

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA ELETTRONICA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE



TESI DI LAUREA

**RISCALDAMENTO A INDUZIONE PER PIANO
COTTURA DOMESTICO**

RELATORE: PROF. PAOLO TENTI

LAUREANDA: FRANCESCA PRAVATO

MATRICOLA N°: 563328-IL

ANNO ACCADEMICO 2009 - 2010

Indice

CONTENUTI	iii
1 INTRODUZIONE	1
1.1 RICHIAMI DI ELETTROMAGNETISMO	1
1.2 APPLICAZIONE DEL RISCALDAMENTO A INDUZIONE IN AMBITO DOMESTICO	6
2 PIANI COTTURA	7
2.1 PIANO COTTURA A GAS	7
2.2 PIANO COTTURA RADIANTE	9
2.3 PIANO COTTURA A LOGENO	12
2.4 PIANO COTTURA A INDUZIONE	15
3 FUNZIONAMENTO DEL PIANO A INDUZIONE	19
3.1 DESCRIZIONE DEL SISTEMA	19
3.2 TECNOLOGIA iCOUPLER	22
3.3 ISOLAMENTO DEGLI INTERRUTTORI IGBT USANDO LA TECNOLOGIA iCOUPLER	24
3.4 ISOLAMENTO DELL'INTERFACCIA UTENTE CON LA TECNOLOGIA iCOUPLER	26
3.5 RILEVAMENTO DELLA PRESENZA DELLA PADELLA SUL PIANO A INDUZIONE	27
4 TIPOLOGIE DI INVERTER E STRATEGIE DI MODULAZIONE	29
4.1 INTRODUZIONE	29
4.2 CARATTERISTICHE DEL CARICO	31
4.3 MODALITA' DI FUNZIONAMENTO ALLA TERZA ARMONICA	34
4.4 TOPOLOGIA DELL'INVERTER	35
4.5 CRITERI DI PROGETTAZIONE	37
4.6 RISULTATI SPERIMENTALI	39
5 CONTROLLO DIGITALE	43
5.1 MODALITA' DI FUNZIONAMENTO	43

6 INDUTTORE **47**
6.1 TIPOLOGIE E CRITERI DI PROGETTAZIONE 47
7 CONCLUSIONI **53**

CONTENUTI

Capitolo 1: Il capitolo 1 di introduzione è dedicato all'elettromagnetismo, in particolare viene spiegato il funzionamento del riscaldamento a induzione studiandone la sorgente e gli effetti. Nel paragrafo 1.1 vengono utilizzati i riferimenti alla legge di Ampère, alle correnti di Foucault, all'effetto Joule ed all'effetto pelle, sottolineando l'importanza che assume la profondità di penetrazione del materiale nel determinare l'efficienza del sistema. Nel paragrafo 1.2 viene invece introdotta l'applicazione del riscaldamento a induzione all'uso domestico dei piani cottura.

Capitolo 2: Nel capitolo 2 si elencano le varie tipologie di piani a cottura domestica attualmente in commercio descrivendone la realizzazione ed il funzionamento, infine ne viene fatta un'analisi per valutare i pro ed i contro del singolo piano cottura. Nel paragrafo 2.1 viene analizzato il piano cottura a gas, nel 2.2 il piano a cottura radiante, nel 2.3 il piano cottura alogeno e nel 2.4 il piano cottura a induzione.

Capitolo 3: Nel capitolo 3 si analizza nel dettaglio la progettazione del piano cottura a induzione dove nel paragrafo 3.1 si approfondisce il funzionamento del sistema spiegando la funzione di ogni singolo componente, mentre nel paragrafo 3.2 viene analizzata la tecnologia iCoupler attuata per assicurare l'isolamento del sistema in situazioni di pericolo. I successivi paragrafi 3.3 e 3.4 descrivono tale tecnologia ed i vantaggi che essa apporta mentre nel paragrafo 3.5 viene analizzato il sistema di rilevazione della presenza di padelle sulla piastra ed il relativo sistema di sicurezza.

Capitolo 4: Nel capitolo 4 viene trattata l'ottimizzazione della cottura a induzione attraverso la progettazione dell'inverter e grazie ad adeguate strategie di modulazione. Il paragrafo 4.1 descrive l'utilità dell'inverter in modalità di funzionamento alla prima armonica con relativo carico, le cui caratteristiche sono elencate nel paragrafo 4.2 distinguendo tra l'utilizzo di materiale ferromagnetico e non ferromagnetico. Nei paragrafi 4.3 e 4.4 si discute l'ottimizzazione dell'inverter nella modalità di funzionamento alla terza armonica con la modifica attuata grazie all'aggiunta di un relè. I criteri di tale progettazione e le prestazioni rilevate dai risultati sperimentali effettuati sono riportati nei paragrafi 4.5 e 4.6.

Capitolo 5: Nel capitolo 5 viene trattato il controllo digitale del piano cottura domestico a induzione, descrivendo nel paragrafo 5.1 la modalità di funzionamento del convertitore e l'ottimizzazione effettuata con la scelta del convertitore analogico-digitale di primo ordine $\Sigma\Delta$.

Capitolo 6: Nel capitolo 6 vengono introdotti i criteri di progettazione dell'induttore per ottenere la massima efficienza del sistema di riscaldamento a induzione, si elencano le varie tipologie di conduttori utilizzabili per la realizzazione dell'impedenza e ne viene esaminato il rapporto costo-efficienza.

Capitolo 7: Il capitolo 7 è dedicato alle conclusioni, vengono esaminati e paragonati i pro e i contro dei singoli piani cottura. In ultimo si elencano i progetti indirizzati al miglioramento delle prestazioni del piano cottura a induzione riguardanti la modifica del convertitore half-bridge, all'utilizzo del convertitore analogico-digitale di primo ordine $\Sigma\Delta$ e della tecnologia iCoupler.

Capitolo 1

INTRODUZIONE

1.1 RICHIAMI DI ELETTROMAGNETISMO

Il riscaldamento a induzione si ottiene con il passaggio attraverso la bobina induttrice di corrente alternata a media frequenza, la quale genera un campo elettromagnetico H_0 in accordo con la legge di Ampère (1.1), che induce delle correnti parassite nel materiale da riscaldare

$$\int H_0 dl = Ni = F \quad (1.1)$$

dove

- H_0 capo elettromagnetico generato;
- l lunghezza del tratto percorso;
- N numero delle spire che costituiscono l'avvolgimento;
- i corrente che percorre l'avvolgimento.

Queste correnti generano perdite di energia riscaldando così il conduttore per effetto Joule, tecnicamente tali correnti parassite sono chiamate correnti di Foucault e sono causate dal movimento (o variazione) del campo magnetico che attraversa un conduttore in Figura 1.1.

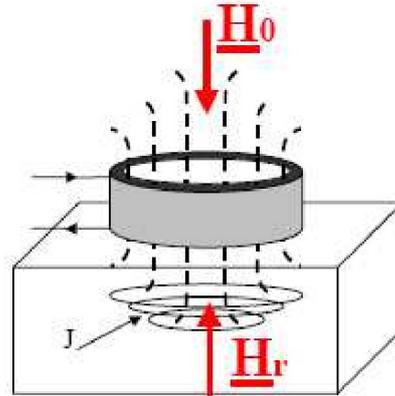


Figura 1.1: Campo magnetico

La Figura 1.1 mostra il campo generato dalla bobina (H_0) e il campo di reazione dovuto alle correnti indotte nel materiale (H_r), dove la bobina e il campione metallico rappresentano, rispettivamente, il primario e il secondario di un trasformatore la cui impedenza dipende dal comportamento delle correnti indotte. Il moto relativo genera quindi la circolazione di elettroni, cioè di corrente, nel conduttore, generando a sua volta un campo magnetico in direzione opposta (H_r) al campo magnetico applicato (H_0). Il fenomeno si accentua:

- con l'aumentare del campo magnetico applicato (se sinusoidale con il quadrato dell'ampiezza);
- con l'aumentare della conducibilità del conduttore attraversato dal campo magnetico;
- con l'aumentare del movimento relativo tra campo magnetico e conduttore;
- se il campo magnetico è variabile in modo periodico con l'aumentare della sua frequenza (se sinusoidale con legge proporzionale al quadrato della frequenza).

Secondo la legge di Faraday, la corrente generata sulla superficie di un conduttore è inversamente proporzionale alla corrente presente nel circuito di induzione (1.2) [39]

$$E = \frac{d\lambda}{dt} = N \frac{d\Phi}{dt} \quad (1.2)$$

dove

- E forza elettromotrice indotta;
- λ lunghezza d'onda;
- Φ flusso di induzione magnetica.

Questo metodo di riscaldamento è utilizzato in svariate situazioni produttive, tipicamente ove siano richieste saldature o più genericamente variazioni delle proprietà fisiche dei metalli o di ogni altro materiale elettricamente conduttivo. Viene preferito ai normali sistemi di riscaldamento in quanto non necessita di contatto e consente una formazione di calore precisa: localizzata, rapida e controllabile. Per realizzare un sistema di riscaldamento a induzione è indispensabile l'utilizzo di un generatore di corrente alternata, una bobina induttrice ed un carico (il materiale che si intende riscaldare), azionando il generatore si avvia il passaggio di corrente attraverso la bobina con la conseguente generazione di un campo magnetico nell'area circostante, in questo modo grazie all'effetto Joule, l'energia elettrica prodotta dalla corrente indotta viene convertita in energia termica (1.3)

$$P = \frac{E^2}{R} = i^2 \cdot R \quad (1.3)$$

dove

R resistenza.

La densità di corrente indotta diminuisce all'avvicinarsi dal centro del conduttore, questo fenomeno viene definito effetto pelle e indica la tendenza della corrente elettrica alternata a distribuirsi dentro un conduttore in modo non uniforme con densità maggiore sulla superficie ed inferiore all'interno secondo la relazione (1.4)

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}} \quad (1.4)$$

dove

ρ resistività o profondità di penetrazione;

μ permeabilità magnetica;

ω frequenza angolare della corrente AC.

La profondità di penetrazione δ è definita come la distanza dal punto in cui la densità di corrente si riduce del fattore $1/e$ rispetto al valore che essa ha in superficie [41]. La Figura 1.2 mostra l'andamento della densità di corrente dovuto all'effetto pelle.

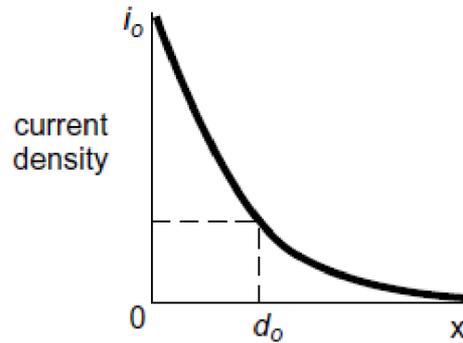


Figura 1.2: Densità corrente

Se il conduttore è un filo a sezione circolare, la sua resistenza in alternata è circa la stessa che presenta un filo cavo avente lo stesso diametro del filo pieno. La formula approssimata di calcolo in questo caso è esposta nella (1.5)

$$R = \frac{\rho}{\delta} \left(\frac{L}{\pi(2D - \delta)} \right) \simeq \frac{\rho}{\delta} \left(\frac{L}{2\pi D} \right) \quad (1.5)$$

dove

- L lunghezza del conduttore cavo;
- D diametro esterno del conduttore cavo;
- δ lo spessore della corona circolare.

L'ultima approssimazione è più accurata se D è molto maggiore di δ , sostituendo il valore di ρ nel valore approssimato ricavato per R si ottiene la (1.6)

$$R = \rho \left(\frac{L}{2\pi D} \right) \sqrt{\frac{\omega\mu}{2\rho}} \simeq \left(\frac{L}{2\pi D} \right) \sqrt{\frac{\rho\omega\mu}{2}} \quad (1.6)$$

Si osserva dunque che

$$R \propto \sqrt{\omega} \quad (1.7)$$



Figura 1.3: Bobina

Nell'espressione (1.7), dalla permeabilità magnetica si evince che all'aumentare della frequenza, cioè di ω , le onde hanno sempre maggior difficoltà nel penetrare il mezzo, per questo motivo le basse frequenze, da 5kHz a 30kHz, sono adatte per materiali decisamente spessi, che richiedono una penetrazione profonda del calore, mentre frequenze maggiori, dai 100kHz ai 400 kHz, sono utili per riscaldamenti superficiali o di zone piccole e limitate, si ha dunque che maggiore è la frequenza, maggiore è il calore prodotto. In questo processo vi è una dispersione del calore nell'ambiente circostante soprattutto per irraggiamento, diviene quindi molto importante, per non penalizzare eccessivamente il rendimento energetico, ridurre il tempo di riscaldamento incrementando la potenza trasmessa fino al limite determinato dal massimo gradiente radiale di temperatura tollerabile senza provocare frattura del materiale. Occorre trattare separatamente i casi in cui il materiale che si desidera scaldare sia fisso o in movimento rispetto alla bobina induttrice, nel primo caso si riscontrano le variazioni delle caratteristiche fisiche del materiale esclusivamente in dipendenza del tempo (utilizzato per materiali di modeste dimensioni, o in alternativa come preparatorio all'ingresso in presse formatrici), diversamente, nel secondo caso si ha la modifica dei parametri fisici con l'aumento della temperatura, correlato con l'avanzamento del pezzo (provocando un'iniezione di potenza non uniforme nel materiale durante il suo spostamento). Si riscontra quindi che la potenza specifica iniettata dalla bobina è influenzata non solo dalla frequenza e dalla corrente, ma anche dalla resistività e dalla permeabilità del materiale da scaldare.



Figura 1.4: Studi di laboratorio

1.2 APPLICAZIONE DEL RISCALDAMENTO A INDUZIONE IN AMBITO DOMESTICO

L'applicazione del riscaldamento a induzione alle piastre di uso domestico ha rivoluzionato l'idea di cottura apportando una serie di vantaggi e di innovazioni irraggiungibili con i classici fornelli a gas. Viene raggiunto infatti uno straordinario livello di sicurezza ed affidabilità grazie ad un organismo di controllo basato sull'utilizzo di microcontrollori che comandano gli interruttori IGBT tramite un sistema di feedback che ne garantisce l'affidabilità del sistema spegnendo istantaneamente la piastra in caso di situazione di pericolo. Non si ha più il rischio di dimenticare il fornello acceso in quanto un complesso sistema di sensori monitorizza la presenza del pentolame e apre l'interruttore (spegnendo così la piastra) in caso di mancata rilevazione o di errato utilizzo della padella. L'intero sistema si basa sul principio dell'elettromagnetismo e naturalmente non essendo il sistema ideale si verificano delle perdite che in grandi quantità potrebbero provocare effetti indesiderati sull'organismo, questo non avviene grazie al sistema di controllo che genera un campo magnetico proporzionale alla dimensione della padella che si utilizza. Se viene appoggiata una pentola di dimensione limitata su una piastra di grande capacità il sensore rileva la non compatibilità e impedisce l'accensione della piastra così da evitare un'elevata dispersione del campo magnetico che potrebbe essere dannosa per il nostro corpo. Viene inoltre azzerata la possibilità di scottature grazie alla parte di vetroceramica che circonda la zona di cottura che resta fredda, garantendo anche un minor riscaldamento dell'ambiente circostante. Da non sottovalutare l'estrema facilità di pulizia permessa dalla mancanza di ugelli, infatti il piano è costituito da una superficie perfettamente liscia che impedisce così anche il rovesciamento del tegame. In ultimo i tempi di cottura sono radicalmente ridotti grazie agli istantanei tempi di risposta alla variazione di intensità di calore e al sistema stesso di riscaldamento, questo comporta un riduzione dello spreco energetico ed un risparmio sulla bolletta elettrica rispetto ai piani radianti con resistenza ed alogeni.

Capitolo 2

PIANI COTTURA

2.1 PIANO COTTURA A GAS

Nella cottura a gas si preleva il combustibile dal metanodotto o da una comune bombola a GPL, successivamente esso viene convogliato, attraverso dei tubi e prima di uscire nel diffusore, entra in un getto forato che rende l'erogazione più costante. Non appena il gas fuoriesce dai bruciatori, l'utente con l'ausilio di un pulsante che genera una scarica elettrica o di un comune accendino innesca la combustione (naturalmente, ad una maggiore quantità di gas erogato corrisponderà una intensità di fiamma superiore). Il problema maggiore che si evidenzia in questa tipologia di piano cottura consiste nella dispersione di calore, infatti buona parte dell'energia termica sprigionata dalla fiamma va a disperdersi nell'ambiente. Le soluzioni attualmente maggiormente utilizzate consistono dell'utilizzo di bruciatori ad alto rendimento e di bruciatori a tripla corona, il primo riduce l'emissione di sostanze tossiche come l'ossido di carbonio ed il monossido di azoto migliorando così anche il processo di combustione con l'ottimizzazione del rendimento, il secondo è un bruciatore a potenza maggiore che va ad incidere sulla riduzione dei tempi di riscaldamento e sui consumi.



Figura 2.1: Fornello a gas

Le Figure 2.2 e 2.1 mostrano l'utilizzo del classico fornello a gas, (i piani cottura a gas, sebbene diffusissimi, restano di fatto i sistemi meno efficaci in commercio).

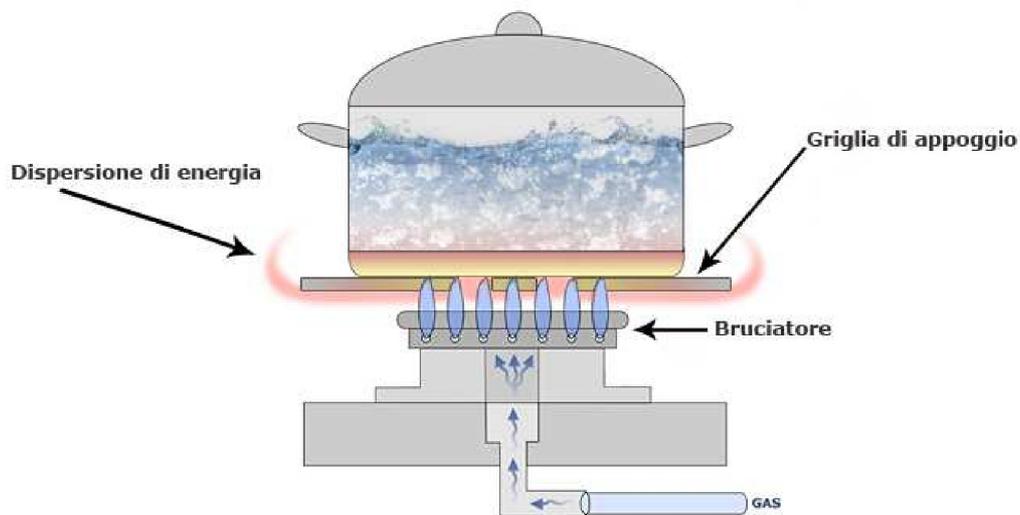


Figura 2.2: Cottura a gas

Vantaggi del piano cottura a gas:

1. costo di acquisto del piano cottura molto basso;
2. funzionamento anche in caso di mancanza di corrente elettrica;
3. possibilità di utilizzare qualsiasi tipo di pentolame, anche con fondo irregolare.

Svantaggi del piano cottura a gas:

1. in primo luogo la sicurezza, infatti il gas in caso di perdite è pericolosissimo, può arrecare morte per asfissia o esplosioni di intere palazzine;
2. la pulizia del piano non è molto agevole e richiede un notevole impiego di tempo;
3. pericolo di ustioni nel toccare le griglie di supporto del pentolame o il fornello;
4. il bruciatore, a seguito di distrazione, potrebbe rimanere accidentalmente acceso anche senza che vi sia sopra del pentolame;
5. nel periodo estivo il calore sprigionato dai fornelli rende spiacevole la cottura;
6. nel tempo gli ugelli dei bruciatori possono otturarsi, in questo caso è necessario effettuare una pulizia molto accurata.

2.2 PIANO COTTURA RADIANTE

Il principio del piano cottura radiante consiste nello scaldare, per effetto Joule, una resistenza di forma circolare concentrica, collocata sotto ad un piano cottura realizzato in vetroceramica, l'intensità di tale calore può essere gestita attraverso delle manopole o, nei piani più recenti, grazie ad un pannello TouchControl digitale. Trattandosi di piani elettrici, è intuibile che ad una maggiore intensità di calore, corrisponderà un maggior assorbimento di corrente elettrica con un inevitabile spreco di energia dovuto dalla serie di passaggi che deve compiere il calore prima di giungere alla padella (il calore generato dalla resistenza posizionata sotto la superficie del piano scalda prima la vetroceramica e poi per trasmissione il pentolame).



Figura 2.3: Resistenza elettrica

Le Figure 2.3, 2.5 e 2.4 mostrano le componenti di realizzazione del piano cottura ed il funzionamento



Figura 2.4: Piano cottura radiante

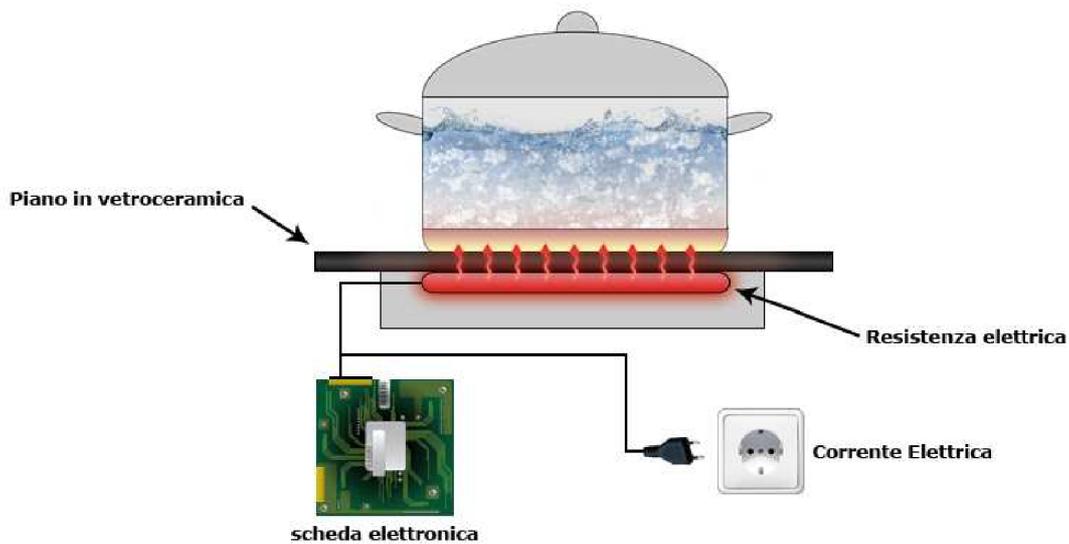


Figura 2.5: Cottura radiante

Vantaggi del piano cottura in vetroceramica radiante:

1. essendo alimentato a corrente elettrica, non sussistono i rischi del gas (asfissia o esplosioni da perdite);
2. trattandosi di una superficie perfettamente piana, non sussiste il rischio che il pentolame si ribalti;
3. niente più ugelli che si otturano, come può accadere per i fornelli a gas.

Svantaggi del piano cottura in vetroceramica radiante:

1. prezzo di acquisto più elevato rispetto ai piani cottura a gas;
2. le pentole devono avere il fondo perfettamente piatto;
3. il 47% di rendimento, sommato al costo dell'energia elettrica, comporta un costo di gestione più alto rispetto ai piani cottura a gas;
4. una zona di cottura, a seguito di distrazione, potrebbe rimanere accesa anche senza che vi sia del pentolame sopra, con rischio, in caso di contatto con il nostro corpo, di gravissime ustioni;
5. 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 molto elevata, comportando il rischio di ustioni più o meno gravi;
6. è richiesto più tempo per portare in temperatura il pentolame;

7. in Italia, con impianti elettrici standard da 3,3KW/h, in caso di uso di più zone di cottura e contemporaneamente di altri elettrodomestici, è possibile che si superi il massimo assorbimento consentito, causando l'intervento della protezione magnetotermica;
8. la pulizia del piano cottura in alcuni casi può risultare piuttosto critica poiché le elevate temperature delle zone di cottura tendono ad abbrustolire i residui di cibo che potrebbero cadere sulla superficie.

2.3 PIANO COTTURA ALOGENO

I piani cottura alogeni vengono alimentati dalla corrente elettrica e attraverso delle potenti luci alogene infrarosse ad alta efficienza, collocate al di sotto del piano cottura in vetroceramica, riscaldano il pentolame, 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 [3].



Figura 2.6: Lampada alogena

Le Figure 2.6, 2.8 mostrano i componenti ed il funzionamento del piano cottura.

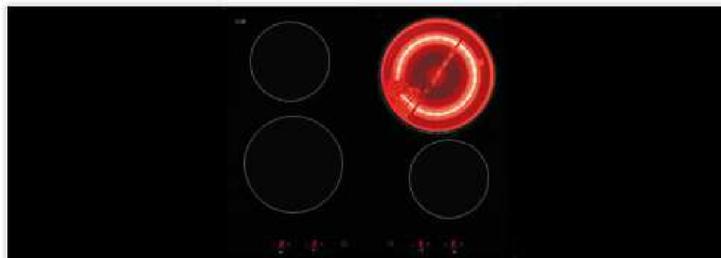


Figura 2.7: Piano cottura alogeno

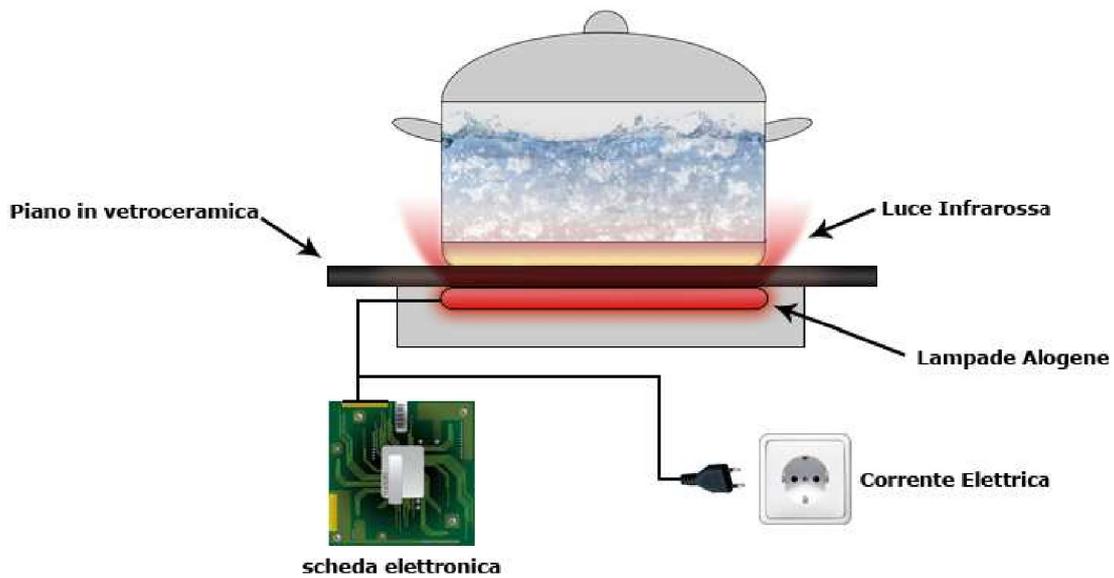


Figura 2.8: Piano cottura alogeno

Vantaggi del piano cottura in vetroceramica alogeno:

1. assenza di fiamma;
2. essendo alimentato a corrente elettrica, non sussistono i rischi del gas (asfissia o esplosioni da perdite);
3. trattandosi di una superficie perfettamente piana, non sussiste il rischio che il pentolame si ribalti;
4. tempi di reazione alla variazione dei gradi cottura molto più rapida dei piani radianti;
5. niente più ugelli che si otturano, come può accadere per i fornelli a gas.

Svantaggi del piano cottura in vetroceramica alogeno:

1. prezzo di acquisto più elevato rispetto ai piani cottura a gas, ma simile ai piani cottura radianti;
2. è necessario acquistare nuove pentole con il fondo perfettamente piatto e opaco;
3. il 58% di rendimento, sommato al costo dell'energia elettrica, comporta un costo di gestione più alto rispetto ai piani cottura a gas;
4. una zona di cottura, a seguito di distrazione, potrebbe rimanere accesa anche senza che vi sia del pentolame sopra, con il rischio, in caso di contatto con il nostro corpo, di gravissime ustioni;

5. 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 molto elevata, comportando il rischio di ustioni più o meno gravi;
6. bisogna prestare attenzione anche alla parte di vetroceramica che circonda la nostra zona di cottura, la quale a causa del forte calore può causare scottature;
7. è richiesto più tempo rispetto ai piani cottura a gas per portare in temperatura il pentolame, ma meno tempo rispetto ai piani cottura radianti;
8. in Italia, con impianti elettrici standard da 3,3KW/h, in caso di uso di più zone di cottura e contemporanee di altri elettrodomestici, è possibile che si superi il massimo assorbimento consentito, causando un blackout elettrico da parte del fornitore di energia;
9. la pulizia del piano cottura in alcuni casi può risultare piuttosto critica poichè le elevate temperature delle zone di cottura tendono ad abbrustolire i residui di cibo che potrebbero cadere sulla superficie.

2.4 PIANO COTTURA A INDUZIONE

Il principio di funzionamento della cottura a induzione è piuttosto semplice, in sintesi ciò che avviene è la generazione di un campo magnetico tramite il passaggio di corrente nell'induttore elettrico presente al disotto della piastra.



Figura 2.9: Bobina a induzione

Il campo magnetico genera a sua volta nel recipiente delle correnti di perdita, chiamate correnti di Foucault, le quali trasformano l'energia magnetica indotta in calore provocando il riscaldamento voluto, tale campo dà luogo al riscaldamento della sola zona di cottura infatti, si origina solo a contatto con il recipiente e si mantiene circoscritto alla superficie dello stesso. Tale procedimento permette una serie di vantaggi importanti quali il maggior rendimento e la minor dissipazione di energia [3] ma rende necessario l'acquisto di pentolame speciale, dotato di fondo magnetico (quindi ricco di materiale ferroso).



Figura 2.10: Piano cottura a induzione

In Figura 2.10 e 2.11 viene mostrato il funzionamento delle piastre a induzione nell'atto del riscaldamento dell'acqua.

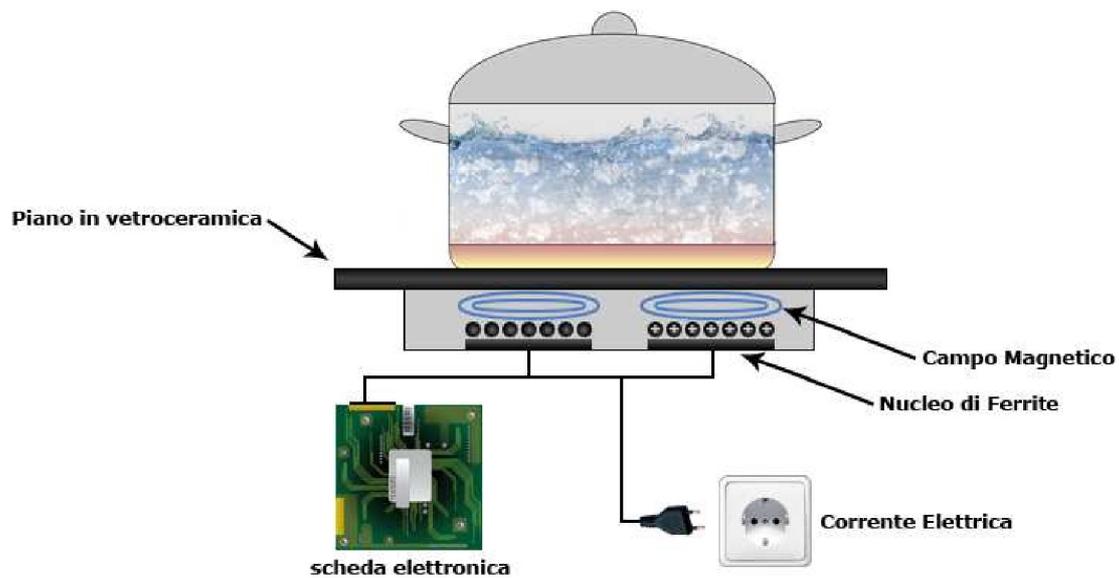


Figura 2.11: Piano cottura a induzione

Vantaggi del piano cottura ad induzione:

1. è molto facile da pulire;
2. essendo alimentato a corrente elettrica, non sussistono i rischi del gas (asfissia o esplosioni da perdite);
3. trattandosi di una superficie perfettamente piana, non sussiste il rischio che il pentolame si rovesci;
4. tempi di risposta alla variazione dell'intensità di calore, istantanei;
5. le zone di cottura sono dotate di riconoscimento automatico della pentola e si attivano solo in presenza di pentolame con fondo magnetico (ferroso);
6. virtualmente il piano in vetroceramica è come se non fosse presente per la tecnologia ad induzione, in quanto il campo magnetico è in grado di attraversarlo senza generare inutili sprechi di energia;
7. il piano in vetroceramica viene scaldato unicamente dal calore del pentolame stesso, quindi la temperatura di esercizio sarà nettamente inferiore rispetto ai piani radianti con resistenza o alogeni;
8. risparmio sulla bolletta elettrica rispetto ai piani radianti con resistenza e alogeni;
9. la parte di vetroceramica che circonda la nostra zona di cottura resta fredda, quindi non sussiste il rischio di scottature;

10. tempi di cottura per portare in temperatura il pentolame notevolmente ridotti, anche rispetto ai piani a gas;
11. assenza di fiamma;
12. niente più ugelli che si otturano, come può accadere per i fornelli a gas;
13. cottura perfettamente uniforme, grazie alla distribuzione del calore su tutto il fondo del pentolame.

Svantaggi del piano cottura ad induzione:

1. prezzo di acquisto più elevato rispetto ai piani cottura a gas, ma simile ai piani cottura radianti e alogeni;
2. è necessario nel 90% dei casi sostituire le pentole antiaderenti, in quanto quelle in commercio di solito sono realizzate con l'esterno in alluminio (quindi non risultano magnetiche) e la moka del caffè in quanto quasi sempre è in alluminio. Fortunatamente la maggior parte delle pentole in acciaio commercializzate, presenta tra i due strati del fondo un disco di ferro e dunque risulta essere magnetica, quindi funzionante sui piani ad induzione. E' importante quindi verificare con l'ausilio di una calamita che il fondo sia magnetico e dotato di superficie piatta;
3. il pentolame, in rame, in alluminio, in vetro o in ceramica non funziona sui piani ad induzione;
4. non si deve utilizzare in alcun caso pentolame con fondo di spessore molto sottile, in quanto il calore potrebbe deformarlo o addirittura fonderlo. E' sempre preferibile acquistare prodotti certificati per essere impiegati con piani ad induzione;
5. in Italia, con impianti elettrici standard da 3,3KW/h, in caso di uso di più zone di cottura e contemporanee di altri elettrodomestici, è possibile che si superi il massimo assorbimento consentito, causando l'intervento della protezione magnetotermica.

Capitolo 3

FUNZIONAMENTO DEL PIANO A INDUZIONE

3.1 DESCRIZIONE DEL SISTEMA

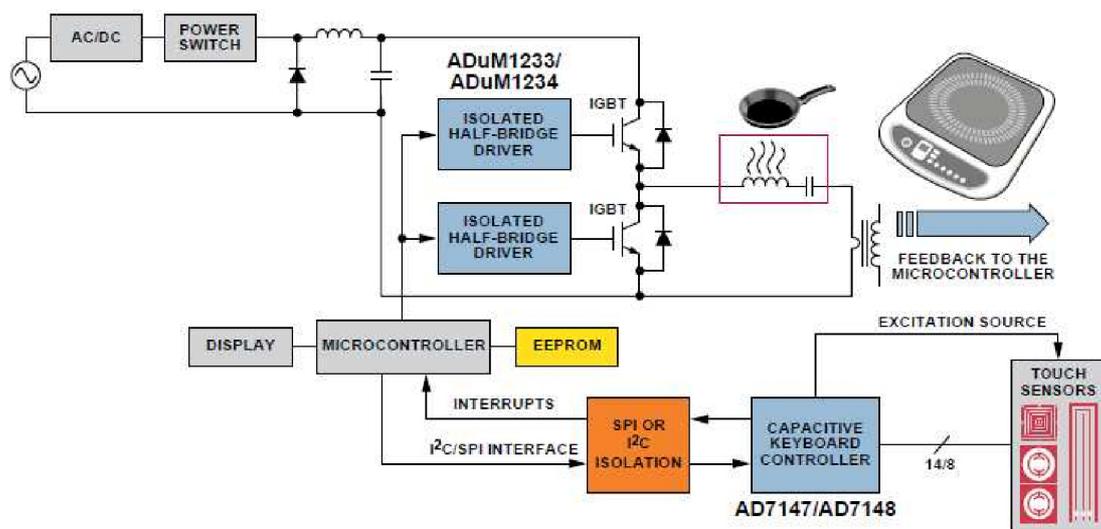


Figura 3.1: Sistema di funzionamento

In Figura 3.1 viene illustrato il sistema di cottura a induzione, che, come è stato trattato nel capitolo precedente, apporta una serie di vantaggi rispetto al piano tradizionale. L'elemento base su cui si fonda questo tipo di riscaldamento è l'induttore, il quale, genera il campo magnetico. La corrente alternata proveniente dall'alimentazione viene convertita in corrente continua grazie all'utilizzo del raddrizzatore, passando attraverso l'inverter ad alta frequenza per poi giungere alla bobina per generare così il campo magnetico attorno ad essa, successivamente nel momento in cui una pentola di metallo viene posta sulla piastra vengono generate delle correnti parassite, la cui energia viene dissipata sotto forma di calore, provocando così

il riscaldamento della pentola voluto. La Figura 3.2 mostra il susseguirsi delle operazioni descritte.

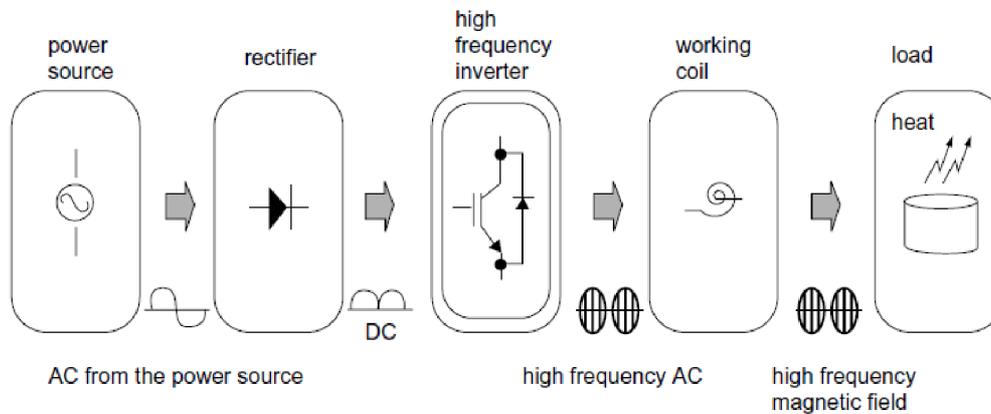


Figura 3.2: Sistema di funzionamento

Da un punto di vista elettronico, l'induttanza attraversata dalla corrente sinusoidale generata da un interruttore IGBT, regola il circuito di risonanza LC le cui perdite producono calore. Gli interruttori IGBT sono pilotati da un microcontrollore, il quale interagisce direttamente con il mondo esterno tramite dei sensori rilevando le disposizioni stabilite dall'utente (come ad esempio la temperatura che deve raggiungere la piastra relativamente al tipo di cottura che si decide effettuare), questo monitoraggio ha come scopo principale quello di far rientrare il funzionamento all'interno dei limiti di sicurezza, così da evitare problemi di efficienza o peggio ancora di guasti del sistema, ciò avviene grazie al sensore principale, costituito da un trasformatore posto in serie con la piastra a induzione che controlla il valore della corrente permettendo il mantenimento, attraverso la piastra a induzione, del valore adeguato di corrente corrispondente al livello di cottura desiderato.

Il circuito risonante LC è costituito dall'induttanza e dalle capacità della piastra a induzione, dalla pentola posta sul piano cottura e dal trasformatore, detto ciò risulta naturale pensare che la frequenza di lavoro possa essere determinata fissando i parametri delle variabili L e C , sfortunatamente, i valori dell'induttanza e della capacità, e conseguentemente quelli della frequenza di risonanza, dipendono dalle dimensioni, dalla forma e dal tipo di materiale della pentola utilizzata, per questo motivo, i diversi livelli di cottura necessari alle singole esigenze non permettono di fissare una frequenza standard.

Un metodo efficiente per settare i livelli di cottura è basato sulla misurazione della corrente, la quale fornisce il valore di riferimento grazie alla rilevazione della quantità di energia dissipata. Programmando il microcontrollore in relazione al rilevamento del valore della corrente si ottiene un valore appropriato della frequenza di modulazione PWM che regola gli IGBT (si trova tipicamente nel range compreso tra i 20kHz ed i 100kHz). Il segnale del PWM proveniente dal microcontrollore possiede un duty cycle fisso di 0.5 e la frequenza viene regolata in dipendenza della potenza richiesta relativa al livello di calore voluto, a causa del-

l'elevata tensione diviene importante provvedere ad un isolamento elettrico in presenza dei punti critici del sistema.

Esistono due fondamentali motivazioni che portano all'indispensabile realizzazione dell'isolamento sopraccitato, in primo luogo per la protezione della persona e dell'attrezzatura dove sussiste la possibilità di esposizione a sovratensioni o sovracorrenti, in secondo luogo per evitare il contatto a massa. In particolare risulta essenziale isolare lo stadio di potenza del piano a induzione dal microcontrollore e dagli altri circuiti digitali. Una via per far ciò consiste nell'isolare il comando degli interruttori IGBT utilizzando una serie di gate-driver isolati, basati sulla tecnologia ADI's innovative iCoupler, che ha una serie di vantaggi rispetto alle tradizionali soluzioni di isolamento [13].

3.2 TECNOLOGIA iCOUPLER

La tecnologia di isolamento iCoupler ha un approccio all'isolamento simile a quello del trasformatore. Integra microtrasformatori e circuiti elettronici, e possiede tutti i vantaggi degli optoaccoppiatori, dei trasformatori discreti e delle tecnologie dei semiconduttori, ma ha la qualità di esser priva dei loro svantaggi. Le limitazioni dell'optocoupler includono l'eccessivo consumo di potenza, un elevato tempo di errore (incertezza), limitata velocità di trasmissione dati e la elevata sensibilità alla temperatura.

Gli iCoupler sono strutture planari realizzate con strati metallici aventi in cima un ulteriore strato d'oro sul quale si effettua la passivazione, cioè la formazione di uno strato di ossido che aderisce perfettamente alla superficie del pezzo impedendone una successiva ossidazione, al di sotto del quale si ha uno strato di 20 μ m di polimide che permette un isolamento anche superiore ai 5kV [4]. I circuiti di CMOS collegati alle due estremità forniscono l'interfaccia tra ogni trasformatore ed i segnali esterni, i dati trasmessi all'ingresso al circuito secondario sono codificati grazie all'utilizzo di impulsi di 1ns (provenienti dal circuito primario), inoltre, il circuito di refresh, posizionato all'ingresso, assicura che in ogni istante lo stato di uscita corrisponda a quello di ingresso.

Dato che lo scopo degli iCoupler consiste nell'isolare l'ingresso dall'uscita, il circuito posizionato a un lato del trasformatore deve esser contenuto in un chip separato dagli altri, i trasformatori possono così venir situati o su entrambi i chip o su un terzo come mostrato in Figura 3.4 [12]. L'insieme di chip (chipset) è assemblato all'interno di un contenitore di plastica, simile a quello utilizzato da una vasta gamma di dispositivi a semiconduttore, (una caratteristica importante dei dispositivi iCoupler è la capacità di trasmettere e ricevere segnali dai canali dello stesso blocco). Dato che i dispositivi iCoupler sono bidirezionali, i segnali possono esser trasmessi in entrambe le direzioni, a condizione che ciò sia consentito dal resto del circuito, in questa maniera si possono avere più configurazioni possibili.

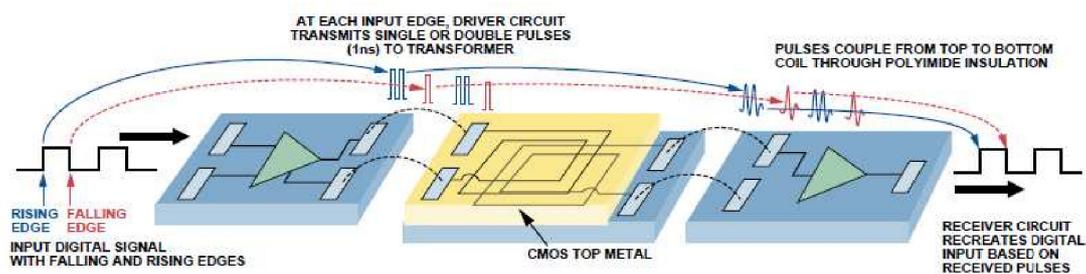


Figura 3.3: Tecnologia iCoupler

La tecnologia iCoupler apporta vantaggi in diverse aree:

- integrazione (dimensioni/costi)
- consumo di potenza
- facile utilizzo
- affidabilità

In Figura 3.4 viene mostrato il componente ADuM140x.

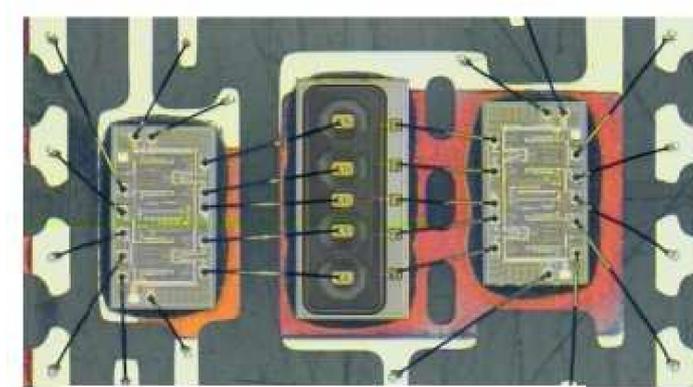


Figura 3.4: ADuM140x

3.3 ISOLAMENTO DEGLI INTERRUTTORI IGBT USANDO LA TECNOLOGIA iCOUPLER

La tecnologia iCoupler può essere definita come facente parte della famiglia degli interruttori a gate isolato, includendo il 2-channel AduM1233 rappresentato in Figura 3.5, il quale garantisce l'isolamento tra l'uscita e l'ingresso, e anche tra le due uscite [5], cioè tra la sfera di controllo e quella di potenza degli IGBT.

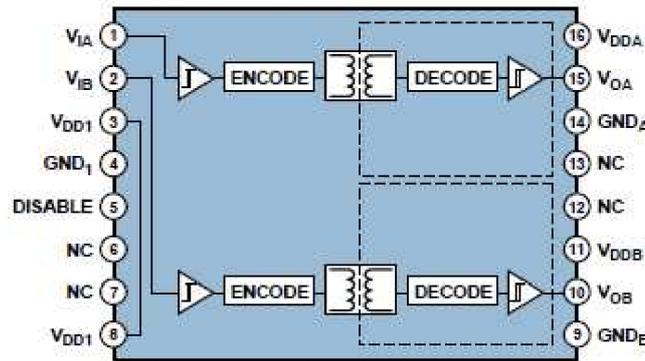


Figura 3.5: AduM1233

La tensione al circuito d'ingresso è fornita da un generatore di tensione isolato e può richiedere uno o più stadi di conversione, risulta necessario utilizzare un generatore di tensione di 5V per il microcontrollore e di 15V per la parte del circuito facente parte l'interruttore IGBT, solo in questo modo è possibile garantire una buona efficienza.

L'iCoupler a gate isolato, visionabile nella figura 3.6, deve fornire una corrente di picco maggiore a 100mA, per ottenere così un ulteriore guadagno e ottimizzare quindi le prestazioni.

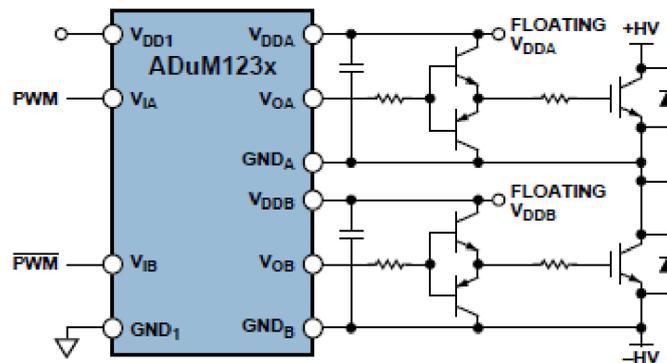


Figura 3.6: AduM123x

Data l'importanza della relazione tra i due canali (con gli IGBT comandati dai segnali in antifase del PWM), valutando la velocità, la stabilità e l'affidabilità della tecnologia iCouper, si evidenzia come quest'ultima sia particolarmente vantaggiosa se comparata ai LED e ai fotodiodi. Come evidenziato nei grafici di Figura 3.7, la propagazione ritarda sui margini di salita dei due canali misurati circa di circa 100ps, mentre la tensione generata rientra nell'intervallo tra i 12V e i 18V per le uscite e tra i 4.5V e i 5.5V per gli ingressi. I margini temporali risultanti seguono completamente le variazioni degli IGBT, dimostrando l'efficienza dell'intero sistema, l'AduM1233 offre un effettivo isolamento galvanico tra l'ingresso del dispositivo e le due uscite del circuito, dove ogni singola uscita (isolata) può operare nell'intervallo di più o meno 700V e contrariamente all'ingresso, sopporta tensioni negative.

La differenza di potenziale tra l'alto e il basso livello del generatore (+HV,-HV) non deve superare i 700V, valore che tipicamente rientra nei parametri di voltaggio utilizzato nella cottura a induzione domestica.

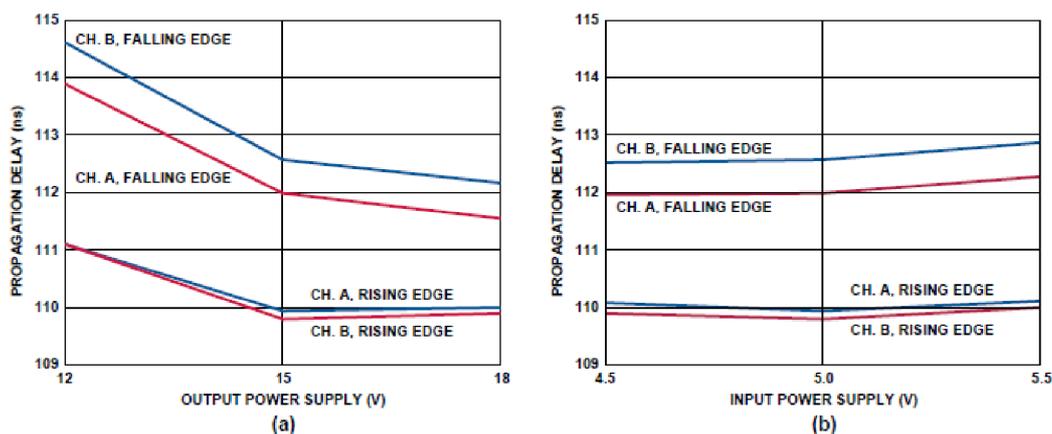


Figura 3.7: Ritardo della propagazione del segnale

3.4 ISOLAMENTO DELL'INTERFACCIA UTENTE CON LA TECNOLOGIA iCOUPLER

Se viene utilizzata una tastiera capacitiva, l'interfaccia tra il microcontrollore e il controllore di tastiera capacitiva AD7147 [6] o AD7148 [7] può venir implementata in serie o con SPI (Serial Peripheral Interface, sviluppato da Motorola) o con I^2C (Inter-Integrated Circuit, marchio registrato della Philips Semiconductor). L'interfaccia bidirezionale I^2C è utilizzata per comunicazioni a velocità di trasmissione relativamente bassa su brevi distanze, dove il basso costo è rilevante. I^2C permette di contenere i costi utilizzando due soli cavi bidirezionali, tuttavia questo vantaggio economico viene meno quando il bus dell' I^2C è isolato con gli optoisolatori, che sono unidirezionali e non gestiscono i segnali bidirezionali. I segnali di trasmissione e di ricezione di ciascun cavo devono quindi essere separati, ottenendo quattro cavi isolati con quattro optoisolatori, inoltre è richiesto l'utilizzo di un buffer specializzato nell'eliminazione del bloccaggio e dei disturbi all'interno dell'interfaccia isolata.

I componenti extra aumentano costo e complessità, occupando un significativo spazio nella scheda, per questo le soluzioni integrate di isolamento disponibili nella tecnologia iCoupler sono ottimali in quanto riducono lo spazio richiesto e la complessità della progettazione, il tutto ad un basso costo. AduM1250 [8] Figura 3.8 e ADuM1251, [9] includono un reale isolamento bidirezionale e incorporano un buffer atto ad eliminare i disturbi e il bloccaggio, questo grado di integrazione comprensiva limita i componenti esterni richiesti a due condensatori di fuga e a due coppie di resistenze di carico (specificate nello standard I^2C) e offre un'interfaccia I^2C a basso costo. Dettagli sulle applicazioni di questi dispositivi possono essere trovati nella AN-9137 [10] (Application Note Isolating PC Interfaces).

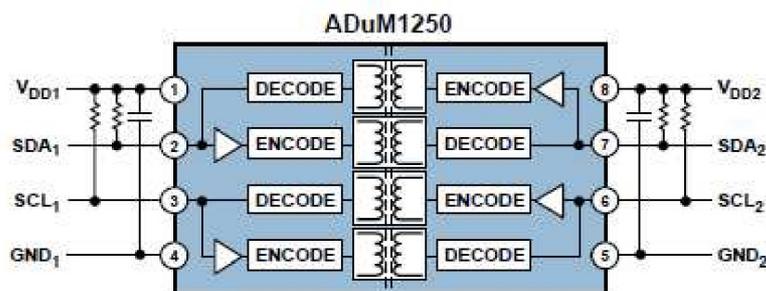


Figura 3.8: AduM1250

3.5 RILEVAMENTO DELLA PRESENZA DELLA PADELLA SUL PIANO A INDUZIONE

Essenziale è il riuscire a rilevare la presenza della padella nel piano a induzione per una serie di motivi già esposti nei precedenti paragrafi. Misurando le elevate tensioni che devono essere sostenute ai capi del collettore (+HV) degli interruttori IGBT, con l'ausilio di una resistenza, diviene possibile inviare al microcontrollore (in Figura 3.9 è riportato un Microcontrollore PIC 18F8720 in contenitore 80-pin TQFP) un segnale per comunicare ogni variazione di tensione al collettore degli IGBT. Nel momento in cui l'utente avvia la cottura accendendo la piastra e ponendo la pentola sul piano, il trasferimento di energia effettuato e la variazione di corrente di picco produrrà una variazione della tensione al collettore. Quando la padella viene rimossa dal piano induttore si avrà un'altra variazione di tensione, ma contraria alla precedente, quindi, paragonando questa variazione di tensione con una tensione di soglia stabilita, con l'ausilio di un comparatore (ADCMP3xx), verrà rilevata la presenza della padella sul piano a induzione [11]. Se non viene rilevata alcuna pentola un segnale di interruzione verrà mandato al microcontrollore il quale provvederà a ristabilire la frequenza del PWM affinché gli IGBT smettano di consentire il passaggio di corrente. Questo offre una sicurezza aggiuntiva nel caso in cui l'utente si dimentichi di spegnere il piano induttore.



Figura 3.9: Microcontrollore

Capitolo 4

TIPOLOGIE DI INVERTER E STRATEGIE DI MODULAZIONE

4.1 INTRODUZIONE

Il convertitore a mezzo ponte è il più usato per una serie di requisiti elettrici dei quali sono dotati i suoi componenti, per la sua semplicità e per il suo rapporto costo-efficienza [14]. Il carico è composto dalla padella e dalla bobina, basandosi sull'analogia con il trasformatore, il loro accoppiamento è modellato come il collegamento in serie di un induttore ed un resistore, che è definito dai valori di L_{eq} e R_{eq} come in Figura 4.1 [15].

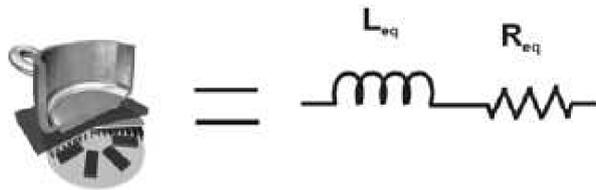


Figura 4.1: Carico

I valori di L_{eq} e R_{eq} dipendono dalla frequenza della corrente di carico e le piastre per il riscaldamento a induzione domestico permettono di riscaldare le padelle ferromagnetiche in una gamma di potenza tra i 50 W ed i 3300 W [16] [17].

Le strategie di modulazione generalmente utilizzate nel riscaldamento a induzione domestico sono i Square Wave (SW) e l'Asymmetrical Duty Cycle (ADC), nel controllo SW, il parametro che regola la potenza di uscita è la frequenza di commutazione (f_s), mentre nel controllo ADC, i parametri utilizzati sono la frequenza f_s e il duty-cycle (D), da evidenziare che in questi controlli quando f_s aumenta o quando D si riduce si ha una diminuzione di potenza. Le Figure 4.2 e 4.3 mostra una topologia di convertitore half-bridge con le rispettive forme d'onda della corrente di carico (I_L) e della tensione di uscita (V_0) in modalità di funzionamento alla prima armonica [18] [19].

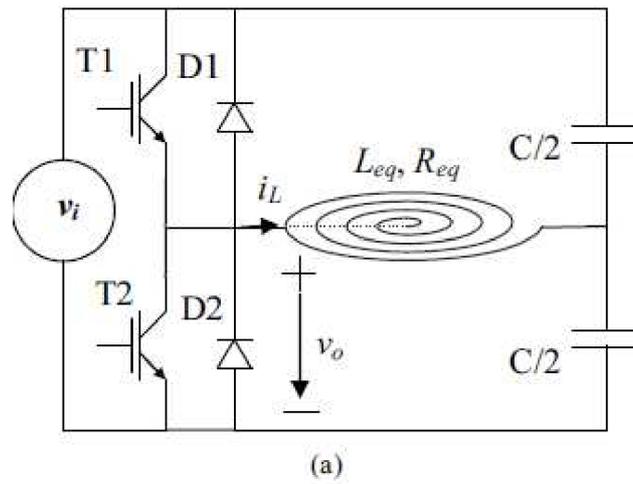


Figura 4.2: Half Bridge

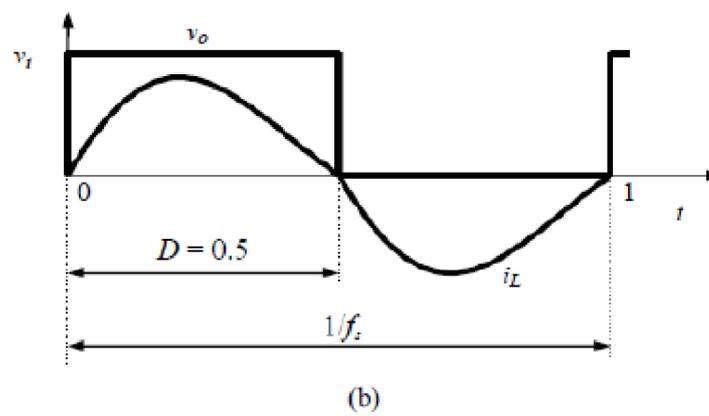


Figura 4.3: Funzionamento alla prima armonica

4.2 CARATTERISTICHE DEL CARICO

In questo e nei successivi paragrafi di questo capitolo verranno definiti i valori che devono assumere la resistenza, l'impedenza e gli altri elementi, nonché la modalità di progetto della piastra tali da permetterne il funzionamento. I dati utilizzati sono stati prelevati dall'articolo [21]. I valori dell'induttanza e della resistenza equivalente del carico dipendono dalle caratteristiche dell'induttore, dalla frequenza della corrente di carico e dal materiale della padella. La Figura 4.4 mostra la dipendenza della frequenza dall'induttanza e dalla resistenza per pentole ferromagnetiche e non ferromagnetiche (come materiale non-ferromagnetico viene considerato in figura l'alluminio). In Figura 4.4(a) viene evidenziato che il valore dell'induttanza rimane circa costante al variare della frequenza e che per le pentole non-ferromagnetiche (L_{eqNF}) è circa la metà di quella utilizzata per le padelle ferromagnetiche (L_{eqF}) sempre mantenendo la stessa frequenza (4.1). In Figura 4.4(b) si mostra che la resistenza aumenta con l'aumentare della frequenza e si rileva che la resistenza per i materiali ferromagnetici (R_{eqF}) è di circa dieci volte superiore a quella per le padelle in materiale non ferromagnetico (R_{eqNF}), rapportati entrambi allo stesso valore di frequenza (4.2).

$$L_{eqF} = 2 \cdot L_{eqNF} \quad (4.1)$$

$$R_{eqF} = 10 \cdot R_{eqNF} \quad (4.2)$$

Il valore della potenza di uscita può essere calcolato come nella (4.3)

$$P_0 = \frac{V_{0rms h}^2}{R_{eq}} \quad (4.3)$$

dove $V_{0rms h}$ indica il valore efficace della tensione di uscita dell'armonica h . Quando V_0 è un segnale simmetrico a onda quadra si può definire il valore efficace della funzione armonica come in (4.4)

$$V_{0rms h} = \frac{2 \cdot V_i}{\pi \cdot h \cdot \sqrt{2}}, \quad h \text{ odd} \quad (4.4)$$

dove il valore di V_i è la tensione di ingresso dell'inverter.

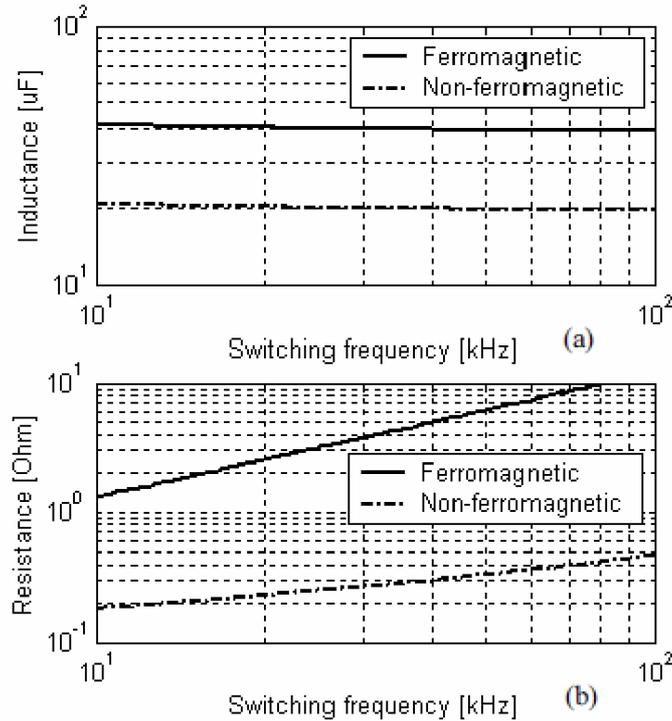


Figura 4.4: Andamento della resistenza e dell'induttanza al variare della frequenza

La frequenza di risonanza (f_r) risulta

$$f_r = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_{eq} \cdot C}} \quad (4.5)$$

Il valore della capacità si ottiene dalla (4.6)

$$C = \frac{1}{4 \cdot \pi^2 \cdot f_r^2 \cdot L_{eq}} \quad (4.6)$$

Un valore tipico della frequenza di commutazione per la massima potenza di uscita per i materiali ferromagnetici è di 23 kHz [21]. La resistenza e l'induttanza utilizzate nel grafico di Figura 4.4 sono approssimativamente pari a 3 Ω ed a 40 µH, mentre la capacità di risonanza per questo carico calcolata nella (4.6) è di 1200 nF con una frequenza f_r pari a 23 kHz. La potenza di uscita ottenuta risulta essere così 3500 W e posta $V_i = 230$ V, si ottiene conseguentemente il valore efficace della corrente di carico pari a 34 A.

Nel caso di materiali non ferromagnetici, la frequenza di risonanza è di 32 kHz, la resistenza di 0,3 Ω e l'induttanza di 20 µH ed il massimo valore della potenza di uscita in tali condizioni di frequenza di risonanza è di 36 kW e conseguentemente il valore efficace della corrente risulta 345 A. Queste condizioni non sono accettabili per un utilizzo domestico, a causa del superamento dei limiti concessi dai dispositivi dell'inverter. Si evince però da questi valori che la resistenza per i materiali non-ferromagnetici è alquanto bassa e che la massima potenza

di uscita e la corrente di carico devono essere elevate per poter ottenere prestazioni accettabili dell'inverter [20]. Al fine di aumentare questa resistenza e diminuire la potenza massima di uscita e la corrente di carico si propone la modalità di funzionamento alla terza armonica.

4.3 MODALITA' DI FUNZIONAMENTO ALLA TERZA ARMONICA

La modalità di funzionamento alla terza armonica (THOM) è indirizzata a ottenere una frequenza di funzionamento della corrente nell'induttore pari alla terza armonica della frequenza di switching. La Figura 4.5 mostra la forma d'onda tipica alla THOM.

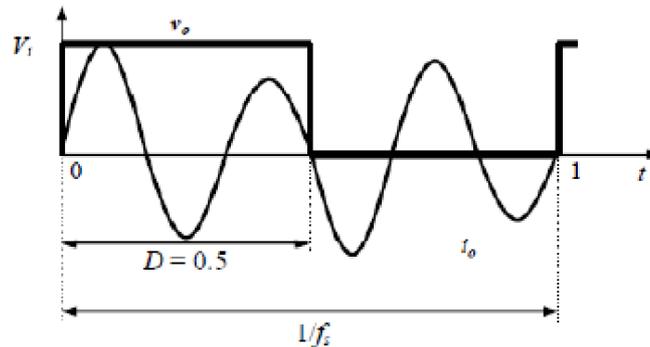


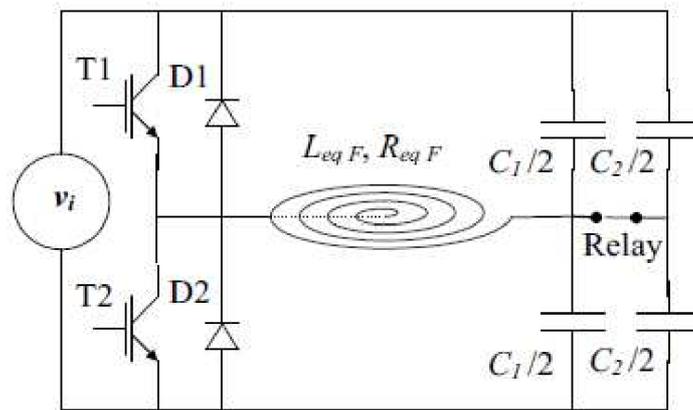
Figura 4.5: Modalità di funzionamento alla terza armonica

Le caratteristiche principali di questa modalità di funzionamento sono: in primo luogo, una maggiore resistenza dato che essa aumenta all'aumentare della frequenza della corrente nell'induttore (infatti si riscontra che alla THOM la frequenza è di tre volte superiore rispetto alla FHOM , per esempio quando la resistenza nella THOM è di $0,4\Omega$, la frequenza dell'induttore è di 69 kHz [21]), in secondo luogo, il valore efficace della tensione di uscita alla terza armonica è circa di tre volte inferiore di quello riscontrato alla prima armonica. Il valore efficace della tensione di uscita può essere calcolato con la (4.4) ed in tal caso, utilizzando i dati precedentemente impostati, risulterebbe rispettivamente di 34,5 V alla THOM e di 103,5V alla FHOM. Queste differenze dimostrano che la massima potenza raggiungibile per la THOM è inferiore a quella per la FHOM, inoltre utilizzando la (4.6), si evince che la massima potenza calcolata per la THOM corrisponde ad 2.980W, valore simile a quello ricavato per le pentole in materiale ferromagnetico.

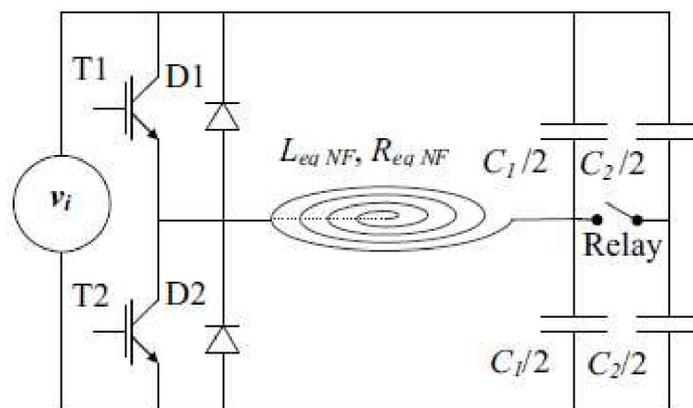
4.4 TOPOLOGIA DELL'INVERTER

Il requisito necessario che deve possedere l'inverter per lavorare alla modalità di funzionamento alla terza armonica consiste nell'aver un adeguato valore di capacità equivalente, il quale deve poter essere modificato nel momento in cui il carico corrisponde ad un tegame in materiale non-ferromagnetico. Il funzionamento alla terza armonica viene impostato per i materiali ferromagnetici (f_{sF}) e quindi per garantire l'utilizzo a entrambi si pone $f_{sF} = f_{sNF}$ con la conseguente necessità di intervenire sul valore della capacità equivalente (le relazioni tra le capacità e le frequenze dei diversi materiali verranno presentate nel paragrafo successivo).

La topologia di inverter utilizzata corrisponde ad un convertitore half-bridge avente in aggiunta un relè per permettere il cambiamento del valore del condensatore di risonanza, la Figura 4.6 (a) mostra la configurazione dell'inverter per pentole ferromagnetiche, dove il relè supplementare è spento (chiuso), contrariamente la configurazione dell'inverter per le pentole di materiale non-ferromagnetico è mostrato in Figura 4.6 (b), dove il relè è aperto.



a)



b)

Figura 4.6: Funzionamento dell'half bridge con relè

La configurazione iniziale del circuito è quella realizzata in figura 4.6(a) con il relè spento, quando il sistema di controllo rileva la presenza di una pentola, identifica il materiale di cui è realizzata (ferromagnetico o non ferromagnetico) e se la pentola è ferromagnetica il relè rimane chiuso e il condensatore di risonanza sarà costituito da $C_1 + C_2$ chiamato (C_F) (Figura 4.6(a)), se contrariamente viene rilevata la presenza di una padella in materiale non-ferromagnetico, il relè viene aperto ed il condensatore di risonanza sarà pari a C_1 denominata (C_{NF}) (Figura 4.6(b)).

4.5 CRITERI DI PROGETTAZIONE

La realizzazione di questo inverter ad eccezione dell'aggiunta del relè è simile a quella di un tipico convertitore half-bridge.

I valori dei condensatori determinano la massima potenza di uscita ed il range di frequenza di switching accettabile, il criterio utilizzato per tale progettazione è basato sull'uguaglianza della frequenza di commutazione per la massima potenza di uscita delle pentole in materiale ferromagnetico e non. La frequenza di commutazione è così calcolata nella (4.7)

$$f_s = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot h \cdot \sqrt{L_{eq} \cdot C}} \quad (4.7)$$

i valori di frequenza di commutazione per pentole ferromagnetiche e per le pentole non-ferromagnetiche sono rispettivamente indicate nella (4.8) e nella (4.9)

$$f_{sF} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_{eqF} \cdot C_F}} \quad (4.8)$$

$$f_{sNF} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_{eqNF} \cdot C_{NF}}} \quad (4.9)$$

le capacità per le padelle in materiale ferromagnetico e non-ferromagnetico possono essere ricavate dalla (4.8) e dalla (4.9) ponendo $f_{sF} = f_{sNF}$.

$$C_{NF} = \frac{L_{eqF}/L_{eqNF}}{9} \cdot C_F \quad (4.10)$$

Le capacità C_1 e C_2 possono essere calcolate come nella (4.11) e (4.12).

$$C_1 = C_{NF} \quad (4.11)$$

$$C_2 = C_F - C_{NF} \quad (4.12)$$

Per il prototipo sperimentale descritto nell'articolo [21] i valori di L_{eqF} e di C_F sono rispettivamente di 40 μ H e di 1200nF, diversamente l'induttanza L_{eqNF} è di 20 μ H per una frequenza di corrente di induzione tre volte superiore della frequenza di switching. Il valore di calcolato con (4.10) è di 270nF, ma non essendo tale valore disponibile, il valore di C_{NF} è approssimato a 300 nF. I valori di C_1 e C_2 calcolati grazie alle (4.11) e (4.12) sono pari rispettivamente a 300 nF e 900 nF.

La Figura 4.7 mostra il prototipo del convertitore half-bridge modificato, tali modifiche consentono di alimentare uno degli induttori con i due singoli inverter half-bridge, ottimizzando così le perdite di potenza dei dispositivi elettronici. Il controllo risulta essere digitale, realizzato utilizzando un Field Programmable Gate Array (FPGA) integrato nella scheda elettronica.



Figura 4.7: Esperimento

4.6 RISULTATI SPERIMENTALI

Il prototipo di inverter realizzato per esser utilizzato nei piani cottura che accettano l'utilizzo di pentole sia in materiale ferromagnetico che non-ferromagnetico è stato testato, per provarne l'efficacia, su piastre su cui sono state posate padelle in acciaio ed in alluminio. Il test è stato eseguito per due livelli di potenza di uscita, alta potenza e bassa potenza. La Figura 4.8 indica le principali forme d'onda per una padella di materiale ferromagnetico la cui potenza di uscita e frequenza di commutazione sono rispettivamente di 2000 W e di 22,5 kHz. I segnali del transistor di controllo sono motivati nella parte alta di Figura 4.8 mentre i segnali di V_o e I_L sono sottostanti.

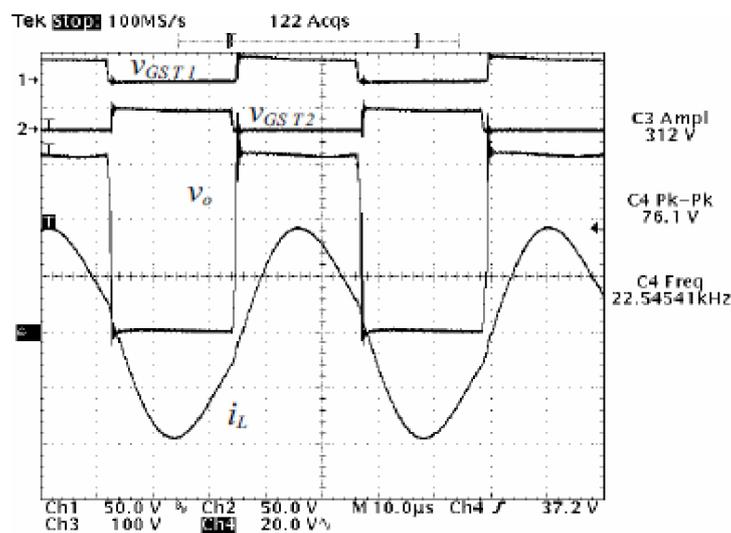


Figura 4.8: Risultati sperimentali

La Figura 4.9 mostra le principali forme d'onda e la potenza di uscita per il tegame non-ferromagnetico.

La frequenza di commutazione è di 22,3 kHz e l'armonica principale della corrente si trova a 67kHz, per quanto riguarda queste forme d'onda è possibile trarre alcune conclusioni:

1. i valori di picco ed il valore efficace di corrente nell'induttore per le padelle non-ferromagnetiche sono superiori ai valori assunti per le pentole in materiale ferromagnetico aventi la stessa potenza di uscita. Si riportano i corrispettivi valori di picco effettivi, pari rispettivamente a 133A ed a 70A per le pentole non ferromagnetiche, a 38A e a 27A per le ferromagnetiche. Si riscontra che a causa dell'aumento della corrente di induzione le perdite di conduzione e di commutazione dei dispositivi in conseguenza aumentano;

2. la corrente di cut-off (una debole corrente tra il source e il drain presente nella regione di sottosoglia) per le pentole non-ferromagnetiche è accettabile alla modalità di funzionamento alla terza armonica, al contrario è piuttosto elevata alla prima armonica a causa della frequenza di commutazione che è molto al di sopra della frequenza di risonanza.

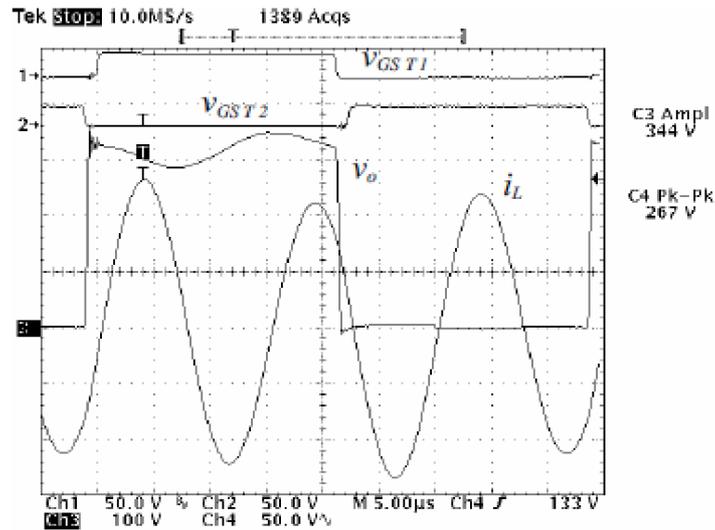


Figura 4.9: Risultati sperimentali

La Figura 4.10 mostra le principali forme d'onda per la padella in materiale ferromagnetico con la relativa bassa potenza di uscita. La potenza di uscita è di 450 W e la frequenza di commutazione corrisponde a 58,3 kHz.

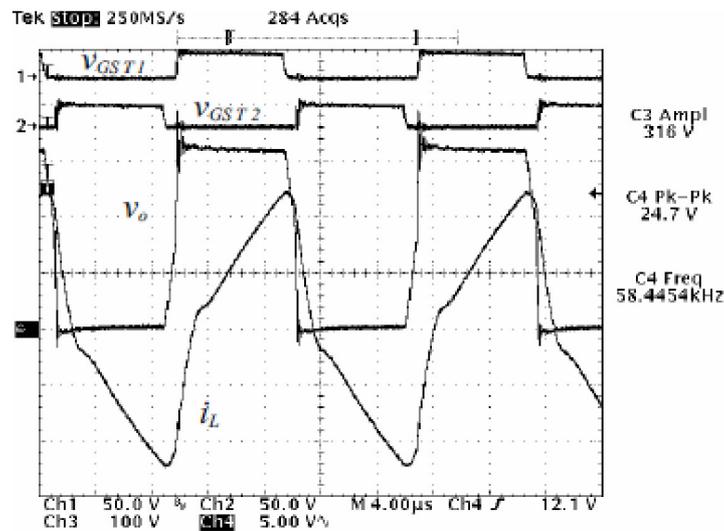


Figura 4.10: Risultati sperimentali

La Figura 4.11 mostra le principali forme d'onda per le padelle non ferromagnetiche poste nelle stesse condizioni di potenza delle ferromagnetiche. Assumendo la frequenza di commutazione pari a 23,3 kHz e l'armonica principale dell'induttore pari a 70kHz, confrontando le forme d'onda per le basse e le alte potenze di uscita, si può osservare che la variazione di frequenza necessaria per pentole non-ferromagnetiche è inferiore rispetto a quella per le ferromagnetiche, calcolate per la stessa potenza di uscita (nell'esempio la variazione di frequenza necessaria è pari a 1kHz per le prime e di 36 kHz per le seconde, questa diversità è dovuta alle diverse caratteristiche proprie dei materiali ferromagnetici e non-ferromagnetici).

Le perdite di calore sono più elevate nella fascia di alta potenza di uscita (per questo motivo i valori di efficienza sono interessanti a questa gamma di potenza), l'efficienza misurata per pentole ferromagnetiche è del 93% e per le non ferromagnetiche è del 70% (tali incrementi sono stati misurati con l'analizzatore di potenza PZ4000 YOKOGAWA). Il rendimento per le pentole non ferromagnetiche è inferiore a quelle ferromagnetiche a causa del valore efficace della corrente dell'induttore e di cut-off, infatti, per queste pentole, si riscontrano valori superiori di correnti.

Infine, questi risultati sperimentali mostrano che le pentole non ferromagnetiche, come quelle in alluminio, possono essere scaldate con un'accettabile prestazione per la modalità di funzionamento di un inverter alla terza armonica.

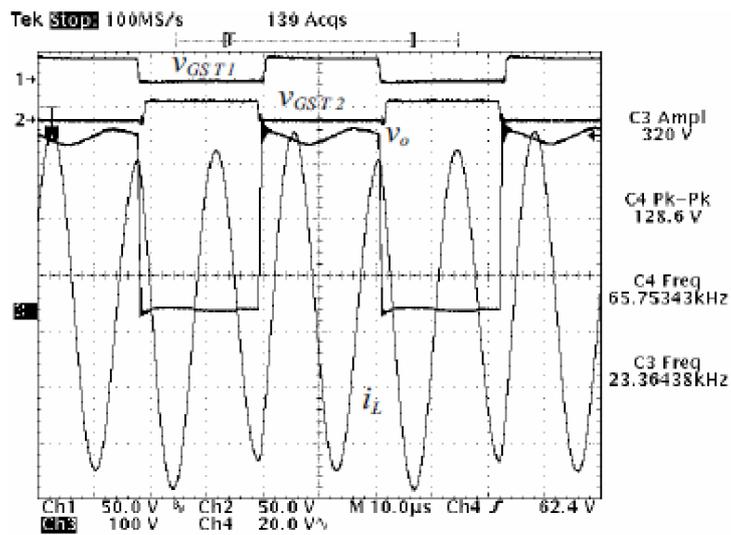


Figura 4.11: Risultati sperimentali

Il vantaggio principale di questa topologia di inverter è che grazie ad esso non è necessario cambiare la bobina induttrice per pentole non ferromagnetiche, ma risulta indispensabile modificare il valore del condensatore di risonanza.

Capitolo 5

CONTROLLO DIGITALE

5.1 MODALITA' DI FUNZIONAMENTO

Le ottime prestazioni e la riduzione dei costi dei circuiti digitali hanno reso possibile la loro applicazione per il controllo di potenza nei convertitori. Il circuito di controllo genera i segnali di gate (il cui compito consiste nel bloccare o trasmettere il segnale di ingresso) in risposta alle correnti e alle tensioni di ingresso e del carico. Il vantaggio principale di questi controllori (i cui segnali vengono campionati attraverso convertitori A / D) è la flessibilità e l'abbreviazione del ciclo di progettazione (vengono di seguito presentate alcune implementazioni digitali VLSI indirizzate al controllo nei piani cottura a induzione).

Prevalentemente, il riferimento di potenza è ottenuto grazie a un'interfaccia che traduce i comandi esterni che vengono inviati con l'ausilio di una manopola o di un sensore capacitivo, la prima cosa che l'utente si aspetta dall'acquisto di un apparecchio è l'aver un controllo costante e affidabile in risposta ad un riferimento dato, questi requisiti sono raggiungibili solo con un'ottima tempistica nella trasmissione e un'elevata precisione nella misurazione. Tutto ciò è ottenuto grazie ai convertitori analogico-digitale di primo ordine sigma-delta ($\Sigma\Delta$), che hanno il compito di monitorizzare l'andamento della corrente e della tensione. Si prediligono i $\Sigma\Delta$ ai convenzionali ADC discreti in quanto questi ultimi richiedono un'elevata velocità di campionamento e risoluzione, difficile da ottenere [23]. La Figura 5.1 mostra il blocco di condizionamento del segnale ed i modulatori $\Sigma\Delta$ di primo ordine utilizzati per convertire la corrente di carico I_L e la tensione di ingresso VDC in segnali digitali. La corrente di carico viene rilevata attraverso un trasformatore di corrente (CT) e ne viene calcolata la tensione grazie all'ausilio della resistenza R_T . Il modulatore di corrente $\Sigma\Delta$ campiona la frequenza f_{CLK} che rappresenta la frequenza di clock della FPGA e la tensione nel carico è stimata misurando la tensione V_{DC} .

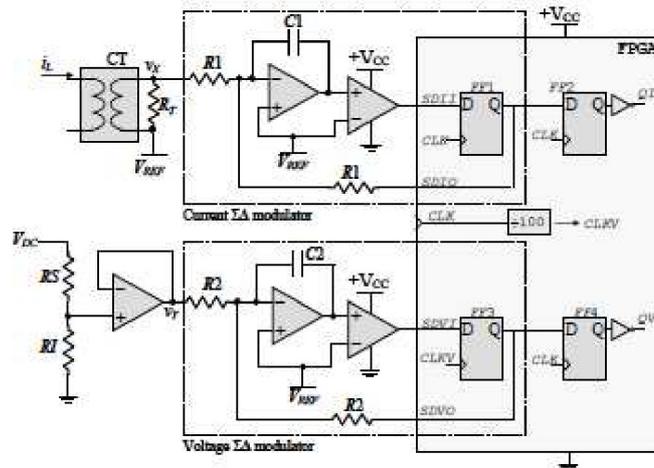


Figura 5.1: Modulatore digitale

Il modulatore digitale è stato programmato in VHDL e genera i segnali di gate e due segnali complementari QH e QL (tenendo conto anche della presenza dei tempi morti per evitare i switching di overlap). I parametri del segnale di gate sono memorizzati nei registri di configurazione, REG_TS contiene il periodo di commutazione, REG_D la larghezza di impulso ed REG_DT il tempo morto. QH e QL sono generati utilizzando dei contatori ed una macchina a stati finiti (FSM) RAMA a quattro stati, QH è attivato negli stati S1 e S3, mentre QL in S3. Le transizioni tra gli stati sono determinate confrontando i contatori con i valori conservati nei registri di configurazione, MCON è il registro di controllo e la FSM rimane in stato di reset fino a quando il bit MR del registro di controllo MCON è in set Figura 5.2.

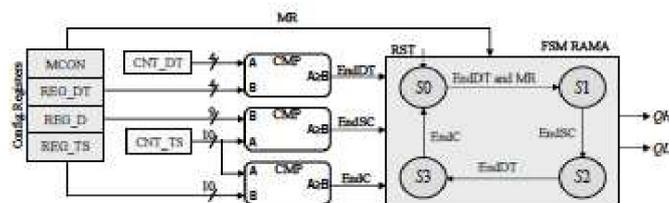


Figura 5.2: Macchina a stati finiti

Le strategie di modulazione sono attuate dinamicamente variando REG_TS, REG_DT e REG_D, secondo alcuni schemi di modulazione di frequenza. Uno tra i più utilizzati e facili da implementare è la modulazione triangolare, che consiste nel variare la frequenza di commutazione intorno al punto di lavoro secondo una legge triangolare, pertanto, questa modulazione è tempo dipendente. La Figura 5.3 mostra il rapporto tra l'ampiezza e il periodo del triangolo, si nota che la riduzione di EMI (interferenze elettromagnetiche) dipende dalla frequenza di modulazione dei parametri del triangolo.

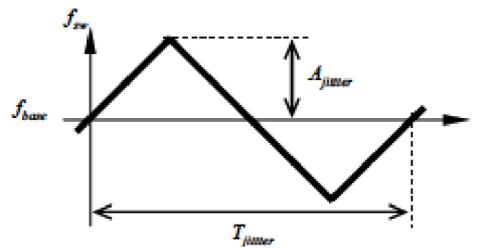


Figura 5.3: Modulazione triangolare

La Figura 5.4 mostra l'analisi spettrale di un'applicazione pratica di un apparecchio con i rispettivi parametri di potenza e frequenza, da 3500 W a 25 kHz. Dalla Figura si può osservare un picco di 82 dB μ V che si verifica a 50 kHz, pari a solo il doppio della frequenza di commutazione. Applicando i parametri del triangolo $f_{base} = 25$ kHz, $T_{jitter} = 6.4$ ms, $A_{jitter} = 1,72$ kHz, si ottiene una riduzione del picco di 3,51 dB μ V [21].

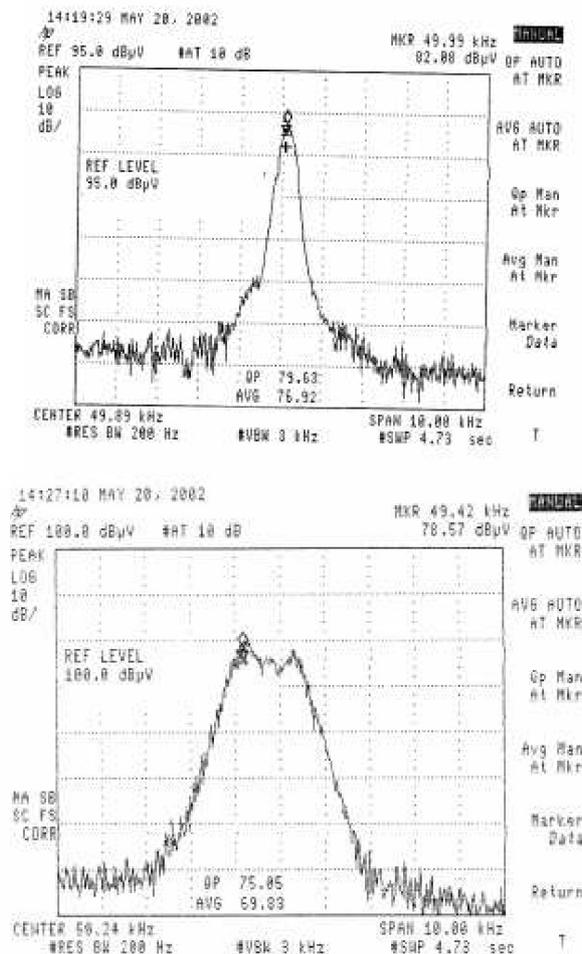


Figura 5.4: Analisi Spettrale

Capitolo 6

INDUTTORE

6.1 TIPOLOGIE E CRITERI DI PROGETTAZIONE

Le bobine di induzione trasferiscono l'energia elettrica dall'inverter alla padella grazie all'accoppiamento magnetico, esse devono soddisfare diverse condizioni per permettere buone prestazioni del piano cottura, come la limitazione nelle dimensioni, adeguati valori di potenza e la necessità di un'elevata efficienza nella trasmissione di energia elettromagnetica. Normalmente, vengono utilizzati avvolgimenti a spirale piatta, con un diametro esterno definito dalla dimensione dei bruciatori [24] [25]. Il numero di spire di un induttore è determinato dal valore della potenza nominale richiesta, mentre la topologia dell'inverter e la tensione di rete sono noti, pertanto, il grado di libertà nella progettazione di un induttore è dato dall'avvolgimento del filato, che è strettamente correlato con l'efficienza dell'induzione [26].

L'efficienza del sistema di riscaldamento, η_{ind} , è il rapporto tra la potenza trasferita al carico, P_l , e la potenza totale fornita, P_t , data dalla (6.1) dove P_w rappresenta invece la potenza dissipata negli avvolgimenti.

$$\eta_{ind} = \frac{P_l}{P_t} = \frac{P_l}{P_w + P_l} \quad (6.1)$$

Si definiscono due modi per poter migliorare η_{ind} : da un lato, ci si indirizza a migliorare P_l , d'altra parte si intraprende la riduzione di P_w attraverso un adeguato progetto del filato. Tradizionalmente vengono trattati due temi: l'analisi dell'impedenza equivalente al sistema induzione-carico e l'analisi delle perdite. La prima analisi è utilizzata per progettare l'inverter di risonanza, la seconda è essenziale per la fabbricazione di apparecchi sicuri ed efficienti. Viene mostrato in Figura 6.1 il progetto basato sull'idea di situare l'avvolgimento tra due supporti multistrato [27].

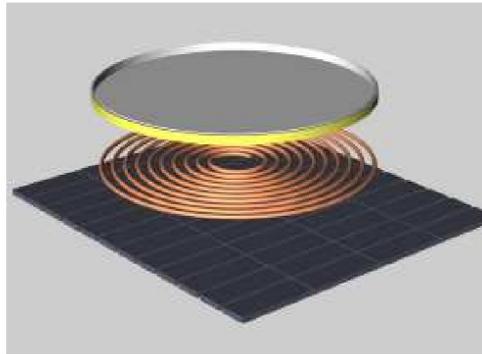


Figura 6.1: Induttore tra due supporti multistrato

Il modello fornisce due grandezze elettriche in relazione con i parametri coinvolti nel sistema di induzione (numero di avvolgimenti, frequenza, proprietà elettromagnetiche dei materiali, parametri geometrici). La prima è una resistenza ΔR , che rappresenta la potenza trasferita al carico per il riscaldamento attraverso l'induzione, l'altra è costituita da un'induttanza L_{eq} che rappresenta il rapporto tra il flusso magnetico totale e la corrente di eccitazione.

Nella progettazione di un sistema di induzione per il riscaldamento per il piano cottura domestico, è essenziale scegliere un conduttore che minimizzi le proprie perdite, sono stati provati diversi tipi di fili di rame: tapes, cavi round, e fili multi-stranded [28] [29] [30]. Questi ultimi sono suddivisi in cavi Litz [31] [32] (usati per ridurre l'effetto pelle per frequenze da pochi kHz a circa 1MHz, costituiti da numerosi fili isolati tra loro mediante smaltatura e rivestimento di cotone) che abbiano fino a una decina di fili, e cavi intrecciati altrimenti detti Twisted [33] [34] (con i fili semplicemente ritorti o a fascio) che possono raggruppare fino a mille fili. Una rappresentazione schematica della comparazione costo-efficienza di un induttore con ogni tipologia di cavo è mostrata in Figura 6.2.

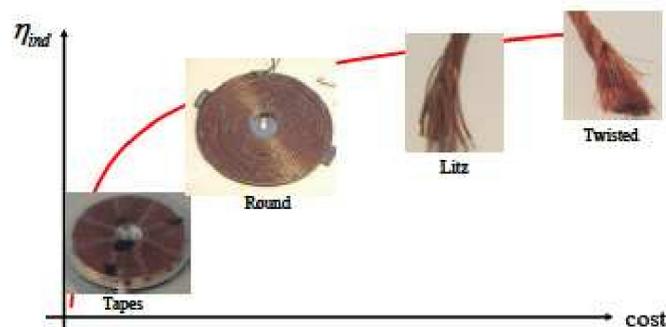


Figura 6.2: Tipologia di conduttore

Al giorno d'oggi, i cavi Litz sono ampiamente utilizzati perché hanno un buon rapporto tra il costo e le prestazioni; inoltre, il numero di fili del cavo ed il suo diametro possono essere progettati per massimizzare η_{ind} a una specifica frequenza di lavoro [26].

Per progettare l'induttore veniva utilizzato il metodo Finite Element Analysis (FEA, che consiste nella realizzazione di un modello al computer del materiale o del progetto che viene analizzato per ottenere risultati specifici), che tradizionalmente era stato utilizzato per i sistemi di induzione domestici. Esso risultava però poco pratico, soprattutto nell'utilizzo di cavi con un alto numero di fili, questo fatto ha stimolato lo sviluppo di metodi ibridi [35] [36], che combinano il calcolo FEA (del campo magnetico necessario) con la stima analitica delle perdite in prossimità nei cavi (questi metodi sono stati applicati anche per studiare l'effetto della temperatura sul sistema induttore-carico [37]).

I metodi ibridi forniscono una resistenza R_0 che rappresenta le perdite nel cavo, pertanto, al fine di verificare sperimentalmente i modelli teorici, la misura della resistenza dipendente dalla frequenza di un sistema induttore-carico deve essere coincidente con la somma dei due valori ΔR e R_0 . Questo parametro è chiamato la resistenza equivalente R_{eq} di un sistema induttore ed è definita nella (6.2).

$$R_{eq} = \Delta R + R_0 \quad (6.2)$$

La Figura 6.3 mostra l'andamento della resistenza equivalente in dipendenza della frequenza per diversi materiali progettata per offrire una potenza di 3500 W. L'induttore è stato progettato con un cavo di Litz e in questo esperimento sono stati testati tre diversi materiali come carichi: rame, alluminio e acciaio ferromagnetico (la resistenza è stata misurata con un analizzatore di impedenza commerciale RLC (Agilent 4284A)).

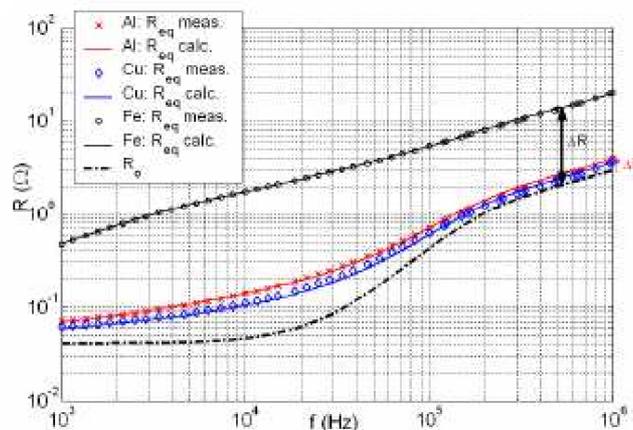


Figura 6.3: Andamento della resistenza al variare della frequenza

Allo stesso modo, la Figura 6.4 mostra la dipendenza dell'induttanza equivalente dalla frequenza per lo stesso setup e per gli stessi carichi.

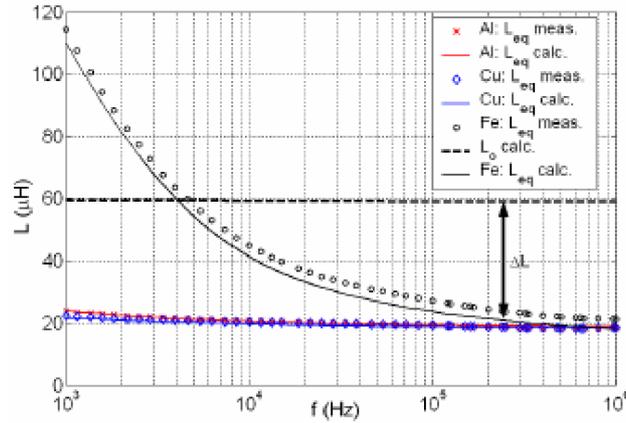


Figura 6.4: Andamento dell'impedenza al variare della frequenza

In questo caso, l'induzione equivalente è definitiva nella (6.3).

$$L_{eq} = \Delta L + L_0 \quad (6.3)$$

L'induzione equivalente L_{eq} è stata separata nell'autoinduttanza L_0 e nel contributo dovuto al carico ΔL , (dove ΔL è dovuta dalle correnti indotte nel carico).

A causa della natura del fenomeno di induzione, ΔL è in genere un termine che tende a ridurre l'induttanza degli avvolgimenti, inoltre, considerando la (6.1) e tenendo conto che entrambe le P_l e le P_t sono causate dalla stessa corrente (assunta sinusoidale con una ampiezza I_ϕ), l'efficienza può essere riscritta come nella (6.4).

$$\eta_{ind} = \frac{\frac{1}{2}\Delta R \cdot I_\phi^2}{\frac{1}{2}\Delta R_{eq} \cdot I_\phi^2} = \frac{\Delta R}{R_{eq}} = \frac{\Delta R}{\Delta R + R_0} \quad (6.4)$$

L'equazione (6.4) mostra come stimare l'efficienza del campo elettromagnetico tra l'avvolgimento e il carico, applicando il valore ottenuto al calcolato fatto nella (6.2) per le resistenze, si ottiene l'andamento dell'efficienza in Figura 6.5. In questa Figura è chiaramente evidenziato che l'efficienza di un'induzione realizzata con l'acciaio ferromagnetico è nettamente superiore a quella ottenuta con il materiale non-ferromagnetico, questo è uno dei principali difetti degli apparecchi domestici di riscaldamento a induzione.

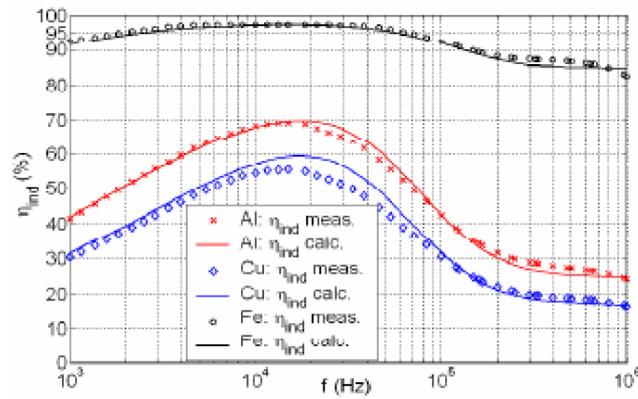


Figura 6.5: Andamento dell'efficienza al variare della frequenza

Infine, la Figura 6.6 mostra il numero di cavi di Litz utilizzati nel progetto in base ai criteri di efficienza a massima induzione.

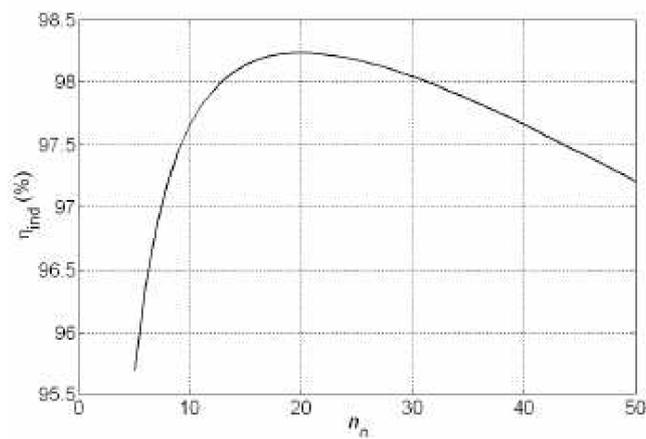


Figura 6.6: Andamento dell'efficienza al variare del numero di conduttori che formano l'avvolgimento

I dati ed i grafici sono stati prelevati da [43].

Capitolo 7

CONCLUSIONI

Secondo il Dipartimento dell'Energia degli Stati Uniti l'efficienza riferita al trasferimento di energia per un piano di cottura a induzione è del 90%, contro il 71% di un ottimo piano cottura elettrico non a induzione, per un risparmio quindi di circa il 20% di energia per la stessa quantità di trasferimento di calore [1]. Avendo definito l'efficienza energetica il rapporto tra l'energia fornita al cibo e quella consumata, viene riscontrato che il piano cottura a gas ha un rendimento energetico del 30% circa, più le perdite di distribuzione che portano a un rendimento complessivo di circa il 27,9% [2].

Le Tabelle 7.1 e 7.2 evidenziano le differenze tra i diversi tipi di piani cottura in commercio [3].

Tipologia	Indice di rendimento	Potenza fornita	Potenza trasferita
Induzione	90%	2.8kW	2.52kW
Gas	50%	3.5kW	1.75kW
Alogeno	60%	2.2kW	1.32kW
Radiante	55%	2.0kW	1.1kW

Tabella 7.1: Tabella 1

La Tabella 7.2 si riferisce al tempo ed energia di ebollizione e temperatura di superficie di 1,9L d'acqua.

Tipologia	Tempo	Temperatura	Energia
Induzione	4 minuti e 46 secondi	230°F	225W/h
Gas	8 minuti e 18 secondi	518°F	390W/h
Alogeno	9 minuti e 00 secondi	734°F	270W/h
Radiante	9 minuti e 50 secondi	644°F	320W/h

Tabella 7.2: Tabella 2

I piani cottura a induzione sono diventati un sofisticato dispositivo che è apprezzato da un numero sempre crescente di persone. Per rendere sempre più competitivo questo sistema di cottura, trovando un buon compromesso tra prezzo, prestazioni e affidabilità sono stati elaborati vari progetti:

1. La modifica dell'inverter half-bridge che rende possibile l'utilizzo di pentolame non ferromagnetico grazie ad un relè che permette la modifica del valore capacitivo senza quindi dover intervenire direttamente sulla bobina. Questo sistema permette elevate prestazioni per la cottura con pentole ferromagnetiche e prestazioni accettabili con le non ferromagnetiche.
2. Può venir migliorata l'efficienza riducendo le perdite dovute al raddrizzatore a diodi utilizzando il convertitore AC/AC.
3. Per quanto riguarda i controllori digitali, l'impiego del System on Chip (SoC), circuiti integrati che oltre al processore aggiungono anche un chip set ed eventualmente altri controller, porta alla riduzione del numero necessario di componenti e grazie all'utilizzo del controllo digitale di primo ordine $\Sigma\Delta$ si ottiene un'elevata risoluzione, linearità di conversione, poca sensibilità alle interferenze, l'assenza di circuiti Sample & Hold (complessi da realizzare), l'assenza di filtri anti-aliasing e un basso costo di realizzazione.
4. L'utilizzo della tecnologia iCoupler assicura vantaggi prestazionali, di potenza e integrazione superiori a quelli offerti dalla tradizionale tecnologia degli optoaccoppiatori

Per comprendere le motivazioni che portano a vedere l'Italia ancora restia all'utilizzo dei piani cottura a induzione, a differenza di molti altri paesi europei, si effettua la comparazione tra le tariffe medie di energia elettrica e di gas del nostro paese con quelle della Francia.

Viene di seguito valutato il costo approssimativo sostenuto nel portare ad ebollizione 1.9L d'acqua con la piastra a induzione e con il tradizionale fornello a gas. La tariffa di energia elettrica e di gas media in Italia è rispettivamente pari a 0.12€/kWh ed a 0.345€/mc cioè 0.033€/kW (100mc=1040kW), il costo valutato per portare ad ebollizione 1.9L d'acqua è quindi di 0.027€ con il piano cottura a induzione e di 0.013€ con il fornello elettrico. Diversamente in Francia la tariffa per l'energia elettrica ed il gas è rispettivamente pari a 0.08€/kWh ed a 0.07€/kW e il costo per far bollire l'acqua alle stesse condizioni precedentemente citate diventa di 0.018€ per il piano a induzione e di 0.027€ per il fornello a gas [42].

Grazie a questi valori risulta evidente il motivo che spinge gli altri paesi europei a differenza dell'Italia al maggior utilizzo della piastra a induzione.

Elenco delle figure

1.1	Campo magnetico	2
1.2	Densità corrente	4
1.3	Bobina	4
1.4	Studi di laboratorio	5
2.1	Fornello a gas	7
2.2	Cottura a gas	8
2.3	Resistenza elettrica	9
2.4	Piano cottura radiante	9
2.5	Cottura radiante	10
2.6	Lampada alogena	12
2.7	Piano cottura alogeno	12
2.8	Piano cottura alogeno	13
2.9	Bobina a induzione	15
2.10	Piano cottura a induzione	15
2.11	Piano cottura a induzione	16
3.1	Sistema di funzionamento	19
3.2	Sistema di funzionamento	20
3.3	Tecnologia iCoupler	22
3.4	ADuM140x	23
3.5	AduM1233	24
3.6	AduM123x	24
3.7	Ritardo della propagazione del segnale	25
3.8	AduM1250	26
3.9	Microcontrollore	27
4.1	Carico	29
4.2	Half Bridge	30
4.3	Funzionamento alla prima armonica	30
4.4	Andamento della resistenza e dell'induttanza al variare della frequenza	32
4.5	Modalità di funzionamento alla terza armonica	34
4.6	Funziamento dell'half bridge con relè	35
4.7	Esperimento	38
4.8	Risultati sperimentali	39

4.9	Risultati sperimentali	40
4.10	Risultati sperimentali	41
4.11	Risultati sperimentali	42
5.1	Modulatore digitale	44
5.2	Macchina a stati finiti	44
5.3	Modulazione triangolare	45
5.4	Analisi Spettrale	45
6.1	Induttore tra due supporti multistrato	48
6.2	Tipologia di conduttore	48
6.3	Andamento della resistenza al variare della frequenza	49
6.4	Andamento dell'impedenza al variare della frequenza	50
6.5	Andamento dell'efficienza al variare della frequenza	51
6.6	Andamento dell'efficienza al variare del numero di conduttori che formano l'avvolgimento	51

Elenco delle tabelle

7.1	Tabella 1	53
7.2	Tabella 2	53

Bibliografia

- [1] Technical support document for residential cooking products. Volume 2: Potential impact of alternative efficiency levels for residential cooking products. (see Table 1.7). U.S. Department of Energy, Office of Codes and Standards.
- [2] Greg Sorensen; David Zabrowski (August 2009). "Improving Range-Top Efficiency with Specialized Vessels". Appliance Magazine. <http://www.appliancemagazine.com/editorial.php?article=2257&zone=114&first=1>. Retrieved 2010-08-07.
- [3] ADI website: www.aeg-electrolux.it.
- [4] ADI website: www.analog.com/iCoupler.
- [5] ADI website: www.analog.com (Search) ADuM1233 (Go).
- [6] ADI website: www.analog.com (Search) AD7147 (Go).
- [7] ADI website: www.analog.com (Search) AD7148 (Go).
- [8] ADI website: www.analog.com (Search) ADuM1250 (Go).
- [9] ADI website: www.analog.com (Search) ADuM1251 (Go).
- [10] ADI website: www.analog.com (Search) AN-913 (Go).
- [11] ADI website: www.analog.com (Search) comparators (Go).
- [12] ADI website: http://www.analog.com/en/interface/digital_isolators/products/cu_over_iCouper_digital_isolation/fca.html.
- [13] Analog Dialogue 42-03 March(2008).
- [14] S. Llorente, F. Monterde, J.M. Burdío and J. Acero, "A Comparative Study of Resonant Inverter Topologies Used in Induction Cookers", in Applied Power Electronics Conference (APEC), Vol. 2, pp.1168-1174, March 2002.
- [15] F.P. Dawson and P. Jain, "A comparison of load commutated inverter Systems for Induction Heating and Melting Applications," IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 6, N^o 3 pp. 430-441, Jul. 1991.

- [16] W.G. Hurley, and J.G. Kassakian, "Induction heating of circular ferromagnetic plates," *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. mag-15, pp 1174-1181, July 1979.
- [17] J. Acero, R. Alonso, J.M. Burdío, L.A. Barragán, and D. Puyal, "Analytical equivalent impedance for a planar circular induction heating system," *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 42, pp. 84-86, Jan. 2006.
- [18] L. Hobson, D.W. Tebb and Turnbull, "Dual element induction cooking unit using power MOSFETs", *International Journal Electronics*, vol. 59, n^o 6, pp. 747-757, 1985.
- [19] H.W.Koertzen, J.D. Van Wyk and J.A. Ferreira, "Design of the halfbridge series resonant converters for induction cooking", *IEEE Power Electronics Specialist Conference Rec.*, 1995, pp 729-735.
- [20] Tanaka, T., "A new induction cooking range for heating any kind of metal vessels," *Consumer Electronics, IEEE Transactions on*, vol.35, no.3pp.635-641, Aug 1989.
- [21] I. Millán, D. Puyal, J.M. Burdío, J. Acero, Sergio Llorente "Resonant Inverter Topology for All-Metal Domestic Induction Heating".
- [22] Ogiwara, H.; Nakaoka, M., "ZCS high frequency inverter using SIT for induction heating applications," *Electric Power Applications, IEE Proceedings-*, vol.150, no.2pp. 185-192, Mar 2003. 918.
- [23] J. Acero, D. Navarro, L. A. Barragán, I. Garde, J.I. Artigas, and J. M. Burdío, "FPGA-based power measuring for induction heating appliances using sigma-delta A/D conversion," *IEEE Trans. Industrial Electronics*, vol. 54, no. 4, pp. 1843-1852, Jul. 2007.
- [24] M.S. Adler, "A field-theoretical approach to magnetic induction heating of thin circular plates," *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. mag-10, no 4, pp 1118-1125, Dec. 1974.
- [25] W.G. Hurley and J.G. Kassakian, "Induction heating of circular ferromagnetic plates," *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. mag-15, no 3, pp 1174-1181, July 1979.
- [26] J. Acero, R. Alonso, J.M. Burdío, L.A. Barragán, and J.I. Artigas, "An electromagnetic-based model for calculating the efficiency in domestic induction heating appliances," in *IEEE Power Electronics Specialists Conf. (PESC) Rec.*, 2006, pp. 153-158.
- [27] J. Acero, R. Alonso, J.M. Burdío, L.A. Barragán, "Enhancement of induction heating performance by sandwiched planar windings," *Electronics Letters*, vol. 42, pp. 241-242, Feb. 2006.
- [28] P. Hernández, F. Monterde, J.R. García, and J.M. Burdío, "Power loss optimisation of foil coils for induction cooking," in *IEEE Industrial Electronics Soc. Conf (IECON) Rec.*, 1998, pp. 371-374.
- [29] J.R García, J.A. García, "Improved coil for induction heating," *European Patent*, No. EP 0936843 A2, 1999.

- [30] J. Acero, R. Alonso, L.A. Barragán, J.M. Burdío, and D. Navarro, “Loss analysis and optimization of round-wire planar windings for domestic induction heating appliances,” in IEEE Applied Power Electronics Conf. (APEC) Rec., 2006, pp. 553-558.
- [31] A.W. Lotfi and F.C. Lee “A high frequency model for litz-wire for switch-mode magnetics,” in IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (IAS) Rec., 1993, pp. 1169-175.
- [32] J. Acero, R. Alonso, J.M. Burdío, L.A. Barragán, and D. Puyal, “Frequency-dependent resistance in litz-wire planar windings for domestic induction heating appliances,” IEEE Trans. Power Electronics, vol. 21, pp. 856-866, July 2006.
- [33] X. Tang, C.R. Sullivan, X. Tang, C.R. Sullivan, “Stranded wire with uninsulated strands as a low-cost alternative to litz wire,” in IEEE Power Electronics Specialists Conf. (PESC) Rec., 2003, pp. 289-295.
- [34] J. Acero, R. Alonso, J.M. Burdío, L.A. Barragán, and C. Carretero, “A model of losses in twisted-multistranded wires for planar windings used in domestic induction heating appliances,” in IEEE Applied Power Electronics Conf. (APEC) Rec., 2007, pp. 1247-1253.
- [35] C.R. Sullivan, “Optimal choice for number of strands in a litz-wire transformer winding,” IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 14, no. 2, pp. 283-291, March 1999.
- [36] S. Wang, M.A.de Rooij, W.G. Odendaal, J.D. van Wyk, and D. Boroyevich, “Reduction of high-frequency conduction losses using a planar litz structure,” IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 20, no. 2, pp. 261-267, March 2005.
- [37] C. Carretero, J. Acero, R. Alonso, J.M. Burdío, and F. Monterde, “Temperature influence on equivalent impedance and efficiency of inductor systems for domestic induction heating appliances,” in IEEE Applied Power Electronics Conf. (APEC) Rec., 2007, pp. 153-158.
- [38] ADT web: <http://it.ambrell.com/aboutinduction.php>.
- [39] P. Mazzoldi, M. Nigro, C. Voci, “Elementi di fisica”, ediSES seconda edizione.
- [40] ADI website: <http://www.fairchildsemi.com/an/AN/AN-9012.pdf>.
- [41] L. Malesani, P. Mattavelli, G. Spiazzi, E. Gaio, P.Tenti “Dispense del Corso di ELETTRONICA INDUSTRIALE”.
- [42] ADT web: <http://particuliers.direct-energie.com/fourniture-energie/offres-electricite-gaz/tarifs-electricite-gaz.html>.
- [43] Pubblicazioni di J. Acero, J.M. Burdío, L.A. Barragán, D. Navarro, R. Alonso J.R. García, F.Monterde, P. Hernández, S. Llorente, I. Garde.

Ringraziamenti

Il primo ringraziamento va ai miei genitori Graziella e Franco che mi hanno sempre aiutata e sostenuta in ogni momento, non avrei potuto desiderare genitori migliori di voi.

Un grazie particolare va a Luca, senza il quale probabilmente oggi non mi sarei laureata... grazie per le ore passate insieme a studiare, per le pause caffè, per la preziosa compagnia e per la tua infinita pazienza.

Grazie a Omar, per essermi stato particolarmente accanto negli ultimi giorni di tesi ed aver fatto con me le tre di notte davanti al pc.

Grazie a tutti i miei compagni di studio e a tutti coloro che hanno contribuito alla preparazione dei miei esami, in particolare a Lisa, a Daniele, a Fabio, a Marco, a Matteo, a Silvia, ad Alberto, a Francesca, ad Alessandra, ad Angelo, ad Andrea, a Federico e a Giulio.

Grazie a Damiano per i mercoledì sera, per le ore trascorse in biblioteca ed alle macchinette.

Grazie a Pierpaolo per avermi sempre spronata a dare il meglio, per tutte le colazioni, i pranzi, le cene, gli spritz, i passaggi in macchina...grazie di tutto.

Un grazie particolarmente sentito ad Elena, a Federica ed a Silvia...per l'affetto che mi avete sempre dimostrato e per non avermi mai fatta sentire sola.

Grazie alle mie due coinquiline Elisa e Nicoletta...per non avermi buttata fuori di casa ed aver sopportato i miei isterismi.

Grazie al mio Fratellone Paolo...grazie per esserci sempre e comunque.

In ultimo ringrazio il mio relatore P. Tenti per l'aver incrementato la mia passione per l'elettronica e per tutti i preziosi consigli indirizzati alla realizzazione della tesi.