Indice

1 Pastorizzazione tradizionale degli alimenti **3**

1.1 Introduzione 3

1.2 Sistemi di pastorizzazione classici 4

2 Metodo Ohmico **7**

2.1 Limiti del metodo tradizionale 7

2.2 I principi del riscaldamento ohmico 8

2.3 Realizzazione circuitale 9

2.4 Vantaggi e svantaggi 11

3 Riscaldamento a Radiofrequenza **13**

3.1 Una nuova tecnologia 13

3.2 Principio fisico del riscaldamento a radiofrequenza 14

3.3 Equipaggiamento elettrico 17

3.4 Configurazioni degli applicatori 18

3.4.1 Applicatore “parallel plate” 18

3.4.2 Applicatore “stray field” 19

3.4.3 Applicatore “staggered through field” 21

3.5 Il generatore 21

3.6 Il triodo 22

3.7 L’adattatore di impedenza 23

3.8 Il sistema di raffreddamento 25

4 Analisi del Circuito **27**

4.1 Scelte progettuali 27

4.2 Sistema con oscillatore ad oscillazione separata 29

4.2.1 Il modello di Everitt-Prince 31

4.2.2 Cenni sul dimensionamento 36

4.3 Sistema con oscillatore ad auto-eccitazione 37
4.3.1 L'oscillatore di Colpitts 39
4.3.2 Caratteristiche del dimensionamento 41

5 Applicazioni della pastorizzazione RF 43
5.1 Vantaggi della tecnologia RF 43
5.2 Il semilavorato di fragola per yogurt 46
5.3 Gli alimenti liquidi con solidi in sospensione 47
5.4 I prodotti confezionati, i trattamenti post-forno e la cottura del pane 48
5.5 Limiti del riscaldamento a radiofrequenza 50
5.6 Sviluppi futuri 51

6 Ringraziamenti 53

Capitolo 1

Pastorizzazione tradizionale degli alimenti

1.1 Introduzione

Il termine pastorizzazione deriva dal biologo francese Louis Pasteur. Questi nel 1860 scoprì che riscaldando il vino e portandolo per pochi minuti a 60°C, era possibile bloccarne i processi di fermentazione.

Da allora i processi di pastorizzazione sono stati soggetti di numerosi studi e perfezionamenti che, una volta applicati sugli alimenti, hanno permesso di ridurre numerose patologie (basti pensare che a fine '800 l'introduzione della pastorizzazione del latte vaccino ha dimezzato in un anno la mortalità dei bambini).

Diversamente dalla sterilizzazione, la pastorizzazione non ha lo scopo di uccidere tutti i microrganismi presenti nel cibo. Lo scopo è invece quello di ridurne il numero in modo che per un certo periodo di tempo non siano in grado di sviluppare effetti patogeni. Si tratta principalmente di un trattamento termico, atto a distruggere tutte le forme patogene, preservando le caratteristiche organolettiche ed il naturale stato chimico-fisico del prodotto. Negli ultimi anni sono stati studiati anche dei trattamenti "a freddo", utilizzando particolari tecnologie, che sono molto diverse da quelle tradizionali ed ancora in fase di sperimentazione nei laboratori.

La differenza principale tra la pastorizzazione e la sterilizzazione è la temperatura: la prima infatti avviene sotto i 100°C, distruggendo quasi tutte le forme vegetative, come ad esempio muffe, lieviti, virus e batteri, quali gli agenti del tifo; la seconda raggiunge temperature al di sopra dei 120°C eliminando le forme sporigene. Infatti i prodotti pastorizzati hanno vita più breve rispetto a quelli sterilizzati e sono sottoposti ad un rapido raffreddamento per inibire lo sviluppo dei microrganismi residui.

La pastorizzazione è quindi associata ad altri sistemi di conservazione: è il caso del latte pastorizzato, che deve essere però conservato in frigorifero e consumato entro pochi giorni. Altri prodotti sono invece sottoposti ad altre tecniche

di conservazione, come il confezionamento sottovuoto o l'aggiunta di sostanze chimiche.

L'impiego del processo di pastorizzazione non è usato per la sanificazione a larga scala di tutti gli alimenti poiché può indurre alterazioni del gusto e della qualità dei prodotti trattati.

Il concetto di pastorizzazione è pertanto legato ad una disinfezione, il più possibile completa, del prodotto ed alla conservazione delle sue caratteristiche chimico fisiche. Questo comporta che vi siano dei limiti di temperatura e di tempo di esposizione, limiti che devono essere idonei a garantire la salubrità ed integrità del prodotto.

La pastorizzazione ha il pregio di conservare il gusto dei prodotti, ma comporta anche alcuni svantaggi, come già detto, infatti interrompe solo temporaneamente la crescita dei batteri e si può dedurre che l'assenza di proprietà battericide dell'alimento possa consentire, a distanza di tempo, nuovamente lo sviluppo di forme batteriche nocive.

1.2 Sistemi di pastorizzazione classici

Per pastorizzare degli alimenti per molto tempo sono stati utilizzati solo processi termici realizzati con scambiatori di calore, particolari componenti in cui è possibile realizzare uno scambio di energia termica tra due fluidi a temperature diverse.

Molti processi di scambio termico non sono isotermici, ma avvengono ad una temperatura variabile. In altri termini, un corpo entra a bassa temperatura e si riscalda; l'altro entra ad alta temperatura e si raffredda. Si presentano quindi tre casi di profilo termico:

- *scambio in controcorrente*, con il quale i due fluidi sono fatti scorrere in direzioni opposte in modo da ottenere uno scambio termico che interessi tutto il liquido;
- *scambio in equicorrente*, con il quale vengono invertiti l'ingresso e l'uscita di uno solo dei fluidi;
- *flusso incrociato*, con il quale uno dei fluidi compie un percorso complesso e l'altro un percorso lineare.

Solo nel caso di scambio in controcorrente la temperatura di uscita del fluido freddo può essere superiore a quella di uscita del fluido caldo.

Gli scambiatori di calore, che sfruttano il principio fisico della trasmissione di calore tra due corpi, possono essere tubolari, a superficie raschiata oppure a piastre (costituiti da piastre metalliche sovrapposte, su cui scorre da un lato il liquido da trattare, dall'altro un fluido riscaldato alla temperatura richiesta).

Esistono molti tipi di scambiatori di calore, che si differenziano per le modalità di contatto delle due correnti:

- *scambiatore a miscela*: le due correnti non sono separate da pareti e si scambiano calore e materia. Gli scambiatori a miscela operano una semplice miscelazione dei fluidi, che di conseguenza si portano alla stessa temperatura;
- *scambiatore di tipo rigenerativo*: le correnti vengono inviate alternativamente all'interno di una camera di mattoni inerti oppure in particolari unità rotanti in lamierino (scambiatore Ljungstrom);
- *scambiatore a irraggiamento diretto*: il calore viene fornito sotto forma di energia radiante (pannelli solari, saline marine);
- *scambiatore a superficie*: è la classe a cui appartengono gli scambiatori più comunemente utilizzati, in quanto permettono lo scambio di grandi quantità di calore, avendo superfici che possono arrivare a decine di migliaia di metri quadrati. Le correnti assorbono il calore dalle superfici con le quali sono separati. In uno scambiatore a superficie si riconoscono due lati contenenti i fluidi. In virtù del primo principio della termodinamica, i corpi devono essere a temperature diverse perché vi sia trasferimento di energia termica da uno all'altro, e si definiscono quindi un lato caldo ed un lato freddo. Questi lati hanno caratteristiche diverse a seconda del tipo di scambiatore.

La durata del trattamento e le temperature raggiunte durante il processo dipendono dal tipo di prodotto e dal suo grado di contaminazione. Si può distinguere infatti in:

- *pastorizzazione bassa*: compresa tra 60°C e 65°C per 30 secondi, utilizzata per vino e birra, latte per produzione di formaggio;
- *pastorizzazione alta*: compresa tra 75°C e 85°C per 2 o 3 minuti, metodo utilizzato un tempo per il latte e ora sostituito dall'HTST;
- *pastorizzazione rapida* o *HTST* (High Temperature Short Time): compresa tra 75°C e 85°C per 15-20 secondi, condotta su alimenti liquidi che scorrono in uno strato sottile tra due pareti metalliche scaldate. In questo tipo di pastorizzazione si può comprendere anche la "stassanizzazione", ovvero la pastorizzazione secondo il concetto di Stassano: a 75 °C per 14 secondi.

Il tempo di trattamento corrisponde al periodo di tempo necessario per il prodotto ad attraversare la cella di pastorizzazione e, di conseguenza, può essere anche molto lungo. Inoltre questo sistema, basato esclusivamente sulla propagazione del calore, permette solo la pastorizzazione di alimenti in forma liquida: latte, vino, birra e succhi di frutta, gli unici ad avere proprietà di omogeneità tali da permettere la propagazione del calore al loro interno tramite conduzione.

La ricerca scientifica degli ultimi anni in questo settore ha mirato proprio, utilizzando differenti tecnologie, a ridurre i tempi necessari per completare il processo ed a permettere la pastorizzazione anche altri prodotti, caratterizzati da una disomogeneità, più o meno spinta, come gli alimenti liquidi con solidi in sospensione.

Capitolo 2

Metodo Ohmico

2.1 Limiti del metodo tradizionale

Il metodo di pastorizzazione alimentare classico, presentato nel capitolo precedente, basato unicamente sulla trasmissione del calore per convezione presenta almeno tre limiti fondamentali:

- il tempo di trattamento corrisponde al periodo di tempo necessario per il prodotto ad attraversare la cella di pastorizzazione;
- non è possibile ottenere una pastorizzazione completa di molti alimenti senza danneggiare il prodotto stesso;
- non è possibile applicare questo sistema qualora l'alimento sia composto da più fasi;

Il metodo di pastorizzazione tradizionale prevede che il calore si propaghi per convenzione nell'alimento stesso e che lentamente dalle parti più esterne (maggiormente sottoposte al flusso convettivo) si diffonda verso l'interno del prodotto.

È ragionevole pensare che le parti più esterne del prodotto risultino sottoposte ad un'azione riscaldante maggiore rispetto a quelle più interne. Per poter raggiungere la temperatura richiesta ad eliminare gli agenti patogeni anche all'interno del prodotto, sarebbe necessario utilizzare una fonte esterna di calore superiore, con il risultato inevitabile di giungere a riscaldare eccessivamente il prodotto.

Non è però possibile aumentare indiscriminatamente la temperatura al fine di ottenere l'eliminazione desiderata della carica batterica, in quanto il prodotto trattato verrebbe irreparabilmente danneggiato.

Si possono citare, a questo proposito alcuni esempi:

- il semilavorato di fragola per yogurt, molto noto nel modo della frutta per le sue problematiche estreme. Si tratta di un alimento estremamente sensibile agli shock termici: il deterioramento del prodotto al di sopra dei 100°C

è quasi totale: determina perdita di consistenza, pigmenti e caratteristiche aromatiche.

- la farinata di ceci, che è in realtà una focaccia costituita da più fasi solide (grasse e glucidiche) senza soluzione di continuità tra loro. La struttura stessa del prodotto impedisce pertanto una corretta trasmissione del calore.
- gli alimenti liquidi con solidi in sospensione (brodi, polpe ed alcuni tipi di succhi), non permettono di raggiungere la temperatura richiesta per eliminare microrganismi e batteri della loro componente solida: il calore viene trasferito prima alla parte liquida e da questa alla parte solida. Il processo richiede molto tempo e spesso accade che la parte liquida giunga a surriscaldarsi, degradandosi ed in alcuni casi addirittura ad evaporare.

Non è dunque pensabile di poter ottenere per molti alimenti un'adeguata pastorizzazione basandosi unicamente sul trasferimento di calore dall'esterno: l'utilizzo del sistema tradizionale oggi è limitato solo ad alcuni prodotti, alimenti in forma liquida (soprattutto latte, vino, birra), su cui il processo si può compiere con particolare efficacia e con limitati effetti avversi.

Nel corso del tempo sono stati studiati dei sistemi di pastorizzazione endogeni, nei quali cioè il calore viene generato direttamente all'interno del prodotto, dei quali il più conosciuto è il *riscaldamento ohmico*.

2.2 I principi del riscaldamento ohmico

Il riscaldamento ohmico (o riscaldamento resistivo) è un processo termico, nel quale il calore viene interamente generato all'interno di un corpo (nel caso in questione un alimento) dal passaggio di una corrente elettrica alternata. La potenza elettrica viene trasferita al corpo e dissipata sotto forma di calore per effetto Joule. Il principio di funzionamento è molto semplice e la figura 2.1 ne mostra un semplice schematico.

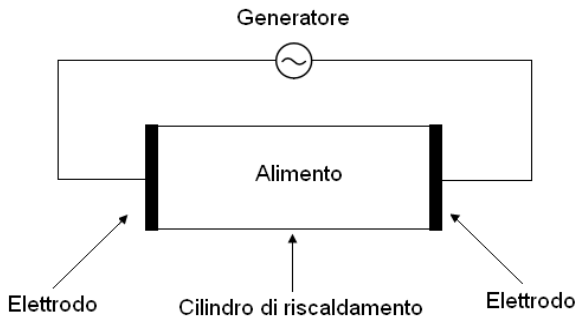

Figura 2.1: Uno schematico del dispositivo per il riscaldamento ohmico

Durante il processo viene applicata una tensione alternata ad entrambi gli elettrodi, che sono posti alle estremità dell'alimento da trattare. La velocità del riscaldamento è direttamente proporzionale alla radice quadrata dell'intensità del campo elettrico, alla conducibilità e composizione chimica del prodotto. La forza del campo elettrico può essere regolata variando opportunamente la distanza tra gli elettrodi. Generalmente è un processo che viene utilizzato per trattare cibi acidi (pH < 4.5), portandoli a temperature prossime ai 90 - 95 °C per 30 - 90 secondi, in modo da riuscire ad eliminare la maggior parte dei batteri e dei microrganismi nocivi.

Rispetto al sistema convenzionale il riscaldamento ohmico permette di ottenere un'azione riscaldante volumetrica e non superficiale, in tempi molto ridotti. I parametri che caratterizzano questo processo termico sono la conducibilità elettrica ed il calore specifico, che sono delle proprietà specifiche di ogni alimento.

La conducibilità elettrica è una misura di quanto facilmente la struttura interna di un materiale si lascia attraversare da una corrente. In altri termini si può anche pensare che la conducibilità, nel caso del riscaldamento ohmico, sia una misura delle specie ioniche che il materiale contiene. Nel caso dei cibi l'ingrediente ionico più comune è il sale (NaCl). Più alta è la quantità di sale che è disciolta nel materiale, più alta è la sua conducibilità.

La capacità termica è una misura della quantità di calore necessaria per aumentare di 1 °C la temperatura di un'unità di massa (generalmente un grammo o un chilogrammo) del materiale.

2.3 Realizzazione circuitale

Ci sono infiniti modi in cui è possibile realizzare un circuito per il riscaldamento ohmico, tuttavia in ognuno di essi sono sempre presenti alcuni elementi chiave dei quali è possibile dare una breve descrizione:

- il circuito necessita di una alimentazione, di conseguenza sarà necessario un generatore;
- gli elettrodi devono essere posti in contatto con il materiale in maniera da potergli trasmettere la corrente;
- la distanza tra gli elettrodi dipende dalla grandezza del materiale e dall'intensità del campo elettrico che si desidera applicare;
- gli elettrodi possono essere distribuiti lungo il percorso del prodotto, secondo una configurazione *in-line field* (figura 2.2) oppure essere posti ortogonalmente al percorso stesso secondo una configurazione *cross-field* (figura 2.3);
- per poter misurare la temperatura serve un sistema di sensori, come ad esempio delle termocoppie;

- il sistema può comprendere delle sonde per misura il pH;
- è necessario un sistema di raffreddamento del prodotto una volta terminato il processo;

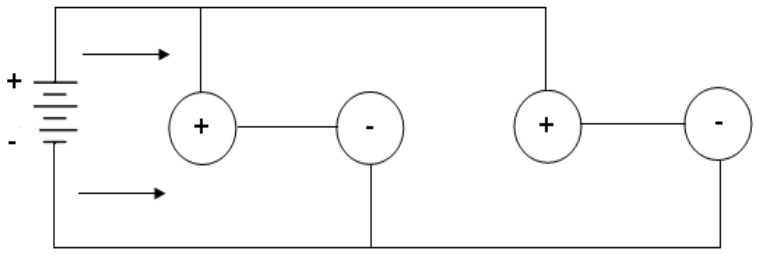

Figura 2.2: Configurazione “In-line field”

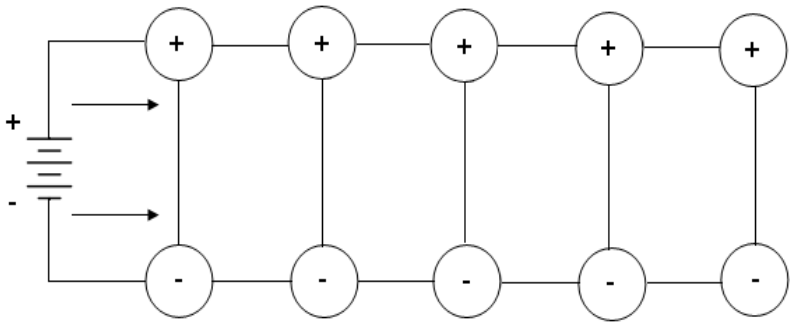

Figura 2.3: Configurazione “Cross-field”

In teoria non vi è un limite al calore che si può produrre ed alla temperatura a cui si può giungere usando questo sistema. Si può pastorizzare qualunque alimento: gli alimenti in forma solida devono essere opportunamente trattati in modo da poter essere finemente suddivisi e dispersi in un altro materiale (di solito un liquido) ottenendo così una sospensione .

Ci sono comunque numerosi aspetti di cui si deve tenere conto: la dipendenza della conducibilità dalla temperatura, il tempo per cui un corpo può essere riscaldato, il massimo campo elettrico che si può applicare e la manutenzione dell’impianto.

I sistemi industriali per il riscaldamento ohmico, presenti sul mercato, possono variare molto. Il più comune è realizzato con colonne a sette elettrodi. Ogni elettrodo è costruito con acciaio inossidabile e prevede un rivestimento termoisolante

di politetrafluoroeletilene (PTFE). Le colonne sono progettate per permettere al flusso al loro interno di scorrere verticalmente e sono connesse con dei tubi isolanti di acciaio (*holding tubes*), nelle quali i prodotti rimangono il tempo necessario per raggiungere la sterilità. Successivamente i prodotti passano attraverso una serie di refrigeratori ed infine giungono in dei serbatoi (*tanks*), dove rimangono finché non vengono confezionati.

Un sistema di controllo tiene costantemente monitorata la temperatura, la capacità termica ed il calore specifico del prodotto in maniera tale da calcolare la potenza elettrica da fornire al circuito.

2.4 Vantaggi e svantaggi

Il metodo del riscaldamento ohmico si presenta come un'ottima alternativa ai metodi di pastorizzazione tradizionali, permette infatti di:

- riscaldare un prodotto generando il calore direttamente all'interno di quest'ultimo;
- ridurre il rischio di bruciare le superfici esterne del prodotto, minimizzando il deterioramento delle sue proprietà organolettiche;
- permette di riscaldare adeguatamente un alimento liquido con solidi in sospensione, solo se la densità di questi ultimi è molto elevata;
- un facile controllo del processo;
- ottenere una pastorizzazione completa del prodotto riuscendo ad eliminare la maggior parte dei microrganismi e degli agenti patogeni.

Si deve comunque ricordare che ci sono alcuni aspetti critici in questo sistema di pastorizzazione. I più importanti riguardano il tempo e la conducibilità elettrica: il metodo del riscaldamento ohmico si basa sul passaggio diretto di corrente e di conseguenza viene a dipendere fortemente dalla conducibilità σ dell'alimento.

Non tutti gli alimenti sono buoni conduttori di corrente, in base alla conducibilità essi possono essere classificati in:

- $\sigma > 0.05$ S/m, buoni conduttori: uova, vino, succhi di frutta;
- $0.005 < \sigma < 0.05$ S/m, medi conduttori: marmellate, margarina;
- $\sigma < 0.005$ S/m, cattivi conduttori: surgelati, grassi e liquori;

Il tempo per ottenere un'azione riscaldante adeguata ad eliminare i microrganismi nocivi varia molto a seconda della natura del prodotto che viene trattato: minore è la conducibilità maggiore sarà il tempo di trattamento. Si deve poi ricordare che

la conducibilità è una grandezza elettrica che dipende anche inversamente dalla temperatura: un aumento di temperatura comporta una sua diminuzione e di conseguenza un aumento della "resistenza" che la struttura interna del prodotto offre al passaggio della corrente. Nel caso di tutti gli alimenti la conducibilità viene a dipendere dalle dimensioni del prodotto, dalla sua temperatura, dalla percentuale di acqua presente e dalla sua composizione chimica (in particolare se all'interno del prodotto sono presenti specie ioniche).

Gli alimenti che al loro interno hanno una maggiore quantità di lipidi possono essere molto problematici da riscaldare: in particolare se i lipidi sono concentrati in zone estremamente conduttive, le linee di corrente possono trovare percorsi alternativi per richiudersi, non passando mai attraverso di essi. Questo fenomeno è noto come il problema delle *sovra temperature localizzate*: la composizione chimica stessa dell'alimento è tale creare al suo interno delle zone più conduttive, che di conseguenza si riscalderanno più rapidamente e delle zone meno conduttive o addirittura isolanti, che impiegheranno molto tempo per scaldarsi.

La pastorizzazione di questi alimenti è estremamente difficile da ottenere: da un lato, per fare in modo che tutto il prodotto raggiunga la temperatura desiderata, si dovrebbe aumentare il tempo di trattamento, mentre dall'altro quest'ultimo dovrebbe essere ridotto, per non produrre bruciature superficiali o deterioramenti delle zone più conduttive, che ovviamente si riscaldano per prime.

Come è stato precedentemente detto prima di entrare all'interno del sistema di pastorizzazione l'alimento da trattare deve essere ridotto ad una sospensione. Tale sospensione deve essere accuratamente preparata, poiché la componente solida verrà riscaldata contemporaneamente alla componente liquida, solo se si trova ad un'elevata densità. In generale quindi non tutti gli alimenti liquidi con solidi in sospensione si possono pastorizzare efficacemente con il sistema ohmico: un alimento estremamente liquido come un succo di frutta o un brodo, non potrà essere processato completamente altrimenti si deteriorerà in maniera irreversibile. Infine c'è da tenere presente la manutenzione dell'impianto, che deve essere estremamente accurata. I macchinari devono essere periodicamente trattati con opportuni prodotti e temperature (ad esempio con NaOH per circa 30 minuti a 60/70 °C) al fine di evitare che componenti organici (sopratutto proteine) possano depositarsi sugli elettrodi, impedendo la conducibilità della corrente.

Capitolo 3

Riscaldamento a Radiofrequenza

3.1 Una nuova tecnologia

Come si è già potuto vedere entrambi i sistemi presentati precedentemente presentano dei limiti. Il metodo convenzionale infatti oltre a richiedere tempi molto lunghi, non riesce a garantire l'integrità di molti prodotti al termine del processo.

Il metodo ohmico, benché da un lato permetta di diminuire di molto i tempi del processo, necessita di una grande manutenzione degli impianti per ottenere il risultato desiderato ed in alcuni casi non è in grado di garantire un'uniformità nel riscaldamento.

Ricercando un miglioramento di questi processi, al fine di superare i loro limiti ed ottenere una tecnologia nuova, si è giunti a sperimentare il riscaldamento endogeno per mezzo di campi elettromagnetici oscillanti molto intensi, aventi una frequenza di oscillazione pari a 27 MHz.

Il riscaldamento endogeno è stato proprio la caratteristica vincente delle radiofrequenze (RF). Si sono infatti potuti riscaldare in modo uniforme molti prodotti, indipendentemente dalla loro natura, densità e dimensioni, direttamente al "cuore" con immediatezza e precisione.

Nell'ottica del massimo rispetto delle caratteristiche originali del prodotto, la radiofrequenza ha consentito il raggiungimento di risultati ottimi, abbattendo entro i limiti richiesti la carica batterica, senza alterare le proprietà dei prodotti alimentari. Inoltre ha permesso di superare gli inconvenienti precedentemente citati, mantenendo le caratteristiche si sicurezza e velocità.

Tali aspetti sono tutt'oggi studiati da autorevoli ricercatori che cercano di ottenere gli stessi risultati con le sperimentazioni dei "campi pulsati" (*HELP, High Intensity Electric Pulse*), nell'intento di realizzare processi di sterilizzazione "a freddo" (che non si basano dunque sull'impiego del calore), ancora però in fase di sperimentazione all'interno dei laboratori.

La tecnologia RF si colloca pertanto "idealmente" fra i due estremi definiti dai processi "a caldo" ed "a freddo", rappresentando così una tecnologia innovativa per trattare gli alimenti, ma già diffusa a livello industriale.

3.2 Principio fisico del riscaldamento a radiofrequenza

Il riscaldamento a radiofrequenza fa parte di un metodo più generale che viene spesso denominato riscaldamento dielettrico. Si tratta di un sistema mediante il quale è possibile cedere calore ad un corpo utilizzando la propagazione di onde elettromagnetiche.

Quando un materiale dielettrico è sottoposto all'azione di un campo elettromagnetico esterno, le molecole di cui è costituito subiscono un fenomeno che viene definito polarizzazione: i dipoli elettrici, siano essi indotti dal campo stesso o permanenti, si dispongono secondo il verso del campo elettrico applicato.

L'utilizzo di un campo oscillante induce un effetto vibro-rotazionale delle molecole (in particolare di quelle dipolari come l'acqua) o delle cariche spaziali: se la polarità del campo esterno viene invertita periodicamente, i dipoli sono costretti ad intraprendere un movimento oscillatorio (con frequenza uguale) per riallinearsi al campo stesso.

Il tempo necessario a raggiungere l'orientazione di equilibrio viene detto *tempo di rilassamento*, ed il suo reciproco *frequenza di rilassamento*.

Ad elevate frequenza, tipicamente nel campo delle radiofrequenze, dove la polarità del campo viene invertita parecchi milioni di volte al secondo, la rapida oscillazione ed il conseguente attrito intermolecolare fanno in modo che vi sia una dissipazione di energia sotto forma di calore, ovvero che parte dell'energia conferita dal campo magnetico esterno, venga assorbita dalle molecole che cominciano a vibrare e la trasformano in energia termica.

Se poi nel materiale sono presenti anche specie ioniche, aventi una certa libertà di movimento, all'effetto precedente si somma anche quello dovuto al rapido moto di queste specie, indotto anch'esso con un meccanismo simile.

Questi fenomeni, che generano una grande dissipazione di energia cinetica e magnetica sotto forma di calore, danno luogo ad un'azione riscaldante omogenea indipendente dalle dimensioni, dal peso, densità e conducibilità termica. Inoltre è possibile ad evitare il problema delle sovra temperature localizzate, tipiche del riscaldamento ohmico.

Esistono quattro differenti modalità con cui il campo elettromagnetico può polarizzare un materiale dielettrico e trasferigli energia:

1. *polarizzazione elettronica* o *ottica*, che è dovuta ad un leggero spostamento della nuvola elettronica degli atomi, caricata negativamente, relativamente al nucleo, caricato positivamente. La polarizzazione elettronica risulta comune a tutti i solidi ed in alcuni, come il diamante, è l'unico contributo alla

costante dielettrica, essendo assenti altri tipi di polarizzazione. Essa necessita di tempi estremamente brevi per essere attivata ed in alcuni materiali è attiva per questo fino a frequenze superiori alla luce visibile (10^{15} Hz). Per conseguenza il tempo di rilassamento è così breve che risulta del tutto trascurabile per le frequenze comunemente considerate in elettrotecnica.

2. *polarizzazione atomica* o *ionica*, che è dovuta ad un leggero spostamento relativo di ioni adiacenti di segno opposto, che si riscontra quindi solo in reticoli di sostanze di tipo ionico o covalente-polare. Essa si genera per lo spostamento in senso contrario degli ioni di segno opposto ed è resa possibile dalla "elasticità" dei legami chimici. Si manifesta fino a frequenze piuttosto alte, tra le iperfrequenze e l'infrarosso ($10^{11} \div 10^{14}$ Hz). Anche per questo tipo di polarizzazione, come nel caso di quella precedente, il tempo di rilassamento è estremamente breve, in modo che esso porta un contributo costante al valore della costante dielettrica per tutte le frequenze usate nell'elettrotecnica.

3. *polarizzazione dipolare*, che si verifica in materiali costituiti da molecole dipolari (come HCl o H_2O) ed in maniera più debole anche in molecole di dimensioni maggiori che possiedano gruppi polari in grado di ruotare. I relativi dipoli possono modificare la loro orientazione spaziale e tendono ad allinearsi rispetto ad un campo elettrico applicato, con una dipendenza molto marcata dalla temperatura. A temperature molto basse infatti i dipoli tendono a "congelare" in posizioni reticolari, mentre aumentando la temperatura l'agitazione molecolare svincola questi dipoli e li rende disponibili all'orientazione. Ad alte temperature l'agitazione termica tende ad annullare questo fenomeno. Questa polarizzazione si manifesta a frequenze comprese tra 1 kHz e 100 MHz. Per azione del campo elettrico l'orientazione dei dipoli può anche non essere completa: per questo motivo è possibile il riscaldamento ad alta frequenza di molte sostanze dielettriche polari. Le perdite per polarizzazione a frequenze alte possono anche essere considerevoli e portano a riscaldamento anche intenso.

4. *polarizzazione della carica spaziale*, che si verifica in materiali che non sono dei dielettrici "ideali", ma nei quali può avvenire una migrazione di carica su distanze macroscopiche. Ad esempio nel $NaCl$ i cationi migrano preferenzialmente verso l'elettrodo negativo attraverso difetti reticolari, come lacune cationiche, provocando l'insorgere di un doppio strato elettrico all'interfase $NaCl$-elettrodo. Quando tali effetti sono consistenti, il materiale andrebbe considerato più come un conduttore ionico o come un elettrolita solido. Si possono misurare in questi casi costanti dielettriche dell'ordine di grandezza di 10^6 o 10^7, che però a rigore non dipendono dalla natura dielettrica del materiale ma piuttosto dalla mobilità di alcuni degli ioni che costituiscono il reticolo. Queste cariche mobili tendono, sotto l'influenza di un campo elettrico, a migrare, concentrandosi attorno alle superfici di discontinuità della

struttura. Si viene dunque a creare una certa differenza di potenziale su tali interfacce. Questo tipo di polarizzazione è il più lento a manifestarsi e può richiedere anche qualche minuto. Un fenomeno analogo a questo tipo di polarizzazione è la migrazione di ioni in un sottile strato di elettrolita depositato sulle pareti di in condensatore, detto appunto condensatore elettrolitico.

L'interazione di un campo elettromagnetico con un materiale viene descritto in termini della *permettività complessa*

$$\varepsilon_c = \varepsilon^{'} - j\varepsilon^{''}$$

Si tratta di un'espressione in cui compaiono due grandezze ($\varepsilon^{'}$ e $\varepsilon^{''}$) che dipendono dalla natura e dal tipo di materiale considerato. Il primo membro ($\varepsilon^{'}$) è la *costante dielettrica*, che rappresenta una misura della capacità di assorbire, riflettere o trasmettere energia elettromagnetica. Il secondo ($\varepsilon^{''}$) è il *fattore di perdita*, che costituisce una misura della percentuale di energia del campo che viene dissipata come calore.

La massima perdita dielettrica di un particolare tipo di processo di polarizzazione si ha quando il suo periodo di rilassamento è uguale al periodo del campo applicato, cioè quando vi è risonanza.

Il fattore di perdita è legato alla costante dielettrica dalla seguente relazione

$$\tan\delta = \frac{\varepsilon^{''}}{\varepsilon^{'}}$$

Il termine $\tan\delta$ viene chiamato *fattore di dissipazione* del materiale.

Da questi tre elementi dipende un'altra grandezza*:* lo *spessore di penetrazione*. Si tratta di un parametro fondamentale nell'ambito del riscaldamento a radiofrequenza, in quanto le sue caratteristiche influenzano l'intero processo. Il suo studio ha permesso di superare alcuni problemi presenti nel riscaldamento ohmico, sebbene sia ancora oggetto di ricerca.

Lo *spessore di penetrazione* (d_p) viene definito come la profondità del materiale a cui l'energia di un'onda piana che si propaga ortogonalmente alla superficie decresce di un fattore $1/e$.

$$d_p = \frac{c}{2\pi f\sqrt{2\varepsilon^{'}}\sqrt{\sqrt{1+(\tan\delta)^2}-1}}$$

c rappresenta la velocità di propagazione delle onde elettromagnetiche nel vuoto ($3\times10^8 ms^{-1}$) e d_p è espresso in metri. Nel caso in cui $\tan\delta$ sia sufficientemente piccolo, allora la relazione precedente può essere semplificata nel modo seguente

$$d_p = \frac{c}{2\pi f\sqrt{\varepsilon^{'}}\tan\delta} = \frac{4.47\times10^7}{f\sqrt{\varepsilon^{'}}\tan\delta}$$

3.3 Equipaggiamento elettrico

Un impianto di pastorizzazione a radiofrequenza è costituito principalmente da quattro sezioni: il generatore, l'applicatore, la linea coassiale di trasmissione della radiofrequenza e l'adattatore di impedenza.

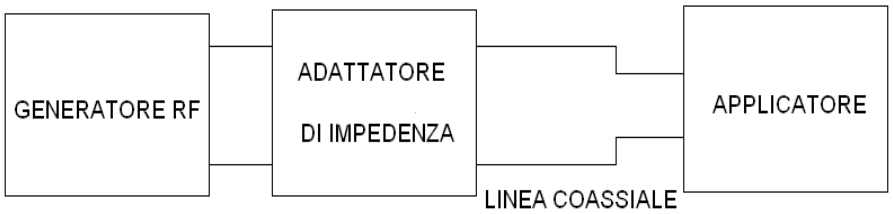

Figura 3.1: Schematico dell'impianto

Il generatore, alimentato con la corrente elettrica della rete, produce e rende disponibile un campo elettromagnetico che oscilla ad una frequenza di 27 MHz.

Il generatore a radiofrequenza viene realizzato con uno o più *triodi* e per ognuno di essi è previsto un sistema di riscaldamento del filamento, un raddrizzatore a doppia semionda, un oscillatore controllato ed un sistema di raffreddamento. La potenza massima è dell'ordine dei 600 kW ed il rendimento globale è dell'ordine del 60%.

L'applicatore è un dispositivo mediante il quale si applica il campo elettromagnetico alternato al prodotto da riscaldare. É costituito da due elettrodi contrapposti, che possono essere considerati come le due armature di un condensatore. Per l'applicatore esistono tre differenti architetture possibili (illustrate nel seguito), il cui utilizzo dipende dalla natura e dallo spessore del prodotto da trattare e dalla forma delle linee del campo magnetico che si desidera ottenere. Gli elettrodi, che sono stati brevettati negli ultimi anni, sono in grado di trasferire valori elevati di potenza con tensioni abbastanza basse e quindi anche maggiori margini di sicurezza.

Possono essere in forma di lastre piane, di griglie a barre parallele interconnesse, oppure in altre forme più o meno particolari per applicazioni, ad esempio, su porzioni di corpi. Vengono infatti usati elettrodi di forma rettangolare, cilindrica o allungata. Infine a seconda dell'applicazione possono essere utilizzati sistemi di elettrodi ad altezza fissa (ovvero con posizionamento automatico predeterminato) oppure variabile.

Il materiale che si desidera scaldare viene posto tra gli elettrodi, ma è sempre separato da essi tramite un dielettrico.

La linea coassiale consente il trasporto dell'energia dal generatore al gruppo adattatore/carico; è diffusa la "tecnologia a 50 Ω", che permette agli impianti di lavorare in condizioni ottimali, senza fenomeni di riflessione (e quindi di onde stazionarie) all'interno della linea.

L'adattatore di impedenza (del quale esistono tre configurazioni possibili: L, T, π) è necessario per adattare l'impedenza del carico (che si suppone variabile) al generatore affinché questo possa emettere la sua massima potenza con un buon rendimento. Si ha una compensazione della reattanza capacitiva del carico mediante opportuni elementi quali induttanze e condensatori variabili. Nella tecnologia a 50 Ω l'adattatore è regolabile, al fine di mantenere l'impedenza dell'insieme adattatore-carico a 50 Ω al variare dell'impedenza di carico.

3.4 Configurazioni degli applicatori

3.4.1 Applicatore "parallel plate"

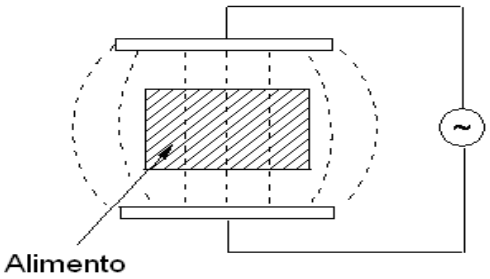

Figura 3.2: Applicatore "parallel plate"

Si tratta dell'applicatore più semplice. Gli elettrodi sono piani ed alimentati da un generatore a radiofrequenza. Il prodotto è collocato fra gli elettrodi, ma non deve essere in contatto con essi. L'intero sistema può essere pensato come un condensatore piano.

3.4.2 Applicatore “stray field”

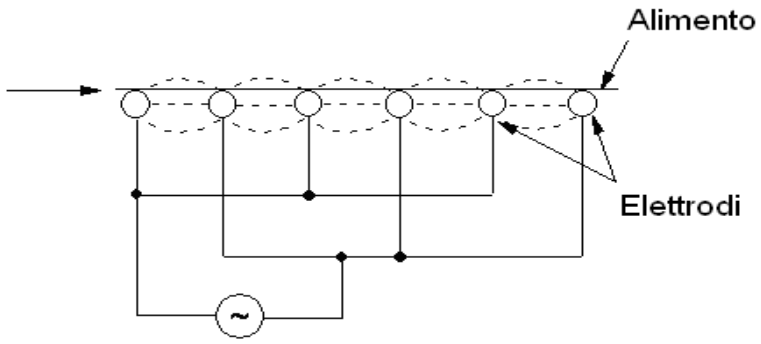

Figura 3.3: Applicatore “stray field”

L’applicatore “stray field” è costituito da una sequenza di elettrodi (a forma di tubi o sbarre), posti parallelamente al materiale da scaldare. Il sistema è connesso elettricamente ad un generatore di radiofrequenza che produce un segnale; quest’ultimo a sua volta induce un campo elettromagnetico che si propaga tra gli elettrodi. La posizione degli elettrodi è fissa e non può essere modificata.

L’applicatore è costituito da due parti: il primo elemento e il secondo elemento. Entrambe sono energizzate da un segnale a radiofrequenza che ha una fase di 0° o di 180°, in modo tale da poter produrre una differenza di potenziale tra gli elettrodi compresa tra zero ed il massimo che consente di raggiungere l’alimentazione esterna. Gli elettrodi nei due casi sono differenti: gli elettrodi del primo elemento sono allungati, mentre quelli del secondo elemento sono piani e di forma rettangolare.

Il primo elemento può essere alimentato direttamente dal segnale a radiofrequenza, mentre il secondo può essere connesso a massa, in modo tale da poter ottenere una differenza di potenziale tra gli elettrodi che varia con la frequenza della sorgente di alimentazione.

*S*ono inoltre posizionati in maniera tale che l’elettrodo allungato e l’elettrodo piano risultino allineati, in modo da ridurre il più possibile il campo elettromagnetico disperso.

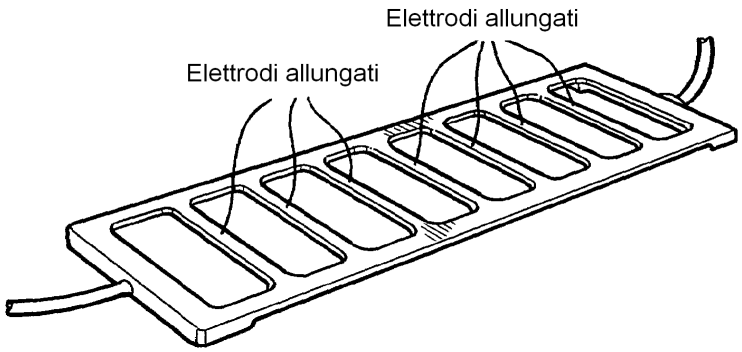

Figura 3.4: Primo Elemento

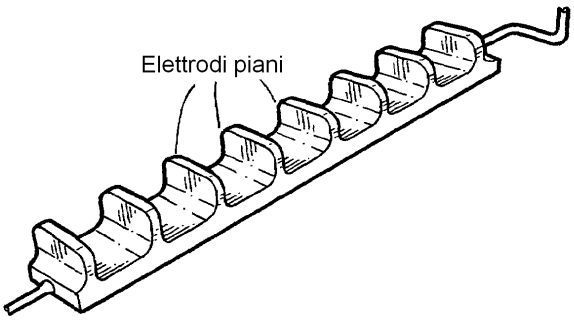

Figura 3.5: Secondo Elemento

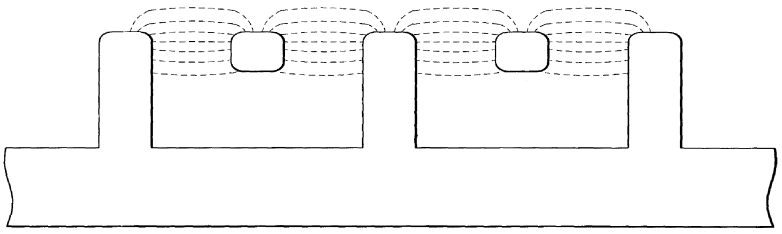

Figura 3.6: Linee di campo elettromagnetico tra il primo elemento ed il secondo elemento

3.4.3 Applicatore "staggered through field"

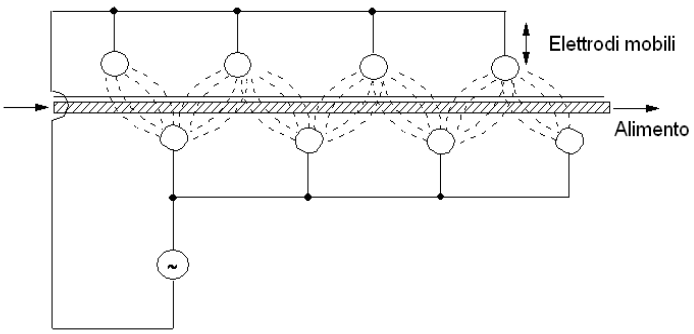

Figura 3.7: Applicatore "staggered through field"

Questo tipo di applicatore a volte viene chiamato anche "applicatore a ghirlanda": gli elettrodi sono uguali a quelli dell'applicatore precedente, ma sono posizionati sopra e sotto il materiale da scaldare. La loro altezza è modificabile: in questo modo è possibile trattare prodotti con spessori più elevati, senza sostanzialmente modificare il processo di riscaldamento.

3.5 Il generatore

Il generatore di radiofrequenza è l'elemento fondamentale di tutto il sistema: è costituito da un alimentatore, un amplificatore ed un circuito risonante. L'amplificatore viene realizzato con un triodo, preferito rispetto al mosfet a causa delle elevate potenze generate. Nel capitolo successivo verranno prese in considerazione le singole parti che lo compongono. Vi sono alcune caratteristiche di base che nel progetto di ogni generatore si dovrebbero rispettare:

- costi limitati: il sistema di pastorizzazione a radiofrequenza si trova a competere sul mercato con altri tipi di pastorizzazione (come il sistema ohmico). Nell'ottica di un miglioramento dei processi tradizionali è necessario tenere in considerazione, oltre ai benefici della nuova tecnologia, anche l'aspetto economico;

- semplicità: questa considerazione nasce dall'utilizzo del generatore. Il sistema di pastorizzazione viene installato nelle aziende e successivamente adoperato da personale che, nella maggior parte dei casi, non ha una grande familiarità con apparecchiature elettroniche. Il generatore quindi deve essere il più semplice possibile, in maniera tale che anche persone non esperte possano capirne il funzionamento ed essere in grado di usarlo;

- robustezza: il generatore deve essere progettato per tollerare variazioni delle grandezze elettriche della linea, senza danneggiarsi e continuare il proprio lavoro in maniera continua;

- flessibilità dell'uscita: è la caratteristica più difficile da garantire e per molto tempo ha costituito un vero e proprio problema per l'intero processo di pastorizzazione. Tutti i materiali infatti quando vengono scaldati cambiano le loro caratteristiche elettriche e fisiche. Questo cambiamento si riflette in cambiamento delle caratteristiche del carico. Nel corso del tempo sono state adottate tecniche particolari per garantire una compensazione di queste variazioni quasi totale, in modo da ottenere un carico quasi costante.

3.6 Il triodo

La *valvola termoionica* (o *tubo a vuoto*) è stato il primo componente elettronico attivo, in grado cioè di innalzare, se opportunamente alimentato, la potenza di un segnale posto al suo ingresso.

Il suo funzionamento in linea di massima è molto semplice: vi è una corrente che passa tra due elettrodi, anodo e catodo e vi sono alcuni elementi (griglie metalliche) che consentono di variare l'intensità della corrente del dispositivo, regolando opportunamente una tensione di controllo.

Il principio di funzionamento del tubo a vuoto è quello dell'emissione termoionica, secondo la quale ogni metallo, se portato ad una temperatura elevata, emette elettroni. La sua implementazione si ottiene con un involucro, nel quale viene praticato il vuoto ottenuto attraverso un particolare processo di riscaldamento dell' intera struttura[1]. Nell'involucro è contenuto un filamento metallico che viene portato all'incandescenza (tra i 1000 ed i 3000 °C) facendolo attraversare da una corrente e sfruttando così l'effetto Joule.

Il catodo è costituito tipicamente da una base di metallo (di solito nickel) e da un rivestimento di ossidi di bario (60%) e stronzio (40%). L'anodo è costituito con un particolare tipo di rame (OFHC *Oxygen Free High Conductivity*), nel quale la percentuale di ossigeno viene il più possibile eliminata durante il processo di fusione.

Polarizzando negativamente il catodo rispetto all'anodo, si stabilisce un flusso elettronico che risale la differenza di potenziale tra i due elettrodi. Se la polarizzazione è quella contraria, non passerà alcuna corrente.

[1] si deve tenere presente che è impossibile eliminare completamente l' aria contenuta all'interno della valvola termoionica. La sua percentuale deve però essere ridotta il più possibile, in particolare quella dell'ossigeno. L'ossigeno infatti è in grado di combinarsi con i metalli di cui è costituito il catodo, impedendo l'emissione di elettroni. Inoltre se durante il processo è presente una quantità eccessiva di specie gassose libere, queste possono essere ionizzate dagli elettroni emessi e dare luogo ad una corrente ionica, non più trascurabile né controllabile.

Se viene poi posta tra anodo e catodo una griglia metallica, polarizzata positivamente rispetto al catodo, ma meno rispetto all'anodo, gli elettroni emessi dal catodo vi saranno attratti e passeranno dunque attraverso le maglie della griglia per raggiungere l'anodo. In caso contrario, se la griglia è polarizzata negativamente, questa respingerà gli elettroni provenienti dal catodo. Pertanto applicando una tensione variabile tra catodo e griglia, si otterrà un passaggio di corrente tra catodo ed anodo che seguirà, con un'opportuna amplificazione, l'andamento del segnale alla griglia. La griglia deve essere progettata in maniera tale che risulti il più "trasparente" possibile al flusso di elettroni. In molti tubi a vuoto la griglia viene realizzata in molibdeno o tungsteno, elementi che sono in grado di resistere alle elevate temperature senza fondere.

L'effetto risultante è quello di un'amplificazione di corrente ed un tubo termoionico così fatto si dice *triodo*.

La griglia, che è generalmente costituita da un filo avvolto a spirale o da una rete interposta nello spazio attorno al catodo, è in grado, se opportunamente polarizzata, di controllare il flusso di elettroni tra anodo e catodo. Se viene polarizzata negativamente rispetto al catodo, respinge gli elettroni tanto maggiormente quanto più è polarizzata negativamente, fino alla tensione di *cut-off* in cui la corrente è zero.

Quindi variando la tensione di controllo della griglia si può controllare il flusso di corrente tra anodo è catodo, da zero fino al massimo che la valvola consente (punto di saturazione). Una piccola variazione della tensione della griglia provoca una notevole variazione della corrente tra anodo e catodo, ottenendo un'amplificazione.

Il parametro più importante del triodo è l'amplificazione μ, viene definita come

$$\mu = -\frac{\delta v_p}{\delta v_{g_{ip}}}$$

dove con δv_p si intende la variazione della tensione anodica (o di placca), prodotta da una variazione della tensione di griglia δv_g (il pedice $i_p$indica che la corrente anodica deve rimanere costante in corrispondenza delle sopraindicate variazioni di tensione); il segno meno è necessario poiché la tensione di griglia deve diminuire, affinché la corrente anodica rimanga costante a seguito di un incremento della tensione anodica.

3.7 L'adattatore di impedenza

La linea coassiale serve per portare un segnale, e quindi potenza, dalla sorgente di campo al carico (rappresentato dall'impedenza di carico Z_L), mediante la propagazione di onde elettromagnetiche lungo l'asse della struttura. Nel momento in cui lungo la linea ci sono delle discontinuità come ad esempio giunzioni tra cavi, diramazioni o carichi non adattati, una parte dell'onda elettromagnetica viene riflessa

e, sommandosi all'onda incidente, dà luogo ad una fluttuazione sinusoidale della tensione, che viene chiamata onda stazionaria. Il fenomeno della riflessione al carico è pertanto usualmente indesiderato, poiché la potenza riflessa, non essendo assorbita dal carico, è stata evidentemente "spesa" inutilmente dalla sorgente; in quest'ottica risulta quindi di fondamentale importanza la condizione di adattamento in uniformità che assicura che il carico assorba tutta la potenza ricevuta (senza cioè alcuno "spreco"). E' stato tuttavia dimostrato che condizione necessaria e sufficiente perché la linea sia adattata (in uniformità) è che l'impedenza di carico coincida con l'impedenza caratteristica della linea, cioè $Z_L = Z_C$.

Tale importante condizione non risulta però automaticamente verificata poiché ogni possibile carico è caratterizzato da una diversa impedenza Z_L e non è ovviamente pensabile di realizzare una linea di trasmissione con l'adeguato valore di Z_C per ogni possibile valore di Z_L.

Quando $Z_L \neq Z_C$ è comunque possibile ottenere la condizione di adattamento utilizzando un opportuno adattatore di impedenza. Con tale termine si indica un quadripolo passivo (tipicamente senza perdite) tale che, collegati i morsetti di uscita con un carico di impedenza Z_L, l'impedenza sui morsetti di ingresso assuma un prefissato valore.

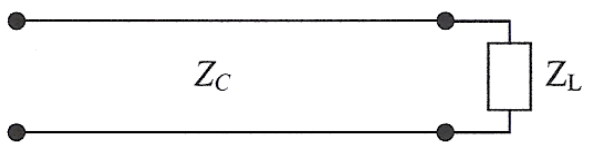

Figura 3.8: Carico non adattato

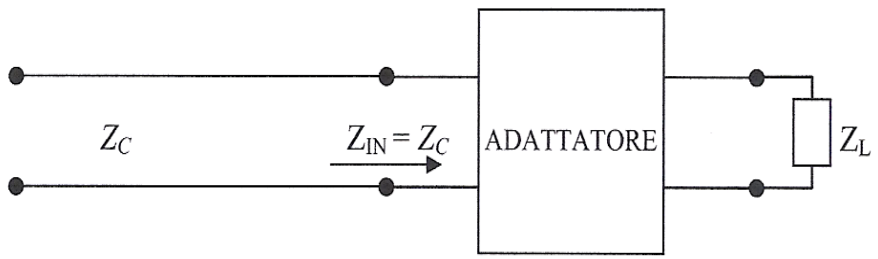

Figura 3.9: Carico adattato

3.8 Il sistema di raffreddamento

Un adeguato sistema di raffreddamento è fondamentale per il buon funzionamento di un triodo. Una valvola termoionica infatti perde la sua funzionalità, fino a divenire inutilizzabile, con l'aumentare della temperatura.

Nelle specifiche dello strumento sono sempre contenute informazioni riguardo alla massima temperatura raggiungibile ed il sistema di raffreddamento più adatto da utilizzare. Un sistema di raffreddamento inefficiente porterà in breve tempo all'invecchiamento del triodo, al contrario un sistema efficiente ne permetterà un utilizzo prolungato. Si dovrebbe sempre evitare di surriscaldare la valvola al di sopra della massima temperatura consentita.

Per misurare la temperatura vengono principalmente usati termistori e termocoppie, ma spesso anche sensori in grado di misurare l'energia radiante come i pirometri, che differiscono sensibilmente da quelli in commercio perché devono essere accuratamente progettati per misurare la temperatura con un'area di contatto con la superficie anche molto piccola.

Il raffreddamento viene ottenuto principalmente usando aria o acqua. Il sistema di raffreddamento con circolazione d'aria è preferibile quando le potenze in gioco sono piccole. Questo sistema prevede l'utilizzo di una o più ventole, che hanno il compito di forzare l'aria ad entrare nella valvola attraverso la griglia.

Le ventole di raffreddamento hanno una dimensione che differisce a seconda del particolare modello di valvola utilizzato e nel data sheet dello strumento, a seconda delle caratteristiche del triodo impiegato, sono sempre presenti alcune indicazioni per sceglierle correttamente. Il raffreddamento con acqua viene utilizzato quando le potenze sono elevate; esistono tre metodi differenti con cui è possibile implementarlo: il raffreddamento diretto dell'anodo, il raffreddamento a vapore ed il raffreddamento multifase.

Il sistema di raffreddamento diretto dell'anodo era il sistema maggiormente utilizzato in passato in ambito industriale. Questo metodo prevede di utilizzare come refrigerante un flusso di acqua, in grado di sottrarre una quantità di calore sufficiente (circa 1000 W per centimetro quadrato di superficie anodica effettiva) in modo da mantenere la parte raffreddata ad una temperatura di funzionamento ottimale. L'acqua successivamente viene raffreddata ed infine pompata di nuovo verso il triodo.

Un flusso d'acqua non adeguato, considerando le elevate temperatura a cui può giungere la valvola, può provocare la formazione di vapore, che condensa sul contatto anodico, rendendo inutilizzabile il triodo. Nella pratica la temperatura dell'acqua in uscita dalla valvola è intorno ai 70 °C e viene successivamente inviata ad uno scambiatore di calore in modo da riportare la sua temperatura intorno ai 25 - 30 °C. L'acqua deve essere sempre tenuta ad una temperatura adeguata (di solito riportata nel data sheet della valvola) ed è necessario che possieda anche un notevole grado di purezza: la sua resistività specifica deve essere mantenuta intorno al $M\Omega/cm$ a 25 °C.

L'utilizzo di acque dure può causare il restringimento di alcune parti del sistema di raffreddamento, di conseguenza è meglio evitarle.

È preferibile usare acque distillate o deionizzate, in maniera tale che non possano verificarsi corrosioni dei componenti o delle protezioni interne a causa dei fenomeni di elettrolisi. Inoltre è necessario installare un filtro all'ingresso della valvola termoionica, che sia in grado di fermare eventuali polveri che potrebbero impedire il passaggio del liquido refrigerante.

Le connessioni tra i vari componenti devono realizzate con un materiale isolante, come ad esempio il polipropilene oppure il cloruro di polivinile (PVC).

Il sistema di raffreddamento a vapore offre alcuni vantaggi rispetto al classico sistema con circolazione di acqua poiché sfrutta il calore latente dell'evaporazione. Si tratta di un sistema molto più efficiente del semplice raffreddamento diretto dell'anodo. Per alzare la temperatura di un grammo di acqua da 40°C a 70°C servono 30 calorie.

Trasformare un grammo di acqua in vapore ad una temperatura di 100 °C richiede 540 calorie. Un tipico sistema di raffreddamento a vapore è costituito da un triodo con un anodo appositamente progettato per rimanere immerso in acqua distillata, un sistema di raffreddamento ed eventuali strutture ausiliarie per raccogliere il vapore. Nel momento in cui il triodo entra in conduzione, l'anodo si riscalda e dissipa il suo calore nell'acqua, che raggiunge i 100 °C e vaporizza. Il vapore acqueo entra successivamente in un sistema di raffreddamento, che lo riporta allo stato liquido e da qui il ciclo ricomincia.

Con questo sistema di raffreddamento si evita l'azione di pompaggio dell'acqua ed il sistema risulta molto più silenzioso.

La manutenzione è inoltre molto minore: l'acqua viene infatti distillata e purificata ad ogni ciclo, grazie alla vaporizzazione indotta dall'anodo. Una tecnica abbastanza recente è quella del raffreddamento multifase. Si tratta di un sistema intermedio tra quelli illustrati precedentemente estremamente efficiente, ma caratterizzato da costi più elevati. L'acqua di raffreddamento viene pompata, con una velocità relativamente alta, in prossimità dell'anodo attraverso un sistema di circolazione ausiliario.

L'acqua che entra in contatto con la superficie anodica vaporizza. Il vapore viene istantaneamente rimosso dalla superficie riscaldata dell'anodo, sfruttando la velocità dell'acqua restante. Successivamente condensa nel flusso stesso del refrigerante, prima di uscire dal triodo. La temperatura dell'acqua quando entra nella valvola termoionica è prossima ai 40°C, mentre quando esce è superiore ai 90°C.

Per garantire il funzionamento duraturo del triodo si deve utilizzare un'acqua estremamente pura e controllata: è necessario impedire che sull'anodo si depositino minerali, a seguito dell'evaporazione, che impedirebbero la conduzione.

Capitolo 4

Analisi del Circuito

4.1 Scelte progettuali

Ci sono numerose realizzazioni circuitali del sistema di pastorizzazione a radiofrequenza degli alimenti, a seconda delle caratteristiche dell'oscillatore e dell'applicatore. Nel seguito ne verranno presentate due: la prima realizzata con un oscillatore con oscillazione separata e la seconda realizzata con un oscillatore ad autoeccitazione. In entrambe, per il dimensionamento, si utilizza il metodo di Prince, che consente di derivare le formule per le correnti direttamente dalle caratteristiche statiche del triodo e dagli angoli di conduzione. La struttura di base di entrambi i circuiti è sempre la stessa ed è rappresentata schematicamente in figura 4.1.

Il generatore, come è già stato precedentemente detto, serve a fornire la potenza necessaria per la pastorizzazione degli alimenti. Gli elementi che lo caratterizzano sono:

- l'alimentatore, ottenuto con raddrizzatore a doppia semionda (ponte di Graetz) ed un condensatore;
- un oscillatore, necessario per generare l'oscillazione del campo elettromagnetico;
- un amplificatore, necessario per amplificare l'oscillazione (il triodo);
- alcuni elementi di controllo dell'oscillazione;

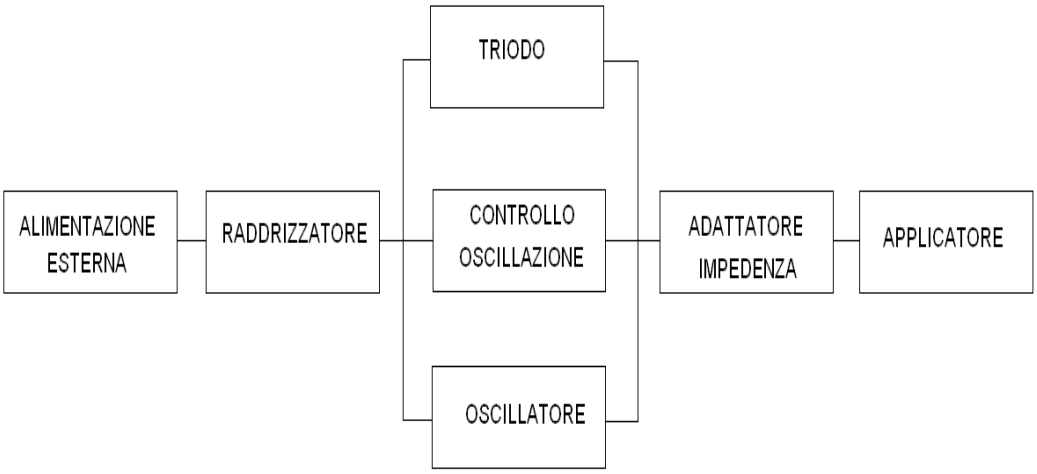

Figura 4.1: Schema completo del circuito di pastorizzazione

Per generare l'oscillazione, nella realizzazione con un oscillatore ad autoeccitazione, è stato scelto il modello secondo Colpitts (due condensatori ed un'induttanza), in modo da diminuire il numero dei nuclei magnetici. Inoltre poiché la frequenza di oscillazione del circuito è di 27 MHz (quindi molto al di sotto dei 100 MHz) l'oscillatore di Colpitts garantisce una migliore stabilità.

L'amplificazione viene ottenuta mediante un triodo. Come è già stato sottolineato nel capitolo precedente, per questo tipo di applicazioni il triodo è preferibile al mosfet di potenza a causa delle elevate potenze in gioco.

Esistono tre classi principali di oscillatori a triodi: A, B, C. Queste si differenziano tra loro per l'ampiezza dell'angolo di conduzione anodica, ossia quel particolare angolo (riferito ad un'onda sinusoidale applicata all'ingresso) per cui la corrente può fluire dal catodo verso l'anodo. I triodi di classe A sono caratterizzati da un angolo di conduzione costante di 360°, i triodi di classe B da un angolo di conduzione di circa 180° ed i triodi di classe C da un angolo di conduzione di meno di 180° (tipicamente compreso tra 90° e 120°). Per la realizzazione del circuito è stato scelto il triodo di classe C, in quanto consente di ottenere la massima efficienza utilizzando oscillatori. Con un amplificatore di classe C infatti è possibile ottenere un'amplificazione praticamente esente da distorsione.

Questo tipo di amplificatore lavora in modo tale che la potenza di uscita varia, senza alcuna limitazione, in funzione del quadrato della tensione anodica. Questa condizione viene ottenuta fornendo alla griglia una polarizzazione negativa tale da ridurre la corrente di placca a zero quando nessuna tensione di segnale entrante viene applicata alla griglia di comando. Applicando alla griglia una tensione alternata (segnale entrante), durante una frazione del mezzo ciclo positivo, si hanno delle grandi variazioni della corrente anodica. La corrente di uscita di un amplifi-

catore di classe C è quindi caratterizzata dal fatto di essere nulla per più di metà del periodo del segnale sinusoidale di ingresso.

Per sostenere l'oscillazione, rispettando le condizioni di Barkausen, è necessario introdurre degli elementi di controllo dell'oscillazione che siano in grado di garantirne un differente valore in fase di accensione ed a regime.

Nell'ottica di ottenere la massima efficienza è indispensabile lavorare con carichi adattati in modo da evitare riflessioni lungo la linea di trasmissione. In entrambe le realizzazioni è stato quindi scelto un adattore di impedenza secondo lo schema π. Questo è stato ottenuto con un accoppiamento magnetico tra le induttanze dell'adattatore e dell'oscillatore, usando un trasformatore monofase, al fine di garantire l'isolamento e ridurre il numero di nuclei magnetici da dimensionare. L'adattatore consente di compensare le componenti reattive del carico ed ottenere un'impedenza di carico adattata mediante il rapporto spire del trasformatore. I componenti devono necessariamente essere variabili, in quanto, come è già stato detto in precedenza, il riscaldamento a radiofrequenza porta ad una modifica delle proprietà elettromagnetiche del prodotto che viene trattato.

L'applicatore scelto è del tipo "parallel plate". Questa scelta consente di poter schematizzare in maniera molto semplice il carico come il parallelo di un condensatore (per tenere conto delle capacità parassite dell'applicatore) ed un resistore (per tenere conto della componente resistiva del prodotto da trattare).

4.2 Sistema con oscillatore ad oscillazione separata

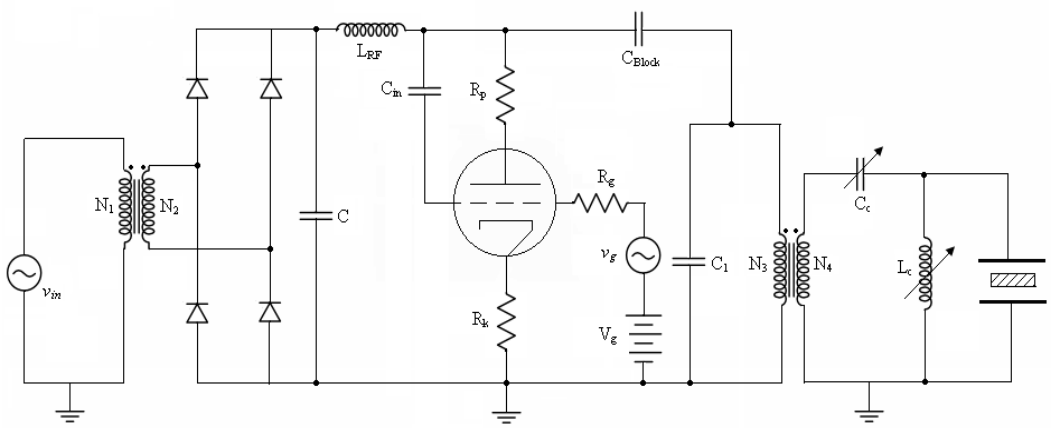

Figura 4.2: Sistema di pastorizzazione con oscillazione separata

Il circuito rappresentato viene definito ad *eccitazione separata*, in quanto la griglia viene eccitata con una sorgente esterna: questa soluzione permette di semplificare

notevolmente l'oscillatore, ma necessita di un secondo alimentatore per polarizzare la griglia.

La capacità C_{in} rappresenta la capacità di ingresso del triodo. Questa dovrebbe essere determinata come somma di due contributi: capacità griglia-anodo (C_{ga}) e la capacità griglia-catodo (C_{gk}) tenendo conto dell'effetto Miller, secondo il quale vale la seguente relazione

$$C_{in} = C_{gk} + (1 - A)\, C_{ga}$$

in cui A rappresenta il guadagno del triodo. Di conseguenza, tenendo conto che le capacità griglia-anodo e griglia-catodo, sono dell'ordine di grandezza del pF, allora si può approssimare $C_{in} \simeq (1 - A)\, C_{ga}$. La capacità di ingresso di un triodo amplificatore è quindi molto maggiore $(A \backsim 50)$ della semplice somma delle due capacità di griglia. Questo è da tenere in considerazione, poiché la capacità di ingresso insieme alla resistenza R di ingresso dell'amplificatore determina la costante di tempo RC, il cui reciproco, diviso per 2π, determina la frequenza di taglio del circuito $\left(f = \frac{1}{2\pi RC}\right)$.

Il resistore R_p rappresenta la resistenza parassita della placca, mentre il resistore R_k quella del catodo. R_g invece viene calcolato come il contributo resistivo della resistenza di griglia del triodo e della resistenza parassita dei generatori di tensione.

In questa realizzazione la griglia del triodo viene controllata mediante una tensione alternata ed una tensione continua in modo da poter modulare la differenza di potenziale tra essa ed il catodo, ottenendo una corrente anodica periodica. La tensione continua è necessaria per fissare il punto di lavoro. In generale tutti i tipi di valvole usate come amplificatrici, la griglia di controllo viene mantenuta costantemente ad una tensione negativa rispetto al catodo.

La ragione di questa polarizzazione negativa può essere facilmente compresa. Se la griglia di comando si trovasse allo stesso potenziale del catodo, nella fase in cui il segnale applicato alla griglia rende questa positiva rispetto al catodo, essa funzionerebbe come acceleratrice ed anche come anodo secondario, assorbendo una parte di elettroni che dal catodo vanno verso l'anodo. In questo modo si avrebbe che, a causa di una corrente secondaria, la fase positiva dell'alternanza avrebbe un'amplificazione differente da quella negativa, ovvero l'andamento della corrente alternata verrebbe deformato. Inoltre la corrente di griglia potrebbe far generare alla valvola termoionica delle oscillazioni. La polarizzazione costante da dare alla griglia deve essere tale da far lavorare la valvola nella parte rettilinea della curva caratteristica, immediatamente sopra il "ginocchio", altrimenti l'amplificazione non è più costante durante il funzionamento del circuito e si possono avere delle deformazioni nella forma d'onda della corrente.

L'induttanza L_{RF}, chiamata anche *choke* ("bobina d'arresto") è un elemento caratteristico di molti circuiti a radiofrequenza. Viene dimensionata in modo da avere, alla frequenza di oscillazione del circuito, un valore di reattanza molto elevato. Serve per staccare l'anodo del triodo dall'alimentazione.

C_{Block} è una capacità di filtro: si comporta come un filtro passa-alto, bloccando la tensione continua ed attenuando molto le componenti a bassa frequenza. Serve a rendere la tensione anodica alternata, filtrando la tensione amplificata che proviene dal circuito di griglia . Il condensatore C_1insieme al primario del trasformatore di uscita costituiscono l'oscillatore. La frequenza di oscillazione del circuito è determinata dal prodotto della capacità C_1e dal valore dell'induttanza del primario. La capacità C_c, l'induttanza $L_c$ed il secondario del trasformatore di uscita costituiscono l'adattore di uscita che ha il compito di compensare le componenti capacitive del carico e garantire che l'impedenza di carico sia adattata.

4.2.1 Il modello di Everitt-Prince

Per il calcolo approssimato delle correnti medie e di picco è possibile utilizzare il modello di Prince. Questo modello consente di determinare manualmente i valori delle correnti del circuito, utilizzando le caratteristiche delle tensioni di griglia ed anodo, una volta noto l'angolo di conduzione dell'amplificatore. Come è già stato detto in precedenza, l'amplificatore scelto è di classe C, in modo tale da avere un angolo di conduzione ϑ inferiore a 180°.

La componente della tensione di placca e di griglia sono sempre sinusoidali, in quanto il circuito realizzato è un circuito risonante. Le correnti di placca e la corrente di griglia sono in ogni istante il risultato combinato dell'azione dei potenziali di placca e di griglia, le loro forme d'onda hanno un andamento impulsivo e sono diverse da zero solamente quando la tensione di placca e di griglia sono rispettivamente al valore minimo ed al valore massimo. La somma della corrente di placca e della corrente di griglia rappresenta la corrente totale che scorre nella valvola termoionica.

Definendo i seguenti valori

E_c valore della tensione continua di griglia

G ampiezza della tensione alternata di griglia

e_g valore istantaneo della tensione di griglia

E_p valore della tensione continua di placca

A ampiezza della tensione alternata di placca

e_p valore istantaneo della tensione di placca

$\hat{I}_1$ ampiezza della componente fondamentale della corrente di placca

I_p valore medio della corrente di placca

i_p valore istantaneo della corrente di placca

ϑ un generico angolo di conduzione di placca

R_L l'impedenza di carico (puramente resistiva)

μ amplificazione del triodo

L'equazione caratteristica di un triodo è la seguente

$$i_p = g_m \left(e_g + \frac{e_p}{\mu} \right)^{\alpha} \tag{4.1}$$

nelle figure 4.3 e 4.4 sono riportati gli andamenti delle tensioni e delle correnti di placca e di griglia in regime sinusoidale

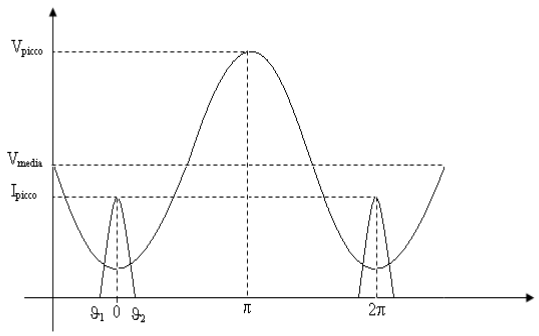

Figura 4.3: Tensione e corrente di placca

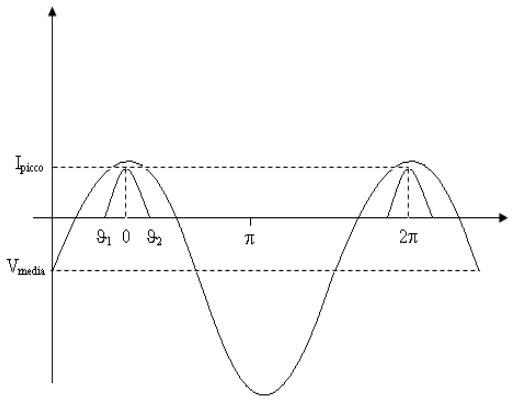

Figura 4.4: Tensione e corrente di griglia

In cui g_m è una costante di proporzionalità che dipende dalle caratteristiche della valvola. Nel caso in cui il triodo sia ideale e perfettamente simmetrico α è pari a $\frac{3}{2}$. Nella pratica, invece è inferiore al valore ideale: valori tipici sono $1,2$ oppure $1,3$. Il modello di Everitt-Prince prevede di linearizzare la caratteristica del triodo, scegliendo $\alpha = 1$. La principale assunzione di questo metodo è di considerare delle forme d'onda sinusoidali per la tensione di griglia e la tensione di placca.

Per fissare il punto di lavoro della valvola, la placca è polarizzata positivamente in continua mentre la griglia negativamente in continua. Si possono allora scrivere le seguenti equazioni

$$e_p = E_p - A\cos\vartheta$$

$$e_g = -E_g + G\cos\vartheta$$

$$\vartheta = \omega t$$

Sostituendo queste espressioni in (4.1) si giunge ad ottenere la relazione

$$i_p = g_m\left(E\cos\vartheta + E_0\right) \tag{4.2}$$

definendo $E = G - \frac{A}{\mu}$ ed $E_0 = E_c - \frac{E_p}{\mu}$.
Il valore di i_p risulta diverso da zero (triodo in conduzione) per $E\cos\vartheta + E_0 > 0$, in caso contrario il valore della corrente di placca è nullo ed il triodo è in interdizione.
Il valore di $\hat{I}_1$, ovvero il valore della componente fondamentale della corrente di placca, può essere valutata calcolando il valore del primo coefficiente di Fourier della corrente di placca

$$\hat{I}_1 = \frac{2g_m}{\pi}\int_0^{\pi}\cos\vartheta\left(E\cos\vartheta + E_0\right)d\vartheta$$

Il valore della corrente di placca è tuttavia pari a zero per buona parte del semiperiodo della tensione applicata, pertanto conviene ridefinire l'estremo di integrazione, introducendo l'angolo di conduzione anodica $\vartheta_p = \arccos\frac{E_0}{E}$.
Il massimo valore della corrente di placca si ottiene allora dalla relazione

$$\hat{I}_1 = \frac{2g_m}{\pi}\int_0^{\vartheta_p}\left(E\cos\vartheta + E_0\right)\cos\vartheta d\vartheta \tag{4.3}$$

Integrando si ottiene

$$\hat{I}_1 = \frac{e' g_m}{\pi}\left(\vartheta_p - \frac{\sin 2\vartheta_p}{2}\right) = \frac{g_m E}{\beta_p} \tag{4.4}$$

definendo $\beta_p = \frac{2\pi}{2\vartheta_p - \sin 2\vartheta_p}$
Il valore della corrente media di placca $(\bar{I}_p)$ può essere calcolata come

$$\bar{I}_p = \frac{g_m}{\pi}\int_0^{\vartheta_p}\left(E\cos\vartheta + E_0\right)d\vartheta$$

Integrando e sostituendo il valore di E_0, precedentemente definito, si ottiene

$$\bar{I}_p = \frac{E g_m}{\pi} (\sin \vartheta_p - \vartheta_p \cos \vartheta_p) \tag{4.5}$$

Si può allora vedere che il rapporto tra la fondamentale della corrente di placca $\hat{I}_1$ (4.3) e la corrente media di placca $\bar{I}_p$ (4.5) è funzione unicamente dell'angolo di conduzione ϑ_p

$$\frac{\hat{I}_1}{\bar{I}_p} = \chi_p = \frac{\vartheta_p - \sin \vartheta_p \cos \vartheta_p}{\sin \vartheta_p - \vartheta_p \cos \vartheta_p} \tag{4.6}$$

Il modello di Everitt-Prince consente di determinare anche il valore di picco della corrente di placca, in funzione dell'angolo di conduzione ϑ_p. Usando la relazione (4.2) è possibile ottenere il valore della corrente di picco, inteso come valore massimo della componente di prima armonica

$$\hat{I}_p = (E + E_0)\, g_m = E(1 - \cos \vartheta_p) g_m$$

Dividendo questa relazione per la (4.5) si arriva ad ottenere il risultato cercato

$$\frac{\hat{I}_p}{\bar{I}_p} = \frac{\pi (1 - cos \vartheta_p)}{\sin \vartheta_p - \vartheta_p \cos \vartheta_p} = \psi_p \tag{4.7}$$

Relazioni simili esistono anche per le correnti di griglia, ma la loro derivazione non è altrettanto semplice. La corrente totale all'interno di un triodo è sempre data dalla somma $i_s = i_p + i_g$ ovvero dalla somma della corrente istantanea di griglia (elettroni che dal catodo si muovono verso la griglia) e della corrente istantanea di placca (elettroni che dalla griglia si muovono verso la placca). La corrente di griglia è molto spesso trascurabile rispetto alla corrente di placca tranne quando, durante un ciclo di funzionamento, la griglia diventa positiva rispetto all'anodo. In questo caso infatti non c'è flusso elettronico tra griglia e placca, ma solamente tra griglia e catodo. Questa è la condizione di funzionamento peggiore, in quanto gli elettroni del catodo vengono attirati dalla griglia e la portano ad avere una polarizzazione negativa. La carica elettronica che si accumula sulla griglia deve essere opportunamente contenuta (mediante l'introduzione di una o più resistenze di fuga), altrimenti la griglia perde la sua capacità di modulare la corrente totale. Il procedimento per la determinazione del valore di picco della corrente di griglia, in funzione dell'angolo di conduzione di griglia ϑ_g, non è semplice come nel caso della corrente di placca. Nel seguito verranno indicati solo i passaggi principali, riportando il risultato finale.

Il rapporto tra la corrente istantanea di placca e la corrente istantanea di griglia è proporzionale, mediante l'Equazione di Everitt [8] alla radice quadrata del rapporto tra la tensione istantanea di placca e la tensione istantanea di griglia.

$$\frac{i_p}{i_g} = \delta\sqrt{\frac{e_p}{e_g}} \tag{4.8}$$

δ rappresenta un coefficiente costante che viene chiamato *fattore di divisione delle correnti*.

La corrente istantanea totale del triodo, come è già stato detto precedentemente, è pari alla somma della corrente istantanea di griglia e della corrente istantanea di placca

$$i_s = i_g + i_p = i_g(1 + \frac{i_p}{i_g})$$

usando l'Equazione di Everitt (4.8) è possibile ottenere l'espressione

$$i_s = i_g + i_p = i_g(1 + \delta\sqrt{\frac{e_p}{e_g}})$$

considerando ora che $i_g \ll i_p$ si può procedere scrivendo

$$i_s \sim i_p = i_g(1 + \delta\sqrt{\frac{e_p}{e_g}})$$

da cui, usando la (4.1) per $\alpha = 1$, si ottiene l'espressione

$$i_g = \frac{g_m(e_g + \frac{e_p}{\mu})}{1 + \delta\sqrt{\frac{e_p}{e_g}}} = \frac{g_m(E\cos\vartheta + E_0)}{1 + \delta\sqrt{\frac{E_p - A\cos\vartheta}{E_g - G\cos\vartheta}}} = \frac{g_m\left[\left(G - \frac{A}{\mu}\right)\cos\vartheta + \left(E_c - \frac{E_p}{\mu}\right)\right]}{1 + \delta\sqrt{\frac{E_p - A\cos\vartheta}{E_g - G\cos\vartheta}}} \tag{4.9}$$

procedendo come nella (4.3) e nella (4.5), calcolando il valore della componente di prima armonica ed il valore medio, si giunge ad ottenere il rapporto tra la corrente di picco e la corrente media. Per semplicità di seguito viene riportato solo il risultato [10]

$$\frac{\hat{I}_g}{\bar{I}_g} = \frac{\pi(1 - \cos\vartheta_g)^2}{\vartheta_g(\cos^2\vartheta_g + \frac{1}{2}) - \frac{3}{2}\sin 2\vartheta_g} = \psi_g \tag{4.10}$$

4.2.2 Cenni sul dimensionamento

La frequenza f di oscillazione del circuito risonante viene calcolata come

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Considerando $f = 27\text{MHz}$ allora l'induttanza e la capacità del circuito risonante devono verificare la relazione inversa

$$LC = \left(\frac{1}{2\pi f}\right)^2$$

Utilizzando la relazione (4.7) ed il valore della corrente media di placca $\bar{I}_p$ (ottenuta come della corrente anodica mediata su un periodo) è possibile ricavare il valore di picco della corrente di placca, $\hat{I}_p$.

$$\hat{I}_p = \bar{I}_p \psi_p = \bar{I}_p \frac{(\pi - \cos\vartheta_p)}{\sin\vartheta_p - \vartheta_p \cos\vartheta_p}$$

In maniera analoga è possibile ottenere il valore di picco della corrente di griglia, $\hat{I}_g$

$$\hat{I}_g = \bar{I}_g \psi_g = \bar{I}_g \frac{\pi(1-\cos\vartheta_g)^2}{\vartheta_g(\cos^2\vartheta_g + \frac{1}{2}) - \frac{3}{4}\sin 2\vartheta_g}$$

Il valore $\hat{I} = \hat{I}_g + \hat{I}_p$ rappresenta il valore di picco della corrente totale che attraversa l'amplificatore

Definendo R_a, come il valore di resistenza effettiva del circuito di placca, ottenuto come il parallelo della resistenza di placca R_p e la resistenza dello stadio successivo, è possibile calcolare il valore di picco della tensione anodica $\left(\hat{V}_a\right)$.

$$\hat{V}_a = R_a \hat{I}_a = R_a \bar{I}_a \frac{\pi\,(1-\cos\vartheta_a)}{\sin\vartheta_a - \vartheta_a \cos\vartheta_a}$$

La potenza dissipata nell'anodo del triodo (P_a) può essere calcolata con la relazione

$$P_a = P_{ia} - P_o$$

nella quale P_{ia} rappresenta la potenza entrante nell'amplificatore e P_o rappresenta la potenza uscente.

Il condensatore C_{Block} deve essere dimensionato in modo tale che, alla frequenza di oscillazione del circuito, la sua reattanza non sia troppo elevata. Il suo valore può essere scelto considerando la relazione

$$\frac{1}{2\pi f C_{Block}} \leq 50\Omega$$

Da cui allora è possibile ricavare

$$C_{Block} \geq \frac{1}{2\pi f 50\Omega}$$

Considerando $f = 27$MHz si ottiene allora che $C_{Block} \geq 118pF$

4.3 Sistema con oscillatore ad auto-eccitazione

Una seconda realizzazione, leggermente più complicata, si ha utilizzando un oscillatore ad auto-eccitazione secondo lo schema di Colpitts.

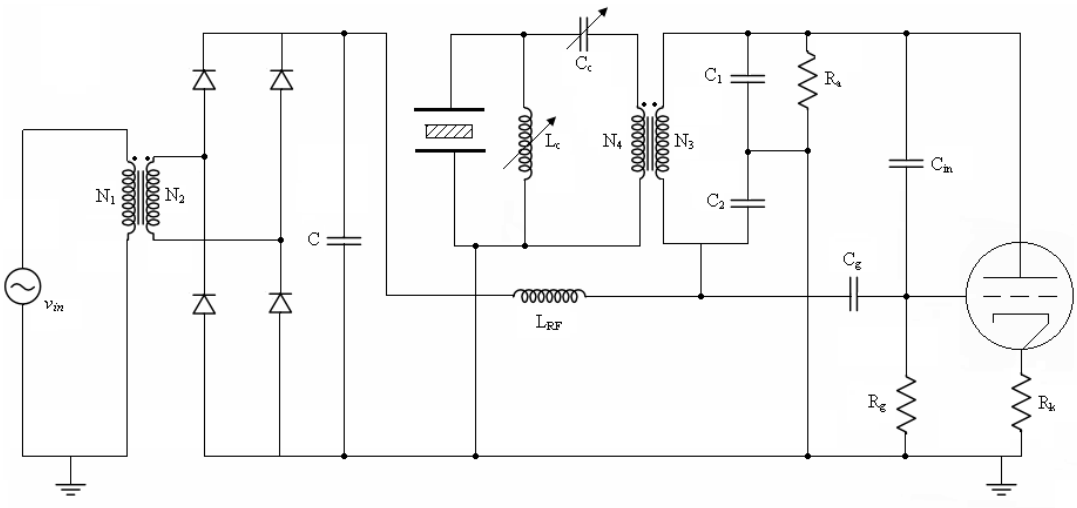

Figura 4.5: Sistema di pastorizzazione realizzato un oscillatore ad auto-eccitazione

La caratteristica del circuito è di essere retroazionato positivamente. Il circuito rappresentato viene definito "ad autoeccitazione", in quanto l'eccitazione della griglia viene ottenuta dall'accoppiamento dei due circuiti di placca e di griglia.

Il principio di funzionamento prevede di eccitare il triodo con una corrente alternata di alta frequenza, applicata alla griglia. Le oscillazioni generate da questa corrente passano, amplificate, nel circuito di placca. Con un opportuno sistema di accoppiamento le oscillazioni di placca vengono riportare nuovamente sulla griglia, in maniera tale che esse ritornano sul circuito di placca ancora amplificate. Questo procedimento viene iterato: le oscillazioni arrivano, dopo un certo tempo, ad un massimo limitato dalla caratteristica stessa della valvola termoionica. La corrente di placca dunque non aumenta indefinitamente con la tensione di griglia per tre motivi principali:

- l'emissione elettronica del filamento è limitata ad un valore massimo, relativo alla sua temperatura;

- all'aumentare della corrente di placca, la corrente spaziale (ovvero gli elettroni che vengono a trovarsi in un dato istante tra il filamento e la placca), aumenta parallelamente neutralizzando una parte della carica positiva della placca;
- le oscillazioni vengono limitate in ampiezza dalla presenza di una corrente di griglia, il cui contributo è importante tanto più la tensione positiva di questo elettrodo è elevata.

L'oscillazione è generata con il primario del trasformatore di uscita e con le capacità C_1 e C_2 ed è in grado di autosostenersi finché vi è alimentazione. Il resistore R_a rappresenta la "resistenza di placca effettiva" del triodo ed è ottenuto come il parallelo tra la resistenza di placca R_p e la resistenza di ingresso dello stadio successivo.

La polarizzazione negativa della griglia rispetto al catodo viene ottenuta sfruttando l'accumulo di elettroni sulla griglia durante la conduzione. Il condensatore C_g infatti è in grado di garantire un "accoppiamento capacitivo" tra il circuito di placca e quello di griglia: questo permette di ridurre il numero ed il costo dei componenti del circuito di polarizzazione.

Quando l'oscillatore di Colpitts, costituito dal primario del trasformatore di uscita N_3 e dai due condensatori C_1 e C_2, diviene sede dell'oscillazione, il condensatore C_g trasmette questa oscillazione alla griglia di comando. Nel semiperiodo in cui la corrente alternata rende la griglia positiva rispetto al catodo, la griglia attira gli elettroni del catodo.

Se non esistessero il condensatore C_g ed il resistore R_g e la griglia fosse collegata direttamente ad un estremo dell'oscillatore e l'altro estremo del circuito fosse collegato direttamente al catodo, non vi sarebbe modo di controllare la corrente anodica con la griglia, in quanto gli elettroni attirati da questa tornerebbero al catodo. Il condensatore di griglia C_g ha proprio la funzione di evitare che questo accada: deve impedire il ritorno degli elettroni al catodo.

Utilizzando il resistore R_g ed il condensatore C_g si può fare in modo che la griglia venga ad acquisire una carica negativa costante rispetto al catodo, carica che diviene ancora più negativa nel secondo semiperiodo, quando il condensatore C_g comunica alla griglia l'impulso negativo (condizione che equivale all'assenza di corrente anodica).

Il resistore R_g, che tipicamente ha un valore molto elevato, serve per scaricare la capacità C_g: viene opportunamente dimensionato in modo tale che la scarica della capacità, durante un ciclo di funzionamento, non sia mai completa. In questo modo ai capi del condensatore C_g vi è sempre un eccesso di elettroni che permettono di polarizzare negativamente la griglia.

Il valore del resistore R_g può andare da alcuni $K\Omega$ fino a diversi $M\Omega$. Il suo dimensionamento deve sempre essere rapportato alla frequenza (e quindi al periodo) del segnale sinusoidale del circuito. Si deve tenere presente che se il suo valore è

troppo elevato la griglia finisce per divenire così negativa rispetto al catodo, da non permettere più il passaggio di elettroni dal catodo all'anodo. Se però il suo valore è troppo basso non è invece possibile riuscire a controllare la corrente del triodo, in quanto non si riesce a polarizzare abbastanza inversamente la griglia.

Il condensatore C_g ha invece come ordine di grandezza il centinaio di pF (per il dimensionamento di C_g vi sono anche delle altre condizioni da prendere in considerazione).

4.3.1 L'oscillatore di Colpitts

Gli oscillatori sinusoidali sono degli amplificatori che forniscono un segnale armonico di ampiezza e frequenza desiderata, senza l'ausilio di alcun segnale di ingresso. Contrariamente agli astabili, che operano tra una saturazione e l'altra, gli oscillatori sinusoidali operano in ragione lineare e, sostanzialmente, sono degli amplificatori che a regime si autopilotano. Per generare il segnale armonico, essi utilizzano una retroazione positiva con $A_{loop} = 1$ ed una coppia di poli complessi coniugati a parte reale nulla, in modo che possano rispondere al gradino con una risposta oscillatoria persistente.

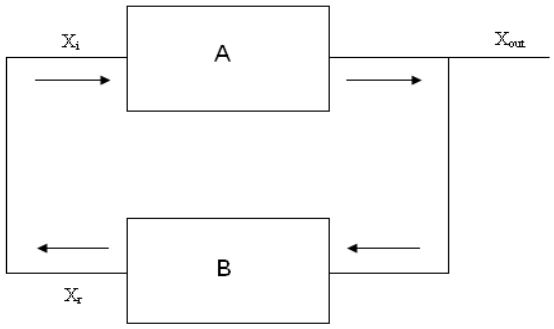

Figura 4.6: Schema di un oscillatore retroazionato

Nello schema di figura 4.6 si vede che l'amplificazione di anello è $A_{loop} = AB$. Per ricavare la condizione di oscillazione è sufficiente notare che, a regime, vale la relazione:

$$X_{out} = AX_i = AX_r = ABX_{out}$$

Affinché questa condizione sia verificata, ovviamente con $X_{out} \neq 0$, è necessario che sia:

$$AB = A_{loop} = 1 \tag{4.11}$$

Questo significa che in un oscillatore sinusoidale devono essere verificate queste condizioni:

- il segnale nel percorrere l'anello di retroazione, non deve essere complessivamente né attenuato né amplificato, ovvero: $|A_{loop}| = 1$;
- lo sfasamento totale, subito dal segnale lungo l'anello, deve essere complessivamente nullo oppure un multiplo intero di 360°: $\Phi_{loop} = 0$;

La condizione (4.11) è nota come *Condizione di Barkausen* e deve essere soddisfatta ad un'unica frequenza: quella di oscillazione, altrimenti il segnale è periodico, ma non sinusoidale. Per fare in modo che la condizione di oscillazione sia verificata alla sola frequenza di oscillazione, è necessario che il quadripolo di reazione sia selettivo.

Per poter innescare l'oscillazione è necessario procedere nel seguente modo:

- dimensionare l'oscillatore facendo in modo che, all'atto dell'accensione, risulti $A_{loop} > 1$ alla frequenza di oscillazione f_0; in queste condizioni il sistema è instabile e risponde al gradino con una risposta oscillatoria crescente;
- per evitare che l'ampiezza delle oscillazioni cresca in modo eccessivo, raggiungendo la saturazione dell'amplificatore e producendo quindi un'uscita distorta, si deve inserire un controllo automatico su A_{loop}. Nella pratica si fa in modo che, all'aumentare dell'ampiezza delle oscillazioni, A_{loop} si vada riducendo. Nel momento in cui $A_{loop} = 1$ le oscillazioni si stabilizzano;

Molti oscillatori che lavorano nel campo delle alte frequenza (dai 300 kHz in su), rientrano nella categoria degli "oscillatori a tre punti". Vengono chiamati così perché l'amplificatore ed il quadripolo di reazione hanno tre punti in comune (la massa, l'ingresso e l'uscita dell'amplificatore). Il quadripolo di reazione è di tipo *LC* e la condizione di oscillazione, ricavata applicando la *Condizione di Barkausen*, impone che le sue tre reattanze verifichino la seguente relazione:

$$X_1 + X_2 + X_3 = 0 \tag{4.12}$$

Ne consegue pertanto che le tre reattanze non possano essere uguali tra loro; vi sono due possibilità:

- due reattanze capacitive ed una induttiva, in questo caso l'oscillatore è del tipo secondo Colpitts;
- due reattanze induttive ed una capacitiva, in questo caso l'oscillatore è secondo Hartely;

Negli oscillatori secondo Colpitts, la frequenza di oscillazione si ricava tenendo presente la (4.12) e riscrivendola come segue

$$-\frac{1}{\omega C_1} - \frac{1}{\omega C_2} + \omega L = 0$$

dalla quale si ottiene

$$\omega L = \frac{1}{\omega}\left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}\right) = \frac{1}{\omega C_s}$$

essendo $\frac{1}{C_s} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$ e $C_s = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$; da questo si ricava allora che la frequenza di oscillazione di un oscillatore, secondo il modello di Colpitts, è data da:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_s}}$$

Inoltre se l'oscillatore di Colpitts è realizzato con un amplificatore invertente, vi è un vincolo che devono soddisfare le reattanza capacitive, in modo da permettere la persistenza dell'oscillazione.

Definito come $A_v(f_0)$ il guadagno dell'amplificatore alla frequenza di oscillazione f_0, deve essere verificata anche la condizione:

$$|A_v(f_0)|C_2 = C_1$$

Molto spesso accade che $|A_v(f_0)| \gg 1$ (come nel caso del triodo) ed allora, in questo caso, deve risultare necessariamente $C_1 \gg C_2$.

4.3.2 Caratteristiche del dimensionamento

La frequenza di oscillazione f del circuito deve essere pari a 27 MHz e viene determinata come

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = 27 \times 10^6 Hz$$

avendo posto $C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$

Utilizzando le relazioni dimostrate nei paragrafi precedenti è possibile ottenere i valori di picco delle correnti di placca e griglia.

Il valore di picco della corrente di placca è espresso dalla relazione (4.7)

$$\hat{I}_p = \bar{I}_p \psi_p = \bar{I}_p \frac{\pi(1 - \cos\vartheta_p)}{\sin\vartheta_p - \vartheta_p \cos\vartheta_p}$$

Il valore di picco della corrente di griglia è invece espresso dalla relazione (4.10)

$$\hat{I}_g = \bar{I}_g \psi_g = I_g \frac{\pi (1 - \cos \vartheta_g)^2}{\vartheta_g \left(\cos^2 \vartheta_g + \frac{1}{2}\right) - \frac{3}{2} \sin 2\vartheta_g}$$

Il valore della capacità di griglia viene scelto affinché la sua reattanza, alla frequenza di funzionamento dell'oscillatore, si comporti come un come un cortocircuito

$$\frac{1}{2\pi f C_g} \cong 0$$

Considerando $f = 27$MHz valori tipici della capacità di griglia C_g sono dell'ordine del centinaio di nF.

La capacità di griglia C_g deve essere scelta in modo che la sua scarica non sia mai completa durante un ciclo di funzionamento, di periodo $T = \left(27 \times 10^6 Hz\right)^{-1} \simeq 37ns$.

Considerando che la scarica di un circuito RC può considerarsi conclusa dopo un tempo $t = 5\tau = 5R_gC_g$ si può allora porre come condizione $t < T$ ovvero $\tau < \frac{T}{5}$, da cui

$$R_g C_g < \frac{T}{5}$$

Scegliendo $R_g = 100K\Omega$ si ottiene che $C_g < 74fF$.

Capitolo 5

Applicazioni della pastorizzazione RF

5.1 Vantaggi della tecnologia RF

La tecnologia di pastorizzazione mediante radiofrequenze è stata sviluppata negli ultimi anni dalla STALAM S.p.A., un'azienda veneta leader a livello mondiale nello studio, progettazione e realizzazione di impianti che utilizzino campi elettromagnetici capacitivi per processi di trattamento termico di materie prime, semilavorati e prodotti industriali finiti.

Attualmente sono in opera, in diversi settori industriali, più di 1500 impianti a radiofrequenza STALAM con potenze nominali da 3 a 250 kW.

I vantaggi offerti dal sistema di pastorizzazione mediante radiofrequenze, rispetto ai sistemi tradizionali, si possono raggruppare in tre categorie:

- vantaggi economici;
- vantaggi tecnici;
- aspetti di sicurezza;

Questi vantaggi sono dovuti sia alle caratteristiche del meccanismo di riscaldamento endogeno indotto dalle radiofrequenze, sia alle caratteristiche dell'impianto utilizzato.

I vantaggi prettamente economici riguardano il rendimento degli impianti ed il loro costo. I sistemi di pastorizzazione tradizionali, che utilizzano direttamente delle fonti energetiche primarie per generare calore, presentano dei rendimenti globali nell'intervallo 10 - 35 %. Al contrario i sistemi di pastorizzazione a radiofrequenza presentano dei rendimenti medi del 65-70 %. Questo risultato è ottenuto grazie alla possibilità di limitare le perdite energetiche, generando il calore direttamente

all'interno del prodotto ed utilizzando adattatori di impedenza variabili che consentono di operare sempre su una linea elettrica adattata, evitando così distorsioni o riflessioni delle grandezze elettriche del circuito.

Gli impianti di pastorizzazione a radiofrequenza risultano quindi più efficienti in termini di consumo di energia: il riscaldamento del prodotto da trattare ha inizio immediatamente all'avviamento dell'impianto ed il consumo di energia è determinato dalla presenza di un alimento tra gli elettrodi, che sia in grado di assorbire l'energia fornita dal campo elettromagnetico oscillante e dissiparla sottoforma di calore. L'ambiante circostante non è quindi interessato dal processo di riscaldamento e non contribuisce in alcun modo al consumo energetico.

L'investimento iniziale per acquistare un impianto di pastorizzazione a radiofrequenza è superiore all'investimento necessario per acquistare un impianto equivalente, che sfrutta i meccanismi di pastorizzazione tradizionali o ohmici. Tuttavia il risparmio energetico, derivante dall'utilizzo di un apparecchio a radiofrequenza, determina un ritorno dell'investimento iniziale in tempi molto brevi.

I vantaggi tecnici, derivanti dall'utilizzo del sistema a radiofrequenza, sono:

- la velocità di riscaldamento: il riscaldamento mediante radiofrequenze è rapidissimo, fino a circa 1°C/s. Questo consente di pastorizzare anche alimenti "critici": è noto infatti che molte sostanze organiche ed in particolare quelle di origine naturale, come il già citato semilavorato di fragola per yogurt, sono estremamente sensibili ai trattamenti termici prolungati. Mantenere una temperatura piuttosto elevata per tempi lunghi può comportare degradazioni irreversibili a livello molecolare e causare quindi alterazioni permanenti delle loro proprietà chimiche, meccaniche ed organolettiche;

- l'uniformità del riscaldamento: come era già stato sottolineato nei capitoli iniziali, sia i sistemi tradizionali che i sistemi ohmici non erano in grado di garantire per tutti i prodotti un trattamento termico uniforme. La lentezza tipica dei processi di riscaldamento "dall'esterno" infatti comporta l'instaurarsi di gradienti termici, tanto maggiori quanto minore è la conducibilità termica. Il risultato inevitabile è una non uniformità nelle caratteristiche del prodotto finale, poiché le parti più esterne dell'alimento vengono sottoposte ad un'azione termica maggiore rispetto alle parti più interne. Anche nel sistema ohmico era stato evidenziato un problema di non uniformità della temperatura del prodotto durante il trattamento, poiché la conducibilità dell'alimento non è costante a causa della sua composizione chimico-fisica. Il sistema a radiofrequenza consente di riscaldare uniformemente l'alimento da pastorizzare grazie all'eccitazione vibro-rotazionale indotta dal campo elettromagnetico esterno sulle sue molecole, permettendo in questo modo di trattare efficacemente anche gli alimenti liquidi con solidi in sospensione;

- la diminuzione della carica batterica in tempi molto brevi: la figure 5.1 e 5.2 mostrano il decadimento microbico (in scala logaritmica) ottenuto con

il sistema tradizionale e il decadimento microbico ottenuto con il sistema a radiofrequenza;

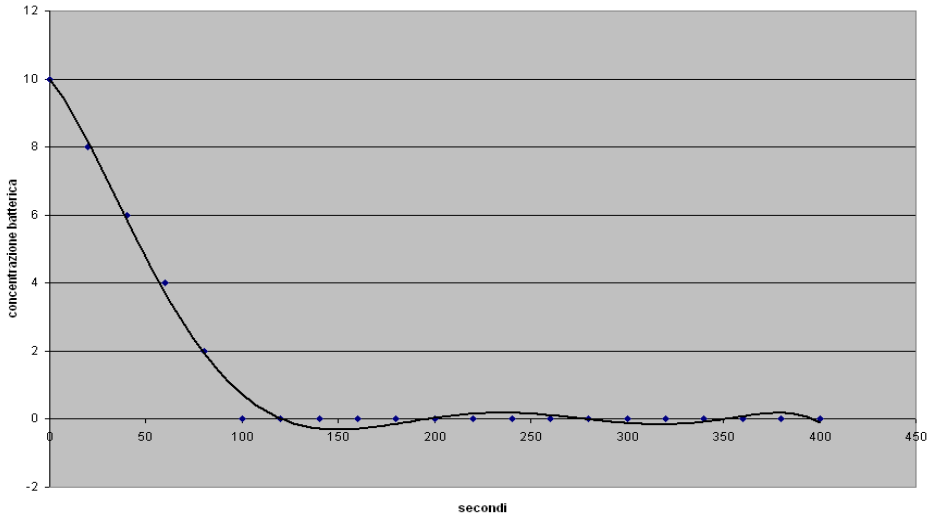

Figura 5.1: decadimento microbico ottenuto con il sistema di pastorizzazione a radiofrequenza

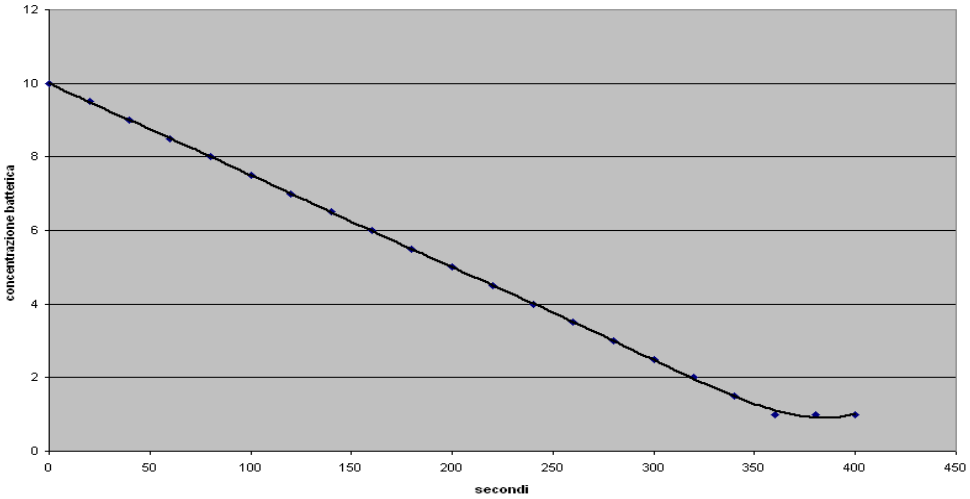

Figura 5.2: decadimento microbico ottenuto con il sistema di pastorizzazione tradizionale

- la bassa dispersione termica nell'ambiente: a differenza del sistema ohmico e del sistema tradizionale infatti la dissipazione di calore nell'ambiente è

molto limitata, grazie alla riduzione dei tempi necessari per portare a termine il processo;

- la semplice e poco frequente manutenzione degli impianti: a differenza del sistema ohmico non vi è contatto tra gli elettrodi e l'alimento e di conseguenza essi possono essere controllati meno frequentemente;
- l'assenza di fumi, vapori e rumori: con questo sistema il calore infatti è generato direttamente all'interno del prodotto e molto spesso non sono necessari meccanismi di pompaggio;

L'utilizzo di impianti a radiofrequenza non induce alcun rischio per la salute dell'operatore, in quanto l'impianto non presenta emissione di campi elettromagnetici. Grazie ad un'accurata progettazione sono stati infatti realizzati sistemi di contenimento, non soggetti ad usura, del campo all'interno della cabina di trattamento che impediscono la fuoriuscita di onde elettromagnetiche. Rimangono di conseguenza solo i rischi, comuni anche agli altri sistemi di pastorizzazione, legati prevalentemente alla presenza di superfici calde [27].

Dal punto di vista della compatibilità elettromagnetica si deve osservare che i sistemi di automazione e contenimento riducono completamente ogni tipo di disturbo, rendendo l'impianto in grado di funzionare in ogni ambiente di lavoro, anche in presenza di apparecchiature sofisticate. L'intera installazione soddisfa le normative vigenti sulla sicurezza dei macchinari, sulla compatibilità elettromagnetica, ed è provvista di marcatura CE [2].

5.2 Il semilavorato di fragola per yogurt

Come è già stato sottolineato all'inizio, la fragola è un frutto la cui struttura è molto sensibile agli shock termici. Il sistema di pastorizzazione a radiofrequenza è in grado di garantire un abbattimento della carica batterica, ottenendo un prodotto finale con elevate caratteristiche qualitative, come ad esempio il rispetto dei contenuti aromatici naturali della frutta, della struttura interna dei pezzi e delle sostanze vitaminiche contenute nella miscela di partenza.

Le parti principali del processo di trattamento sono:

- il ciclo di lavaggio e sterilizzazione dell'impianto;
- la fase di messa a regime;
- la pastorizzazione;

Le uniche fonti di energia utilizzate sono: elettricità, acqua ed aria compressa. Il vapore, elemento caratteristico per effettuare gli scambi termici nei sistemi di pastorizzazione tradizionali, non viene utilizzato. La potenza elettrica installata è,

complessivamente, pari a 200 kW. Il consumo di acqua massimo risulta di circa 20 m^3/h.

Il semilavorato di fragola giunge alla vasca di alimentazione ad una temperatura di circa 60°C. Successivamente viene esposto alla radiazione elettromagnetica, arrivando alla temperatura di circa 98 °C. I tempi di riscaldamento sono di qualche secondo, la temperatura è uniforme in tutta la sezione del prodotto e la temperatura viene mantenuta entro $\pm 0,5$°C. Successivamente il prodotto viene raffreddato e viene portato alla temperatura desiderata per il confezionamento (circa 30°C). Le portate sono mediamente di 2000 Kg/h.

L'abbattimento dei tempi del processo è legato alle proprietà del riscaldamento volumetrico. Tale riscaldamento garantisce il raggiungimento uniforme e contemporaneo della temperatura in tutti i punti del fluido e dei solidi in sospensione. L'effetto del rapido shock termico e l'azione del campo elettromagnetico permettono di abbattere la carica batterica e sporigena.

Accanto ai miglioramenti microbiologici, al termine del processo il prodotto presenta un miglioramento apprezzabile, rispetto al trattamento tradizionale, anche negli aspetti qualitativi ed organolettici: l'alimento infatti possiede una maggior consistenza e freschezza, un contenuto aromatico naturale maggiore ed il colore resta immutato.

La preservazione del prodotto viene poi ottenuta con una riduzione dei tempi di trattamento, dell'utilizzo di addensanti (perché l'effetto degradante della temperatura è ridotto) e dell'uso di coloranti ed aromi (perché vengono infatti rispettate e mantenute le caratteristiche originarie) [27].

5.3 Gli alimenti liquidi con solidi in sospensione

La tecnologia delle radiofrequenze consente di pastorizzare facilmente in modo continuo alimenti liquidi (come il latte e succhi) ed alimenti liquidi con solidi in sospensione (come brodi e polpe). Il riscaldamento endogeno infatti permette di ottenere un'azione riscaldante omogenea degli alimenti liquidi (e degli eventuali solidi in sospensione) in tempi estremamente brevi, evitando i problemi tipici delle tecnologie tradizionali e delle tecnologie ohmiche. Il prodotto viene spinto da una pompa all'interno di tubi in teflon e viene esposto alla radiazione elettromagnetica. In questo modo l'alimento viene riscaldato con un gradiente termico di 1°C/sec. L'impianto per la pastorizzazione di questi alimenti è in grado di erogare una potenza di 30 kW sul carico e di raggiungere una produttività di circa 1000 Kg/h, con temperature di uscita comprese tra 85°C e 95°C. Successivamente è completato da una stazione di raffreddamento in controcorrente. Nella progettazione è necessario prestare particolare attenzione agli aspetti di asetticità dell'impianto a valle del riscaldamento a radiofrequenza fino al confezionamento.

Figura 5.3: Impianto “RF/L 70 kW” per la pastorizzazione o sterilizzazione in continuo di alimenti liquidi (su gentile concessione della STALAM S.p.A)

5.4 I prodotti confezionati, i trattamenti post-forno e la cottura del pane

Mediante le radiofrequenze si possono effettuare trattamenti estremamente efficaci di stabilizzazione termica ed inattivazione batterica di paste fresche ed altri prodotti confezionati in sacchetti o vaschette di plastica per la grande distribuzione.

Il processo di pastorizzazione si articola in due fasi:

- riscaldamento endogeno rapido mediante radiofrequenze, dove la temperatura del prodotto viene portata rapidamente ed in maniera uniforme (5-10°C/min) fino l valore desiderato;
- mantenimento in ambiente termostatato, per il tempo necessario (da pochi secondi ad alcuni minuti) all’abbattimento della carica microbica.

I risultati ottenuti hanno dimostrato un’elevata riduzione della carica microbica a temperature più basse rispetto ai metodi tradizionali e con tempi di trattamento molto più contenuti; una trascurabile alterazione delle caratteristiche chimiche,

fisiche ed organolettiche del prodotto; un notevole risparmio energetico e di ingombro dei macchinari.

Mediante la radiofrequenza è possibile ottenere anche una deumidificazione controllata in post-cottura dei prodotti da forno (biscotti, crackers, snacks, pan di spagna, aggregati...), permettendo di:

- controllare perfettamente l'umidità residua e quindi il peso finale del prodotto;
- controllarne a piacere la cottura ed il colore;
- preservarne l'aroma;
- eliminare rotture dovute a gradienti di umidità interni;
- ottenere una prolungata conservabilità della fragranza;
- ridurre sensibilmente i consumi energetici a parità di produzione.

Figura 5.4: Impianto "ARF 30 kW" per la pastorizzazione di gnocchi di patata confezionati (su gentile concessione della STALAM S.p.A)

Inoltre la STALAM S.p.A ha messo a punto un sistema innovativo per la cottura del pane, sfruttando la tecnologia a radiofrequenza. Il processo di cottura tradizionale, ottenuto mediante forni ventilati sfruttando la conduzione del calore, è un processo lento (fino a 30 minuti) e provoca bruciature superficiali. Esponendo la pasta

direttamente alla radiazione elettromagnetica è possibile ottenere un riscaldamento uniforme e veloce, poiché il calore viene generato "all'interno" dell'alimento stesso.

Recentemente la STALAM S.p.A ha brevettato una "configurazione variabile" di elettrodi in grado di modificare la quantità di energia elettromagnetica presente tra essi, adattandosi alle variazioni di volume del prodotto. L'impianto è dotato di un sistema di controllo estremamente accurato ed efficiente: l'energia viene infatti trasmessa dal generatore agli elettrodi attraverso una serie di condensatori variabili. Tutti i parametri del processo vengono controllati mediante un PLC. Il tempo totale per completare la cottura è di circa 8-10 minuti. La caratteristica principale del pane trattato con questo sistema è di essere privo di bruciature superficiali ed avere una crosta bianca.

5.5 Limiti del riscaldamento a radiofrequenza

Il limite maggiore della tecnologia a Radiofrequenza è rappresentata dalla difficoltà della radiazione elettromagnetica di penetrare all'interno del dell'alimento e trasferire energia alle sue molecole. La grandezza fisica che rappresenta la penetrazione della radiazione all'interno del prodotto, come è già stato descritto nel Capitolo 3, è lo *spessore di penetrazione* d_p, la cui espressione è:

$$d_p = \frac{c}{2\pi\sqrt{2\varepsilon'}\sqrt{\sqrt{1+\tan^2\delta}-1}}$$

c rappresenta la velocità di propagazione della radiazione elettromagnetica nel vuoto, $\tan\delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}$ è il fattore di dissipazione, ε' è la costante dielettrica e ε'' è il fattore di perdita. Lo spessore di penetrazione viene definito come la profondità del materiale a cui un'onda elettromagnetica, che si propaga ortogonalmente alla sua superficie, decresce di un fattore $1/e$.

Per ottenere un elevato valore dello spessore di penetrazione, di conseguenza per avere un campo elettromagnetico che sia in grado di penetrare in profondità, è necessario che sia ε' sia ε'' siano sufficientemente piccole. ε' ed ε'' rappresentano le grandezze che definiscono le proprietà dielettriche di un materiale e sono influenzate da numerosi fattori, come la composizione chimica del materiale stesso, la presenza la suo interno di acqua, ioni mobili e di momenti di dipolo permanenti o indotti. Non esistono però delle relazioni precise per stabilire le variazioni di ε' ed ε'' durante il processo.

Sia ε' ed ε'' sono infatti influenzate dalla temperatura e dalla frequenza di oscillazione del campo elettromagnetico applicato ed il loro comportamento non è sempre prevedibile. Le ricerche condotte negli ultimi anni dall'Università di Washington hanno indagato le proprietà dielettriche di molti alimenti quali frutta, pasta fresca, formaggio, uova e salmone. I risultati hanno mostrato che il fattore di perdita ε'' delle uova e della pasta fresca aumenta rapidamente con la temperatura

alle frequenze di oscillazione di 27 MHz e di 40 MHz. Per molti frutti ed ortaggi (ad esempio per le patate) invece ε' aumenta con la temperatura a 27 MHz e rimane costante a 40 MHz. mentre ε'' aumenta con la temperatura sia a 27 MHz che a 40 MHz [14].

Inoltre è stato rilevato che in molti processi la forma geometrica del prodotto trattato può rappresentare un problema per la penetrazione della radiazione elettromagnetica. Per ottenere un'adeguata riduzione della carica batterica durante la pastorizzazione di alimenti non liquidi, come nel caso delle paste fresche, è necessario disporre il prodotto secondo configurazioni compatte e regolari, in modo da garantire un'esposizione uniforme alla radiazione. Infatti gli spazi vuoti che si formano, quando il prodotto viene posizionato tra gli elettrodi, presentano una minore impedenza e vengono pertanto a rappresentare un percorso preferenziale per la corrente di spostamento indotta dal campo che non penetra quindi all'interno dell'alimento.

Anche i vacuoli d'aria, che sono presenti all'interno di molti prodotti, possono influire negativamente sulla sua pastorizzazione: attorno ai vacuoli si vengono infatti a creare delle disuniformità del campo elettrico che sono causa di riscaldamenti localizzati.

5.6 Sviluppi futuri

La tecnologia del riscaldamento a radiofrequenza è una tecnologia nuova, sicura ed efficiente, che nasce dalla necessità di migliorare i processi termici di pastorizzazione tradizionali. La ricerca tecnologica degli ultimi anni si è rivolta verso la sperimentazione di processi di pastorizzazione "a freddo", ossia processi che sfruttano l'interazione della radiazione elettromagnetica con la materia senza lo sviluppo di calore.

La tecnologia dei campi elettrici pulsati (HELP: *High Intensity Electric Pulses*) rappresentano una tecnologia in fase di sviluppo, che non si basa sull'impiego del calore. Essi sono responsabili della rottura di membrane, in particolare di quelle cellule microbiche vegetative, che provoca la morte cellulare. L'intensità dei campi elettrici pulsati è in genere superiore a 10 kV/cm e la durata della loro applicazione è dell'ordine dei micro-secondi.

I campi elettrici pulsati consentirebbero dunque di distruggere microrganismi patogeni e alterativi presenti negli alimenti, senza causare cambiamenti delle loro proprietà nutrizionali ed organolettiche.

Questa tecnologia emergente può essere considerata un processo di pastorizzazione non termico, che soddisfa il concetto di "minimo trattamento tecnologico". Questo concetto è basato sulla richiesta da parte del consumatore di alimenti salutari e "freschi" non contenenti additivi chimici. Dai risultati dell'applicazione del processo HELP, riguardo i campi elettrici pulsati, è emerso che [13]:

- non sono in grado di inattivare la maggior parte degli enzimi alimentari, di denaturare le proteine, né di destabilizzare le emulsioni;
- rappresentano una tecnologia di stabilizzazione per alimenti liquidi e consentono di preservarne gli attributi di qualità;
- sono efficaci nell'inattivare molti microrganismi, in particolare lieviti ma anche batteri gram positivi e gram negativi; al contrario le spore batteriche sono più resistenti;
- causano intenerimento di carne e pesce;
- la loro efficacia dipende anche dalla composizione dell'atmosfera nelle vicinanze dell'alimento, infatti le forme vegetative di alcuni batteri sono più sensibili alle radiazioni in presenza di ossigeno;
- possono essere applicati come trattamento preliminare a successive operazioni tecnologiche, quali essiccamento e processi di estrazione.

Per il momento è stato dimostrato che questa tecnologia non è ancora in grado di trattare efficacemente molti alimenti e, per poter completare il processo di pastorizzazione, è comunque necessario ricorrere successivamente a conservanti naturali, trattamenti termici oppure trattamenti ad alte pressioni. In particolare è stato dimostrato che i campi elettrici pulsati, impiegati per la pastorizzazione delle uova, non sono in grado di inattivare i batteri della salmonella: per eliminare completamente la carica batterica è necessario anche un successivo trattamento termico a 60°C.

Capitolo 6

Ringraziamenti

Ringrazio il Professor Paolo Tenti per avermi dato la possibiltà di fare questa nuova esperienza, per avermi seguito nella realizzazione di questo lavoro e per essersi dimostrato sempre disponibile per chiarimenti e spiegazioni.

Ringrazio i Professori Fabrizio Dughiero e Michele Forzan per la documentazione ed i preziosi consigli che mi hanno fornito.

Ringrazio l'Ing. A. Mantoni per avermi fornito materiale che mi è stato di valido aiuto per completare il mio lavoro.

Ringrazio l'Ing. A. Tonello per avermi accolto alla STALAM e per aver messo a mia disposizione la sua grande esperienza.

Ringrazio di cuore mamma, papà, Chiara ed Enrico per avermi incoraggiato e sostenuto in questi anni e mio nonno Aldo, sempre presente e partecipe con il suo entusiasmo ad ogni mio esame.

Un ringraziamento speciale lo dedico a Padre Italo ed ai ragazzi del Collegio San Francesco, con i quali ho trascorso tanti momenti divertenti, piacevoli e di collaborazione; la loro amicizia mi ha permesso di crescere e di affrontare in modo equilibrato e sereno il mio percorso universitario.

Ringrazio Daniele, mio compagno di corso, per essermi stato di aiuto e per avermi spronato, con i suoi successi, a fare del mio meglio.

Un grazie particolare, infine, lo dedico ad Alberto, Nicolò e Roberto che in questi anni mi sono stati vicini e mi hanno sempre incoraggiato ad andare avanti anche nei momenti di maggiore difficoltà.

Bibliografia

[1] **Bossi J.** (1961). Le Valvole Termoioniche: caratteristiche e loro comparazione. Il Rostro pp: 75-97.

[2] **Ciscato A.** (2002). Inattivazione microbiologica di liquidi viscosi con solidi in sospensione mediante campi elettromagnetici a radiofrequenza. STALAM S. p. A.

[3] **Claesen G., De Hoe J. M., Jansen W. J. L.** (1994). Energy Saving in Industry by efficient use of Electricity. UIE pp: 7-37.

[4] **CPI, Eimac Division** (2003). Care and Feeding of Power Grid Tubes. Richardson Electronics pp: 29-80.

[5] **Duryee L. M.** (1948). Some Economic Aspects of Radio Frequency Heating. *Duryee-Radio Frequency Heating*, Vol.67, pp: 105-112.

[6] **Edson W. E.** (1953). Vacuum-Tube Oscillators. Chapman & Hall pp: 165-179.

[7] **Everitt W. L.** (1934). Optimun operating conditions for Class C Amplifiers. *Proceedings of the Institute of Radio Engineers*, Vol.22, pp: 152-176.

[8] **Everitt W. L.**, **Spangemberg K.** (1938). Grid Current flows as a factor in the design of Vacuum-tube power Amplifiers. IEEE Proceedings pp: 617-630.

[9] **Hermawan N., Evrendilek A. G., Dantzer W. R., Zhang Q. H., Richter E. R.** (2004). Pulsed Electric Field Treatment of liquid whole egg inoculated with Salmonella enteritidis, *Journal of Food Safety*, 24: 71-85.

[10] **Heydari M., Mirhoseini S. M. H., Mohammadpour H. A., Abbas S.** (2009). Analytical & Experimental Studies on Impedance Matching in RF Generators for Dielectric Loads. IEEE Proceedings pp: 37-42.

[11] **Hulls P. J., Laplace D., Van Reusel K.** (1994). Electricity in the Food and Drinks Industry. UIE pp: 118-130.

[12] **Kinn T. P.** (1945). Vacuum-Tube Radio Frequency Generator: Characteristics and Application to Induction Heating Problems. Proceedings of the I. R. E. pp: 641-656.

[13] **Knorr D.** (2002). HELP Technology. *Trends in Food Science & Technology*, 12(3): 93-144.

[14] **Marra F., Zhang L., Lyng J. G.** (2009). Radio frequency treatment of food: Rewiev of recent advances. *Journal of Food Engineering*, 91: 497-458.

[15] **Neophytou R. I., Metaxas A. C.** (1998). Circuit of Radio Frequency heating systems. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, 33(4): 243-262.

[16] **Palmieri L.** (2006). Tecnologie basate sull'Energia Elettromagnetica nell'Industria Alimentare: Riscaldamento Ohmico e Campi Elettrici Pulsati. SSICA pp: 1-14.

[17] **Pohl W. J.** (2008). The Design and Operation of high-power Triodes for radio freqeuncy heating. Hournal of Food Engineering. *Journal of Food Engineering*, 87: 410-416.

[18] **Prince D. C.** (1955). Vacuum tubes as Power Oscillators. IEEE Proceedings pp: 275-313.

[19] **Ragni L., Al-Shami A., Mikhaylenko G., Tang J.** (2007). Dielectric characterisation of hen eggs during storage. *Journal of Food Engineering*, 82: 450-459.

[20] **Rowley A. T.** (2001). Radio Frequency Heating. *Thermal Technologies in Food Processing*, 84: 162-167.

[21] **Sastri S. K., Palaniappan S.** (1992). Mathematical modeling and experimental studies on ohmic heating of liquid-particle mixtures in a static heater. *Journal of Food Process Engineering*, 20(6): 241-261.

[22] **Scipiani G.** (1931) Le Ampolle Elettroniche: valvole termoioniche e cellule fotoelettriche. Ulrico Hoepli pp: 47-60.

[23] **Swanson B., Wang J., Tang J.** (2009). Dielectric properties of egg whites and whole eggs as influenced by thermal treatments. *LWT-Food Science and Technology*, 42: 1204-1212.

[24] **STALAM S. p. A.** - 36055 Nove (VI).

[25] **Ten Engineering Srl** - 31040 Nervesa della Battaglia (TV).

[26] **Terman F. E., Roake W. C.** (1946). Calculation and Design of Class C Amplifier. *Proceedings of the Institute of Radio Engineers*, Vol. 24, pp: 620-632.

[27] **Tonello A.** (2002). Nota tecnica sul nuovo impianto STALAM "RF/L" per i trattamenti di pastorizzazione e sterilizzazione del latte. STALAM S.p.A.

[28] **Wang Y., Wig T., Tang. J.** (2003). Dielectric properties of food relevant to RF and microwave pasteurisation and sterilisation. *Journal of Food Engineering*, 57: 257-268.

[29] **Wilson T. L.** (1975). Dielectric heating - A useful industrial tool. IEEE Proceedings pp: 333-336.

[30] **Yang J., Zhao Y., Wells J. H.** (2003). Computer simulation of capacitive radio frequency (RF) dielectric heating on vegetable sprout seeds. *Journal of Food Process Engineering*, 26: 239-263.

[31] **Zoltai P., Sastry K.** (1991). Electrical conductivities of selected solid foods during ohmic heating. *Journal of Food Process Engineering*, 14(3): 221-236.

Siti internet consultati

http://ieeexplore.ieee.org/search/freesearchabstract/radiofrequency/

http://www.stalam.it/