



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA



DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE
CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN
INGEGNERIA DELL'ENERGIA ELETTRICA

TESI DI LAUREA MAGISTRALE IN
INGEGNERIA DELL'ENERGIA ELETTRICA

Analisi sperimentale e agli elementi finiti di sintesi di $Y(CO_3)OH$ tramite il riscaldamento a microonde

RELATORE: Prof. Michele Forzan

CORRELATORE: Dottor. Christian Bianchi

LAUREANDO: Filippo Amadio

ANNO ACCADEMICO 2014-15

'Un timoniere di valore naviga anche con la vela a brandelli'
'Magnus gubernator et scisso navigat velo'
'Lucio Anneo Seneca (4 a.C.-65 d.C.), Lettere a Lucilio'

INTRODUZIONE

Il lavoro della presente tesi è frutto della collaborazione tra il Dipartimento di Scienze Chimiche dell'università di Padova ed il Dipartimento di Ingegneria Industriale. L'obiettivo è studiare la produzione delle particelle di Itrio Idrato Carbonato $Y(\text{CO}_3)\text{OH}$ ottenute dalla scomposizione termica dell'Urea in ambiente acquoso tramite il riscaldamento a microonde all'interno del range di temperatura 80-130 [°C]. Il fine è poter controllare le dimensioni delle particelle ottenute in modo che la deviazione standard dei diametri di $Y(\text{CO}_3)\text{OH}$ sia la più piccola possibile e per ottenere ciò non si è utilizzato il magnetron come sorgente del campo elettrico alternativo, ma generatori allo stato solido che permettono un controllo della potenza in ingresso, e delle fasi. La novità del presente lavoro consiste nel produrre queste reazioni in flusso, e non a liquido fermo.

Il lavoro si suddivide in un'analisi sperimentale accanto ai colleghi del Dipartimento di Scienze Chimiche ed un'analisi numerica utilizzando software agli elementi finiti come Comsol Multiphysics per la previsione e studio dei fenomeni trattati. Il lavoro è stato condotto inizialmente utilizzando la cavità di un normale forno a microonde disponibile in commercio, un reattore in Teflon dotato di una serpentina al cui interno scorre il fluido, acqua che ha proprietà elettriche e termiche molto simili a quelle della soluzione per la produzione di $Y(\text{CO}_3)\text{OH}$ e dei generatori allo stato solido, ma le prove sperimentali hanno evidenziato fin da subito alcune difficoltà. L'accoppiamento di campi elettrici alternativi con masse in gioco molto piccole (1.5 [ml]) comporta una potenza assorbita dal carico molto inferiore rispetto alla potenza in ingresso e così il riscaldamento risulta insoddisfacente; inoltre un altro aspetto chiave è la perdita di potenza lungo i cavi coassiali che immettono la potenza all'interno della cavità. Successivamente con l'analisi numerica in Comsol Multiphysics delle prove eseguite in laboratorio si è cercato di ottenere un modello valido per la previsione dei fenomeni quantificando quindi la perdita di potenza lungo i cavi coassiali e analizzando il comportamento del fluido all'interno del reattore sottoposto al riscaldamento. L'utilizzo del reattore in Teflon ha diversi vantaggi legati soprattutto al basso costo di costruzione e alla semplicità di utilizzo, ma si è dimostrato inadeguato per questo tipo di applicazioni soprattutto per la piccola massa di fluido che può scorrere al suo interno.

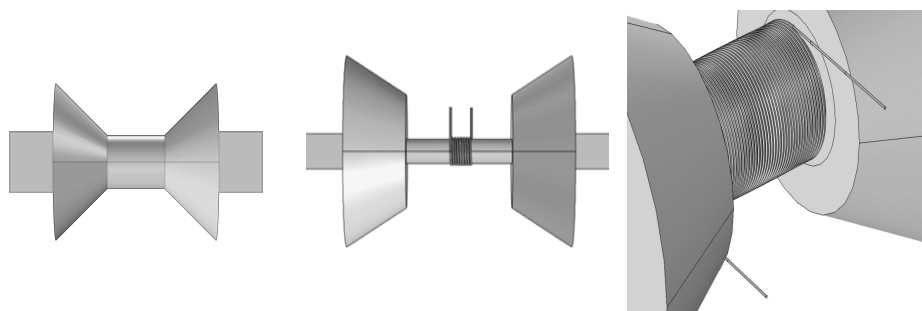


Figura 1: Da sinistra: configurazione analizzata a vuoto, configurazione con tubo in Teflon e bobina di fluido di 8.5 spire, bobina di fluido di 44.5 spire dopo le analisi sperimentali

La seconda parte del lavoro consiste nell'analisi, progettazione e costruzione di una nuova cavità: si studia infatti una configurazione che permetta la concentrazione e l'uniformità del campo elettrico (vedi Figura 1); essa è composta da due guide d'onda rettangolari per l'immissione di potenza, due tronchi di cono ed una struttura cilindrica sede della concentrazione del campo. Si eseguono diversi studi parametrici variando le dimensioni della cavità e i risultati con la configurazione a vuoto sono incoraggianti. Utilizzando una sola porta in ingresso oppure, entrambe le porte con il controllo delle fasi, si riesce a focalizzare notevolmente il campo elettrico. Si pensa quindi di studiare la stessa configurazione in presenza del fluido e viste le valutazioni effettuate con le prove sperimentali si pensa di sostituire il reattore in Teflon con una bobina di fluido così da aumentare la massa in gioco, inoltre si utilizza un tubo in Teflon che funge da supporto (vedi Figura 1).

Si esegue quindi uno studio parametrico combinato e si decide di realizzare la configurazione che permette di massimizzare il campo elettrico all'interno del fluido. La cavità è costruita con fogli di PVC ricoperti di carta di alluminio che presenta un'ottima capacità di isolamento elettromagnetico. Dalle prove eseguite sperimentalmente non risulta necessario l'utilizzo del supporto in Teflon ed inoltre si dimostra necessario aumentare ulteriormente la massa di fluido all'interno della struttura utilizzando una bobina di diametro maggiore e con maggiori spire (vedi Figura 1): si esegue quindi una caratterizzazione della cavità in Comsol Multiphysics per capirne il comportamento al fine di facilitare il lavoro in laboratorio. In laboratorio sono state effettuate delle prove di produzione di $Y(CO_3)OH$ in flusso: con la cavità iniziale è stato necessaria la sostituzione del reattore in Teflon con tubicini dello stesso materiale disposti a formare una bobina e coibentati con lana di quarzo; con la cavità realizzata non è stato necessario l'impiego della lana di quarzo.

Entrambi i campioni delle particelle prodotte sono positivi la popolazione di particelle ottenute é numerosa e la deviazione standard del loro diametro é decisamente piccola.

Indice

1	Nozioni sulle microonde	1
1.1	Spettro elettromagnetico	1
1.2	Modi di propagazione	3
1.3	Matrice di scattering	9
1.4	Riscaldamento per perdite dielettriche	13
2	Analisi sperimentale in laboratorio e modellizzazione numerica	17
2.1	Obbiettivi	21
2.2	Modellizzazione in Comsol Multiphysics	22
2.3	Validazione del modello	30
2.4	Metodologia e stima delle perdite nei cavi coassiali	32
2.5	Esperienze di laboratorio e primi campioni	36
2.6	Verifica numerica dell'inadeguatezza del reattore in PTFE	39
2.6.1	Studio parametrico al variare di ϵ'	44
3	Progettazione di un nuovo reattore	47
3.1	Configurazione a vuoto	47
3.1.1	Studio parametrico a vuoto	50
3.1.2	Influenza di due porte attive	52
3.2	Configurazione con fluido	53
3.2.1	Studio parametrico combinato e definizione di una configurazione ottimale	55
3.2.2	Studio del transitorio termico	58
3.2.3	Influenza della massa in gioco nella cavità	58
4	Caratterizzazione della cavità realizzata e analisi sperimentale	61
4.1	Modellizzazione dei cavi coassiali	62
4.2	Sensibilità a variazione geometriche e di fase a vuoto	63
4.2.1	Studio parametrico a vuoto variando la fase di una porta	63

4.2.2	Studio parametrico a vuoto variando il raggio maggiore rc1	65
4.2.3	Studio parametrico a vuoto variando il raggio minore rc2	66
4.2.4	Studio parametrico a vuoto variando l'altezza del tronco di cono hc	66
4.2.5	Studio parametrico a vuoto variando l'altezza della struttura cilindrica ht	68
4.3	Sensibilit� a variazioni geometriche e di fase a carico	68
4.3.1	Studio parametrico a carico variando la fase di una porta	69
4.3.2	Studio parametrico variando il raggio maggiore rc1 . . .	71
4.3.3	Studio parametrico variando il raggio minore rc2	72
4.3.4	Studio parametrico variando l'altezza del tronco di cono hc	72
4.3.5	Studio parametrico variando l'altezza della struttura cilindrica ht	74
4.3.6	Analisi del transitorio termico	74
4.4	Influenza della massa in gioco nella cavit�	77
4.5	Studio parametrico variandone la geometria	77
4.6	Risultati sperimentali con la cavit� realizzata	82
5	Conclusioni	83
A	A1	87

Elenco delle figure

1	Da sinistra: configurazione analizzata a vuoto, configurazione con tubo in Teflon e bobina di fluido di 8.5 spire, bobina di fluido di 44.5 spire dopo le analisi sperimentali	iii
1.1	Spettro elettromagnetico	2
1.2	Schema guida d'onda rettangolare	6
1.3	Generatore di impedenza Z_G connesso ad un carico di impedenza Z_L	11
1.4	Diagramma fasoriale di un materiale dielettrico sottoposto ad un campo elettrico alternativo	15
2.1	Schema a blocchi del lavoro tesi	18
2.2	Strumentazione a disposizione nel laboratorio di via Trasea. Da in alto a sinistra:tavolo di lavoro, cavità del forno a microonde, rilevatore di campi elettromagnetici, pompa a siringa, reattore in Teflon e termocoppia	20
2.3	Andamento della distribuzione di popolazione delle particelle che si vorrebbe ottenere	22
2.4	Riproduzione in Comsol della cavità costruita	29
2.5	Particolare della mesh del reattore finale costruito: essendo la geometria complessa e i domini molto piccoli sono stati costruiti delle regioni fittizie per facilitare la costruzione della mesh	29
2.6	Esperienze condotte in laboratorio di riscaldamento di un bicchiere d'acqua	30
2.7	Dati delle esperienze di riscaldamento di un bicchiere d'acqua	31
2.8	Riproduzione in Comsol Multiphysics di riscaldamento di un bicchiere d'acqua	32
2.9	Andamento della temperatura media dell'acqua in Comsol e dai risultati sperimentali	33
2.10	Bilancio delle potenze del sistema studiato	33

2.11	Andamento del salto di temperatura ricavato sperimentalmente e in Comsol per diversi valori della potenza in ingresso . . .	35
2.12	Si utilizzano materiali trasparenti alle microonde come il vetro per variare l'altezza del reattore in Teflon all'interno della cavità	37
2.13	A sinistra: reattore in Teflon coibentato con lana di quarzo. A destra: sostituzione del reattore in Teflon con tubicini in Teflon disposti a formare una bobina	38
2.14	Distribuzione dei prodotti di $Y(\text{CO}_3)\text{OH}$ ottenuti in funzione del loro diametro. Da in alto a sinistra: risultati della prova 1, 2,3	38
2.15	Dimensioni del reattore in PTFE	39
2.16	Riproduzione in Comsol del reattore all'interno della cavità a microonde	40
2.17	Da in alto a sinistra: andamento della temperatura dell'acqua all'interno del reattore in PTFE agli istanti 0, 60, 120, 240, 300, 360 [s]	42
2.18	Semplificazione del reattore in Teflon	44
2.19	Andamento della potenza assorbita dal fluido in funzione di ϵ'	45
3.1	Configurazione reattore	48
3.2	Parametri della geometria considerata	48
3.3	Configurazione del campo TE_{10} all'interno della guida d'onda .	49
3.4	Caratteristiche cavi coassiali utilizzati in laboratorio	49
3.5	Campo elettrico medio nella struttura cilindrica e parametro $S_{11} _{\text{dB}}$ al variare del raggio maggiore $rc1$	51
3.6	Campo elettrico medio nella struttura cilindrica e parametro $S_{11} _{\text{dB}}$ al variare del raggio minore $rc2$	51
3.7	Campo elettrico medio nella struttura cilindrica e parametro $S_{11} _{\text{dB}}$ al variare dell'altezza hc	51
3.8	Effetto di concentrazione del campo elettrico con una porta attiva di potenza 25[W]	52
3.9	Campo elettrico medio con $\theta_1 = 0$ e al variare di θ_2	53
3.10	Da sinistra: andamento del campo elettrico con $\theta_1 = 0$ e $\theta_2=0$, $\theta_2=\frac{\pi}{3}$, $\theta_2=\frac{2\pi}{3}$, $\theta_2=\pi$	53
3.11	Configurazione con fluido e supporto in Teflon	55
3.12	Risultati studio parametrico con fluido e le relative soluzioni dominanti. In rosso si evidenzia la configurazione ottimale. . .	56
3.13	Soluzioni prese in considerazione dello studio parametrico combinato	57
3.14	Campo elettrico all'interno del fluido per la configurazione che presenta $rc1=11$ [cm], $rc2=6.5$ [cm], $hc=8.5$ [cm], $ht=10$ [cm] .	57

3.15	Da in alto a sinistra: andamento della temperatura all'interno della bobina di fluido agli istanti: 0, 30, 90, 150, 180 [s] con 25 [W] per porta e risultati finali dei tre studi termici	59
3.16	Caratteristiche e risultati studio parametrico al variare del numero di spire	60
4.1	Cavit� costruita e valori dei parametri utilizzati	62
4.2	Dimensioni componenti della guida d'onda	63
4.3	Parametri utilizzati e risultati ottenuti nello studio parametrico combinato della guida d'onda	64
4.4	Modello della cavit� reale implementato in Comsol e relativa mesh	64
4.5	Campo elettrico medio nella struttura cilindrica	65
4.6	Studio parametrico variando rc1	66
4.7	Campo elettrico medio all'interno della struttura cilindrica variando rc1	66
4.8	Studio parametrico a vuoto variando rc2	67
4.9	Campo elettrico medio all'interno della struttura cilindrica variando rc2	67
4.10	Studio parametrico a vuoto variando hc	67
4.11	Campo elettrico medio all'interno della struttura cilindrica variando hc	67
4.12	Studio parametrico a vuoto variando ht	68
4.13	Campo elettrico medio all'interno della struttura cilindrica variando ht	68
4.14	Sezione del reattore con vista della bobina contenente il fluido	69
4.15	Campo elettrico medio nel fluido e nell'intera struttura cilindrica a carico al variare di θ_2	70
4.16	Studio parametrico variando rc1	71
4.17	Campo elettrico medio nel fluido e nell'intera struttura cilindrica variando rc1	71
4.18	Studio parametrico variando rc2	72
4.19	Campo elettrico medio nel fluido e nell'intera struttura cilindrica variando rc2	72
4.20	Studio parametrico variando hc	73
4.21	Campo elettrico medio nel fluido e nell'intera struttura cilindrica variando hc	73
4.22	Studio parametrico variando ht	73
4.23	Campo elettrico medio nel fluido e nell'intera struttura cilindrica variando ht	73

4.24	Da in alto a sinistra: andamento della temperatura all'interno della bobina di fluido agli istanti: 0, 30, 90, 150, 180 [s] con 25 [W] per porta	75
4.25	Temperatura media del fluido delle analisi termiche effettuate	76
4.26	Risultati e relative caratteristiche studio parametrico al variare del numero di spire: a sinistra $\theta_2=0$, a destra $\theta_2=\pi$	76
4.27	Da sinistra: campo elettrico medio nel carico di acqua e nell'intera struttura cilindrica	79
4.28	Da sinistra: andamento del campo elettrico per un angolo di rotazione di 0, 80, 180, 220, 300, 360 [deG]	79
4.29	Da sinistra: campo elettrico medio nel carico di acqua e nell'intera struttura cilindrica al variare di θ_{12}	81
4.30	Da sinistra: andamento del campo elettrico per un angolo di rotazione di 180 [deG] e $\theta_{12}=0, \frac{4\pi}{9}, 2\pi, \frac{11\pi}{9}, \frac{5\pi}{3}, 2\pi$	81
5.1	Andamento della temperatura del fluido all'interno del reattore in Teflon: il riscaldamento non é sufficiente con la temperatura massima raggiunta di 68 [°C] dopo 360 [s]. Il fluido é in movimento	84
5.2	Andamento della potenza assorbita dall'acqua al variare del numero di spire di cui é composta la bobina di fluido: a sinistra per la configurazione contenete un supporto in Teflon, a destra in assenza di esso	84
5.3	A sinistra: effetto di concentrazione del campo elettrico a vuoto. A destra: implementazione della bobina di fluido e del supporto in Teflon per l'analisi dello studio parametrico combinato	85

Capitolo 1

Nozioni sulle microonde

Il lavoro di tesi si occupa dell'applicazione delle microonde per la produzione di particelle di Ittrio carbonato idrato $Y(CO_3)OH$: tale produzione avviene tramite il riscaldamento della soluzione madre che comporta la decomposizione termica di Urea in ambiente acquoso. Si descrivono quindi alcune nozioni fondamentali utilizzate nel lavoro.

1.1 Spettro elettromagnetico

In fisica le radiazioni elettromagnetiche vengono differenziate in base alla loro frequenza e quindi della loro lunghezza d'onda λ che é definita come:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1.1)$$

dove $c=300000$ [km/s] é la velocità di propagazione della luce mentre f é la frequenza del segnale. Lo spettro elettromagnetico (vedi Figura 1.1) é l'insieme di tutte le possibili frequenze delle radiazioni elettromagnetiche: le onde radio sono quei segnali la cui frequenza é inferiore i 300 [MHz], sono utilizzate nelle telecomunicazioni di tecnologia piú datata come la radiofonia e la televisione, ma anche nella piú recente telefonia mobile e le comunicazioni senza fili; le microonde hanno frequenza compresa tra i 300 [MHz] e i 300 [GHz]: secondo la meccanica quantistica onde elettromagnetiche a diversa frequenza (e quindi diversa energia), vengono assorbite eccitando diversi stati energetici del materiale attraverso cui passano.

Le onde radio attraversano inalterate la maggior parte della materia perché la piccola energia da esse trasportate può eccitare soltanto gli spin nucleari, i cui stati energetici sono separati soltanto in presenza di campo ma-

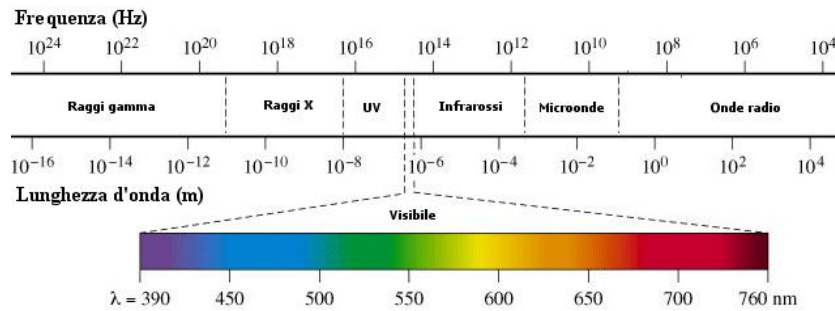


Figura 1.1: Spettro elettromagnetico

gnetico. Le microonde invece eccitano gli stati rotazionali della materia: un tipico forno a microonde, che opera alla frequenza di 2.45 [GHz], è in grado di fare ruotare le molecole d'acqua contenute all'interno dei cibi. Questa rotazione, smorzata dall'attrito col mezzo circostante, permette di riscaldare in modo efficiente gli alimenti. Le microonde hanno trovato come primo uso il campo militare, infatti il radar è stata la prima grossa applicazione delle microonde.

La regione visibile dello spettro elettromagnetico è l'unico intervallo di frequenze per cui l'occhio umano è sensibile. A radiazioni visibili di diversa lunghezza d'onda (e quindi frequenza) corrispondono tutti i diversi colori dell'arcobaleno. Vi è una quasi perfetta coincidenza tra la sensibilità dell'occhio umano e la radiazione emessa dal sole. Infatti la radiazione di corpo nero del sole è quella di un corpo alla temperatura di 5700 [K], e tale temperatura ha un picco ad una lunghezza d'onda di 550 [nm] (il colore blu-verde dello spettro visibile). L'occhio umano ha la massima sensibilità a tale lunghezza d'onda e tale sensibilità diminuisce rapidamente sia per lunghezze d'onda più corte (violetto), sia per quelle più lunghe (rosso). La luce visibile è in grado di eccitare gli stati energetici elettronici. Se un oggetto è colorato ciò è dovuto essenzialmente al fatto che gli atomi o le molecole della superficie dell'oggetto possono assorbire una parte (certe lunghezze d'onda) della luce che li investe portando gli elettroni a livelli energetici più alti. Il colore specifico che l'oggetto assume dipende dal materiale superficiale ed è determinato dalle regole di addizione e sottrazione dei colori: è infatti la luce non assorbita che, rimbalzando sull'oggetto, arriva all'occhio umano che in seguito decodifica e assegna il colore all'oggetto.

1.2 Modi di propagazione

I fenomeni elettrici ed elettromagnetici sono descritti a partire dalle equazioni di Maxwell: si vuole quindi descrivere le modalità di propagazione del campo elettrico, magnetico (TE, TM, TEM) a partire dalle soluzioni di tali equazioni. Le equazioni di Maxwell sono generalmente descritte come:

$$\nabla \times \bar{E} = -\frac{\partial \bar{B}}{\partial t} - \bar{M} \quad (1.2)$$

$$\nabla \times \bar{H} = \frac{\partial \bar{D}}{\partial t} + \bar{J} \quad (1.3)$$

$$\nabla \bar{D} = \rho \quad (1.4)$$

$$\nabla \bar{B} = 0 \quad (1.5)$$

dove si sono utilizzate le grandezze:

- campo elettrico \bar{E} [V/m]
- campo magnetico \bar{H} [A/m]
- densità di flusso elettrico \bar{D} [C/m²]
- densità di flusso magnetico \bar{B} [Wb/m²]
- densità di corrente magnetica \bar{M} [V/m²]
- densità di corrente elettrica \bar{J} [A/m²]
- densità di carica elettrica ρ [Coul/m³]

Si considera che la propagazione avvenga in una linea di trasmissione o in una guida d'onda e che quindi la sezione ortogonale alla direzione di propagazione della stessa sia costante in dimensione e forma e che sia infinitamente lunga in questa direzione. I conduttori sono considerati perfetti anche se è possibile estendere tali concetti al caso di conduttore non perfetto. Considerando una propagazione armonica nel tempo lungo la direzione

di propagazione z allora il campo elettrico e magnetico possono essere scritti come:

$$\bar{E}(x, y, z) = [\bar{e}(x, y) + \hat{z}e_z(x, y)]e^{-j\beta z} \quad (1.6)$$

$$\bar{H}(x, y, z) = [\bar{h}(x, y) + \hat{z}h_z(x, y)]e^{-j\beta z} \quad (1.7)$$

dove $\bar{e}(x, y)$ e $\bar{h}(x, y)$ rappresentano il campo elettrico e magnetico nel piano perpendicolare alla direzione di propagazione mentre e_z e h_z rappresentano il campo lungo la direzione di propagazione. Si osserva che se sono presenti perdite nel conduttore oppure nel dielettrico la costante di propagazione è complessa e così $j\beta$ andrà sostituita da $\gamma = \alpha + j\beta$. Ipotizzando che nella linea di trasmissione o nella guida d'onda non siano presenti sorgenti di potenza possiamo scrivere le equazioni di Maxwell come:

$$\nabla \times \bar{E} = -j\omega\mu\bar{H} \quad (1.8)$$

$$\nabla \times \bar{H} = -j\omega\epsilon\bar{E} \quad (1.9)$$

le tre componenti di ognuna di queste equazioni vettoriali possono essere risolte considerando le componenti dei campi in direzione ortogonale al moto (x,y) in funzione della componente del campo lungo la direzione di propagazione del moto (z) ottenendo così le quattro equazioni:

$$H_x = \frac{j}{k_c^2}(\omega\epsilon\frac{\partial E_z}{\partial y} - \beta\frac{\partial H_z}{\partial x}) \quad (1.10)$$

$$H_y = \frac{-j}{k_c^2}(\omega\epsilon\frac{\partial E_z}{\partial x} + \beta\frac{\partial H_z}{\partial y}) \quad (1.11)$$

$$E_x = \frac{-j}{k_c^2}(\beta\frac{\partial E_z}{\partial x} + \omega\mu\frac{\partial H_z}{\partial y}) \quad (1.12)$$

$$E_y = \frac{j}{k_c^2} \left(-\beta \frac{\partial E_z}{\partial y} + \omega \mu \frac{\partial H_z}{\partial x} \right) \quad (1.13)$$

dove si specifica:

$$k_c^2 = k^2 - \beta^2 \quad (1.14)$$

$$k = \omega \sqrt{\mu \epsilon} = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (1.15)$$

dove K_c é chiamato il numero d'onda di taglio.

Si definiscono quindi diverse modalitá di propagazione:

- modalitá di propagazione TEM che é caratterizzate da $E_z=H_z=0$ con in generale $\frac{\partial}{\partial x} \neq 0, \frac{\partial}{\partial y} \neq 0$
- modalitá di propagazione TE che é caratterizzata da $E_z=0$ e $H_z \neq 0$. Allora le equzioni di Maxwell si riducono a:

$$H_x = \frac{-j\beta}{k_c^2} \frac{\partial H_z}{\partial x} \quad (1.16)$$

$$H_y = \frac{-j\beta}{k_c^2} \frac{\partial H_z}{\partial y} \quad (1.17)$$

$$E_x = \frac{-j\omega\mu}{k_c^2} \frac{\partial H_z}{\partial x} \quad (1.18)$$

$$E_y = \frac{j\omega\mu}{k_c^2} \frac{\partial H_z}{\partial y} \quad (1.19)$$

In questo caso $k_c \neq 0$ e la costante di propagazione $\beta = \sqrt{k^2 - k_c^2}$ é genericamente una funzione della frequenza e delle dimensioni geometriche della linea o della guida d'onda. Per applicare tali relazioni occorre prima ricavare H_z dalle equazioni di Helmotz:

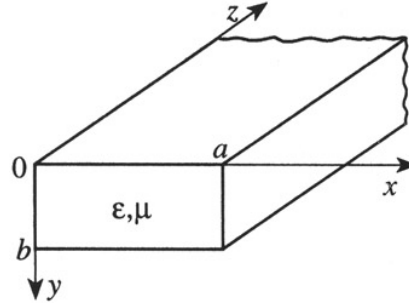


Figura 1.2: Schema guida d'onda rettangolare

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} + k^2\right)H_z = 0 \quad (1.20)$$

poiché si ha $H_z(x, y, z) = h_z(x, y)e^{-j\beta z}$ si ottiene così:

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + k_c^2\right)h_z = 0 \quad (1.21)$$

e questa equazione deve essere risolta con le condizioni al contorno della specifica geometria della guida d'onda.

- modalità di propagazione TM è caratterizzata da $E_z \neq 0$ e $H_z = 0$.

Si vuole ora risolvere l'equazione (1.16) ricavata per la modalità di propagazione TE nel caso di guida d'onda rettangolare (vedi Figura 1.2) caratterizzata quindi da una sezione trasversale al moto di dimensioni $a > b$ (dove a si trova lungo l'asse x) e di lunghezza indefinita. Si ipotizza che la guida sia riempita di materiale di permittività ϵ e permeabilità μ .

L'equazione differenziale (1.16) può essere risolta utilizzando il metodo delle variabili separate ottenendo così:

$$h_z(x, y) = X(x)Y(y) \quad (1.22)$$

che sostituita all'interno della 1.16 porta all'equazione:

$$\frac{1}{X} \frac{d^2 X}{dx^2} + \frac{1}{Y} \frac{d^2 Y}{dy^2} + k_c^2 = 0 \quad (1.23)$$

Ogni termine dell'equazione deve essere uguale ad una costante e così definendo delle costanti di separazione k_x e k_y otteniamo:

$$\frac{d^2 X}{dx^2} + k_x^2 X = 0 \quad (1.24)$$

$$\frac{d^2 Y}{dy^2} + k_y^2 Y = 0 \quad (1.25)$$

$$k_x^2 + k_y^2 = k_c^2 \quad (1.26)$$

allora la soluzione generica per h_z può essere scritta come:

$$h_z(x, y) = (A \cos(k_x x) + B \sin(k_x x))(C \cos(k_y y) + D \sin(k_y y)) \quad (1.27)$$

Per ricavare le costanti dell'equazione appena ricavata dobbiamo imporre le condizioni al contorno del campo elettrico tangente alle pareti della guida d'onda (che deve essere nullo poiché imponiamo l'ipotesi di conduttore perfetto) ottenendo così:

$$e_x(x, y) = 0, \quad y = 0, b \quad (1.28)$$

$$e_y(x, y) = 0, \quad x = 0, a \quad (1.29)$$

Utilizzando le espressioni (1.13),(1.14) si ricavano:

$$e_x = \frac{-j\omega\mu}{k_c^2} k_y (A \cos(k_x x) + B \sin(k_x x)) (-C \cos(k_y y) + D \sin(k_y y)) \quad (1.30)$$

$$e_y = \frac{j\omega\mu}{k_c^2} k_x (-A \sin(k_x x) + B \cos(k_x x)) (C \cos(k_y y) + D \sin(k_y y)) \quad (1.31)$$

allora dalle equazioni (1.23),(1.24),(1.25),(1.26) si ottiene:

- $D=0, k_y = \frac{n\pi}{b} \quad n=0,1,2,\dots$
- $B=0, k_x = \frac{m\pi}{a} \quad m=0,1,2,\dots$

e così la soluzione finale per H_z é così

$$H_z(x, y, z) = A_{mn} \cos \frac{m\pi x}{a} \cos \frac{n\pi y}{b} e^{-j\beta z} \quad (1.32)$$

Le componenti del campo trasversale alla direzione di propagazione del modo TE_{mn} sono quindi:

$$E_x = \frac{j\omega\mu n\pi}{k_c^2 b} A_{mn} \cos \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} e^{-j\beta z} \quad (1.33)$$

$$E_y = \frac{-j\omega\mu m\pi}{k_c^2 a} A_{mn} \sin \frac{m\pi x}{a} \cos \frac{n\pi y}{b} e^{-j\beta z} \quad (1.34)$$

$$H_x = \frac{j\beta m\pi}{k_c^2 a} A_{mn} \sin \frac{m\pi x}{a} \cos \frac{n\pi y}{b} e^{-j\beta z} \quad (1.35)$$

$$H_y = \frac{j\beta n\pi}{k_c^2 b} A_{mn} \cos \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} e^{-j\beta z} \quad (1.36)$$

la costante di propagazione é:

$$\beta = \sqrt{k^2 - k_c^2} = \sqrt{k^2 - \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 - \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2} \quad (1.37)$$

che é reale se

$$k > k_c = \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2} \quad (1.38)$$

Ogni modo e dunque ogni combinazione di m,n ha una frequenza di taglio $f_{c_{mn}}$ data da:

$$f_{c_{mn}} = \frac{k_c}{2\pi\sqrt{\mu\epsilon}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\mu\epsilon}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2} \quad (1.39)$$

Il modo con la piú bassa frequenza di taglio é detto modo dominante: poiché abbiamo ipotizzato $a > b$ la piú bassa frequenza di taglio si ha per TE_{10} ($m=1, n=0$) e vale:

$$f_{c_{10}} = \frac{1}{2a\sqrt{\mu\epsilon}} \quad (1.40)$$

Infine particolarizzando le equazioni (1.28),(1.29),(1.30),(1.31) per il modo TE_{10} si ottengono le relazioni:

$$H_z = A_{10} \cos \frac{\pi x}{a} e^{-j\beta z} \quad (1.41)$$

$$E_y = \frac{-j\omega\mu a}{\pi} A_{10} \sin \frac{\pi x}{a} e^{-j\beta z} \quad (1.42)$$

$$H_x = \frac{j\beta a}{\pi} A_{10} \sin \frac{\pi x}{a} e^{-j\beta z} \quad (1.43)$$

$$E_x = E_z = H_y = 0 \quad (1.44)$$

1.3 Matrice di scattering

La matrice di scattering é definita a partire dalle onde di tensione incidenti le porte e le onde di tensione riflesse da quelle porte. Consideriamo quindi un dispositivo dotato di N porte dove indichiamo con V_n^+ l'ampiezza dell'onda

di tensione incidente alla porta n e con V_n^- l'ampiezza dell'onda di tensione riflessa dalla porta n . Allora la matrice di scattering S é cosí definita:

$$\begin{bmatrix} V_1^- \\ V_2^- \\ \vdots \\ V_n^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \dots & S_{1N} \\ S_{21} & S_{22} & \dots & S_{2N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ S_{N1} & S_{N2} & \dots & S_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1^+ \\ V_2^+ \\ \vdots \\ V_n^+ \end{bmatrix} \quad (1.45)$$

Un singolo elemento della matrice di scattering é quindi cosí determinato:

$$S_{ij} = \frac{V_i^-}{V_j^+} \Big|_{V_k^+ = 0 \text{ for } k \neq j} \quad (1.46)$$

e quindi l'elemento S_{ij} si trova a partire dall'onda incidente di tensione V_j^+ sulla porta j e la misura dell'ampiezza dell'onda di tensione riflessa V_i^- alla porta i con tutte le porte spente, cioè a zero, eccetto la j -esima porta. Questo significa che tutte le altre porte devono terminare in un carico adattato che quindi non può indurre riflessioni.

Si possono quindi ricavare i coefficienti della matrice di scattering riferiti alle onde di potenza incidenti e riflesse alle porte. Consideriamo una linea di trasmissione la totale onda di tensione e di corrente é data in termini di onda incidente e riflessa da:

$$V = V_0^+ + V_0^- \quad (1.47)$$

$$I = \frac{1}{Z_0}(V_0^+ - V_0^-) \quad (1.48)$$

dove Z_0 é l'impedenza caratteristica della linea. É possibile quindi ricavare l'ampiezza dell'onda di tensione incidente e riflessa:

$$V_0^+ = \frac{V + Z_0 I}{2} \quad (1.49)$$

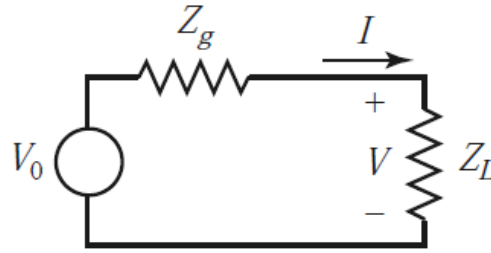


Figura 1.3: Generatore di impedenza Z_G connesso ad un carico di impedenza Z_L

$$V_0^- = \frac{V - Z_0 I}{2} \quad (1.50)$$

la potenza media rilasciata al carico è quindi data da:

$$P_L = \frac{1}{2} \operatorname{Re} V I^* = \frac{1}{2Z_0} (|V_0^+|^2 - |V_0^-|^2) \quad (1.51)$$

e quindi si deduce che la potenza netta rilasciata al carico è data dalla differenza tra la potenza incidente e quella riflessa. Si sottolinea come tale risultato sia valido solamente se l'impedenza caratteristica è reale (tipicamente si considera $Z_0 = 50\Omega$) non se è complessa.

Questi risultati non sono utili se non è presente una linea di trasmissione tra il generatore ed il carico. In questo caso è comunque possibile definire delle nuove grandezze che sono utili quando si tratta di studiare il caso di un generatore che trasmette potenza ad un carico (vedi Figura 1.3) e che possono essere applicate al caso di linee di trasmissione con o senza perdite.

L'ampiezza dell'onda di potenza incidente e riflessa sono così definite:

$$a = \frac{V + Z_R I}{2\sqrt{R_R}} \quad (1.52)$$

$$b = \frac{V - Z_R^* I}{2\sqrt{R_R}} \quad (1.53)$$

dove si indica con $Z_R = R_R + jX_R$ l'impedenza di riferimento che potrebbe essere complessa. Invertendo tali equazioni si possono così ricavare:

$$V = \frac{Z_R^* a + Z_R b}{\sqrt{R_R}} \quad (1.54)$$

$$I = \frac{a - b}{\sqrt{R_R}} \quad (1.55)$$

allora la potenza rilasciata al carico può essere espressa come:

$$P_L = \frac{1}{2} \text{Re} V I^* = \frac{1}{2} |a|^2 - \frac{1}{2} |b|^2 \quad (1.56)$$

da cui si può notare come la potenza assorbita dal carico sia la differenza tra l'onda di potenza incidente e riflessa. Per definire la matrice di scattering per le onde di potenza per N-porte consideriamo l'impedenza di riferimento per la i-esima porta Z_{Ri} . Allora definiamo il vettore dell'ampiezza dell'onda di potenza utilizzando i vettori totali di corrente e tensione:

$$[a] = [F]([V] + [Z_R][I]) \quad (1.57)$$

$$[b] = [F]([V] - [Z_R]^*[I]) \quad (1.58)$$

dove si indica con $[F]$ la matrice diagonale con elementi $\frac{1}{2}\sqrt{\text{Re}Z_{Ri}}$ mentre $[Z_R]$ è una matrice diagonale con elementi Z_{Ri} . Attraverso la relazione $[V] = [Z][I]$ possiamo scrivere

$$[b] = [F]([Z] - [Z_R]^*)([Z][Z_R])^{-1}[F]^{-1}[a] \quad (1.59)$$

e così otteniamo la matrice di scattering per le potenze $[S_p]$:

$$[S_p] = [F]([Z] - [Z_R]^*)([Z] + [Z_R])^{-1}[F]^{-1} \quad (1.60)$$

1.4 Riscaldamento per perdite dielettriche

Il riscaldamento per perdite dielettriche si basa sull'effetto termico che si manifesta in un materiale dielettrico se sottoposto all'azione di un campo elettrico alternativo ad alta frequenza. I materiali dielettrici sono caratterizzati da una bassa conducibilità elettrica, quindi le correnti di conduzione risultano modeste e perciò i processi di riscaldamento ad induzione o per resistenza diretta non sono applicabili. I materiali dielettrici inoltre hanno bassa conducibilità termica e quindi i riscaldamenti di tipo superficiale (forni a resistori) con trasmissione del calore dalla superficie verso l'interno del corpo richiedono tempi di riscaldamento sempre molto elevati. Sono queste le motivazioni per cui si utilizza il riscaldamento per perdite dielettriche che consente di ottenere un riscaldamento rapido e concentrato nella massa del corpo anche se ricorre ad una forma di energia relativamente costosa.

In un materiale dielettrico in cui siano presenti i campi vettoriali \vec{E} (campo elettrico), \vec{D} (spostamento elettrico) la densità di energia elettrostatica per unità di volume espressa in $[J/m^3]$ è data dalla relazione:

$$w = \frac{\vec{E}\vec{D}}{2} \quad (1.61)$$

dove si specifica:

- $\vec{D} = \epsilon_0\vec{E} + \vec{P} = (1 + \frac{\vec{P}}{\epsilon_0\vec{E}})\epsilon_0\vec{E} = (1 + \alpha)\epsilon_0\vec{E} = \epsilon_0\epsilon\vec{E}$ vettore spostamento dielettrico
- $\vec{P} = \alpha\epsilon_0\vec{E}$ vettore polarizzazione dielettrica
- $\epsilon_0 = 8.86 * 10^{-12}$ costante dielettrica del vuoto
- α coefficiente adimensionale di proporzionalità detto suscettività dielettrica del materiale

In un mezzo in cui siano presenti campi vettoriali \vec{E} , \vec{D} la prima equazione di Maxwell assume la forma:

$$rot\vec{H} = \sigma\vec{E} + \frac{\partial\vec{D}}{\partial t} \quad (1.62)$$

dove si specifica:

- \bar{H} intensità del campo magnetico
- σ conducibilità elettrica del mezzo
- $\bar{G} = \sigma \bar{E}$ densità di corrente di conduzione
- $\frac{\partial \bar{D}}{\partial t}$ densità di corrente di spostamento

nel caso di grandezze sinusoidali del tipo $\bar{E} = \bar{E} e^{j\omega t}$ tale equazione si scrive nella forma:

$$\text{rot} \bar{H} = \sigma \bar{E} + j\omega \epsilon_0 \epsilon \bar{E} \quad (1.63)$$

dove si specifica:

$$\bar{G}_t = \sigma \bar{E} + j\omega \epsilon_0 \epsilon \bar{E} \quad (1.64)$$

somma della densità di corrente di conduzione e di spostamento. Il processo di polarizzazione delle particelle non è istantaneo e così in un campo elettrico alternativo il vettore polarizzazione risulta sfasato in ritardo rispetto al vettore di intensità del campo, il coefficiente α è un numero complesso e così anche il vettore \bar{D} risulta sfasato in ritardo rispetto a \bar{E} di un angolo δ_p caratteristico della potenza attiva messa in gioco nel processo di polarizzazione del dielettrico (vedi Figura 1.4).

Allora la densità di corrente totale può essere rappresentata come una corrente di conduzione:

$$\bar{G}_t = (\sigma + j\omega \epsilon_0 \epsilon) \bar{E} = \dot{\omega}_t \bar{E} \quad (1.65)$$

dove si specifica:

- $\epsilon = \epsilon' - j\epsilon''$
- $\dot{\sigma}_t = (\sigma + \omega \epsilon_0 \epsilon'') + j\omega \epsilon_0 \epsilon'$ conducibilità elettrica equivalente complessa del dielettrico

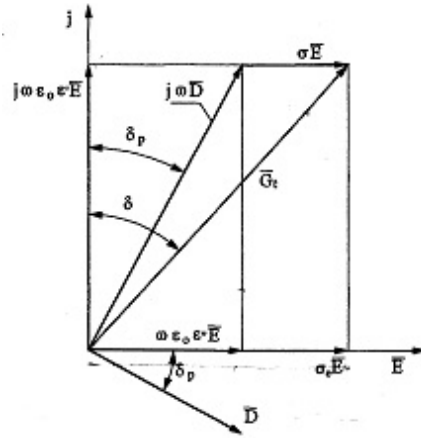


Figura 1.4: Diagramma fasoriale di un materiale dielettrico sottoposto ad un campo elettrico alternativo

oppure può essere descritta come corrente di spostamento:

$$\vec{G}_t = j\omega\epsilon_0\left(\epsilon' - j\frac{\sigma}{\omega\epsilon_0}\right)\vec{E} = j\omega\epsilon_0\epsilon'(1 - tg\delta)\vec{E} \quad (1.66)$$

dove $tg\delta$ è la tangente dell'angolo di perdita totale nel dielettrico. Si osserva che l'angolo di perdita totale δ è maggiore di δ_p poiché il primo tiene conto sia dell'energia termica messa in gioco dalle correnti di conduzione, sia di quella dovuta alla polarizzazione nel campo elettrico alternativo. Si ricava quindi:

$$\vec{\sigma}_t = j\omega\epsilon_0\epsilon'(1 - tg\delta) \quad (1.67)$$

$$tg\delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} + \frac{\sigma}{\omega\epsilon_0\epsilon'} = tg\delta_p + \frac{\sigma}{\omega\epsilon_0\epsilon'} \quad (1.68)$$

dove i parametri ϵ' , $tg\delta$ definiscono quasi completamente le proprietà di un dielettrico sottoposto ad un campo elettrico alternativo.

Si vuole ora ricavare l'espressione della potenza nel dielettrico sottoposto ad un campo elettrico alternativo. La potenza complessa per unità di volume nel dielettrico è calcolabile mediante la relazione:

$$p + jq = \bar{E}\check{G}_t = \check{\sigma}_t \bar{E}^2 \quad (1.69)$$

dove $\check{}$ indica il valore complesso coniugato, e così si ricava:

$$p + jq = (\sigma + \omega\epsilon_0\epsilon'' - j\omega\epsilon_0\epsilon')E^2 = \omega E^2 \epsilon_0 \epsilon' (tg\delta - j) \quad (1.70)$$

la parte reale di tale relazione é:

$$p = \omega E^2 \epsilon_0 \epsilon' tg\delta = 5.55 * 10^{-11} f E^2 \epsilon' tg\delta \quad (1.71)$$

che rappresenta la potenza [W/m³] trasformata in calore nel materiale: tale espressione che é l'equazione fondamentale del riscaldamento per perdite dielettriche mette in evidenza che la potenza specifica per unità di volume é proporzionale alla frequenza, al quadrato dell'intensità del campo elettrico e al fattore di perdita $\epsilon''_e = \epsilon' tg\delta$.

Capitolo 2

Analisi sperimentale in laboratorio e modellizzazione numerica

Il lavoro della seguente tesi richiede un'analisi sperimentale dei fenomeni accanto alla modellizzazione numerica in Comsol Multiphysics. Si vuole infatti ottenere tramite il riscaldamento a microonde, la produzione di particelle $Y(\text{CO}_3)\text{OH}$ (Ittrio Idrato Carbonato) che derivano dalla decomposizione termica dell'Urea in ambiente acquoso. La reazione, avente come parametro principale di controllo la temperatura, avviene tra gli 80-130 [°C] con il fluido della soluzione madre che è in flusso: non si tratta di una reazione a liquido fermo. Inizialmente si utilizzano gli strumenti a disposizione in laboratorio, ed in particolare una cavità di un forno a microonde disponibile in commercio, successivamente si procede alla progettazione e costruzione di una nuova cavità (vedi Figura 2.1).

La strumentazione a disposizione presente nel laboratorio di via Trasea (Padova) consiste in (vedi Figura 2.2):

- cavità di un forno a microonde domestico in cui sono state create due cavità rettangolari per la connessione di due guide d'onda rettangolari con le quali saranno connessi i cavi coassiali che trasmettono la potenza in ingresso
- due amplificatori di potenza che permettono di fornire potenza all'interno dell'intervallo (0-100) [W] fino al raggiungimento della temperatura interna massima ammissibile di 65 [°C]: lavorando in modo continuo alla potenza massima di 100 [W] tale temperatura è raggiunta in 8/9 [min]. Si sottolinea come tale dato sia sensibile al carico adottato: infatti a parità di potenza in ingresso un carico che assorbe meno potenza

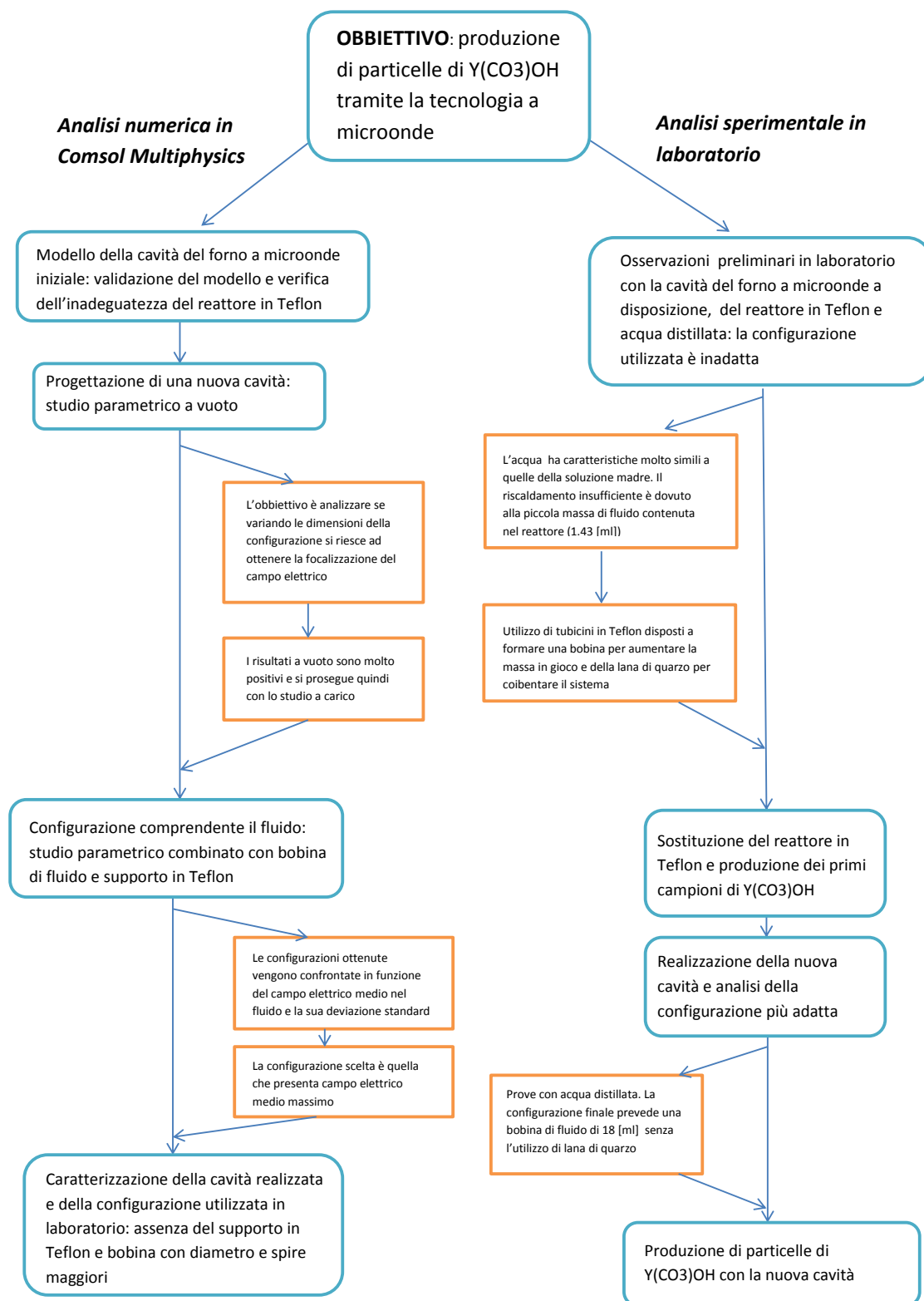


Figura 2.1: Schema a blocchi del lavoro tesi

provoca una potenza riflessa maggiore e quindi la temperatura interna degli amplificatori di potenza aumenterà piú rapidamente.

Infatti nell'ipotesi di isolamento elettromagnetico perfetto e in assenza di perdite vale la relazione:

$$P_{\text{ingresso}} = P_{\text{assorbitacarico}} + P_{\text{riflessa}} \quad (2.1)$$

- cavi coassiali di collegamento tra l'amplificatore di potenza e la guida d'onda: il materiale dielettrico utilizzato nei cavi é Teflon di permittività dielettrica relativa $\epsilon_r=2$
- splitter che ha la funzione di ripartire la potenza in ingresso tra i due amplificatori di potenza in uscita
- due modulatori IQ che consentono il controllo della fase del segnale in ingresso agli amplificatori di potenza
- generatore di tensione
- computer che attraverso software permette di controllare la potenza in uscita dagli amplificatori di potenza, lo sfasamento di ogni segnale in uscita dal modulatore IQ, la frequenza di lavoro che é fissata a 2.45 [GHz] e la temperatura interna raggiunta da ogni amplificatore. Il programma fornisce inoltre il dato della potenza in uscita dall'amplificatore di potenza e della potenza riflessa all'ingresso dello stesso. Si osserva quindi come tali valori non tengano conto della possibile dissipazione di potenza nei cavi coassiali e quindi non corrispondono all'effettiva potenza immessa all'interno della cavità
- rilevatore di campi elettromagnetici che consente di capire se i dispositivi utilizzati schermino in modo opportuno il campo elettromagnetico. Questo strumento é importante sia per questioni di sicurezza che per comprendere se la potenza fornita é assorbita dal carico o dispersa
- termocamera e termocoppia
- reattore in Teflon in pressione dotato al suo interno di una serpentina che permette di far circolare al suo interno del fluido la cui massa complessiva é di circa 1.43 [ml]: un obiettivo del lavoro di tesi é comprendere l'effettiva efficacia di questo dispositivo. Infatti l'utilizzo del Teflon rispetto al piú tradizionale vetro presenta diversi vantaggi: bassi costo e difficoltà di costruzione, minore fragilità



Figura 2.2: Strumentazione a disposizione nel laboratorio di via Trasea. Da in alto a sinistra: tavolo di lavoro, cavità del forno a microonde, rilevatore di campi elettromagnetici, pompa a siringa, reattore in Teflon e termocoppia

- pompa a siringa che permette il controllo della velocità del fluido in un range di 0.0001-10 [ml/min]
- tubicini in Teflon utilizzati per collegare il fluido tra il regolatore di flusso ed il reattore in Teflon di diametro 0.75, 1.5 [mm] (essendo tale reazione all'interno del campo di applicazione della microfluidica)
- acqua distillata per le prove preliminari in laboratorio: il suo utilizzo è indicativo del comportamento della soluzione madre avendo proprietà elettriche, termiche molto simili
- soluzione madre a base di Urea per la produzione di $Y(\text{CO}_3)\text{OH}$

2.1 Obiettivi

Gli obiettivi principali della parte sperimentale del lavoro sono:

- ottenere particelle di $Y(\text{CO}_3)\text{OH}$ controllandone il diametro: si vorrebbe controllare tale grandezza tramite le variabili a disposizione (potenza in ingresso, fase del segnale immesso in cavità, tempo di residenza del fluido in cavità, temperatura del fluido) ed in particolare si vorrebbe che la deviazione standard del diametro delle particelle prodotte sia molto piccola (vedi Figura 2.3). Ottenere particelle molto simili, quindi con lo stesso diametro, è importante, in ambito industriale, per migliorarne la sinterizzazione
- riscaldamento efficace e duraturo della soluzione: la reazione ha come parametro di controllo principale la temperatura ed in particolare avviene all'interno del range 80-130 [°C]: è quindi fondamentale poter raggiungere questi valori di temperatura
- riscaldamento uniforme: al fine di ottenere una deviazione standard del diametro delle particelle prodotte molto piccola occorre che la temperatura all'interno della soluzione sia il più uniforme possibile. In ragione del tipo di riscaldamento adottato, le microonde, il campo elettrico all'interno del fluido deve essere il più uniforme possibile
- verificare l'efficacia o meno del reattore in Teflon a disposizione
- riproducibilità delle esperienze

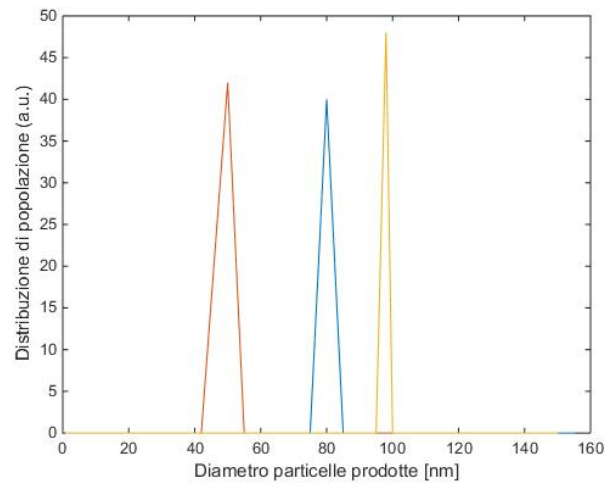


Figura 2.3: Andamento della distribuzione di popolazione delle particelle che si vorrebbe ottenere

2.2 Modellizzazione in Comsol Multiphysics

Come metodo di analisi e previsione dei fenomeni si utilizza un programma agli elementi finiti: Comsol Multiphysics. L'obiettivo finale è la produzione delle particelle di $Y(CO_3)OH$ tramite il riscaldamento a microonde: con Comsol quindi si riproduce l'intero andamento del fenomeno fisico analizzato, elettromagnetico e termico. Per fare ciò il software richiede di ricostruire il modello fisico della realtà e si vuole dunque analizzare i punti fondamentali. Come si è introdotto dallo schema a blocchi (vedi Figura 2.1) nel presente lavoro di tesi si è progettato e costruito una nuova cavità a microonde per la produzione di particelle di Itrio Idrato Carbonato. Spesso quindi si farà riferimento a tale modello implementato:

- costruzione della geometria: il problema affrontato è tridimensionale ed in generale non vi sono simmetrie né dal punto di vista elettrico né termico e quindi è necessario costruire l'intera geometria con le esatte dimensioni. Nel lavoro di tesi questi dispositivi sono la cavità del forno a microonde con le guide d'onda rettangolari, i cavi coassiali che generano la potenza e tutto ciò che è sottoposto al riscaldamento: contenitori del fluido e fluido. Comsol nell'implementazione della geometria suddivide gli spazi in domini: un dominio è una porzione di spazio non interessata da intersezioni con altre geometrie.
- proprietà dei materiali: questo punto è fondamentale affinché i risultati ottenuti con Comsol corrispondano alla realtà ed in particolare ogni

dominio interessato dallo studio elettromagnetico e termico deve essere associato al proprio materiale. Il software contiene un database di materiali con molte delle loro proprietà elettromagnetiche e termiche ma spesso non sono sufficienti, allora andranno aggiunte con dati ricavati sperimentalmente in laboratorio oppure dalla letteratura a disposizione. Nel lavoro di tesi le proprietà dei materiali utilizzati derivano da: libreria di Comsol Multiphysics, prove eseguite in laboratorio (per quanto riguarda le proprietà elettriche della soluzione madre, e del Teflon) e dalla letteratura. In particolare i materiali utilizzati con le rispettive proprietà sono:

Teflon	
$\epsilon = 1.9 - j0.01$	permettività elettrica complessa
$\sigma = 0$	conducibilità elettrica
$\mu_r = 1$	permeabilità magnetica relativa
$C_p = 1050 \text{ [J/(KgK)]}$	capacità termica a pressione costante
$\rho = 2200 \text{ [Kg/m}^3\text{]}$	densità

Soluzione madre di Urea in ambiente acquoso	
$\epsilon = 65 - j30$	permettività elettrica complessa
$\sigma = 5.5 * 10^{-6}$	conducibilità elettrica
$\mu_r = 1$	permeabilità magnetica relativa
$\gamma = 1$	rapporto dei calori specifici

Acqua distillata	
$\epsilon = 75 - j12$	permettività elettrica complessa
$\sigma = 5.5 * 10^{-6}$	conducibilità elettrica
$\mu_r = 1$	permeabilità magnetica relativa
$\gamma = 1$	rapporto dei calori specifici

Vetro Pyrex	
$\epsilon = 4.7$	permettività elettrica
$\mu_r = 1$	permeabilità relativa

Per quanto riguarda il problema elettromagnetico se alcuni domini non vengono selezionati Comsol li considera in automatico come conduttori perfetti così come tutte le superficie di confine tra la geometria realizzata ed il mondo esterno e quindi caratterizzati da:

Conduttore perfetto	
$\sigma=\infty$	conducibilità elettrica
$\mu_r=1$	permeabilità relativa

- definizione del problema elettromagnetico nel dominio della frequenza: la frequenza di lavoro é di 2.45 [GHz]. Si selezionano tutti i domini interessati dalla presenza del campo elettrico: nella costruzione della cavità a microonde si selezionano quindi: aria, materiali e fluidi contenuti all'interno della cavità a microonde ed il Teflon che rappresenta il materiale dielettrico utilizzato nella costruzione dei cavi coassiali; Comsol studierà l'andamento del campo elettrico attraverso la relazione risolutiva:

$$\nabla \mu_r^{-1} (\nabla \cdot \bar{E}) - k_0^2 (\epsilon_r - \frac{j\sigma}{\omega\epsilon_0}) \bar{E} = 0 \quad (2.2)$$

I domini non selezionati e quindi considerati dal solver come conduttori perfetti saranno studiati attraverso la relazione:

$$n \cdot \bar{E} = 0 \quad (2.3)$$

la quale indica che il campo elettrico é sempre ortogonale alle superfici di questi domini. In automatico Comsol considera, per tutti i domini di lavoro, l'assenza iniziale del campo elettrico lungo le tre coordinate spaziali x, y, z:

$$E_x = 0[V/m] \quad (2.4)$$

$$E_y = 0[V/m] \quad (2.5)$$

$$E_z = 0[V/m] \quad (2.6)$$

Un aspetto fondamentale é la selezione delle porte cioè delle superfici che immettono potenza nel sistema: possono essere delle superfici di

una guida d'onda rettangolare cosí che riproducano un campo elettrico di modo TE_{10} oppure le basi di un cavo coassiale. Si seleziona quindi la potenza e la fase del segnale in ingresso.

- definizione del problema termico nel dominio del tempo: nel lavoro di tesi é stato analizzato lo scambio termico a liquido fermo ed in flusso a regime laminare. In entrambi i casi si selezionano i soli domini interessati dallo scambio di calore: i fluidi ed i loro contenitori. In entrambi i casi occorre utilizzare la fisica 'heat transfer in solids': é sufficiente per l'analisi a liquido fermo mentre per l'analisi in flusso laminare andrà accoppiata con la fisica 'laminar flow'. Per quanto riguarda l'opzione 'heat transfer in solids' occorre separare i domini di fluido ('heat transfer in fluids') da quelli solidi dei contenitori ('heat transfer in solids') e quindi le rispettive relazioni di risoluzione saranno differenti: in particolare visto il problema di scambio termico in funzione del tempo si avrà per i domini di fluido:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p u \nabla T = \nabla(k \nabla T) + Q + Q_{vd} + Q_p \quad (2.7)$$

e per i domini solidi:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p u \nabla T = \nabla(k \nabla T) + Q \quad (2.8)$$

Comsol considera in automatico lo scambio di calore per conduzione tra i materiali utilizzando le loro proprietá termiche; é possibile aggiungere uno scambio di calore convettivo tra le superfici di contorno e l'aria circostante con l'opzione 'heat flux' in cui é richiesto di specificare il coefficiente di scambio convettivo: nel lavoro di tesi il valore considerato é all'interno del range 5-15 [$\frac{W}{m^2K}$]. La relazione che regola lo scambio convettivo tra le superfici selezionate é quindi:

$$-n \cdot (-k \nabla T) = h(T_{\text{ext}} - T) \quad (2.9)$$

Un'altra opzione fondamentale per la risoluzione del problema termico accoppiato con quello elettromagnetico é l'opzione 'heat source': si

selezionano i domini che assorbendo il campo elettrico alternativo generano calore: nel lavoro di tesi tali domini saranno i fluidi sottoposti al riscaldamento: la soluzione madre e l'acqua distillata. La relazione che regola la generazione di calore é quindi:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p u \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q + Q_{vd} + Q_p \quad (2.10)$$

Per quanto riguarda il problema termico in regime laminare si selezionano solo i domini di fluido e la risoluzione del problema avviene nel dominio del tempo. Le relazioni che regolano il moto del fluido sono quindi:

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho(u \cdot \nabla)u = \nabla \cdot [-\rho l + \mu(\nabla u + (\nabla u)^T) - \frac{2}{3}\mu(\nabla \cdot u)l] + F \quad (2.11)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (2.12)$$

Si specificano le superfici di ingresso e uscita del fluido con le opzioni 'Inlet' e 'Outlet'. Nell'opzione 'Inlet' si specifica la velocità di ingresso del fluido, nell'opzione 'Outlet' la pressione della superficie di uscita. In laboratorio non si impone la velocità del flusso ma la portata: tale valore é sempre stato all'interno del range 0.1-2 [ml/min]: allora la velocità di ingresso del fluido imposta in Comsol dipende dal diametro della condotta utilizzata secondo la relazione:

$$Q = A \cdot v = \frac{\pi D^2}{4} \cdot v \quad (2.13)$$

dove Q é la portata, D il diametro della condotta e v la velocità del fluido. Per quanto riguarda la pressione in uscita essendo il moto del fluido dettato dalla velocità in ingresso si é sempre imposto $p_0=0$ [Pa]

- costruzione della mesh: Comsol essendo un programma agli elementi finiti richiede di suddividere i domini selezionati in piccole porzioni (andando così a formare proprio la mesh) che utilizzerà per la ricostruzione dell'andamento delle grandezze studiate (campo elettrico, potenza dissipata, temperatura). Questo punto è fondamentale per la validità dei risultati ottenuti e soprattutto nel caso di geometrie complesse o molto grandi può essere molto dispendioso. La mesh deve essere composta da un numero sufficientemente elevato di elementi altrimenti i risultati ottenuti dalle simulazioni possono essere del tutto erronei. Al contrario una mesh molto fitta, composta da un numero molto elevato di elementi può comportare un eccessivo tempo di risoluzione del problema. Il numero di elementi di mesh che si possono utilizzare dipende dalla potenza del computer a disposizione. Comsol consente di scegliere diverse tipi di geometrie con le quali costruire la mesh dei vari domini (tetraedrica, triangolare, quadrangolare) e la dimensione massima di ogni elemento.

Il lavoro di tesi ha comportato lo studio in Comsol e la costruzione di una cavità per il riscaldamento a microonde di una bobina di fluido di 1.5 [mm] di diametro (vedi Figura 2.4): la configurazione è quindi composta da due guide d'onda rettangolari, due tronchi di cono, una struttura cilindrica e la bobina di fluido. Essendo la geometria complessa e la differenza di dimensioni tra gli elementi della mesh della bobina e del volume circostante elevata si è implementato un volume fittizio (un cilindro) attorno alla bobina di fluido per facilitare la costruzione della mesh (vedi Figura 2.5): infatti Comsol ha delle difficoltà a realizzare la mesh quando la differenza tra le dimensioni di due domini vicini è elevata. Come si è già sottolineato l'aumento del numero di elementi di mesh comporta un maggior tempo di calcolo non sempre giustificato poiché i parametri obbiettivi (campo elettrico, potenza dissipata, temperatura) potrebbero variare molto poco. Allora in questo caso è più ragionevole lavorare con una mesh più blanda e che comporta valori molto simili alla configurazione con mesh più fitta. Si vuole dunque esporre tale metodo di lavoro per la cavità del forno a microonde realizzata. Utilizzando una mesh con le caratteristiche:

Dominio	Tipo di mesh	Massima dimensione elementi di mesh	Numero totale di elementi
guide d'onda rettangolari	Tetraedrica	1.2 [cm]	28555
tronchi di cono	Tetraedrica	1.2 [cm]	45231
struttura cilindrica	Tetraedrica	1 [cm]	81588
dominio fittizio	Tetraedrica	0.3 [cm]	146642
bobina di fluido	Tetraedrica	0.75 [mm]	23635
cavi coassiali	Tetraedrica	0.8 [cm]	39088
Tutti i domini			364739

con una potenza di 25 [W] per porta ed uno sfasamento tra i due segnali in ingresso di $\theta_{12}=\pi$ la risoluzione del problema elettromagnetico nel dominio della frequenza (2.45 [GHz]) comporta i risultati:

Tempo di risoluzione [sec]	Campo elettrico medio nel fluido [V/m]	Potenza assorbita dal fluido [W]
3 min, 37 sec	950.37	34.955

Utilizzando invece una mesh piú fitta con le caratteristiche:

Dominio	Tipo di mesh	Massima dimensione elementi di mesh	Numero totale di elementi
guide d'onda rettangolari	Tetraedrica	1.2 [cm]	55139
tronchi di cono	Tetraedrica	1.2 [cm]	152364
struttura cilindrica	Tetraedrica	1 [cm]	159153
dominio fittizio	Tetraedrica	0.3 [cm]	146642
bobina di fluido	Tetraedrica	0.75 [mm]	47967
cavi coassiali	Tetraedrica	0.8 [cm]	39088
Tutti i domini			599903

con una potenza di 25 [W] per porta ed uno sfasamento tra i due segnali in ingresso di $\theta_{12}=\pi$ la risoluzione del problema elettromagnetico nel dominio della frequenza (2.45 [GHz]) comporta i risultati:

Tempo di risoluzione [sec]	Campo elettrico medio nel fluido [V/m]	Potenza assorbita dal fluido [W]
5 min, 45 sec	948.46	34.739

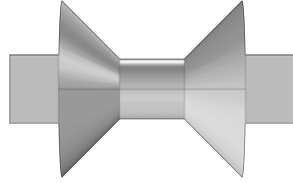


Figura 2.4: Riproduzione in Comsol della cavità costruita

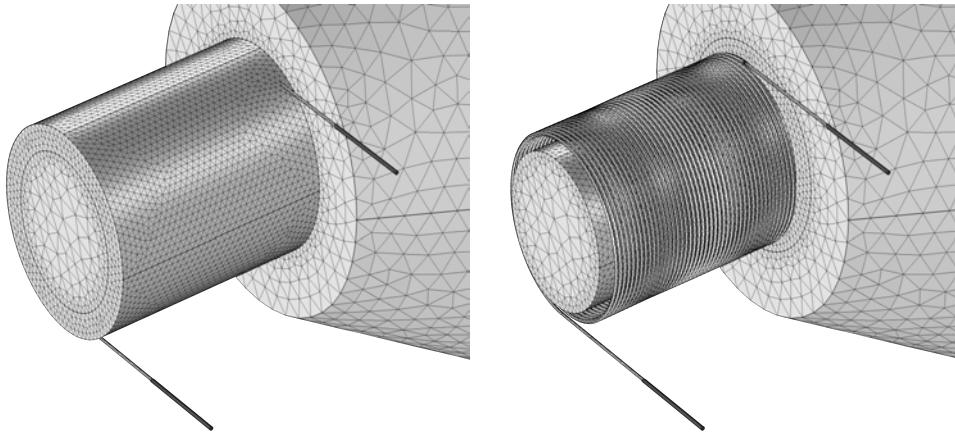


Figura 2.5: Particolare della mesh del reattore finale costruito: essendo la geometria complessa e i domini molto piccoli sono stati costruiti delle regioni fittizie per facilitare la costruzione della mesh

I risultati del campo elettrico medio nel fluido e della potenza assorbita dal fluido nei due casi sono molto simili e quindi non è necessario affinare molto la mesh che comporta un maggior onere di calcolo e quindi di tempo di risoluzione. L'aumento del tempo di risoluzione è infatti sensibile quando aumenta il numero di simulazioni da effettuare, ad esempio in uno studio parametrico. Si sottolinea inoltre come un ulteriore aumento del numero di elementi di mesh, per un totale ad esempio di 850000-900000 elementi circa, non è consentito dalla macchina a disposizione. Nel lavoro di tesi si è quindi deciso di lavorare con la configurazione della mesh più blanda e si sottolinea come tale logica di lavoro sia stata sempre applicata ad ogni simulazione effettuata durante il presente lavoro di tesi.



Figura 2.6: Esperienze condotte in laboratorio di riscaldamento di un bicchiere d'acqua

- definizione degli studi di risoluzione: ogni problema fisico implementato (elettromagnetico, termico, meccanico) può essere risolto attraverso vari tipi di studi: nel dominio del tempo, nel dominio della frequenza, a regime stazionario. Nel lavoro di tesi si utilizza lo studio nel dominio della frequenza (più esattamente alla frequenza di 2.45 [GHz]) per il problema elettromagnetico mentre il problema termico si risolve nel dominio del tempo (in generale sono stati sufficienti studi nell'intervallo 0-360 [s])

2.3 Validazione del modello

Si vuole utilizzare Comsol come metodo di analisi e previsione dei fenomeni studiati: affinché i risultati ottenuti dalle simulazioni possano essere considerati validi occorre eseguire una validazione del modello riprodotto. Si eseguono quindi in laboratorio delle semplici esperienze, come il riscaldamento di un bicchiere d'acqua (vedi Figura 2.6), al variare della potenza in ingresso e della quantità di fluido in gioco, che verranno poi riprodotte nel modello in Comsol. Nelle esperienze effettuate (vedi Figura 2.7) si utilizza acqua distillata, il bicchiere è posizionato sulla base inferiore della cavità e tramite l'utilizzo di una termocoppia si misura la temperatura media del fluido dopo 60, 120, 180 [s] dall'avvio del processo:

Dall'analisi dei risultati ottenuti si osserva la linearità del sistema: la temperatura media dell'acqua aumenta linearmente con il tempo di residenza all'interno della cavità.

Porta 1 [W]	Porta 2 [W]	$T_{\text{finale}} - T_{\text{iniziale}} [^{\circ}\text{C}]$	Tempo [s]	Massa [ml]
50	50	0	0	100
50	50	2.2	60	100
50	50	5.2	120	100
50	50	11.4	180	100
20	20	0	0	100
20	20	2.6	60	100
20	20	5	120	100
20	20	6.5	180	100
50	50	0	0	50
50	50	10.3	60	50
50	50	20.8	120	50
50	50	29.8	180	50
20	20	0	0	50
20	20	3.5	60	50
20	20	7	120	50
20	20	11.7	180	50
10	10	0	0	50
10	10	1.7	60	50
10	10	3.6	120	50
10	10	5	180	50
50	50	0	0	25
50	50	15	60	25
50	50	26	120	25
50	50	42	180	25
30	30	0	0	25
30	30	16.4	60	25
30	30	32.06	120	25
30	30	53.33	180	25
25	25	0	0	25
25	25	13.66	60	25
25	25	26.7	120	25
25	25	39.42	180	25
50	50	0	0	5
50	50	12.1	60	5
50	50	25.6	120	5
50	50	36.8	180	5

Figura 2.7: Dati delle esperienze di riscaldamento di un bicchiere d'acqua

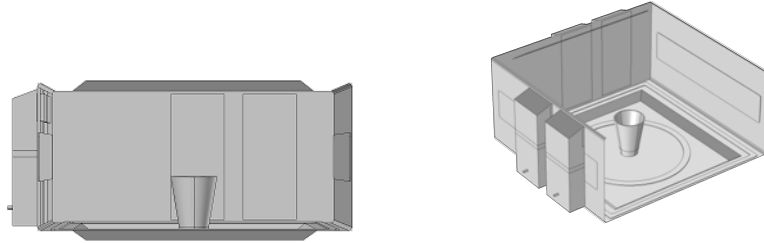


Figura 2.8: Riproduzione in Comsol Multiphysics di riscaldamento di un bicchiere d'acqua

2.4 Metodologia e stima delle perdite nei cavi coassiali

In Comsol vengono quindi svolte delle simulazioni che riproducano l'esperienza svolta di riscaldamento di un bicchiere d'acqua in cui si utilizzano le misure reali del bicchiere utilizzato e la quantità esatta di acqua (vedi Figura 2.8). I materiali utilizzati sono il vetro Pyrex e l'acqua distillata. Nell'analisi del transitorio termico oltre allo scambio per conduzione tra i domini a contatto (bicchiere e acqua) si considera uno scambio convettivo tra il bicchiere, l'acqua e l'aria caratterizzato da:

$$h=5 \left[\frac{W}{m^2K} \right] \quad \text{coefficiente di trasferimento di calore}$$

Come sorgente di ingresso si utilizzano porte rettangolari all'interno delle guide d'onda della stessa potenza utilizzata nelle prove in laboratorio con i cavi coassiali: la configurazione del campo è la stessa e ciò viene confermato da articoli presenti in letteratura.

Si effettua dunque un confronto dei risultati ottenuti in laboratorio e di quelli ottenuti tramite le simulazioni in particolare posizionando in ascisse il tempo di riscaldamento e in ordinate il salto di temperatura subito dall'acqua: si sottolinea che si fa riferimento ad un valore medio della temperatura all'interno del fluido poiché essendo il campo elettrico non uniforme all'interno del volume d'acqua non lo è anche la sua temperatura. Dai risultati ottenuti (vedi Figura 2.9) si osserva:

- si conferma la linearità del sistema: la temperatura aumenta linearmente con il tempo di residenza nella cavità

2.4. METODOLOGIA E STIMA DELLE PERDITE NEI CAVI COASSIALI 133

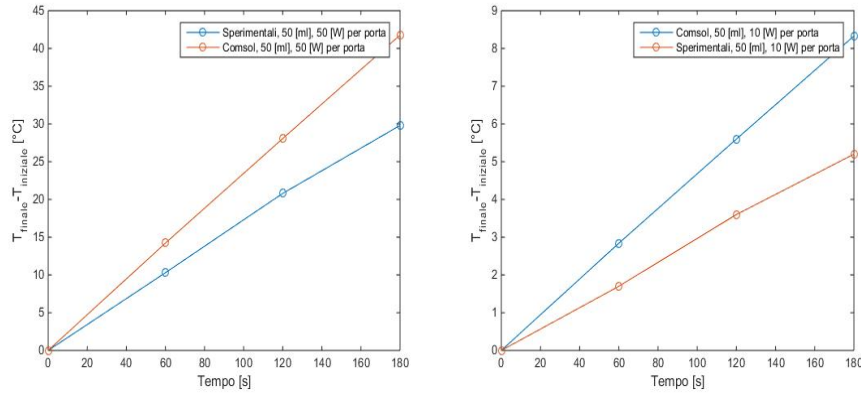


Figura 2.9: Andamento della temperatura media dell'acqua in Cmsol e dai risultati sperimentali

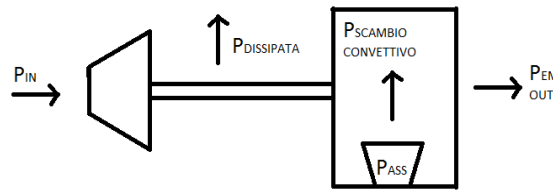


Figura 2.10: Bilancio delle potenze del sistema studiato

- si osserva una sovrastima della temperatura raggiunta dal fluido nelle simulazioni in Cmsol rispetto alle prove eseguite in laboratorio

La discrepanza di valori tra il salto di temperatura ricavato in Cmsol e sperimentalmente si ipotizza sia dovuto alla dissipazione di potenza nei cavi coassiali essendo questi non adatti alla trasmissione di potenza. Si ricorda infatti che la potenza data in ingresso in laboratorio é un valore fornito a monte dei cavi coassiali. Utilizzando i dati già a disposizione si vuole dunque quantificare la potenza dissipata nei cavi coassiali (vedi Figura 2.10) applicando quindi il bilancio delle potenze:

$$P_{IN} - P_{DISSIPATA} - P_{RIFLESSA} = P_{EM} + P_{CONVEZIONE} + P_{ASSORBITA} \quad (2.14)$$

dove si specifica:

- P_{IN} é la potenza fornita in ingresso
- $P_{RIFLESSA}$ é la potenza riflessa alla porta in ingresso
- $P_{DISSIPATA}$ é la potenza dissipata nei cavi coassiali
- P_{EM} potenza elettromagnetica persa: ipotizzando che l'isolamento elettromagnetico sia perfetto si ottiene $P_{EM}=0$
- $P_{CONVEZIONE}$ potenza scambiata per convezione da parte del sistema bicchiere, acqua
- $P_{ASSORBITA}$ é la potenza assorbita effettivamente dall'acqua contenuta nel bicchiere che provoca l'aumento di temperatura del fluido secondo la relazione:

$$P_{ASSORBITA}\Delta t = mc_p\Delta T \quad (2.15)$$

dove Δt é l'intervallo di tempo in cui avviene il riscaldamento, m la massa di acqua espressa in [ml], $c_p=4.18$ [$\frac{J}{grK}$ e ΔT] il salto di temperatura

Osservando dunque che il salto di temperatura subito dall'acqua é proporzionale alla potenza assorbita si ricava attraverso il confronto con le simulazioni in Comsol una $P_{DISSIPATA}=30-40\%$ (vedi Figura 2.11): questa stima é stata effettuata per masse relativamente grandi (25, 50, 75 [ml]) per favorire l'accoppiamento tra fluido e campo elettrico. Infatti si puó affermare che a paritá di potenza in ingresso, P_{IN} , all'aumentare della massa di fluido sottoposta al riscaldamento aumenta la potenza assorbita $P_{ASSORBITA}$ e quindi il salto di temperatura ΔT : lavorare con salti di temperatura maggiori significa diminuire i possibili errori di misura dovuti alla sensibilitá degli strumenti a disposizione.

Si sottolinea come la $P_{DISSIPATA}$ sia funzione della massa in gioco: infatti a paritá di potenza in ingresso al diminuire della massa (e quindi della potenza assorbita) aumenta la $P_{DISSIPATA}$: il lavoro di tesi comporta l'utilizzo di masse molto piccole, anche 1.6 [ml], quindi in questo caso la potenza dissipata lungo i cavi coassiali pué essere considerata anche maggiore del 30-40% appena ricavato.

2.4. METODOLOGIA E STIMA DELLE PERDITE NEI CAVI COASSIALI 35

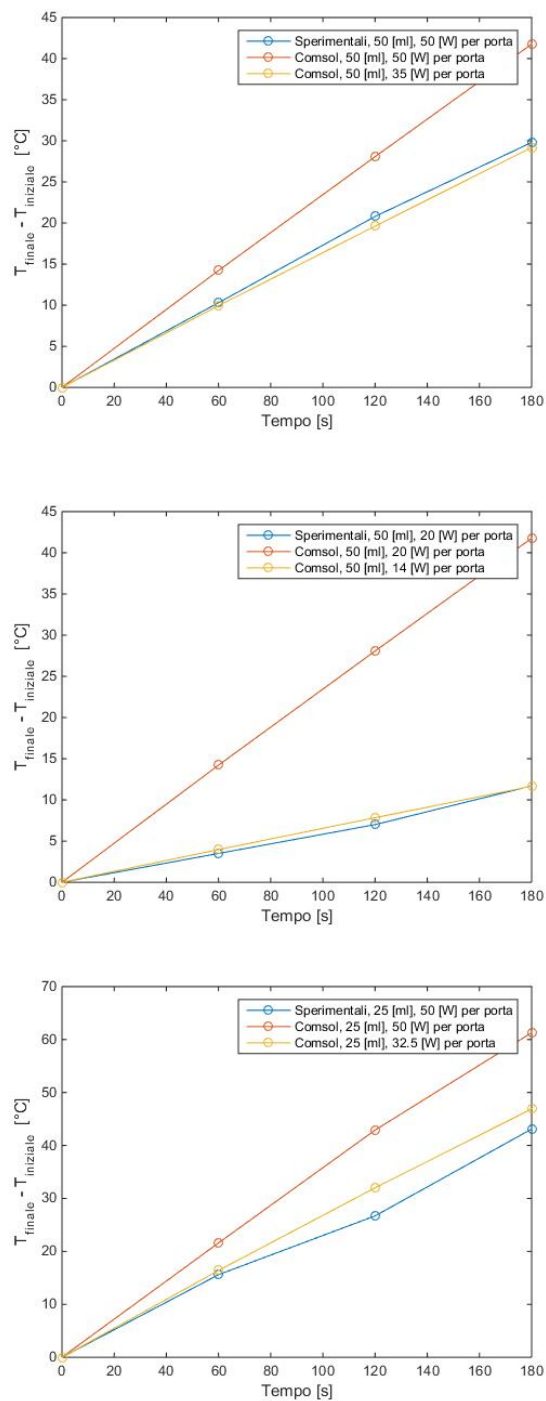


Figura 2.11: Andamento del salto di temperatura ricavato sperimentalmente e in Comsol per diversi valori della potenza in ingresso

2.5 Esperienze di laboratorio e primi campioni

Si conducono delle esperienze preliminari con la strumentazione a disposizione per comprendere il fenomeno in analisi. Poiché la soluzione madre ha caratteristiche molto simili a quelle dell'acqua si utilizza acqua distillata sia per questioni di sicurezza legate alla possibile instabilità della reazione con la soluzione madre sia per evitare sprechi. Si utilizza quindi:

- cavità del forno a microonde presente in laboratorio
- reattore in Teflon la cui massa complessiva di fluido al suo interno è di 1.43 [ml]
- tubicini in Teflon di diametro 0.5 [mm] attraverso i quali il fluido fluisce dalla pompa a siringa, alla serpentina ricavata all'interno del reattore per poi uscire dalla cavità
- pompa a siringa per controllare la velocità del flusso del fluido: il flusso tipicamente utilizzato appartiene all'intervallo 0.1-2 [ml/min]

Le prove sono effettuate all'interno dell'intero range di potenze ammesse dalla strumentazione quindi fino 100 [W] per porta e fino al raggiungimento della temperatura massima possibile di esercizio degli amplificatori di potenza, che viene raggiunta alla potenza massima in circa 8/9 [min].

Il campo elettromagnetico presenta picchi e nodi e quindi zone ad elevato e basso campo: per un'analisi accurata del sistema le prove sono condotte variando la posizione del reattore in Teflon all'interno della cavità. Si utilizzano inoltre supporti in vetro, trasparente alle microonde, per variarne l'altezza (vedi Figura 2.12). Con l'obiettivo di variare ogni possibile parametro a disposizione le esperienze sono condotte al variare della velocità del flusso all'interno del range 0.01-2 [ml/min] e anche a liquido fermo.

In ognuna delle esperienze condotte non si assiste all'ebollizione dell'acqua infatti non si ha la formazione di vapore d'acqua ed inoltre all'uscita della cavità la temperatura del fluido è sempre di circa 40 [°C]: si ipotizza che le motivazioni di questo comportamento siano:

- la piccola massa in gioco all'interno della cavità che provoca un inefficace accoppiamento con il campo elettrico
- l'elevata dispersione di calore tra il fluido, il reattore, i tubicini di collegamento e l'aria all'interno della cavità



Figura 2.12: Si utilizzano materiali trasparenti alle microonde come il vetro per variare l'altezza del reattore in Teflon all'interno della cavità

- la dissipazione di potenza lungo i cavi coassiali che comporta una notevole differenza tra la potenza data in ingresso e l'effettiva potenza entrante in cavità

Tramite l'utilizzo di Comsol Multiphysics si evidenzia l'effettiva inefficacia del reattore in Teflon (vedi Paragrafo 2.6) dovuta essenzialmente alla piccola massa di fluido presente al suo interno. Si pensa quindi di sostituire il reattore, utilizzando tubicini in Teflon di diametro 0.75-1.5 [mm] disposti a formare una bobina, e della lana di quarzo, per coibentare il sistema, per capire quale dei due fattori è predominante al fine di ottenere l'ebollizione dell'acqua (vedi Figura 2.13): si ripetono quindi tutte le prove effettuate preliminarmente. I risultati ottenuti indicano:

- il reattore non è adatto al raggiungimento dell'obiettivo: non si riesce ad ottenere l'ebollizione dell'acqua anche con l'utilizzo della lana di quarzo e al variare della sua posizione
- utilizzando una bobina ricavata attraverso i tubicini in Teflon, aumentando così la massa di fluido all'interno della cavità, disposta all'uscita delle guide rettangolari e coibentata con lana di quarzo si riesce ad ottenere l'ebollizione
- si ottiene l'ebollizione dell'acqua anche nelle prove in flusso

Dalle esercitazioni svolte di riscaldamento di acqua distillata utilizzando tubicini in Teflon si ricava una configurazione adatta per le prove con la soluzione madre per la produzione di $Y(CO_3)OH$. Si utilizzano tubicini di diametro 1.5 [mm] avvolti a formare una bobina per una massa totale di 10 [ml] di fluido disposti di fronte all'uscita delle guide d'onda rettangolari. La bobina è coibentata con lana di quarzo, alzata rispetto alla base della cavità utilizzando un supporto in vetro e la potenza in ingresso è di 70 [W] per porta.



Figura 2.13: A sinistra: reattore in Teflon coibentato con lana di quarzo. A destra: sostituzione del reattore in Teflon con tubicini in Teflon disposti a formare una bobina

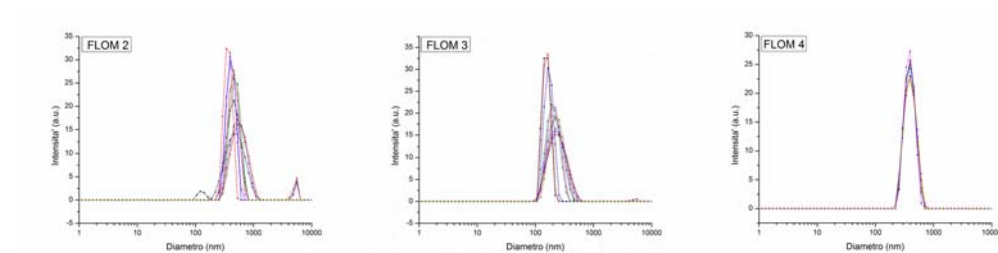


Figura 2.14: Distribuzione dei prodotti di $Y(\text{CO}_3)\text{OH}$ ottenuti in funzione del loro diametro. Da in alto a sinistra: risultati della prova 1, 2,3

Con questa configurazione sono state eseguite delle prove di produzione di Itrio Idrato Carbonato: i risultati ottenuti (vedi Figura 2.14) sono:

Prova	Tempo di residenza [s]	Potenza ciascuna porta [W]	Diametro [nm]
1	74	70	556
2	240	70	216
3	380	70	401

I risultati ottenuti sono positivi poiché la popolazione di particelle ottenute è molto numerosa e i diametri di ogni particella sono all'interno di un range molto ristretto. Inoltre al variare della velocità del flusso varia il diametro delle particelle ottenute.

2.6. VERIFICA NUMERICA DELL'INADEGUATEZZA DEL REATTORE IN PTFE39

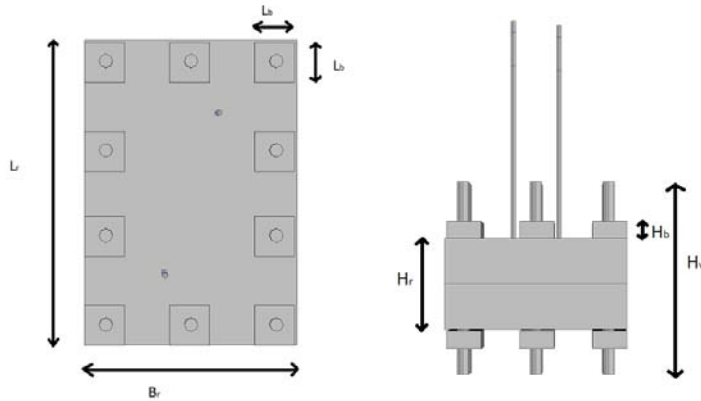


Figura 2.15: Dimensioni del reattore in PTFE

2.6 Verifica numerica dell'inadeguatezza del reattore in PTFE

Uno degli obiettivi del lavoro di tesi é valutare l'efficacia del reattore in PTFE per questo tipo di applicazioni: i vantaggi infatti dell'uso del Teflon rispetto al piú tradizionale vetro sono molteplici: basso costo, facilitá di costruzione e trasporto.

Dalle esperienze condotte in laboratorio di riscaldamento di acqua distillata si osserva l'assenza dell'ebollizione per ogni posizione del reattore all'interno della cavità a microonde e per ogni valore di potenza in ingresso. Costata e quantificata la perdita dei cavi coassiali, si riproduce in Comsol la geometria e la fisica analizzata in queste prove. Si riproduce quindi l'intera geometria del reattore in Teflon posizionato al centro della cavità, delle viti per la tenuta in pressione, della serpentina ricavata al suo interno dove scorre circa 1.43 [ml] di fluido e dei tubicini in Teflon di collegamento per l'ingresso e l'uscita del fluido (vedi Figura 2.15). Le dimensioni utilizzate sono quelle reali (vedi Figura 2.16):

Diametro interno tubicini [mm]	0.5
Diametro esterno tubicini [mm]	1
Altezza reattore H_r [cm]	4
Lunghezza reattore L_r [cm]	11.5
Base del reattore B_r [cm]	8
Altezza bulloni H_b [cm]	0.8
Lunghezza bulloni L_b [cm]	1.5
Altezza viti H_v [cm]	8.5

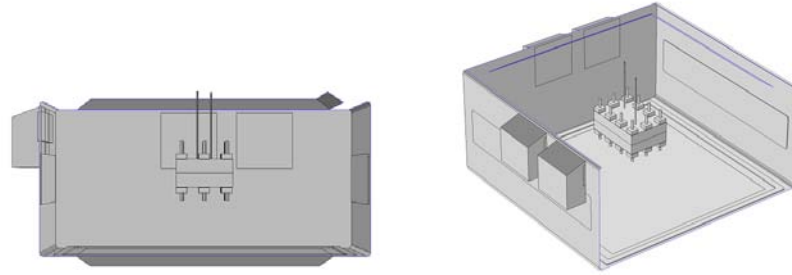


Figura 2.16: Riproduzione in Comsol del reattore all'interno della cavità a microonde

Si riproduce quindi la fisica di fluido in moto in regime laminare dove si considera uno scambio convettivo tra tutte le superfici esterne del reattore, dei tubicini e l'aria. Si specifica quindi le caratteristiche implementate nel lavoro:

Potenza porta 1 [W]	25
θ_1	0
Potenza porta 2 [W]	25
θ_1	0
Velocità fluido in ingresso [m/s]	0.007
Coefficiente di scambio termico convettivo [$\frac{W}{m^2K}$]	15
Pressione fluido in uscita [Pa]	0

Osservando l'andamento della temperatura del fluido e del reattore in Teflon per un intervallo di riscaldamento di 360 [s] (vedi Figura 2.17), si possono trarre alcune considerazioni:

- non si raggiunge in alcun punto la temperatura di 100 [°C] e quindi l'ebollizione dell'acqua in accordo con le prove sperimentali eseguite in laboratorio
- il riscaldamento non è omogeneo dovuto quindi alla disuniformità del campo elettrico all'interno del fluido: la temperatura massima raggiunta è di 68 [°C] dopo 360 [s]: questo valore è raggiunto solo in alcuni punti mentre per la maggior parte del fluido la temperatura è al di sotto dei 50 [°C]
- l'aumento di temperatura è legato alla presenza di zone con campo elettrico elevato e non segue il movimento del fluido all'interno del reattore: vi sono quindi punti in cui il fluido si raffredda

- la temperatura del reattore si mantiene sempre pressoché costante al valore iniziale, solo in alcuni punti a diretto contatto con il fluido la sua temperatura aumenta

Dalla simulazione in Comsol si ricavano diversi dati utili per una comprensione globale del fenomeno:

$T_{\text{fluido}} [^{\circ}\text{C}]$	$T_{\text{reattore}} [^{\circ}\text{C}]$	$P_{\text{assorbita fluido}} [\text{W}]$	$P_{\text{assorbita reattore}} [\text{W}]$	Tempo [s]
20	20	6.4809	1.84	0
28.56	20.11	6.4809	1.84	30
32.36	20.24	6.4809	1.84	60
35.035	20.37	6.4809	1.84	90
37.125	20.508	6.4809	1.84	120
38.89	20.642	6.4809	1.84	150
40.46	20.77	6.4809	1.84	180
41.883	20.911	6.4809	1.84	210
43.173	21.046	6.4809	1.84	240
44.32	21.181	6.4809	1.84	270
45.404	21.316	6.4809	1.84	300
46.393	21.45	6.4809	1.84	330
47.316	21.58	6.4809	1.84	360

Si possono quindi trarre alcune considerazioni: la potenza assorbita dal fluido é molto elevata in relazione alle piccole masse di fluido in gioco (1.6 [ml] considerando anche l'acqua presente nei tubicini di collegamento) e in assenza di perdite per conduzione o convezione comporterebbe un aumento di temperatura del fluido pari a:

$$\Delta T = \frac{P_{\text{ass fluido}} \cdot \Delta t}{m \cdot c_p} = \frac{6.48 \cdot 360}{1.6 \cdot 4.18} = 348 [^{\circ}\text{C}]$$

Dato che non si assiste a questo vertiginoso aumento di temperatura si vuole capire dove la potenza assorbita viene scambiata valendo infatti le relazioni:

$$P_{\text{ass fluido}} + P_{\text{ass reattore}} = P_{\text{eff fluido}} + P_{\text{eff reattore}} + P_{\text{scambio convettivo}} \quad (2.16)$$

$$P_{\text{eff reattore}} = P_{\text{ass reattore}} + P_{\text{scambio conduzione}} - P_{\text{scambio convettivo}} \quad (2.17)$$

$$P_{\text{eff fluido}} = P_{\text{ass fluido}} - P_{\text{scambio conduzione}} \quad (2.18)$$

$$P_{\text{scambio convettivo}} = h \cdot S_{\text{esterna}} \cdot \Delta T \quad (2.19)$$

indicando con:

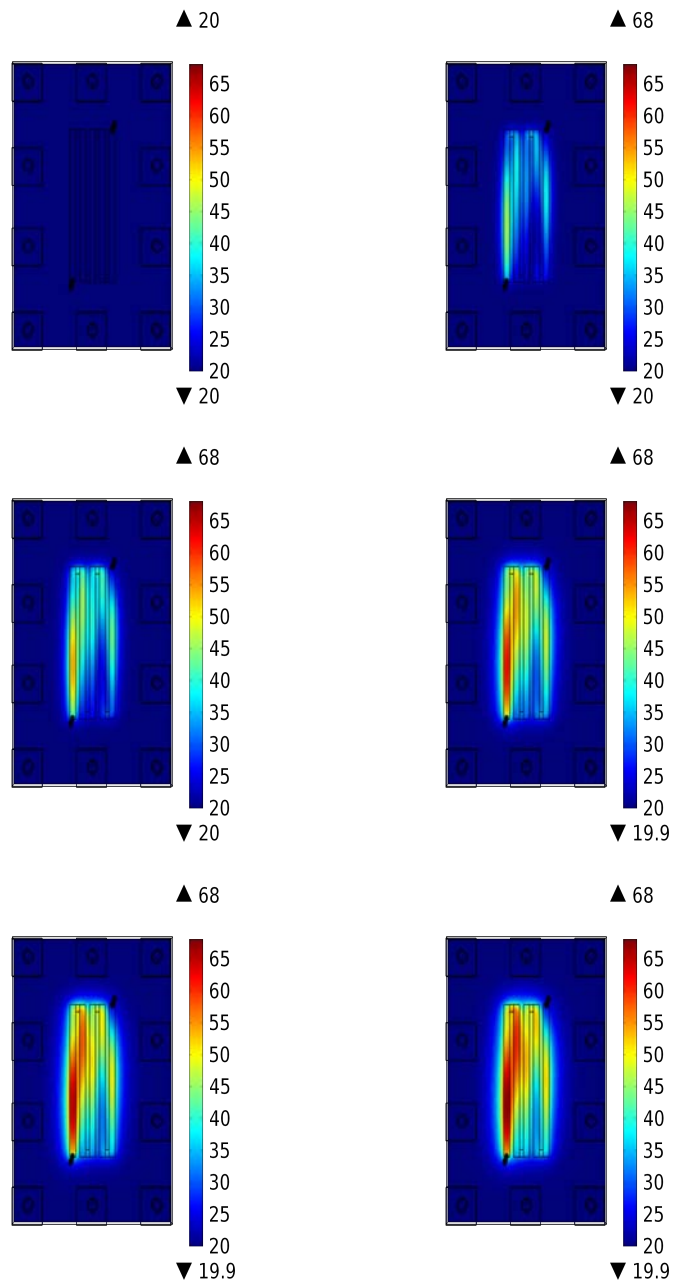


Figura 2.17: Da in alto a sinistra: andamento della temperatura dell'acqua all'interno del reattore in PTFE agli istanti 0, 60, 120, 240, 300, 360 [s]

- $P_{\text{ass fluido}} = 6.48$ [W] la potenza totale assorbita dall'acqua
- $P_{\text{ass reattore}} = 1.84$ [W] la potenza totale assorbita dal reattore in PTFE
- $P_{\text{eff fluido}}$ la potenza effettivamente assorbita dall'acqua che provoca l'aumento di temperatura
- $P_{\text{eff reattore}}$ la potenza effettivamente assorbita dal reattore in Teflon che provoca l'aumento di temperatura
- $P_{\text{scambio conduzione}}$ la potenza scambiata per conduzione tra fluido e reattore
- $P_{\text{scambio convettivo}}$ la potenza scambiata per convezione tra le superfici esterne del reattore e l'aria

Essendo la superficie totale esterna del reattore sottoposta allo scambio convettivo pari a $S_{\text{esterna}} = 0.051$ [m²] si ottiene:

$$P_{\text{effettivafluido}} = \frac{27.316 \cdot 1.6 \cdot 4.18}{360} = 0.5 \text{ [W]}$$

$$P_{\text{effettivareattore}} = \frac{1.58 \cdot 900 \cdot 1.3}{360} = 5.135 \text{ [W]}$$

$$P_{\text{scambioconduzione}} = 6.48 - 0.5 = 5.98 \text{ [W]}$$

$$P_{\text{scambioconvettivo}} = 2.685 \text{ [W]}$$

Dai risultati ottenuti si evince come il mancato riscaldamento del fluido all'interno del reattore sia essenzialmente dovuto a:

- perdita di potenza per conduzione con il reattore in Teflon legata soprattutto alla piccola massa di fluido in gioco e quindi all'elevato rapporto tra la superficie esterna e la massa del fluido
- perdita di potenza per convezione
- perdita di potenza nei cavi coassiali: infatti avendo a disposizione un carico che assorbe così poca potenza rispetto alla potenza in ingresso ciò comporta l'aumento della potenza riflessa e quindi delle perdite lungo i cavi: l'utilizzo dunque nelle simulazioni in Comsol di potenza in ingresso di 25 [W] risulta così realistica

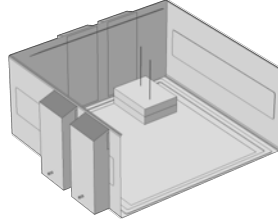


Figura 2.18: Semplificazione del reattore in Teflon

2.6.1 Studio parametrico al variare di ϵ'

Si vuole ora valutare se vi sono materiali che si comportano dal punto di vista elettromagnetico in modo migliore rispetto al Teflon per questa particolare applicazione: si vuole in definitiva analizzare l'andamento della potenza assorbita dall'acqua distillata al variare della permittività elettrica complessa ϵ' del materiale costituente il reattore.

Per fare questo si semplifica la geometria del reattore mantenendo le dimensioni dei due blocchi principali ma eliminando viti e bulloni così da semplificare l'onere di calcolo (vedi Figura 2.18). Si vuole infatti analizzare l'andamento della potenza assorbita dal fluido al variare del materiale in modo da individuare se vi sono eventuali linearità o meno nel suo comportamento. La serpentina all'interno del reattore contenente l'acqua distillata non subisce variazioni mantenendo un volume di 1.43 [ml].

Si considera che il materiale di cui è formato il reattore non abbia un comportamento assorbente alle microonde e così $\epsilon''=0$. Si effettua quindi uno studio parametrico al variare di ϵ' con valori compresi tra 1 (oltre al fluido vi è solo aria) e 13.5. Il fluido contenuto nel reattore è acqua distillata. La potenza in ingresso alle due porte è di 25 [W] e $\theta_1 = \theta_2=0$.

Dai risultati ottenuti (vedi Figura 2.19) si evidenzia:

- la mancanza di linearità nel comportamento della potenza assorbita in funzione di ϵ'
- la presenza di un materiale tra l'aria ed il fluido favorisce l'assorbimento di potenza rispetto al caso in assenza di esso ($\epsilon=1$)
- materiali come il vetro ($\epsilon'=4.7$) o la ceramica ($\epsilon'=11.75$) favoriscono l'assorbimento di potenza rispetto il Teflon

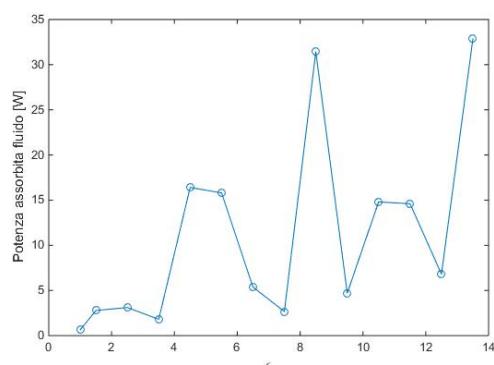


Figura 2.19: Andamento della potenza assorbita dal fluido in funzione di ϵ'

Con questa analisi si vuole evidenziare l'esistenza di materiali che presentino un comportamento elettromagnetico piú favorevole rispetto al Teflon al fine di assorbire potenza da parte del fluido; accanto a questa valutazione occorre però considerare gli svantaggi nell'utilizzo di altri materiali: costo, fragilità, difficoltà di lavorazione, comportamento termico.

La scelta di utilizzare il Teflon ha diversi aspetti positivi: buon comportamento elettromagnetico, basso costo, facilmente trasportabile. Per questa particolare applicazione un metodo per migliorarne il comportamento é quello di aumentare la massa del fluido al suo interno, diminuendo il rapporto superficie esterna volume cosí che presenti un comportamento migliore dal punto di vista termico.

Capitolo 3

Progettazione di un nuovo reattore

In ragione delle difficoltà incontrate nel riscaldamento della soluzione utilizzando la cavità a disposizione in laboratorio si cerca di progettare un nuovo reattore con una configurazione tale da permettere:

- la concentrazione del campo in una specifica zona, in cui sarà presente il fluido, così da favorire il riscaldamento della soluzione
- l'uniformità del campo all'interno del fluido così da ottenere un riscaldamento uniforme con lo stesso valore di campo elettrico e quindi di temperatura nella soluzione
- controllo della temperatura raggiunta dal fluido attraverso la potenza, tempo di residenza del fluido all'interno della cavità, valore dell'angolo θ del segnale dato in ingresso all'amplificatore di potenza, della velocità del fluido e della disposizione e quantità di fluido utilizzata
- valori accettabili del termine $S_{11}|_{\text{dB}}$ così da ottenere una buona efficienza di riscaldamento: la potenza data in ingresso è effettivamente assorbita dal carico (fluido) e non viene riflessa alla porta. Si considera come valore accettabile $S_{11} = -18|_{\text{dB}}$

3.1 Configurazione a vuoto

Servendosi di Comsol Multiphysics si studia una prima configurazione della cavità costituita da due guide d'onda rettangolari, due tronchi di cono e una struttura cilindrica (vedi Figura 3.1): si vorrebbe che con una tale configurazione si ottenga una concentrazione del campo elettrico all'interno della

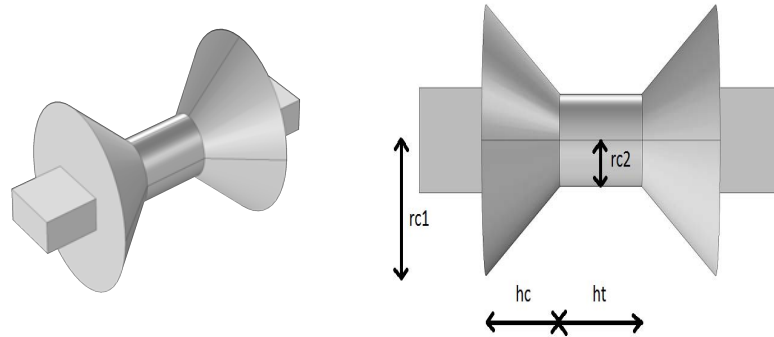


Figura 3.1: Configurazione reattore

rc1	raggio maggiore del tronco di cono
rc2	raggio minore del tronco di cono
hc	altezza del tronco di cono
ht	altezza della struttura cilindrica

Figura 3.2: Parametri della geometria considerata

struttura cilindrica mantenendo sempre buoni valori del parametro S_{11} . Si evidenziano (vedi Figura 3.2) alcuni parametri della geometria modellizzata che saranno ripresi piú volte durante il lavoro di tesi.

Il dispositivo é quindi composto da:

- due guide d'onda rettangolari che hanno la funzione di immettere il campo all'interno del dispositivo
- due volumi a tronchi di cono che si vorrebbe avessero la funzione di concentrare il campo all'interno della zona cilindrica
- struttura cilindrica inizialmente vuota. L'effetto di concentrazione comporterebbe un aumento del campo elettrico al suo interno

La guida d'onda rettangolare in ingresso modellizzata in Comsol ha dimensioni della sezione di 8.5 [cm] e 4 [cm] mentre la porta in ingresso di immissione della potenza é una porta rettangolare, che coincide con la sezione iniziale della guida, che trasmette un campo di modo TE_{10} . Questa decisione, presa per risparmiare tempo di calcolo durante le analisi numeriche e che si vedrá essere un'ottima approssimazione, é in accordo con un articolo presente in

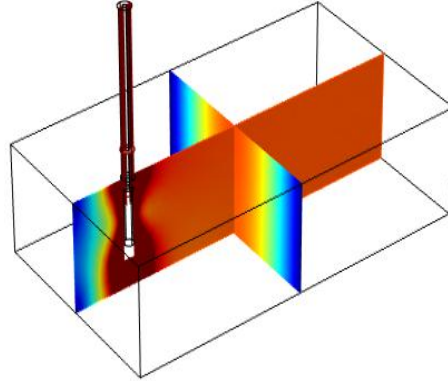


Figura 3.3: Configurazione del campo TE_{10} all'interno della guida d'onda

raggio esterno cavo coassiale [cm]	0.276
raggio interno cavo coassiale [cm]	0.079
materiale dielettrico coassiale	Teflon

Figura 3.4: Caratteristiche cavi coassiali utilizzati in laboratorio

letteratura¹: se i cavi coassiali in ingresso e la guida d'onda rettangolare sono correttamente dimensionati e connessi tra di loro (il posizionamento del coassiale fondamentale) si può sostituire, nell'analisi numerica, il cavo coassiale d'ingresso con una porta rettangolare della stessa potenza (vedi Figura 3.3). Si osserva che i valori delle dimensioni della guida d'onda e dei cavi coassiali (vedi Figura 3.4) coincidono con quelli già presenti in laboratorio e quindi si confida nella loro buona realizzazione; nonostante ciò sono state condotte delle simulazioni che lo verificano.

Lo scopo è studiare preliminarmente l'influenza delle varie grandezze in gioco, raggio maggiore del tronco di cono rc_1 , raggio minore del tronco di cono rc_2 , altezza del tronco di cono hc , sul campo elettrico medio all'interno del cilindro e sulla grandezza $S_{11}|_{dB}$ e notare se vi sono eventuali monotonicità o meno all'interno dell'intervallo di valori considerato. Nelle simulazioni numeriche che si effettuano si considera una sola porta in funzione così da poter valutare il parametro $S_{11}|_{dB}$: la potenza in ingresso è di 25 [W], e la lunghezza della struttura cilindrica è mantenuta costante a $ht=15$ [cm].

¹Iwabuchi, Kashiwa, Kubota ' Analysis of electromagnetic fields in a mass produced microwave oven using the finite difference time domain method '

3.1.1 Studio parametrico a vuoto

Il primo valore di cui si studia l'influenza é il parametro $rc1$ mantenendo quindi $hc,rc2$ fissi:

$rc1$ [cm]	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9	9.5	10	10.5	11
	$rc2=4$ [cm]												
	$hc=10$ [cm]												

Analizzando i risultati ottenuti (vedi Figura 3.5) si osserva la mancanza di monotonicit  all'interno dell'intervallo considerato e si sceglie $rc1=11$ [cm] come valore migliore. Si analizza quindi l'influenza del raggio minore $rc2$, in cui si mantengono fissi i parametri $rc1, hc$:

$rc2$ [cm]	3	3.25	3.5	3.75	4	4.25	4.5	4.75	5	5.25	5.5	
	$rc1=11$ [cm]											
	$hc=10$ [cm]											

Analizzando i risultati ottenuti (vedi Figura 3.6) si osserva la mancanza di monotonicit  all'interno dell'intervallo considerato e si sceglie come $rc2=3.75$ [cm] come valore migliore. Si analizza quindi l'influenza sulle prestazioni dell'altezza del tronco di cono hc , in cui si mantengono fissi i parametri $rc1, rc2$:

hc [cm]	5.5	5.75	6	6.25	6.5	6.75	7	7.25	7.5	7.75	8	8.25
	8.5	8.75	9	9.5	10	10.5	11	11.5	12	12.5	13	
	$rc1=11$ [cm]											
	$rc2=3.75$ [cm]											

Analizzando i risultati ottenuti (vedi Figura 3.7) in cui si osserva come anche in questo caso non vi siano monotonicit  all'interno dell'intervallo considerato si sceglie come $hc=9$ [cm] come risultato migliore.

Con la combinazione di parametri ottenuti:

- $rc1=11$ [cm]
- $rc2=3.75$ [cm]
- $hc=9$ [cm]
- $ht=15$ [cm]

si ottengono, con una potenza in ingresso data dalla porta 1 pari a 25 [W], i valori:

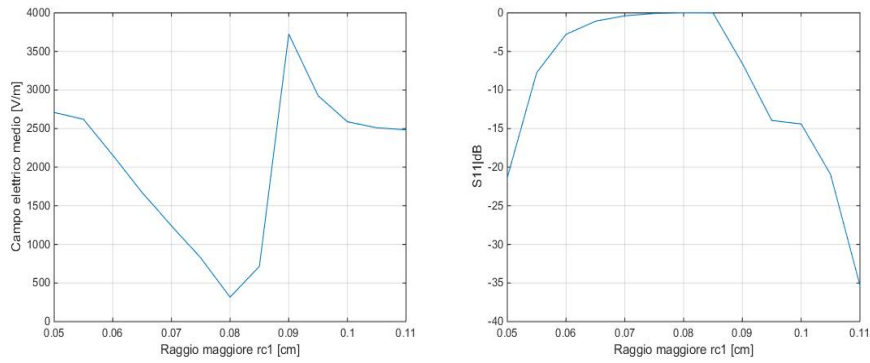


Figura 3.5: Campo elettrico medio nella struttura cilindrica e parametro $S_{11}|_{dB}$ al variare del raggio maggiore $rc1$

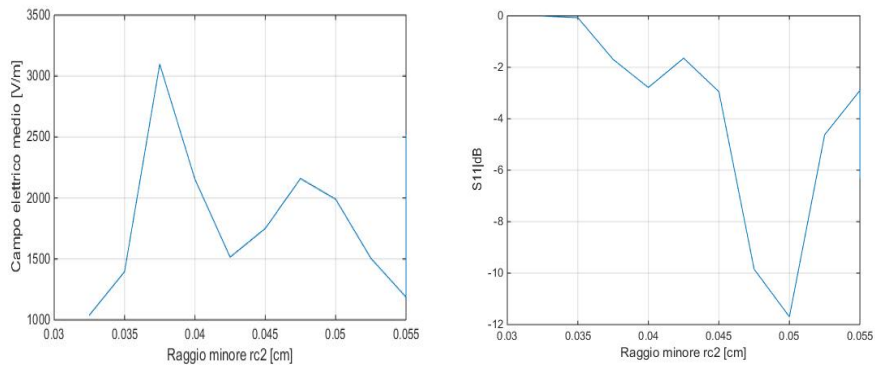


Figura 3.6: Campo elettrico medio nella struttura cilindrica e parametro $S_{11}|_{dB}$ al variare del raggio minore $rc2$

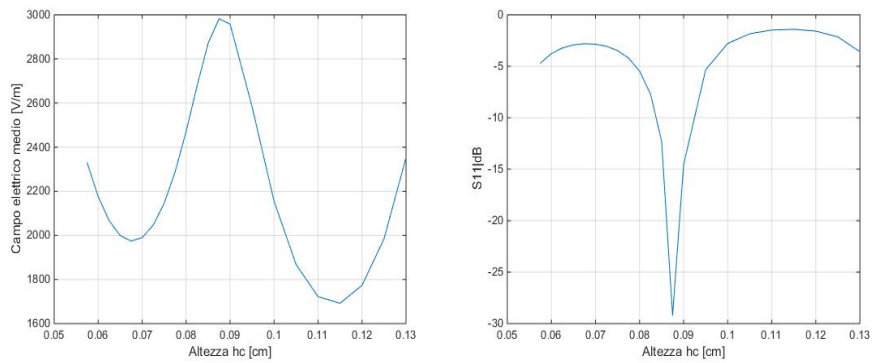


Figura 3.7: Campo elettrico medio nella struttura cilindrica e parametro $S_{11}|_{dB}$ al variare dell'altezza hc

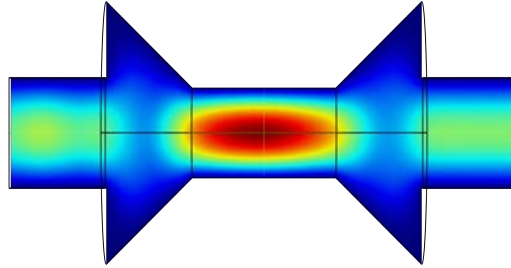


Figura 3.8: Effetto di concentrazione del campo elettrico con una porta attiva di potenza 25[W]

- campo elettrico medio all'interno della struttura cilindrica $E_{\text{medio}}=4004.3$ [V/m]
- S_{11} [dB]=-16.876

questi valori (vedi Figura 3.8), soprattutto per quanto riguarda il parametro di riferimento S_{11} sono molto positivi ed è quindi giustificato proseguire con questa configurazione della cavità analizzando l'influenza della presenza del fluido.

3.1.2 Influenza di due porte attive

La configurazione è dotata di due guide d'onda e quindi di due porte attive poiché nel laboratorio di via Trasea sono a disposizione due amplificatori di potenza e quindi si vuole sfruttare a pieno gli apparecchi a disposizione. Si vuole studiare quindi l'influenza sul campo elettrico medio all'interno della struttura cilindrica con entrambe le porte attive, poiché in tale caso non è possibile valutare il parametro S_{11} . In laboratorio è presente un modulatore IQ che consente di variare la fase dei segnali in ingresso all'amplificatore di potenza: si studia quindi l'influenza sul campo elettrico medio al variare della fase di uno dei segnali in ingresso. Data la configurazione migliore ottenuta a vuoto con $rc1=11$ [cm], $rc2=3.75$ [cm], $hc=9$ [cm], $ht=15$ [cm] si effettua uno

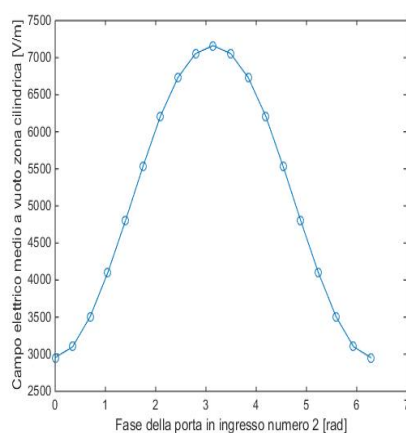


Figura 3.9: Campo elettrico medio con $\theta_1 = 0$ e al variare di θ_2

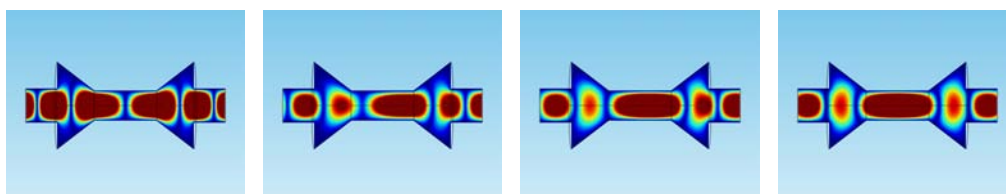


Figura 3.10: Da sinistra: andamento del campo elettrico con $\theta_1 = 0$ e $\theta_2 = 0$, $\theta_2 = \frac{\pi}{3}$, $\theta_2 = \frac{2\pi}{3}$, $\theta_2 = \pi$

studio parametrico al variare del parametro θ_2 mantenendo $\theta_1 = 0$. Entrambe le porte in ingresso hanno una potenza di 25 [W].

Dai risultati ottenuti (vedi Figure 3.9, 3.10) si evince come la configurazione con $\theta_1 = 0$, $\theta_1 = \pi$ sia la migliore al fine di concentrare il campo all'interno della struttura cilindrica e con valori del campo medio maggiori del doppio rispetto al caso con $\theta_1 = 0$, $\theta_1 = \pi$.

3.2 Configurazione con fluido

Come conseguenza dei buoni risultati ottenuti nel caso in assenza di fluido si vuole ora passare allo studio del problema considerandone la sua presenza. Gli obiettivi sono:

- mantenere l'effetto di focalizzazione del campo all'interno della struttura cilindrica ed in particolare all'interno della bobina di fluido ottenendo valori del campo elettrico medio il piú elevati possibile cosí da favorirne il riscaldamento

- ottenere una distribuzione del campo elettrico il piú uniforme possibile all'interno della bobina di fluido cosí da rendere il campo elettrico e quindi il riscaldamento il piú uniforme possibile, cercando quindi di minimizzare la deviazione standard del campo elettrico all'interno del fluido
- mantenere valori ragionevoli delle dimensioni della cavità, quindi che non si discostino di molto da quelli utilizzati a vuoto per ovvie motivazioni di costruzione

La soluzione madre ha caratteristiche elettromagnetiche e termiche molto simili a quelle dell'acqua quindi nel modello in Comsol si utilizzano le caratteristiche proprio dell'acqua ed in particolare si specifica:

$$\epsilon = 65 - j30 \quad \textit{permettività elettrica complessa} \quad (3.1)$$

$$\sigma = 5.5 * 10^{-6} \quad \textit{conducibilità elettrica} \quad (3.2)$$

$$\mu_r = 1 \quad \textit{permeabilità magnetica relativa} \quad (3.3)$$

$$\gamma = 1 \quad \textit{rapporto dei calori specifici} \quad (3.4)$$

Per favorire l'accoppiamento del campo elettrico con masse piccole non si utilizza il reattore in Teflon ma dei tubicini dello stesso materiale disposti a formare una bobina all'interno del quale scorre il fluido cosí da aumentare se necessario la massa di fluido presente nel reattore. Si decide di modellizzare una bobina di acqua di raggio 2.5 [mm] di 8.5 spire utilizzando come supporto un tubo in Teflon di raggio 1.4 [cm] e della stessa lunghezza della struttura cilindrica della cavità ht (vedi Figura 3.11). Le caratteristiche utilizzate del Teflon sono:

$$\epsilon = 1.9 - j0.01 \quad \textit{permettività elettrica complessa} \quad (3.5)$$

$$\sigma = 0 \quad \textit{conducibilità elettrica} \quad (3.6)$$

$$\mu_r = 1 \quad \textit{permeabilità magnetica relativa} \quad (3.7)$$

$$C_p = 1050[J/(Kg*K)] \quad \textit{capacità termica a pressione costante} \quad (3.8)$$

$$\rho = 2200[Kg/m^3] \quad \textit{Densità} \quad (3.9)$$

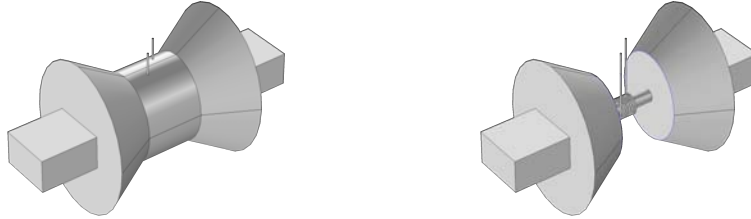


Figura 3.11: Configurazione con fluido e supporto in Teflon

3.2.1 Studio parametrico combinato e definizione di una configurazione ottimale

Si effettua quindi uno studio parametrico combinato utilizzando due porte attive caratterizzate da uno sfasamento $\Delta\theta_{12}=0$ ciascuna di potenza 25 [W], tubicini di acqua diametro 1.5 [mm] disposti a formare una bobina di 8.5 spire, alla frequenza di lavoro di 2.5 [GHz]: si studiano tutte le possibili combinazioni prendendo in considerazione cinque valori per ogni grandezza $rc1$, $rc2$, hc , ht :

$rc1$ [cm]	$rc2$ [cm]	hc [cm]	ht [cm]
10	5	8	10
10.5	5.5	8.5	10.5
11	6	9	11
11.5	6.5	9.5	11.5
12	7	10	12

Si ottengono quindi 625 combinazioni (vedi Figura 3.12) che sono confrontate in base al campo elettrico medio e alla deviazione standard del campo all'interno della bobina di fluido: poiché l'obiettivo è ottenere un riscaldamento intenso (che permetta di raggiungere senza difficoltà la temperatura di inizio reazione) ed uniforme (con lo stesso valore di temperatura e quindi del campo elettrico in ogni punto) si prediligono le soluzioni che presentano campo elettrico medio maggiore e deviazione standard minore. Questa selezione di dati è ottenuta tramite script in matlab (vedi Appendice A1) elaborando i dati di campo elettrico medio e della deviazione standard importati dalle simulazioni in Comsol Multiphysics. Una volta individuate le soluzioni do-

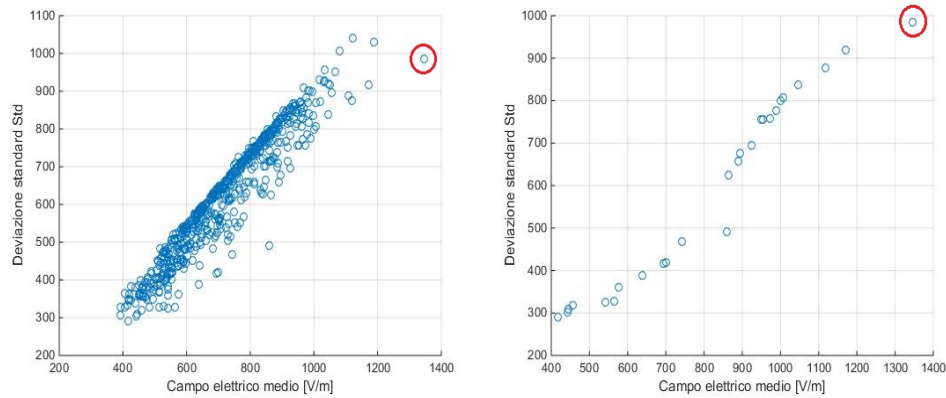


Figura 3.12: Risultati studio parametrico con fluido e le relative soluzioni dominanti. In rosso si evidenzia la configurazione ottimale.

minanti dello studio parametrico, in tutto 26 combinazioni, si può effettuare una ulteriore selezione di esse: poiché si ricercano soluzioni che comportano un elevato campo elettrico, sia perché come spiegato precedentemente il riscaldamento è migliore e poiché ciò comporta valori accettabili del parametro S_{11} le soluzioni caratterizzate da campo elettrico inferiore a circa 900 [V/m] non sono prese in considerazione anche se comportano valori decisamente migliori di deviazione standard (vedi Figura 3.13).

Analizzando ogni configurazione ottenuta e dunque la relativa distribuzione del campo elettrico all'interno del dispositivo e del fluido si possono fare le seguenti considerazioni:

- la presenza del fluido modifica completamente la configurazione del campo elettrico rispetto al caso in assenza di esso
- si incontra una notevole difficoltà nell'ottenere l'uniformità del campo all'interno del fluido (vedi Figura 3.14)
- valori elevati del campo elettrico medio all'interno del fluido comportano valori elevati di deviazione standard e quindi una maggiore disuniformità
- non si ottiene un effetto così marcato di concentrazione del campo elettrico all'interno della struttura cilindrica come nel caso di studio con aria

Si sceglie come configurazione migliore da realizzare quella che presenta campo elettrico massimo: tale scelta è dettata dalla necessità prioritaria

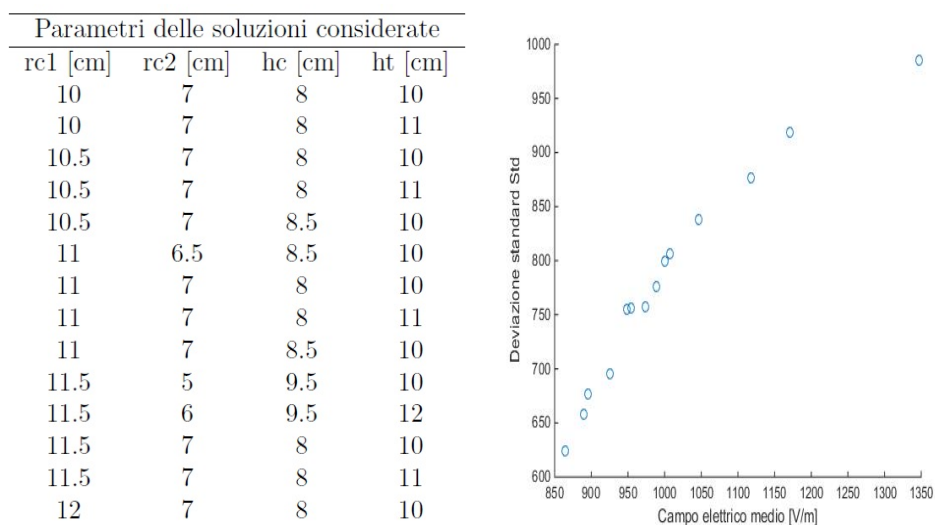


Figura 3.13: Soluzioni prese in considerazione dello studio parametrico combinato

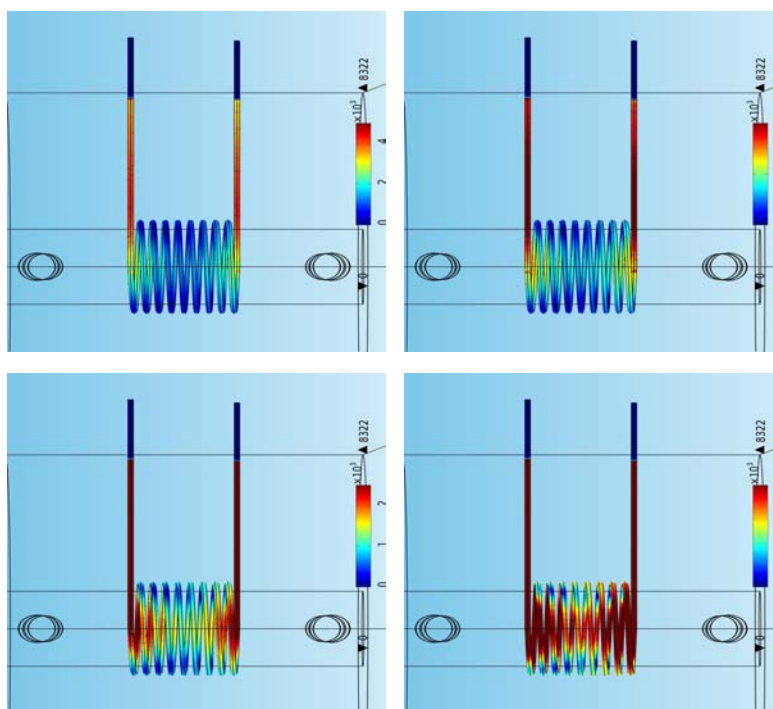


Figura 3.14: Campo elettrico all'interno del fluido per la configurazione che presenta $rc1=11$ [cm], $rc2=6.5$ [cm], $hc=8.5$ [cm], $ht=10$ [cm]

di ottenere un riscaldamento rapido ed efficace del fluido privilegiando tale aspetto all'uniformità del riscaldamento in ragione anche delle notevoli difficoltà nell'ottenerlo. La configurazione scelta presenta quindi:

- raggio maggiore $rc1=11$ [cm]
- raggio minore $rc2=6.5$ [cm]
- altezza tronco di cono $hc=8.5$ [cm]
- altezza struttura cilindrica $ht=10$ [cm]

Si vuole ora analizzare il comportamento termico del fluido con questo nuovo reattore.

3.2.2 Studio del transitorio termico

Si prosegue ora con lo studio del transitorio termico: la configurazione definitivamente scelta è quella che presenta campo elettrico medio maggiore all'interno del fluido. Le caratteristiche delle simulazioni dello studio termico effettuate sono relativamente in accordo con i valori delle possibili esperienze in laboratorio: gli amplificatori di potenza raggiungono la temperatura limite di esercizio in qualche minuto, si considera un coefficiente di scambio termico convettivo tra l'acqua in moto e l'aria pari a $5 \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$, il moto del fluido è laminare con una velocità di 0.008 [m/s]. Si considerano quindi tre analisi del transitorio termico caratterizzate da $\theta_{12}=\pi$ e per valori di potenza su ciascuna porta di 25, 35, 45 [W].

I risultati ottenuti (vedi Figura 3.15) indicano:

- si ottiene un rapido ed efficace riscaldamento del fluido
- è possibile controllare la temperatura raggiunta variando la potenza in ingresso delle porte
- il riscaldamento non è uniforme (con valori di temperatura uguali in tutti i punti) ed anzi vi sono zone di intenso riscaldamento però l'aumento di temperatura è continuo lungo la bobina di fluido

3.2.3 Influenza della massa in gioco nella cavità

Si vuole analizzare l'influenza sulla potenza assorbita dal fluido della quantità di massa presente all'interno della cavità: per fare ciò si effettua dunque uno studio parametrico al variare del numero di spire della bobina.

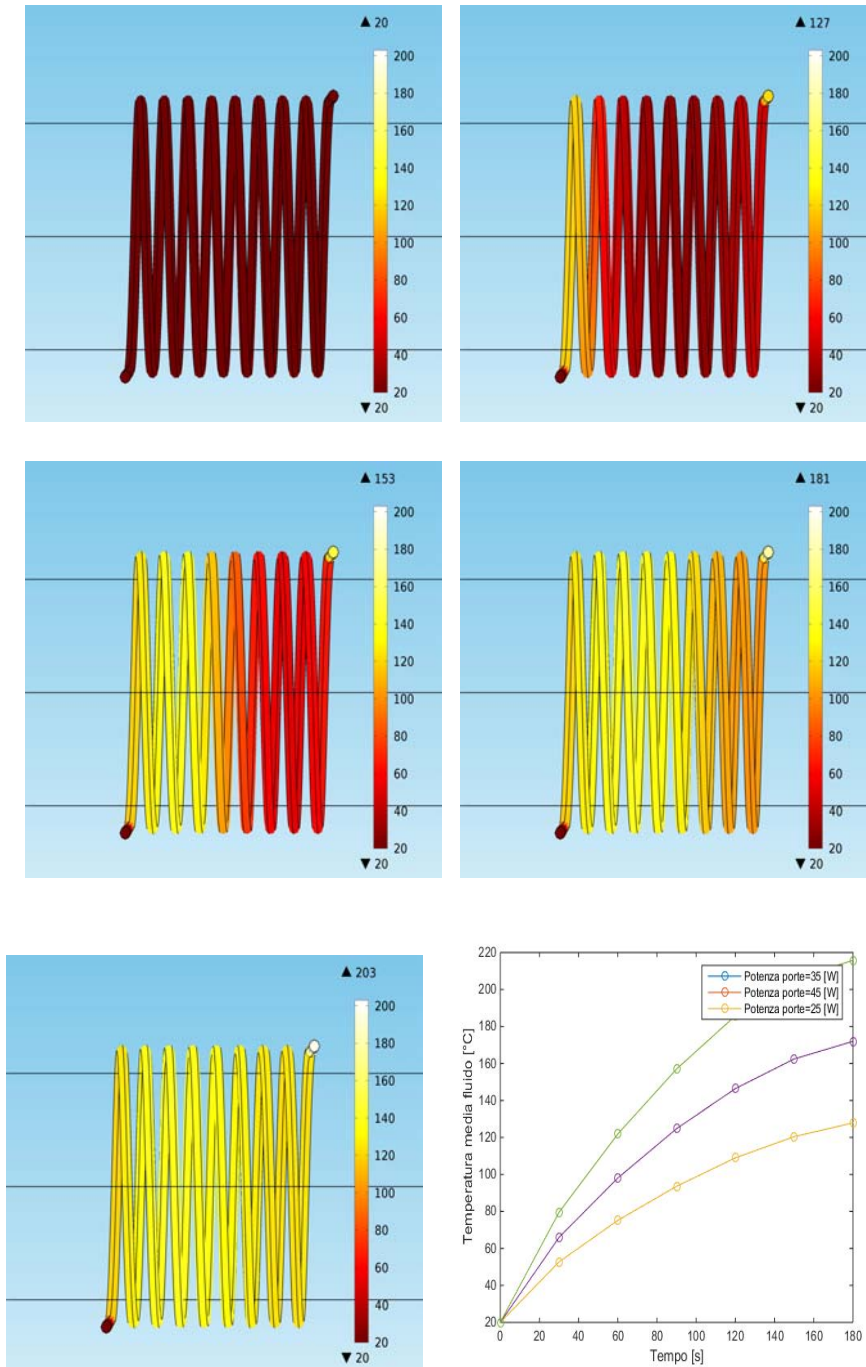


Figura 3.15: Da in alto a sinistra: andamento della temperatura all'interno della bobina di fluido agli istanti: 0, 30, 90, 150, 180 [s] con 25 [W] per porta e risultati finali dei tre studi termici

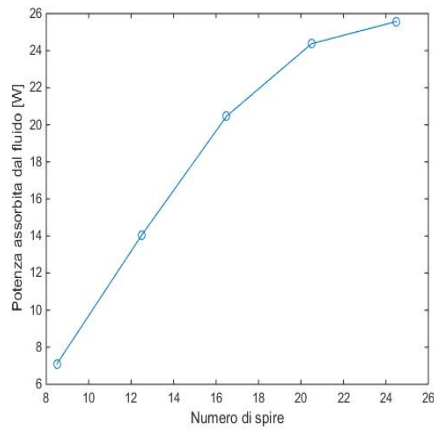


Figura 3.16: Caratteristiche e risultati studio parametrico al variare del numero di spire

La potenza in ingresso per ciascuna porta é di 25 [W] e sono caratterizzate da uno sfasamento $\theta_{12}=0$. I risultati (vedi Figura 3.16) mostrano un aumento della potenza assorbita e quindi dell'efficienza del sistema all'aumentare della massa del fluido e tale aumento di potenza non é esponenziale ma circa lineare . Quindi si ipotizza che l'effettivo miglioramento del riscaldamento che si riscontra sia dovuto alla presenza di zone dell'intero fluido con campo elettrico molto intenso (poiché aumenta il volume ricoperto dal fluido).

Capitolo 4

Caratterizzazione della cavità realizzata e analisi sperimentale

La configurazione scelta per l'effettiva costruzione è quella che presenta campo elettrico maggiore all'interno del fluido: si privilegia quindi tale aspetto all'uniformità del campo. La cavità presenta le dimensioni:

rc1	11 [cm]
rc2	6.5 [cm]
hc	8.5 [cm]
ht	10 [cm]

Il reattore è costruito attraverso fogli di PVC ricoperti di alluminio (vedi Figura 5.1).

Le analisi sperimentali che seguono dimostrano che:

- il reattore costruito isola elettromagneticamente in modo soddisfacente
- non si riesce ad ottenere il riscaldamento desiderato utilizzando lo stesso numero di spire dell'analisi numerica
- aumentando il numero di spire ed il raggio di tali spire (anche senza l'utilizzo del supporto in Teflon) così da aumentare la massa di fluido in cavità in modo da facilitare l'accoppiamento tra campo elettrico e fluido si ottiene un riscaldamento adeguato all'obiettivo finale: in particolare attraverso delle prove con acqua si osserva che con potenza di 70 [W] per ciascuna porta, realizzando una bobina di 7 [cm] di diametro e di 44.5 spire così da avere una massa di 17.5 ml all'interno della cavità (essendo il tubicino in Teflon che costituisce la bobina sempre di 1.5

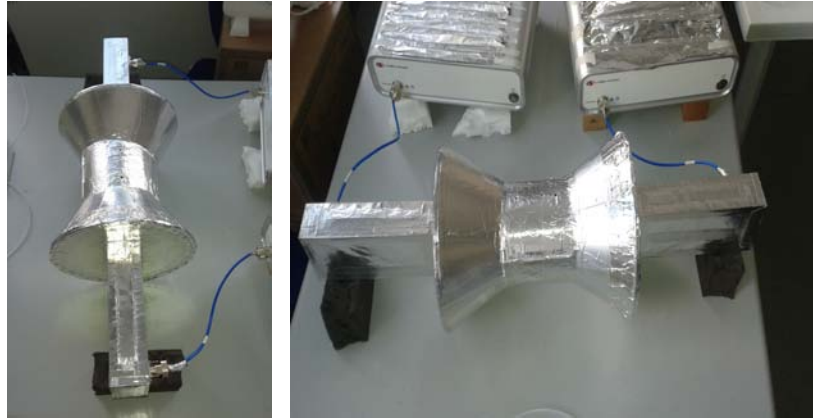


Figura 4.1: Cavità costruita e valori dei parametri utilizzati

[mm] di diametro) si ottiene l'ebollizione costante dopo 4 minuti circa dall'avvio

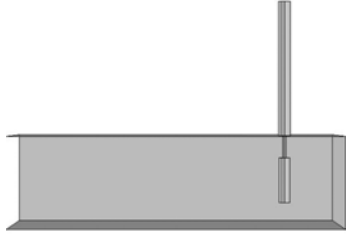
Si decide quindi di realizzare una caratterizzazione della cavità costruita a vuoto e con la nuova geometria della bobina. Per evitare possibili errori si decide, a questo punto del lavoro, di modellizzare in Comsol Multiphysics tutti i particolari effettivamente presenti nel modello realizzato comprendendo quindi i cavi coassiali e le loro connessioni con la guida d'onda.

4.1 Modellizzazione dei cavi coassiali

Si vuole rendere il modello in Comsol il più verosimile possibile alla realtà: in letteratura vi è un articolo che sostiene sia possibile sostituire il cavo coassiale in ingresso e la sua connessione con la guida d'onda con una porta rettangolare della stessa potenza che propaga un campo elettrico di modo TE_{10} . Nonostante ciò per evitare possibili effetti indesiderati e poiché l'aumento dell'impegno di calcolo non è molto si decide di implementare l'intera geometria della guida d'onda rettangolare, del cavo coassiale e della connessione con la guida. L'accoppiamento del cavo coassiale con la guida d'onda avviene tramite un cilindro metallico.

Si considerano quindi la geometria e le dimensioni reali del cavo coassiale e della guida d'onda (vedi Figura 5.2). Il dielettrico di cui è composto il cavo coassiale è Teflon con permittività complessa pari a $\epsilon = 1.9 - j0.01$:

Per verificare la qualità della guida d'onda implementata e quindi costruita ed in particolare della connessione realizzata si decide di effettuare uno studio parametrico combinato in cui si varia l'altezza del cilindro di connessione (*hcilindro*), il raggio del cilindro di connessione (*rcilindro*) e la lunghezza



Lunghezza guida d'onda [cm]	20
Lunghezza base guida d'onda [cm]	9.2
Altezza guida d'onda [cm]	4.8
Raggio esterno cavo coassiale [cm]	0.276
Raggio interno cavo coassiale [cm]	0.079
Lunghezza cilindro interno cavo coassiale [cm]	6.4
Lunghezza cilindro esterno cavo coassiale [cm]	6
Raggio cilindro di connessione [cm]	0.2
Altezza cilindro di connessione [cm]	2

Figura 4.2: Dimensioni componenti della guida d'onda

del cilindro interno che compone il cavo coassiale (*lunghezzainterno*): come condizioni al contorno si ha che tutte le pareti componenti la guida d'onda rettangolare, eccetto quella di uscita, i cavi coassiali ed il cilindro di connessione sono considerate conduttori perfetti. È esclusa, ovviamente, la superficie di separazione tra il Teflon e l'aria che occupa il volume interno della guida. La potenza in ingresso del cavo coassiale è 10 [W] e come indice di buona qualità della configurazione si valuta il parametro $S_{11}|_{dB}$ tenendo presente che un ottimo valore di tale parametro è $S_{11}|_{dB} = -18$. I risultati ottenuti (vedi Figura 5.3) confermano che la configurazione implementata nel modello e utilizzata in laboratorio emette molto bene la potenza fornita in ingresso.

La geometria del reattore implementato in Comsol è effettivamente come quello costruito e utilizzato in laboratorio (vedi Figura 5.4).

4.2 Sensibilità a variazione geometriche e di fase a vuoto

Si esegue quindi la caratterizzazione del reattore a vuoto in cui si attivano entrambe le porte a disposizione.

4.2.1 Studio parametrico a vuoto variando la fase di una porta

La potenza in ingresso dei cavi coassiali è 25 [W], la fase della porta 1 è mantenuta a $\theta_1=0$ [rad] mentre la fase della porta 2, θ_2 , viene fatta variare

$h_{cilindro}$ [m]	$r_{cilindro}$ [m]	$lunghezza_{interno}$ [m]	$S_{11} _{dB}$
0.01	0.0015	0.064	-1.35
0.01	0.0015	0.067	-3.24
0.01	0.0015	0.07	-8.13
0.01	0.002	0.064	-1.88
0.01	0.002	0.067	-4.73
0.01	0.002	0.07	-12.73
0.01	0.0025	0.064	-2.47
0.01	0.0025	0.067	-6.48
0.01	0.0025	0.07	-19.09
0.015	0.0015	0.0064	-5.25
0.015	0.0015	0.067	-14.07
0.015	0.0015	0.07	-16.99
0.015	0.002	0.064	-7.02
0.015	0.002	0.067	-22.26
0.015	0.002	0.07	-12.62
0.015	0.0025	0.064	-8.73
0.015	0.0025	0.067	-26.77
0.015	0.0025	0.07	-10.48
0.02	0.0015	0.064	-24.49
0.02	0.0015	0.067	-11.85
0.02	0.0015	0.07	-6.93
0.02	0.002	0.064	-29.9
0.02	0.002	0.067	-10.43
0.02	0.002	0.07	-6.38
0.02	0.0025	0.064	-23.59

Figura 4.3: Parametri utilizzati e risultati ottenuti nello studio parametrico combinato della guida d'onda

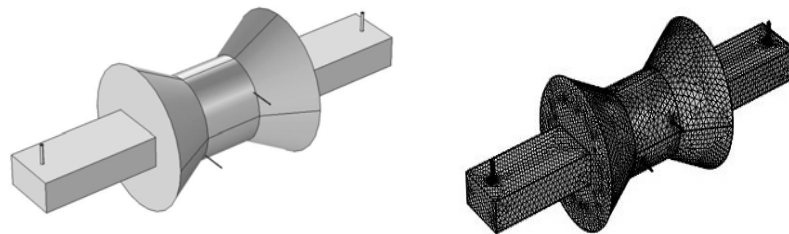


Figura 4.4: Modello della cavità reale implementato in Comsol e relativa mesh

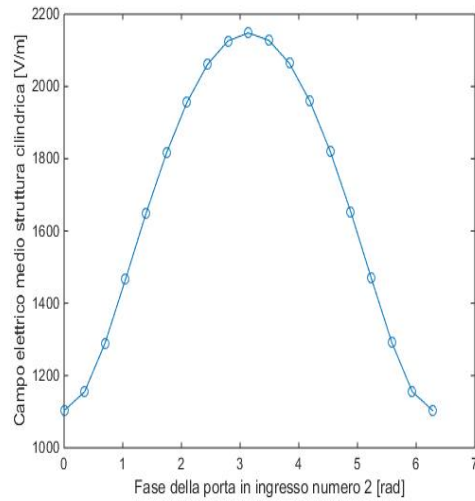


Figura 4.5: Campo elettrico medio nella struttura cilindrica

all'interno dell'intervallo $[0, 2\pi]$ [rad].

I risultati del campo elettrico medio all'interno della struttura cilindrica (vedi Figura 5.5) mostrano come la soluzione con $\theta_1=0$ e $\theta_2=\pi$ comporti un campo elettrico medio maggiore rispetto a tutti gli altri casi analizzati. Allora per la successiva parte dell'analisi numerica in Comsol si utilizzano i parametri di θ per le due porte:

$$\theta_1 = 0 \quad \theta_2 = \pi \quad (4.1)$$

4.2.2 Studio parametrico a vuoto variando il raggio maggiore rc1

In questo studio si varia il parametro rc1 mantenendo fissi gli altri parametri rc2, hc, ht ai valori del reattore costruito (vedi Figura 5.6). La potenza in ingresso dei cavi coassiali è di 25 [W] ciascuno in cui si specifica $\theta_1=0$ mentre $\theta_2=\pi$.

I risultati ottenuti (vedi Figura 5.7) del campo elettrico medio all'interno della struttura cilindrica indicano come a vuoto aumentando il raggio maggiore rc1 non si migliori la concentrazione del campo che invece è l'obiettivo che si vuole raggiungere.

Parametri utilizzati nel primo studio parametrico a vuoto variando rc1									
rc1 [cm]	9.25	9.5	9.75	10	10.25	10.5	10.75	11	11.25
	11.5	11.75	12	12.25	12.5	12.75			
rc2 [cm]					6.5				
hc [cm]					8.5				
ht [cm]					10				

Figura 4.6: Studio parametrico variando rc1

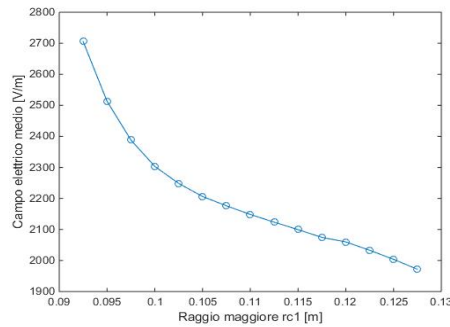


Figura 4.7: Campo elettrico medio all'interno della struttura cilindrica variando rc1

4.2.3 Studio parametrico a vuoto variando il raggio minore rc2

In questo studio si varia il parametro rc2 mantenendo fissi gli altri parametri rc1, hc, ht ai valori del reattore costruito (vedi Figura 5.8). La potenza in ingresso dei cavi coassiali è di 25 [W] ciascuno in cui si specifica $\theta_1=0$ mentre $\theta_2=\pi$. I risultati ottenuti (vedi Figura 5.9) mostrano come il campo elettrico medio nell'intera struttura cilindrica sia massimo per il valore rc2=7.75 [cm] mentre sia pressoché costante per gli altri valori.

4.2.4 Studio parametrico a vuoto variando l'altezza del tronco di cono hc

In questo studio si varia il parametro hc mantenendo fissi gli altri parametri rc1, rc2, ht ai valori del reattore costruito (vedi Figura 5.10). La potenza in ingresso dei cavi coassiali è di 25 [W] ciascuno in cui si specifica $\theta_1=0$ mentre $\theta_2=\pi$. I risultati ottenuti (vedi Figura 5.11) mostrano come il campo elettrico medio nell'intera struttura cilindrica sia massimo per valori $7.5 < hc < 9$ e tale andamento è privo di monotonicità.

4.2. SENSIBILITÀ A VARIAZIONE GEOMETRICHE E DI FASE A VUOTO67

Parametri utilizzati nel secondo studio parametrico a vuoto variando rc2												
rc1 [cm]	11											
rc2 [cm]	5.1	5.3	5.5	5.7	5.9	6.1	6.3	6.5	6.7	6.9	7.1	7.3
	7.5	7.7	7.9									
hc [cm]	8.5											
ht [cm]	10											

Figura 4.8: Studio parametrico a vuoto variando rc2

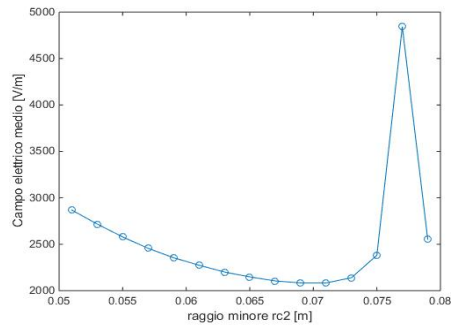


Figura 4.9: Campo elettrico medio all'interno della struttura cilindrica variando rc2

Parametri utilizzati nel terzo studio parametrico a vuoto variando hc											
rc1 [cm]	11										
rc2 [cm]	6.5										
hc [cm]	7.1	7.3	7.5	7.7	7.9	8.1	8.3	8.5	8.7	8.9	9.1
	9.3	9.5	9.7	9.9							
ht [cm]	10										

Figura 4.10: Studio parametrico a vuoto variando hc

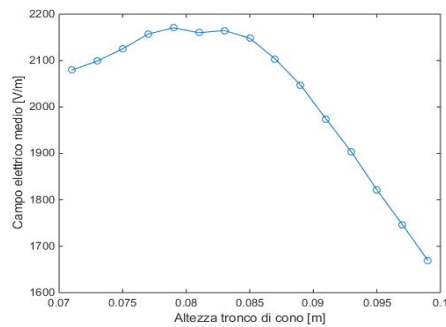


Figura 4.11: Campo elettrico medio all'interno della struttura cilindrica variando hc

Parametri utilizzati nel quarto studio parametrico a vuoto variando ht										
rc1 [cm]	11									
rc2 [cm]	6.5									
hc [cm]	8.5									
ht [cm]	8.25	8.5	8.75	9	9.25	9.5	9.75	10	10.25	10.5
	10.75	11	11.25	11.5	11.75					

Figura 4.12: Studio parametrico a vuoto variando ht

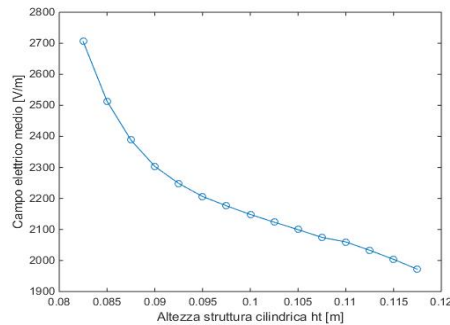


Figura 4.13: Campo elettrico medio all'interno della struttura cilindrica variando ht

4.2.5 Studio parametrico a vuoto variando l'altezza della struttura cilindrica ht

In questo studio si varia il parametro ht mantenendo fissi gli altri parametri rc1,rc2,hc ai valori del reattore costruito (vedi Figura 5.12). La potenza in ingresso dei cavi coassiali é di 25 [W] ciascuno in cui si specifica $\theta_1=0$ mentre $\theta_2=\pi$.

I risultati ottenuti (vedi Figura 5.13) mostrano come il campo elettrico medio nell'intera struttura cilindrica sia massimo al diminuire del parametro ht: poiché tale zona deve contenere la soluzione da sottoporre al riscaldamento non é conveniente diminuire ulteriormente tale parametro.

4.3 Sensibilità a variazioni geometriche e di fase a carico

Si implementa nel modello in Comsol Multiphysics la bobina in Teflon di diametro 1.5 [mm] in cui scorre la soluzione: per facilitare il riscaldamento e quindi l'accoppiamento di campo elettrico con masse molto piccole si cerca di

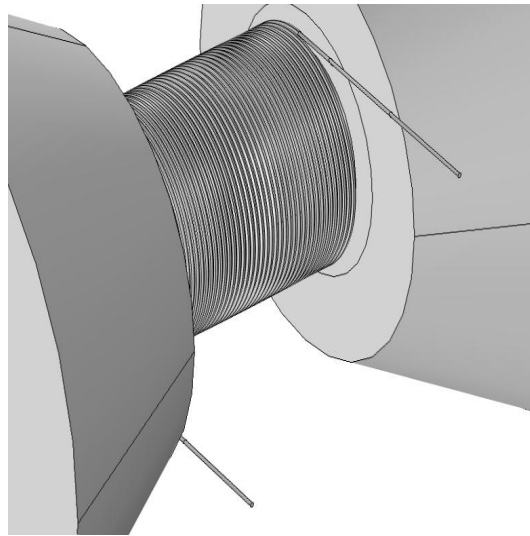


Figura 4.14: Sezione del reattore con vista della bobina contenente il fluido

aumentare il volume di fluido nel reattore aumentando dunque il numero di spire ed il raggio di tali spire: si decide quindi di utilizzare una configurazione di 44.5 spire ciascuna di raggio 3.5 [cm] (vedi Figura 5.14). Considerando anche i tubicini di ingresso e uscita si raggiunge così una massa di fluido contenuta all'interno del reattore e quindi sottoposta all'effetto delle microonde di 17.5 [ml]. La soluzione madre ha caratteristiche elettromagnetiche e termiche molto simili a quelle dell'acqua quindi nel modello in Comsol si utilizzano le caratteristiche proprio dell'acqua ed inoltre non viene riprodotto lo spessore del tubicino in Teflon che contiene il fluido ma superficialmente alla bobina di acqua vengono imposte le caratteristiche elettromagnetiche e termiche del Teflon, quindi come se il tubicino fosse di spessore nullo. Si ripetono quindi a carico le gli stessi studi parametrici effettuati a vuoto.

4.3.1 Studio parametrico a carico variando la fase di una porta

La potenza in ingresso dei cavi coassiali è 25 [W] e mentre la fase della porta 1 è mantenuta a $\theta_1=0$ [rad], la fase della porta 2, θ_2 , viene fatta variare all'interno dell'intervallo $[0,2\pi]$ [rad]. I risultati del campo elettrico medio all'interno del fluido e dell'intera struttura comprendente il fluido (vedi Figura 5.15) mostrano come la soluzione con $\theta_1=0$ e $\theta_2=\pi$ sia la migliore per massimizzare il campo elettrico medio all'interno del fluido. Questo risultato è molto utile sia per la parte numerica che per la parte sperimentale

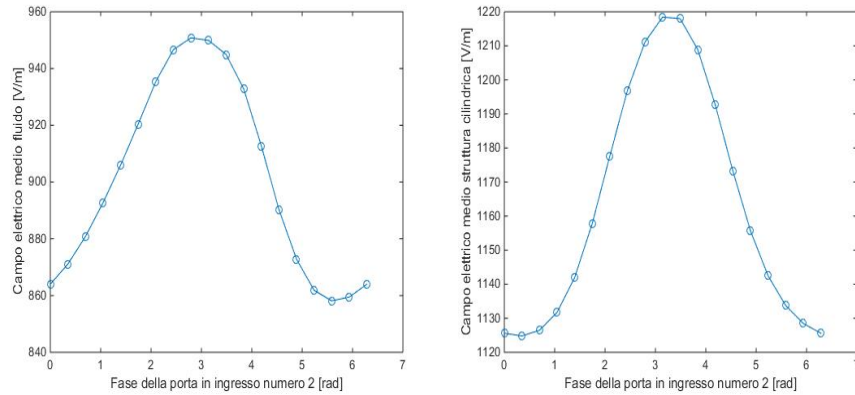


Figura 4.15: Campo elettrico medio nel fluido e nell'intera struttura cilindrica a carico al variare di θ_2

poiché con tale sfasamento delle porte con il quale si ottiene un campo elettrico medio maggiore che il riscaldamento sarà più rapido ed efficace. Allora per le successiva parte dell'analisi numerica in Comsol si utilizzano questi parametri di θ per le due porte:

$$\theta_1 = 0 \quad \theta_2 = \pi \quad (4.2)$$

Oltre all'aspetto quantitativo del campo elettrico medio all'interno della bobina di fluido occorre fare una precisazione sull'aspetto qualitativo dell'andamento del campo elettrico al variare delle fasi (vedi Figura):

- con $\theta_2=0$ si ottiene una configurazione del campo con zona di campo molto elevato al centro della zona cilindrica con ai suoi lati due zone di campo basso: la geometria della bobina comprende l'intero volume e quindi è sottoposta a due zone di campo elettrico basso e una zona ad elevato campo
- con $\theta_2=\pi$ si ottiene una configurazione del campo con una zona di campo basso al centro della zona cilindrica con ai suoi lati due zone di campo molto elevato: la geometria della bobina comprende l'intero volume e quindi è sottoposta a due zone di campo elettrico elevato ed una zona a basso campo
- i valori del campo medio ottenuti al variare delle fasi sono indicativi solamente per questo tipo di carico: se ad esempio si considerasse un

4.3. SENSIBILITÀ A VARIAZIONI GEOMETRICHE E DI FASE A CARICO 71

Parametri utilizzati nel primo studio parametrico a carico variando rc1									
rc1 [cm]	9.25	9.5	9.75	10	10.25	10.5	10.75	11	11.25
	11.5	11.75	12	12.25	12.5	12.75			
rc2 [cm]	6.5								
hc [cm]	8.5								
ht [cm]	10								

Figura 4.16: Studio parametrico variando rc1

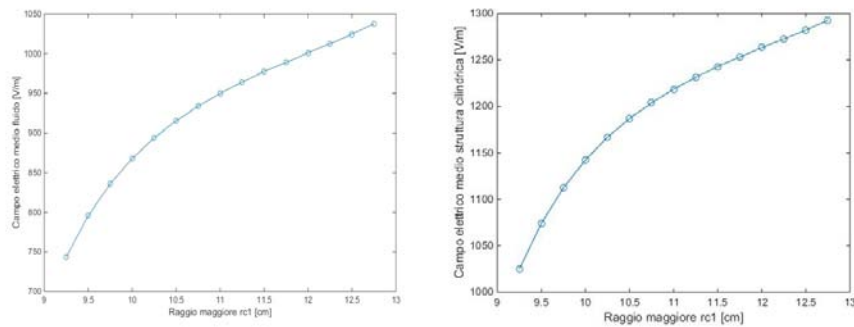


Figura 4.17: Campo elettrico medio nel fluido e nell'intera struttura cilindrica variando rc1

bicchiere d'acqua al centro della zona cilindrica la scelta $\theta_1=0$, $\theta_2=\pi$ sarebbe svantaggiosa poiché in questo caso il carico si troverebbe proprio all'interno di una zona a basso campo

Si ripetono ora a carico gli stessi studi parametrici effettuati a vuoto così da caratterizzare il reattore costruito tenendo conto della bobina di fluido.

4.3.2 Studio parametrico variando il raggio maggiore rc1

In questo studio si varia il parametro rc1 mantenendo fissi gli altri parametri rc2, hc, ht ai valori del reattore costruito (vedi Figura 5.16). La potenza in ingresso dei cavi coassiali è di 25 [W] ciascuno in cui si specifica $\theta_1=0$ mentre $\theta_2=\pi$. I risultati ottenuti (vedi Figura 5.17) del campo elettrico medio nel fluido e nell'intera struttura cilindrica indicano come la presenza del fluido modifichi in modo decisivo la configurazione ed i valori del campo infatti in questo caso un valore di rc1 maggiore fa aumentare il campo elettrico medio.

Parametri utilizzati nel secondo studio parametrico a carico variando rc2												
rc1 [cm]	11											
rc2 [cm]	5.1	5.3	5.5	5.7	5.9	6.1	6.3	6.5	6.7	6.9	7.1	7.3
	7.5	7.7	7.9									
hc [cm]	8.5											
ht [cm]	10											

Figura 4.18: Studio parametrico variando rc2

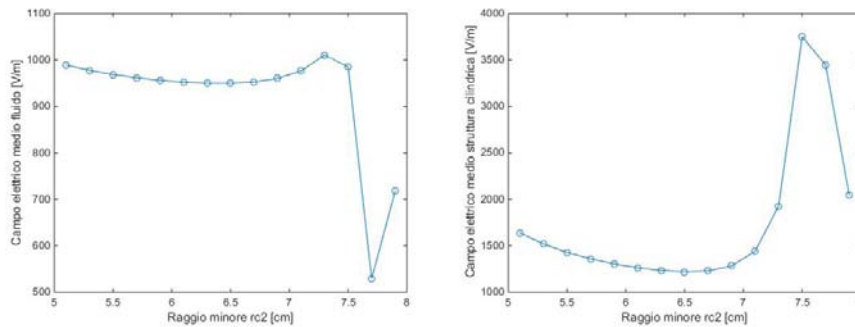


Figura 4.19: Campo elettrico medio nel fluido e nell'intera struttura cilindrica variando rc2

4.3.3 Studio parametrico variando il raggio minore rc2

In questo studio si varia il parametro rc2 mantenendo fissi gli altri parametri rc1, hc, ht ai valori del reattore costruito (vedi Figura 5.18). La potenza in ingresso dei cavi coassiali è di 25 [W] ciascuno in cui si specifica $\theta_1=0$ mentre $\theta_2=\pi$. I risultati ottenuti (vedi Figura 5.19) mostrano come il campo elettrico medio nell'intera struttura cilindrica abbia lo stesso andamento che nel caso a vuoto ma che il comportamento sia opposto all'interno del fluido: l'obiettivo è invece massimizzare e se possibile uniformare il campo elettrico all'interno del fluido.

4.3.4 Studio parametrico variando l'altezza del tronco di cono hc

In questo studio si varia il parametro hc mantenendo fissi gli altri parametri rc1, rc2, ht ai valori del reattore costruito (vedi Figura 5.20). La potenza in ingresso dei cavi coassiali è di 25 [W] ciascuno in cui si specifica $\theta_1=0$ mentre $\theta_2=\pi$. I risultati ottenuti (vedi Figura 5.21) mostrano come il campo elettrico medio nel fluido e di conseguenza nell'intera struttura cilindrica aumenti al diminuire del parametro hc, ma non in modo decisivo.

4.3. SENSIBILITÀ A VARIAZIONI GEOMETRICHE E DI FASE A CARICO73

Parametri utilizzati nel terzo studio parametrico a carico variando hc	
rc1 [cm]	11
rc2 [cm]	6.5
hc [cm]	7.1 7.3 7.5 7.7 7.9 8.1 8.3 8.5 8.7 8.9 9.1 9.3 9.5 9.7 9.9
ht [cm]	10

Figura 4.20: Studio parametrico variando hc

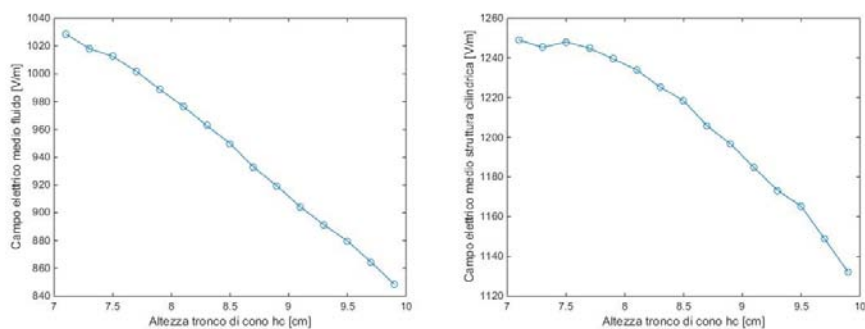


Figura 4.21: Campo elettrico medio nel fluido e nell'intera struttura cilindrica variando hc

Parametri utilizzati nel quarto studio parametrico a carico variando ht	
rc1 [cm]	11
rc2 [cm]	6.5
hc [cm]	8.5
ht [cm]	10.25 10.5 10.75 11 11.25 11.5 11.75 12 12.25 12.5 12.75 13 13.25 13.5 13.75

Figura 4.22: Studio parametrico variando ht

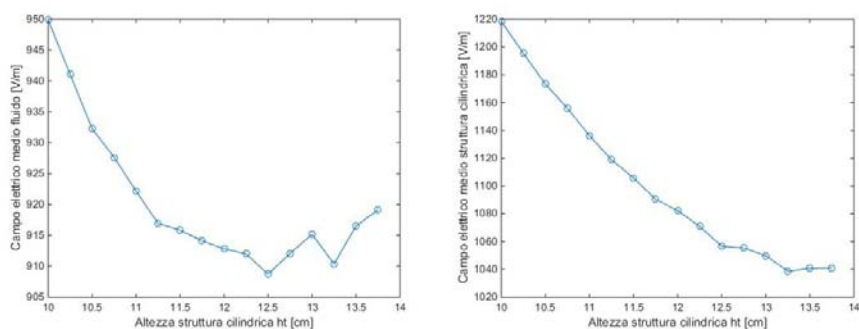


Figura 4.23: Campo elettrico medio nel fluido e nell'intera struttura cilindrica variando ht

4.3.5 Studio parametrico variando l'altezza della struttura cilindrica ht

In questo studio si varia il parametro ht mantenendo fissi gli altri parametri rc1,rc2,hc ai valori del reattore costruito (vedi Figura 5.22). La potenza in ingresso dei cavi coassiali é di 25 [W] ciascuno in cui si specifica $\theta_1=0$ mentre $\theta_2=\pi$. I risultati ottenuti (vedi Figura 5.23) mostrano come il campo elettrico medio nel fluido e di conseguenza nell'intera struttura cilindrica aumenti diminuisca all'aumentare di ht e quindi la soluzione ht=10 [cm] é già una buona scelta costruttiva essendo tale valore vicino il minimo possibile per la presenza della bobina utilizzata.

4.3.6 Analisi del transitorio termico

Si prosegue dunque con lo studio del transitorio termico della configurazione adottata: si considera uno scambio convettivo tra le pareti della bobina e l'aria circostante caratterizzato da un coefficiente di scambio termico $h=5$ [$\frac{W}{m^2K}$]. Le proprietà dell'analisi termica effettuata sono:

Analisi transitorio termico	
Potenza porta 1 [W]	25
Potenza porta 2 [W]	25
$\Delta\theta_{12}$	π
Regime del flusso	laminare
Velocità di ingresso fluido [m/s]	0.007

dai risultati ottenuti (vedi Figura 5.24 e 5.25) si evidenzia:

- il fluido raggiunge la temperatura di 100 gradi centigradi in breve tempo (90 [s])
- il riscaldamento non é uniforme e avendo utilizzato uno sfasamento tra le due porte in ingresso di $\Delta\theta_{12}=\pi$ si evidenziano due zone di riscaldamento piú marcato ed una zona di basso riscaldamento al centro
- essendo le masse in gioco molto piccole sottoposte ad uno scambio convettivo, il fluido nel suo percorso lungo la bobina si raffredda nelle zone in cui il campo elettrico é meno intenso

4.3. SENSIBILITÀ A VARIAZIONI GEOMETRICHE E DI FASE A CARICO75

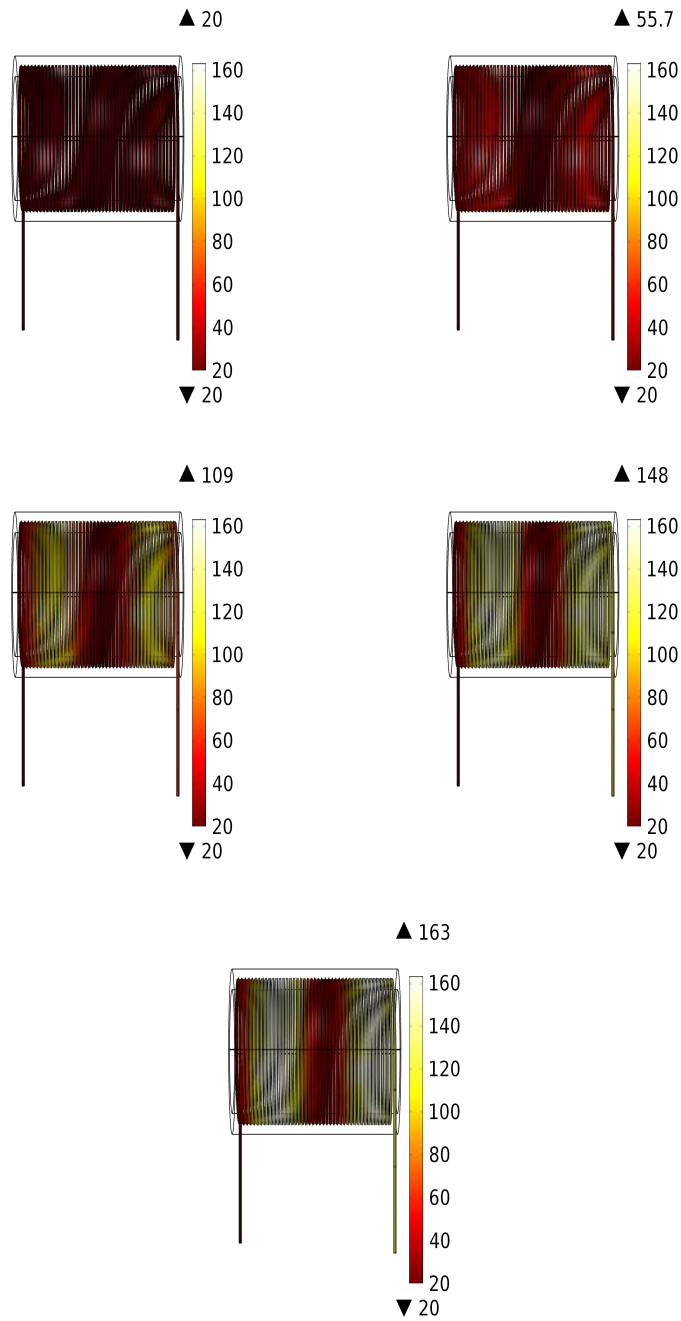


Figura 4.24: Da in alto a sinistra: andamento della temperatura all'interno della bobina di fluido agli istanti: 0, 30, 90, 150, 180 [s] con 25 [W] per porta

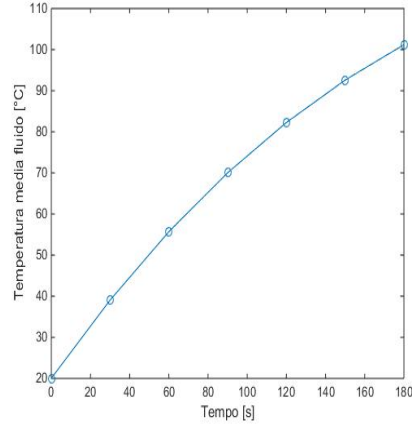
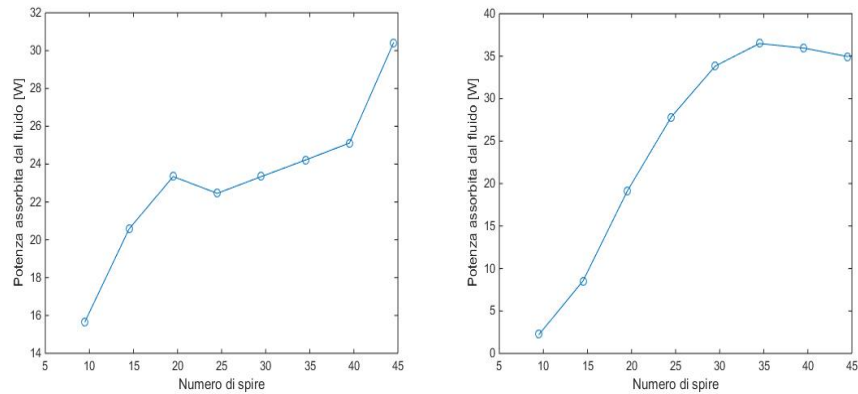


Figura 4.25: Temperatura media del fluido delle analisi termiche effettuate



Potenza porte 1,2 [W]	$\Delta\theta_{12}$	Numero spire	Potenza porte 1,2 [W]	$\Delta\theta_{12}$	Numero spire
25	0	8.5	25	π	8.5
25	0	12.5	25	π	12.5
25	0	16.5	25	π	16.5
25	0	20.5	25	π	20.5
25	0	24.5	25	π	24.5

Figura 4.26: Risultati e relative caratteristiche studio parametrico al variare del numero di spire: a sinistra $\theta_2=0$, a destra $\theta_2=\pi$

4.4 Influenza della massa in gioco nella cavità

Si vuole analizzare l'influenza sulla potenza assorbita dal fluido della quantità di massa presente all'interno della cavità: per fare ciò si effettua dunque uno studio parametrico al variare del numero di spire della bobina. I risultati (vedi Figura 5.26) indicano:

- un effettivo aumento della potenza assorbita all'aumentare della massa del fluido dovuto alla presenza di zone della bobina sottoposte ad un campo elettrico molto intenso
- la potenza assorbita dipende fortemente dalla geometria del corpo che comporta una redistribuzione del campo elettrico all'interno del fluido: come si può vedere nel caso con $\theta_2 = \pi$ a, la potenza assorbita diminuisce per un numero di spire pari a 35-40 e ciò si spiega con una modifica del campo elettrico all'interno del fluido
- l'aumento della massa del fluido è quindi vantaggioso poiché non è semplice conoscere a priori l'effettiva distribuzione del campo con la perturbazione dovuta alla presenza del corpo da riscaldare

4.5 Studio parametrico variandone la geometria

Analizzando i risultati numerici ottenuti in Comsol Multiphysics, con i colleghi del Dipartimento di Scienze Chimiche si è deciso di studiare una configurazione che permetta di ottenere una sola zona di campo elettrico molto elevato (un picco) al centro della bobina di fluido, piuttosto che due zone di campo elevato esterne ed una zona di basso campo al centro. Queste considerazioni riguardano un miglior sviluppo della reazione chimica per la produzione di particelle di Itrio Idrato Carbonato $Y(CO_3)OH$.

Dallo studio parametrico effettuato variando la fase di una sola porta si nota infatti:

- $\theta_{12} = 0$ si ottiene una zona di campo elettrico elevato (picco) al centro della bobina
- $\theta_{12} = \pi$ si ottiene una zona di basso campo elettrico (nodo) al centro della bobina e due picchi laterali

Poiché la strumentazione a disposizione in laboratorio consente di ottenere il controllo delle fasi solo per la condizione $\theta_{12} = \pi$ si effettua uno

studio parametrico di tipo geometrico. Si ruota una guida d'onda rettangolare assieme al cavo coassiale all'interno dell'intervallo $[0, 2\pi]$ rispetto l'asse di simmetria lungo la struttura.

L'andamento del campo elettrico con la presenza di zone ad elevato, basso campo é indifferente per leggere variazioni del carico. Sia per evidenziare al meglio i risultati sia per semplificare l'onere di calcolo si sostituisce la bobina con un parallelepipedo di acqua distillata, posizionata al centro della struttura cilindrica di dimensioni:

lunghezza [cm]	6
larghezza [cm]	5
altezza [cm]	1

Le caratteristiche dello studio parametrico sono quindi:

$P_{\text{porta1}}=P_{\text{porta2}}$ [W]	Angolo di rotazione [deG]	θ_{12}
25	0	π
25	20	π
25	40	π
25	60	π
25	80	π
25	100	π
25	120	π
25	140	π
25	160	π
25	180	π
25	200	π
25	220	π
25	240	π
25	260	π
25	280	π
25	300	π
25	320	π
25	340	π
25	360	π

I risultati ottenuti sono raffigurati in Figura 5.27, 5.28.

Si osserva come l'andamento del campo elettrico con un picco al centro della cavità si ottenga per un angolo di rotazione della guida d'onda di 180 gradi con uno sfasamento fissato tra i segnali in ingresso delle due porte di $\theta_{12} = \pi$. Lo stesso risultato viene ottenuto in assenza di rotazione della guida

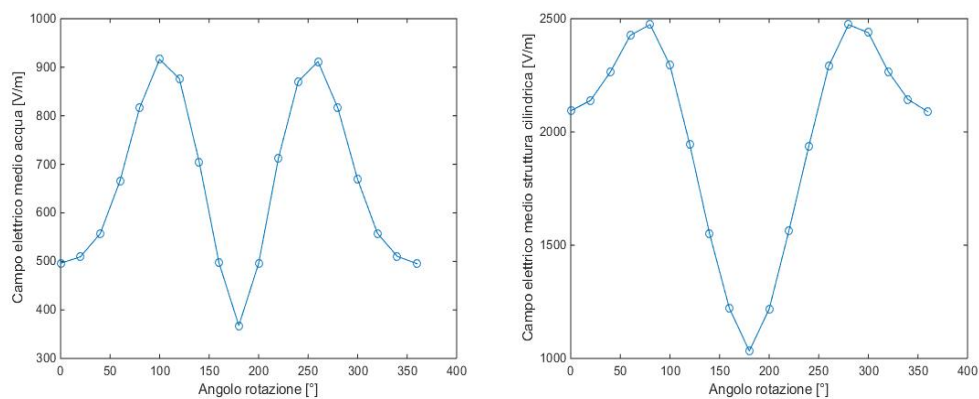


Figura 4.27: Da sinistra: campo elettrico medio nel carico di acqua e nell'intera struttura cilindrica

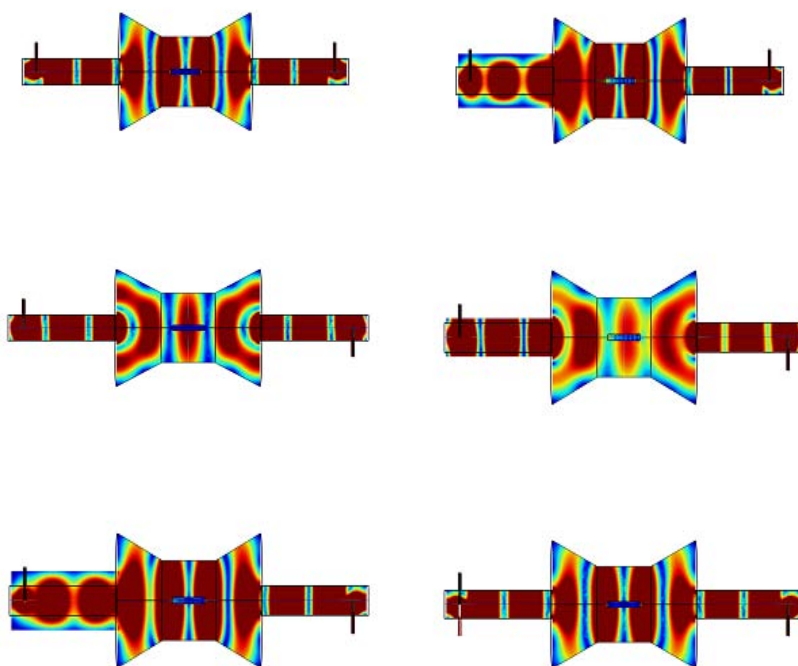


Figura 4.28: Da sinistra: andamento del campo elettrico per un angolo di rotazione di 0, 80, 180, 220, 300, 360 [deG]

d'onda (angolo di rotazione = 0 [deG]) ma con uno sfasamento tra i segnali delle due porte pari a $\theta_{12} = \pi$.

Si vuole ora confrontare l'effetto della rotazione geometrica di una guida d'onda con l'effetto dovuto alla variazione dello sfasamento θ_{12} tra i due segnali in ingresso. Per fare ciò si mantiene fisso l'angolo di rotazione di una guida d'onda a 180 [deG]. Le caratteristiche dello studio parametrico sono quindi:

$P_{\text{porta1}}=P_{\text{porta2}}$ [W]	Angolo di rotazione [deG]	θ_{12}
25	180	0
25	180	$\frac{\pi}{9}$
25	180	$\frac{2\pi}{9}$
25	180	$\frac{\pi}{3}$
25	180	$\frac{4\pi}{9}$
25	180	$\frac{5\pi}{9}$
25	180	$\frac{2\pi}{3}$
25	180	$\frac{7\pi}{9}$
25	180	$\frac{8\pi}{9}$
25	180	π
25	180	$\frac{10\pi}{9}$
25	180	$\frac{11\pi}{9}$
25	180	$\frac{4\pi}{3}$
25	180	$\frac{13\pi}{9}$
25	180	$\frac{14\pi}{9}$
25	180	$\frac{5\pi}{3}$
25	180	$\frac{16\pi}{9}$
25	180	$\frac{17\pi}{9}$
25	180	2π

I risultati ottenuti sono raffigurati in Figura 5.29, 5.30.

Dal confronto tra Figura 5.28, 5.30 si osserva come l'andamento del campo elettrico sia diverso al variare dell'angolo di rotazione e al variare dello sfasamento tra i segnali in ingresso. Si ottiene lo stesso risultato solamente per $\theta_{12} = \pi$.

Dal confronto tra Figura 5.27, 5.29 si osserva come l'effetto di concentrazione del campo sia accentuato dalla variazione dell'angolo di rotazione della guida d'onda. Questi risultati indicano l'esistenza di una analogia tra l'andamento del campo elettrico e la geometria della guida dove esso si propaga.

Dall'analisi dei risultati ottenuti, si riproduce in laboratorio una configu-

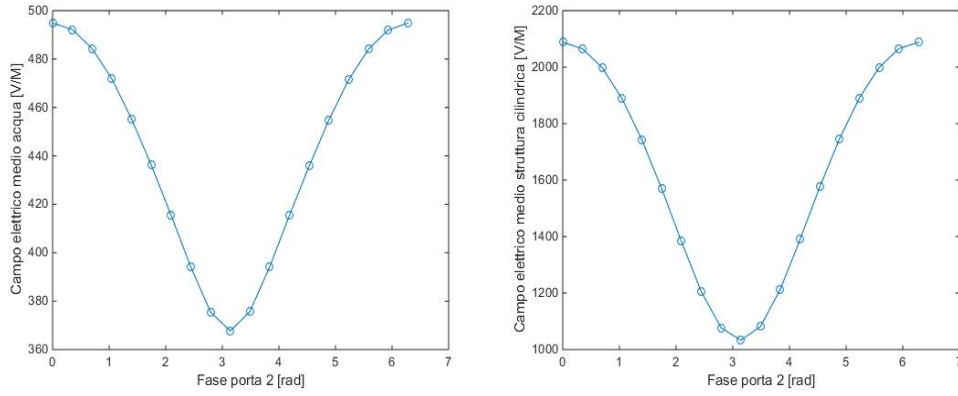


Figura 4.29: Da sinistra: campo elettrico medio nel carico di acqua e nell'intera struttura cilindrica al variare di θ_{12}

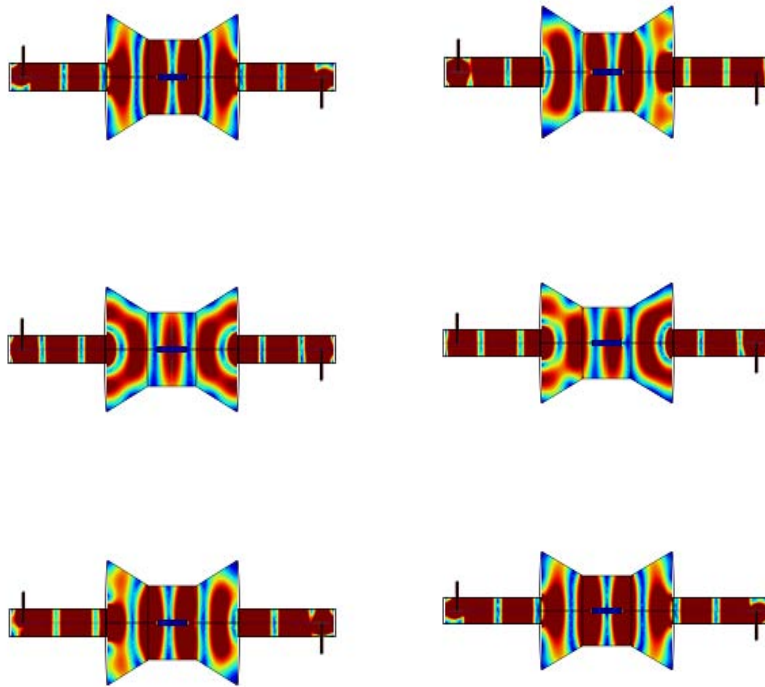


Figura 4.30: Da sinistra: andamento del campo elettrico per un angolo di rotazione di 180 [deG] e $\theta_{12}=0, \frac{4\pi}{9}, 2\pi, \frac{11\pi}{9}, \frac{5\pi}{3}, 2\pi$

razione della cavità con angolo di rotazione di 180 gradi della guida d'onda e sfasamento tra i segnali in ingresso $\theta_{12}=\pi$.

4.6 Risultati sperimentali con la cavità realizzata

Si procede dunque con le prove sperimentali di produzione di Itrio Idrato Carbonato $Y(CO_3)OH$ attraverso la nuova cavità realizzata. Si utilizza la stessa configurazione adottata per le prove con acqua distillata: si utilizzano quindi tubicini in Teflon di raggio 0.75 [mm] disposti a formare una bobina di 44.5 spire di diametro 7 [cm] e disposta all'interno della struttura cilindrica della cavità. Utilizzando del nastro adesivo non è necessario alcun tipo di supporto. Le prove sono eseguite dai colleghi del Dipartimento di Scienze Chimiche ed i risultati ottenuti sono:

- si riesce ad ottenere la produzione di $Y(CO_3)OH$ (verificata dal cambiamento di colore della soluzione) utilizzando una potenza di 70 [W] per porta con uno sfasamento $\theta_{12}=0$ e con una velocità del flusso compresa nell'intervallo 2-4 [ml/min]
- la soluzione ha effettivamente un comportamento elettromagnetico e termico analogo a quello dell'acqua
- i risultati ottenuti dall'analisi in laboratorio delle particelle prodotte sono positivi: il diametro delle particelle è all'interno di un range molto piccolo o in altro modo la deviazione standard (Std) dei diametri delle particelle è piccola. I risultati ottenuti sono infatti:

Quantità di soluzione	Velocità del flusso [ml/min]	$P_{porta1,2}$ [W]	$\theta_{12}=0$	Diametro [nm]	Std
18	2.5	70	0	490	7.6
18	3.74	70	0	445	8.2

Capitolo 5

Conclusioni

L'utilizzo delle microonde attraverso sorgenti allo stato solido per la produzione di particelle nel campo della microfluidica ha ancora moltissimi aspetti su cui lavorare. I vantaggi che comporta questa tecnologia sono molteplici: possibilità di controllo della potenza data in ingresso, possibilità di funzionamento di una o più porte in ingresso, controllo della fase del segnale in ingresso. Il grande svantaggio come si è potuto osservare è rappresentato dall'accoppiamento di campi elettrici alternativi con masse molto piccole. Inoltre la richiesta di riscaldamento uniforme e quindi campo elettrico uniforme all'interno della soluzione presenta notevoli difficoltà proprio in ragione della tecnologia utilizzata.

Nel lavoro di tesi si è osservato inizialmente le difficoltà legate all'utilizzo di masse molto piccole, come nel caso del reattore in Teflon, sia sperimentalmente che attraverso le simulazioni in Comsol: il riscaldamento ottenuto non era sufficiente per far avvenire la reazione di produzione di $Y(CO_3)OH$ (vedi Figura 5.1).

L'aumento della massa in gioco favorisce il riscaldamento poiché aumenta la potenza elettromagnetica assorbita. Questo aspetto è stato verificato successivamente, in Comsol, con il reattore progettato: sia nel caso preliminare (contenete il supporto in Teflon) che nel successivo (in assenza del supporto in Teflon) si è riscontrato l'aumento della potenza assorbita dall'acqua al variare del numero di spire che compone la bobina di fluido (vedi Figura 5.2). In molte delle simulazioni eseguite e delle esperienze di laboratorio effettuate si è sostituito la soluzione madre a base di Urea con acqua distillata poiché presenta proprietà elettriche, termiche molto simili.

In seguito ai risultati ottenuti con la cavità a microonde iniziale e con il reattore in Teflon si è progettato e realizzato una nuova cavità con l'obiettivo di concentrare e uniformare il campo elettrico all'interno del fluido per soddisfare le richieste iniziali. La configurazione scelta presenta due guide

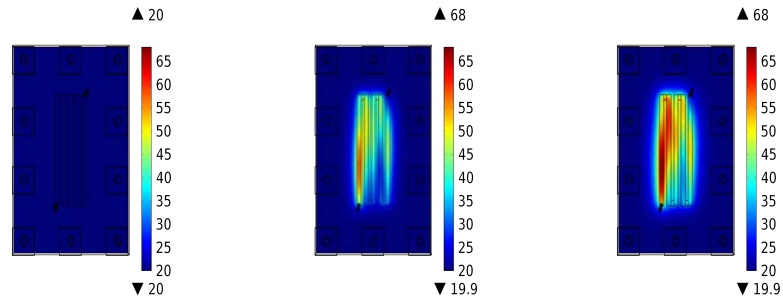


Figura 5.1: Andamento della temperatura del fluido all'interno del reattore in Teflon: il riscaldamento non é sufficiente con la temperatura massima raggiunta di 68 [°C] dopo 360 [s]. Il fluido é in movimento

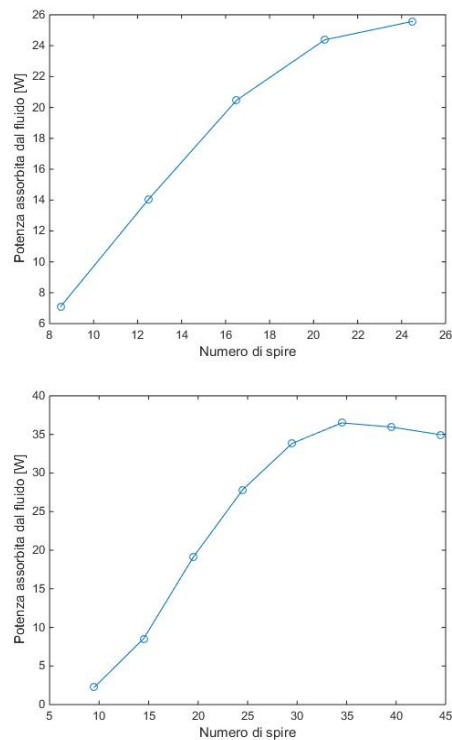


Figura 5.2: Andamento della potenza assorbita dall'acqua al variare del numero di spire di cui é composta la bobina di fluido: a sinistra per la configurazione contenete un supporto in Teflon, a destra in assenza di esso

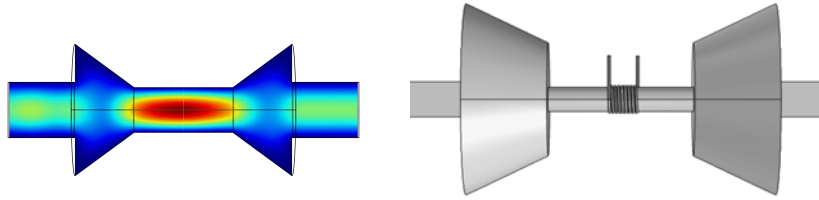


Figura 5.3: A sinistra: effetto di concentrazione del campo elettrico a vuoto. A destra: implementazione della bobina di fluido e del supporto in Teflon per l'analisi dello studio parametrico combinato

d'onda rettangolari, due tronchi di cono ed una struttura cilindrica sede dell'effetto di concentrazione del cono: si sono effettuati quindi studi parametrici al variare delle dimensioni della geometria. I risultati ottenuti a vuoto sono stati estremamente positivi (vedi Figura 5.3): con una sola porta in funzione, oppure con due porte in funzione e controllando lo sfasamento tra i segnali in ingresso, si ottiene una notevole concentrazione del campo elettrico.

Successivamente si è quindi considerata la presenza del fluido (vedi Figura 5.3): si è effettuato quindi uno studio parametrico combinato al variare delle dimensioni delle grandezze principali valutando il comportamento del campo elettrico medio all'interno del carico (rappresentato da una bobina di acqua) e la deviazione standard. Infatti un campo elettrico medio elevato indica un buon effetto di concentrazione, mentre una minore deviazione standard la sua uniformità. Date tutte le combinazioni ottenute sono state selezionate quelle che presentavano campo elettrico medio maggiore e deviazione standard minore. Si è potuto così osservare che in presenza di fluido l'effetto di concentrazione è meno marcato rispetto il caso a vuoto ed inoltre l'aumento del campo elettrico medio comporta una diminuzione della deviazione standard.

Privilegiando un riscaldamento efficace rispetto alla sua uniformità si è realizzato la configurazione che presenta il campo elettrico medio maggiore all'interno del fluido anche se la sua deviazione standard è elevata. Utilizzando fogli di PVC e carta di alluminio si è realizzato così la nuova cavità: presenta un ottimo isolamento elettromagnetico e le prove effettuate di produzione di $Y(CO_3)OH$ sono positive: la deviazione standard dei diametri delle particelle ottenute è piccola.

La difficoltà principale riscontrata nel lavoro di tesi è stata condurre in parallelo il lavoro sperimentale in laboratorio e l'analisi numerica che inizialmente portavano risultati divergenti: dopo un'attenta analisi delle esperienze

effettuate si è individuata tale causa nelle perdite lungo i cavi coassiali non implementata inizialmente in Comsol. Questa dissipazione di potenza è stata quindi quantificata e considerata nelle successive simulazioni.

Infine la collaborazione con i colleghi del Dipartimento di Scienze Chimiche si è dimostrata una esperienza preziosa soprattutto per aver fatto lavorare studenti e professori di diversa formazione.

Appendice A

A1

Script in Matlab per la valutazione delle soluzioni dominanti dello studio parametrico combinato in cui si variano le grandezze `rc1`, `rc2`, `hc`, `ht`

'risultati' rappresenta la matrice di 625 righe e 2 colonne. Le colonne indicano il campo elettrico medio nel fluido e la deviazione standard, le righe rappresentano la combinazione considerata dei parametri `rc1`, `rc2`, `hc`, `ht`

```
i=1
```

```
j=1
```

```
cont=1
```

```
conta=0
```

```
confronto=risultati
```

```
aggiornamento=risultati
```

```
matrice(1,cont)=0
```

```
while i<=numel(aggiornamento(:,1))
    while j<=numel(confronto(:,1))
        if aggiornamento(i,1)<confronto(j,1) &&
            aggiornamento(i,4)>confronto(j,4)
            matrice(1,cont+1)=i
            j=1000
        end
        if numel(matrice(1,:))==(cont+1)
            k=i-conta
            confronto=confronto([1:(k-1) (k+1):end],:)
            conta=conta+1
        end
        j=j+1
    end
    j=1
    cont=cont+1
    i=i+1
end
```

```

candidati=unique (matrice)

contatore=1

for k=2:numel (candidati (1 ,:))

    Dominati (contatore)=candidati (1 ,k)

    contatore=contatore+1

end

conta=1

for i=1:numel (aggiornamento (: ,1))

    if i~=Dominati (1 ,:)

        Dominanti (conta)=i

        conta=conta+1

    end

end

for i=1:numel (Dominanti (1 ,:))

    dominantioggetti (i ,:)= [ aggiornamento (Dominanti (1 , i) ,1)
                             aggiornamento (Dominanti (1 , i) ,4)]

    dominantiparametri (i ,:)= [ parametri (Dominanti (1 , i) ,1)
                               parametri (Dominanti (1 , i) ,2)
                               parametri (Dominanti (1 , i) ,3)
                               parametri (Dominanti (1 , i) ,4)]

end

```


Bibliografia

- [1] David M. Pozar (2012), *Microwave engineering*, Wiley
- [2] Costantine A. Balanis (2005), *Antenna theory*, Wiley
- [3] (2013), *Introduction to Comsol Multiphysics*
- [4] Inder Bahl, Prakash Bhartia (2003) *Microwave solid state circuit design*, Wiley
- [5] Marco Farina (2012), *Lezioni di elettromagnetismo*
- [6] K. Iwabuchi, T. Kubota, T. Kashiwa (1996), *Analysis of electromagnetic fields in a mass produced microwave oven using the finite difference time domain method*
- [7] S. Lupi (2005), *Appunti di elettrotermia*
- [8] G. M. Whitesides (2006), *The origins and the future of microfluidics*, *Nature* 442
- [9] N. T. Nguyen, S. Wereley (2002), *Fundamentals and applications of microfluidics*
- [10] D. Desideri (2014), *Micro/nanodispositivi elettrici ed elettromagnetici*
- [11] G. Ghione, P. Pirola (2012), *Elettronica delle microonde*, Otto editore
- [12] F. Bressan, M. Bullo, F. Dughiero, *Analisi di un forno per riscaldamento a microonde alimentato da più sorgenti allo stato solido*
- [13] Labem Italia SRL (2012), *Catalogo Labem Italia*
- [14] D. Houcque (2005), *Introduction to Matlab for engineering students*
- [15] P. Di Barba (2010), *Multiobjective shape design in electricity and magnetism*, Springer

- [16] Cengel, Cimbala (2007), *Meccanica dei fluidi*, McGraww-Hill
- [17] S. Y. Liao (2000), *Microwave devices and circuits*, Prentice Hall