15.83	13.39	-18.22
P bobina	[W]	1005.58	1020	1.41

Il modello è stato risolto imponendo una corrente di alimentazione di 20.3 A, in quanto dalle misure ottenute con lo Yokogawa, si era visto essere circa la corrente media circolante. Per quanto riguarda la resistenza del carico, è stata inserita quella reale valutata direttamente dalle misure sperimentali come rapporto tra tensione e corrente, essendo il carico puramente resistivo, ovvero 593 Ω nel primo caso e di 542 Ω nel secondo caso. Si può vedere come, specialmente per la distanza di 17 mm come le simulazioni diano risultati più elevati rispetto alle prove sperimentali, questo molto probabilmente è dovuto ad una distanza maggiore tra bobina e avvolgimento causata da imperfezioni nel legno e dalla presenza di kapton al di sotto della pentola che può allontanare le due parti. La resistenza dell'avvolgimento utilizzato per realizzare la bobina da 31 spire che consente di raccogliere il flusso disperso, è stata valutata in 0.9 Ω , trovata dalla conoscenza della resistività del rame, lunghezza, sezione del filo e riportata a 90°C, temperatura media raggiunta dall'avvolgimento osservata mediante inserimento di una termocoppia durante l'esperienza.

Pertanto, con sezione del filo utilizzato di 0,5 mm² e lunghezza del filo di circa 18 metri:

$$\rho_{20^\circ C} \simeq 2 * 10^{-8} \Omega \cdot m$$

$$R_{20^\circ C} = \rho \cdot \frac{l}{S} \simeq 0.679 \Omega$$

$$R_{90^\circ C} = (1 + \alpha \Delta T) * R_{20^\circ C} \simeq 0.9165 \Omega$$

con $\alpha = 3.9 * 10^{-3}$ e $\Delta T = 90 - 20 = 70^\circ C$ La resistenza dell'avvolgimento utilizzato per realizzare la bobina da 73 spire invece è stata valutata in 1.53 Ω , trovata dalla conoscenza della resistività del rame riportata a 130°C, lunghezza, sezione del filo.

Pertanto, con sezione del filo utilizzato di 0,75 mm² e lunghezza del filo di circa 40 metri:

$$R_{20^\circ C} = \rho \cdot \frac{l}{S} \simeq 1.07 \Omega$$

$$R_{130^\circ C} = (1 + \alpha \Delta T) * R_{20^\circ C} \simeq 1.53 \Omega$$

con $\alpha = 3.9 * 10^{-3}$ e $\Delta T = 130 - 20 = 110^\circ C$.

Le Tabelle 5.12 e 5.13 indicano la variazione delle potenze assorbite e trasferite alla pentola con i rispettivi rendimenti. Tra parentesi viene indicata la variazione percentuale delle grandezze rispetto al caso di pentola commerciale senza alcun carico applicato e pentola innovativa. Si può osservare che l'inserimento di un carico, causa la diminuzione della potenza trasferita alla pentola di alcuni punti percentuali e il leggero aumento della potenza assorbita dal piano cottura, mantenendo comunque il rendimento molto elevato. E' doveroso osservare che il numero di spire applicato è alquanto elevato. Se si vuole alimentare, ad esempio, dei sensori dove sono necessari solamente pochi watt, questo farà variare consumo e rendimenti di molto poco. E' quindi possibile pensare di utilizzare un avvolgimento esterno per alimentare qualche dispositivo ausiliario. Le Figure 5.15 mostrano il circuito del modello utilizzato e le linee di flusso. Evidenziabile come la bobina esterna sia interessata anch'essa da flusso altrimenti disperso e quindi sia possibile ricavare una piccola ma utile potenza, ciò viene confermato sperimentalmente ed è visibile in Figura 5.14.

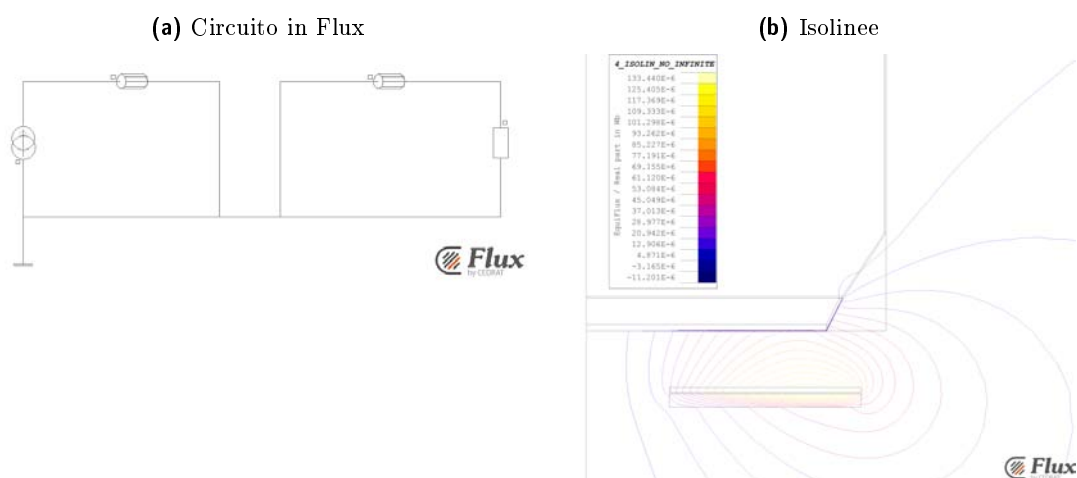


Figura 5.15: Modello circuito in Flux e linee di flusso

Tabella 5.12: Confronto potenze distanza 7.3 mm

Grandezza	Unità di misura	Senza carico	Con carico 31 spire		Con carico 73 spire	
P assorbita	[W]	1785.41	1792.89	(+0.4%)	1807.56	(+1.23%)
P pentola	[W]	1695.68	1649.04	(-2.82%)	1619.42	(-4.71%)
Rendimento	[%]	92.96	91.98	(-1.07%)	89.89	(-3.42%)
P carico	[W]		18.09		62.24	

Tabella 5.13: Confronto potenze distanza 17 mm

Grandezza	Unità di misura	Senza carico	Con carico 31 spire	
P assorbita	[W]	997.79	1005.58	(+0.77%)
P pentola	[W]	871.93	863.84	(-0.94%)
Rendimento	[%]	87.39	85.90	(-1.73%)
P carico	[W]		15.83	

Bibliografia

- [1] Recensioni piani cottura, “<http://www.recensioni-piano-cottura-ad-induzione-magnetica.it/piano-cottura-induzione.asp>”,
- [2] Wikipedia, “en.wikipedia.org/wiki/Induction-cooking”,
- [3] D. Bettin, “Modelli numerici per la determinazione dei parametri elettrici di induttori nei piani di cottura ad induzione”, *Padova (2010)*
- [4] S. Lupi, “Appunti di Elettrotermia”, *Università degli studi di Padova (2005)*
- [5] A. Marconi, “MFE analysis in time domain of Simultaneous Double Frequency induction hardening”, *Padova (2015)*, pp 14-20
- [6] C. Bonacina, A. Cavallini, L. Mattarollo, “Trasmissione del calore”, *Cleup editore (1994)*
- [7] P. Mazzoldi, M. Nigro, C. Voci, “Elementi di fisica”, *EdiSES Seconda edizione (2000)*
- [8] Matweb, “www.matweb.com”,
- [9] Flux, “User guide Flux® 11.2, Volume 2”, *Francia (2013)*
- [10] Flux, “User guide Flux® 11.2, Volume 3”, *Francia (2013)*