

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

Estudos de Aquecimento via Micro-Ondas

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Lucas Manique Raymundo

Porto Alegre
2013

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

ESCOLA DE ENGENHARIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

Estudos de Aquecimento via Micro-Ondas

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Química

Área de concentração: Modelagem e
Simulação

Orientadores:

Prof. Dr. Jorge Otávio Trierweiler

Co-orientador:

M. Sc. Fernanda Cabral Borges

Porto Alegre

2013

Agradecimentos

Primeiramente, agradeço ao Prof. Dr. Jorge Otávio Trierweiler, por me orientar na realização desse trabalho.

Aos colegas do Grupo de Intensificação, Modelagem, Simulação, Controle e Otimização de Processos (GIMSCOP), em especial à minha co-orientadora M. Sc. Fernanda Cabral Borges, e aos meus colegas Eng. Andrei Leandro Morsch Franco e M.Sc. Eng.^a Juliana da Silveira Espindola, pelos ensinamentos, apoio e companheirismo.

Ao Dr. Cleiton Bittencourt da Porciúncula pela grande ajuda prestada, discussões e interesse pelo trabalho.

Aos meus pais, Júlio e Silvana, pelo amor e dedicação e por sempre terem me incentivado aos estudos.

Aos meus amigos pelas lições de vida e momentos de felicidade.

À Débora pelo carinho, compreensão e especial apoio à realização desse trabalho.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul, ao Departamento de Engenharia Química, e a todos os professores pela colaboração na obtenção do conhecimento, obrigado.

Resumo

O uso de micro-ondas em aquecimento é bem estabelecido na sociedade, sendo usado no meio doméstico e também em alguns processos industriais. O crescente interesse na tecnologia de micro-ondas na área de química verde tem levado a considerá-la como uma alternativa para o tratamento de resíduos, onde uma variedade de sistemas de micro-ondas podem ser projetados, desenvolvidos e aperfeiçoados. A pirólise é um processo de conversão termoquímica de resíduos onde o uso de micro-ondas para aquecimento tem se destacado e apresentado vantagens. Um dos desafios para a utilização de aquecimento via micro-ondas para esse processo reside na obtenção de um equipamento de aquecimento compatível com o processo e com sua escala e que seja eficiente. Os componentes principais de qualquer equipamento desse tipo são uma fonte, linhas de transmissão e um aplicador, uma cavidade ressonante onde a energia das micro-ondas é transferida aos materiais aquecidos. O campo elétrico dentro da cavidade ressonante define o perfil de aquecimento que será obtido, e está ligado à sua geometria. Nesse sentido, o projeto do aplicador de micro-ondas é crítico para a utilização eficiente do aquecimento via micro-ondas na pirólise rápida. O objetivo geral deste trabalho é estudar modelos para o aquecimento via micro-ondas utilizando o software de modelagem e simulação *COMSOL Multiphysics* validando os resultados em um forno de micro-ondas comercial. Como objetivos específicos se tem a verificação prática das previsões decorrentes da aplicação das leis do eletromagnetismo. Além disso, deseja-se entender quais são os aspectos de um aparelho de micro-ondas mais importantes para sua aplicação em aquecimento. Os principais resultados obtidos são técnicas de simulação do modelo, envolvendo escolha dos métodos de resolução e de malha. Os resultados do modelo são fiéis à teoria eletromagnética apresentada, porém não representativos quando comparados aos resultados experimentais, destacando-se a importância da reprodução da geometria do conjunto de guia de onda e cavidade e da modelagem adequada do dispositivo de emissão de micro-ondas.

Palavras-chave: pirólise, micro-ondas, modelagem, CFDs.

Sumário

1.	INTRODUÇÃO	1
1.1.	Objetivos	2
1.2.	Estrutura do trabalho	2
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1.	Fundamentos de Micro-ondas	3
2.2.	Modelo Matemático.....	6
2.2.1.	Aquecimento	6
2.2.2.	Perdas e Propagação	7
2.2.3.	Energia Eletromagnética	9
2.2.4.	Penetração e Reflexão de Micro-ondas	10
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	11
3.1.	Experimental	11
3.1.1.	Teoria Experimental	11
3.1.2.	Material Utilizado	11
3.1.3.	Geometria do Forno Experimental.....	13
3.1.4.	Metodologia Experimental.....	15
3.2.	Modelagem e Simulação	15
3.2.1.	Hardware e Software Utilizados.....	15
3.2.2.	Módulo utilizado e hipóteses envolvidas.....	16
3.2.3.	Condições de contorno	16
3.2.4.	Propriedades dos materiais.....	17
3.2.5.	Descrição de Modelos	18
3.2.6.	Abordagem de Estudo dos Modelos	20
3.2.7.	Métodos de Resolução de Sistemas Lineares	20
3.2.8.	Tamanho Máximo de Elemento de Malha	20
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	21
4.1.	Modelo de Teste	21
4.1.1.	Simulação direta.....	21
4.1.2.	Simulação sem carga	21
4.1.3.	Simulação com carga:.....	23
4.2.	Modelo do forno micro-ondas experimental.....	28
4.2.1.	Simulação sem carga	28
4.2.2.	Simulação com carga.....	30
4.3.	Resultados experimentais	30
4.4.	Validação	31
4.5.	Discussão	32

5.	CONCLUSÃO	33
5.1.	Trabalhos Futuros.....	33
	Referências Bibliográficas.....	34

Lista de Figuras

Figura 1: Rotação de Dipólos submetidos a um campo eletromagnético.	3
Figura 2: Propriedades Dielétricas da Água em Função da Frequência (a 25°C).	5
Figura 3 – Desenho do corte transversal de um magnetron de onda contínua.	6
Figura 4: Isolamento térmico e sistema de medição.	12
Figura 5: Forno de micro-ondas utilizado nos experimentos.	13
Figura 6: Visão frontal do interior da cavidade ressonante	14
Figura 7: Porta de micro-ondas de altura variável, refletor angulado e fresta; Guia de ondas e magnetron escondidos por parede metálica; Placa de mica removida	14
Figura 8: Esquema da vista superior da cavidade do forno micro-ondas, evidenciando os pontos experimentais.....	15
Figura 9: Geometria do modelo de teste sem carga.....	18
Figura 10: Geometria do modelo do forno micro-ondas experimental.....	19
Figura 11: Módulo do campo elétrico [V/m] na cavidade sem carga, Malha 1 com 13.138 elementos; Apenas valores acima de 20.000 V/m mostrados.....	22
Figura 12: Módulo do campo elétrico [V/m] na cavidade sem carga, Malha 2 com 60.079 elementos; Apenas valores acima de 20.000 V/m mostrados.....	23
Figura 13: Módulo do campo elétrico [V/m] na cavidade sem carga, condição inicial para simulação com carga; Apenas valores acima de 15.000V/m mostrados.....	25
Figura 14: Módulo do campo elétrico [V/m] na cavidade com carga; Apenas valores acima de 7500 V/m mostrados.....	26
Figura 15: Módulo do campo elétrico resolvido com malha de 53.312 elementos	27
Figura 16: Módulo do campo elétrico resolvido com malha de 122.775 elementos	27
Figura 17: Módulo do campo elétrico no modelo do forno com carga apresentado em vistas ortogonais; Mostrados somente valores acima de 30.000 V/m.....	29

Lista de Tabelas

Tabela 1: Range de operação dos principais parâmetros em processos de pirólise	1
Tabela 2: Dimensões do recipiente de polietileno.....	11
Tabela 3: Informações técnicas do forno micro-ondas.....	13
Tabela 4: Propriedades dos materiais utilizados na modelagem	17
Tabela 5: Métodos de resolução de sistema de equações lineares utilizados	20
Tabela 6: Resultados da simulação do modelo de teste sem carga.....	21
Tabela 7: Configurações das malhas utilizadas para resolução do modelo de teste sem carga	22
Tabela 8: Resultados da simulação de estado transiente no modelo de teste com carga utilizando uma malha de 53.312 elementos.....	24
Tabela 9: Resultados da simulação de estado transiente no modelo de teste com carga utilizando uma malha de 77.045 elementos.....	24
Tabela 10: Resultados da simulação de estado transiente no modelo de teste com carga utilizando uma malha de 122.775 elementos.....	24
Tabela 11: Resultados da simulação de estado transiente no modelo de teste com carga utilizando o método GMRES para resolução do campo elétrico e uma malha de 176.802 elementos.....	28
Tabela 12: Resultados da simulação de estado transiente no modelo de teste com carga utilizando o método GMRES para resolução do campo elétrico e uma malha de 222.775 elementos.....	28
Tabela 13: Parâmetros de malha, métodos e resultado da simulação do modelo do forno sem carga em estado estacionário	29
Tabela 14: Configurações de malha para a simulação do modelo do forno com carga em estado transiente	30
Tabela 15: Resultados experimentais	31
Tabela 16: Comparação de dados experimentais e resultados do modelo do forno com carga	32

Tabela de Símbolos

Símbolo	Significado	Unidade
ε	Permissividade	F/m
ε_r	Permissividade relativa à do vácuo	adimensional
ε'	Constante dielétrica	F/m
ε'_r	Constante dielétrica relativa à do vácuo	adimensional
ε''	Fator de perda dielétrica	F/m
ε''_r	Fator de perda dielétrica relativo ao do vácuo	adimensional
ε_0	Permissividade do vácuo	F/m
$\tan\delta$	Tangente de perda dielétrica	adimensional
Q_v	Calor por unidade de volume cedido devido à absorção de radiação de micro-ondas	W/m ³
f	Frequência de onda eletromagnética	Hz
ω	Frequência angular da onda eletromagnética	Rad/s
E	Campo elétrico	V/m
T	Temperatura	°C
t	Tempo	s
ρ	Massa específica	kg/m ³
C_p	Capacidade calorífica à pressão constante	J/kg.K
λ	Comprimento de Onda	m
μ	Permeabilidade magnética	N/A ²
μ_r	Permeabilidade magnética relativa à do vácuo	adimensional
c	Velocidade de uma onda eletromagnética	m/s
Q	Calor cedido devido à absorção de radiação de micro-ondas	W
P_{mw}	Potência de micro-ondas irradiada	W
ρ_{volt}	Reflexão de voltagem	adimensional
R	Resistência elétrica	ohm
i_{ind}	Corrente elétrica induzida	A
H	Campo magnético	A/m
A_0	Amplitude de onda em um ponto do espaço	adimensional
k	Constante de propagação de onda	adimensional
x	Posição no espaço	m
φ	Constante de fase	rad
φ'	Constante de fase modificada	rad

Símbolo	Significado	Unidade
$\bar{\nabla} \times$	Operador Rotacional	m^{-1}
j	Unidade imaginária	adimensional
\bar{S}	Vetor de Poynting	W/m^2
$\nabla \cdot$	Operador Divergente	m^{-1}
$\frac{\partial}{\partial t}$	Operador Derivada temporal	s^{-1}
∇^2	Operador Laplaciano	m^{-2}
α	Comprimento característico de atenuação de micro-onda	m^{-1}
β_H	Constante de fase de campo magnético	rad
β_E	Constante de fase de campo elétrico	rad
m	Massa da amostra	kg
Q_{aq}	Energia térmica cedida à amostra no período de aquecimento	J
t_{aq}	Período definido de aquecimento	s
P	Potência de aquecimento	W
\bar{u}	Vetor de velocidade	m/s
∇	Operador Gradiente	m^{-1}
k_t	Condutividade térmica	$W/m.K$
k_0	Constante da equação vetorial do campo elétrico	$rad/s \cdot \sqrt{F/m}$
\bar{n}	Vetor normal à superfície	adimensional
$S_{m\acute{a}x}$	Tamanho máximo de elemento	m
λ_{ar}	Comprimento de onda eletromagnética no ar	m
P_{rh}	Potência de aquecimento dielétrico	W
$T_{mín}$	Temperatura mínima em todo o volume de material dielétrico no fim da simulação	$^{\circ}C$
$T_{m\acute{a}x}$	Temperatura máxima em todo o volume de material dielétrico no fim da simulação	$^{\circ}C$
E_{max}	Módulo de campo elétrico máximo em todos os domínios do modelo	V/m
λ_{die}	Comprimento de onda eletromagnética no material dielétrico	m
λ_{pet}	Comprimento de onda eletromagnética no polietileno	m

1. INTRODUÇÃO

O uso de micro-ondas em aquecimento é bem estabelecido na sociedade, sendo usado no meio doméstico e também em alguns processos industriais. No entanto, existe um potencial nessa tecnologia para que seja utilizada em muitos processos de aquecimento industriais, pois oferece vantagens únicas não alcançadas pelo aquecimento convencional. Nesse sentido, a tecnologia de micro-ondas tem sido explorada como um método de apoio ao tratamento de resíduos.

O crescente interesse na tecnologia de micro-ondas na área de química verde tem levado a considera-la como uma alternativa para o tratamento de resíduos, onde uma variedade de sistemas de micro-ondas podem ser projetados, desenvolvidos e aperfeiçoados para processar diversos resíduos, decorrentes das seguintes vantagens segundo (Fernández, Arenillas e Menéndez, 2011). (i) redução no volume de resíduo, (ii) aquecimento rápido, (iii) aquecimento seletivo, (iv) melhor reatividade química, (v) a possibilidade de tratar resíduos *in-situ*, (vi) processos rápidos e flexíveis que podem ser controlados remotamente, (vii) facilidade de controle, (viii) economia de energia, (ix) custo-benefício geral, (x) portabilidade de equipamentos e de processos, (xi) uma fonte de energia mais limpa comparada aos sistemas convencionais (Fernández, Arenillas e Menéndez, 2011).

Três diferentes rotas de conversão termoquímica são mais encontradas em processos: combustão (oxidação completa), gaseificação (oxidação parcial) e pirólise (degradação térmica sem oxigênio). O termo pirólise é definido como a degradação térmica na ausência de oxigênio, convertendo um material bruto em diferentes produtos intermediários: sólidos (carvão), líquidos (compostos de alto peso molecular que condensam quando resfriados) e gasosos (gases de baixo peso molecular) (Fernández, Arenillas e Menéndez, 2011). Madeira, resíduos agrícolas e florestais e lodos de tratamento de esgoto são alguns dos principais recursos energéticos renováveis disponíveis e, conseqüentemente, submetidos a processos de pirólise, também estão sujeitos os componentes biodegradáveis dos resíduos sólidos urbanos e resíduos comerciais e industriais. A diversidade de propriedades químicas e físicas desses materiais residuais pode implicar em diferenças significativas entre os perfis de pirólise de cada um, já que diferentes níveis de interação entre seus componentes podem ocorrer, definindo a distribuição e características dos produtos. No entanto, não apenas a composição dos reagentes, mas os parâmetros de operação de pirólise podem induzir e alterar certas reações químicas particulares, resultando em diferentes perfis químicos dos voláteis. Os mais influentes são: temperatura do meio reativo, taxa de aquecimento do material pirolisado e tempo de residência de voláteis presentes no reator (Fernández, Arenillas e Menéndez, 2011).

Dependendo dos parâmetros do processo, a pirólise costuma ser classificada em pirólise lenta, rápida e flash.

Tabela 1: Range de operação dos principais parâmetros em processos de pirólise

Tecnologia de Pirólise	Tempo de Residência [s]	Taxa de Aquecimento [K/s]	Temperatura [K]
Lenta	450-550	0,1 - 1	550 - 950
Rápida	0,5 - 10	10 - 200	850 - 1250
Flash	< 0,5	> 1000	1050 - 1300

Fonte: (Fernández, Arenillas e Menéndez, 2011)

A rota de pirólise rápida tem sido a mais utilizada para obtenção de produtos líquidos, vantajosos em questões de densidade energética e transportabilidade (Yin, 2012). Dentre as

inúmeras tecnologias que vem sendo desenvolvidas para aplicação nesse processo, o uso de micro-ondas para aquecimento tem se destacado, já tendo sido empregado em escalas piloto de pirólise rápida, trazendo um ganho energético ao processo, e em qualidade ao produto líquido obtido. Os desafios para a utilização de aquecimento via micro-ondas para pirólise rápida residem, principalmente, na necessidade de sistemas diferenciados para o sensoriamento de temperatura (Mehdizadeh, 2010), na limitação de materiais utilizáveis em um meio de propagação de micro-ondas (Javadi, 1995) e especialmente na obtenção de um equipamento de aquecimento compatível com o processo e com sua escala e que seja eficiente (Thostenson e Chou, 1999).

Os componentes principais de qualquer equipamento desse tipo são uma fonte, responsável pela geração de radiação eletromagnética, linhas de transmissão, que entregam a energia eletromagnética da fonte ao aplicador, e o aplicador, uma cavidade ressonante onde a energia das micro-ondas é transferida aos materiais aquecidos. O campo elétrico que se estabelece dentro da cavidade ressonante é definido por sua geometria, e está intrinsecamente ligado aos gradientes de temperatura que se estabelecerão durante o aquecimento e à eficiência energética (Thostenson e Chou, 1999). Nesse sentido, o projeto do aplicador de micro-ondas é crítico para a utilização de aquecimento via micro-ondas na pirólise rápida.

1.1. Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é o estudo de modelos para o aquecimento via micro-ondas utilizando o software de modelagem e simulação *COMSOL Multiphysics* e comparar os resultados obtidos com dados experimentais.

Como objetivos específicos, deseja-se demonstrar a teoria eletromagnética envolvida e sua relação com os comportamentos observados. Além disso, deseja-se entender quais são os aspectos de um aparelho de micro-ondas mais importantes para sua aplicação em aquecimento.

1.2. Estrutura do trabalho

O presente trabalho está dividido em 5 capítulos. Este primeiro traz as motivações e uma introdução do tema

No segundo capítulo é apresentada a revisão bibliográfica, onde são apresentados os fundamentos da tecnologia de micro-ondas e a teoria eletromagnética envolvida, bem como seu equacionamento.

O terceiro capítulo apresenta os detalhes dos experimentos de aquecimento realizados com o forno de micro-ondas e da implementação dos modelos para reprodução desse fenômeno no meio computacional.

O quarto capítulo mostra os resultados obtidos das simulações e comparando-os com os resultados experimentais.

O quinto e último capítulo trata do cumprimento dos objetivos e sugestões para trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Fundamentos de Micro-ondas

Uma onda eletromagnética consiste em um componente de campo elétrico e um de campo magnético, perpendiculares entre si. Micro-ondas são ondas eletromagnéticas que ficam na região entre o infravermelho e as ondas de rádio no espectro eletromagnético, definidas com comprimentos de onda entre 0,001 e 1 metro, correspondentes a frequências entre 300 e 0,3 GHz. Nesse intervalo do espectro eletromagnético existem frequências usadas para a comunicação de telefones celulares, radares, e satélites de televisão (Van Loock, 2006). De acordo com o regulamento da Comissão Federal de Comunicações e das Leis Internacionais de Rádio, somente quatro frequências são permitidas para uso industrial, científico e doméstico: 915+-25, 2450+-13, 5800+-74 e 22125+-125 MHz. No aquecimento por micro-ondas, a frequência de 2,45 GHz é a mais utilizada (Krug, 2008). A energia de um fóton de micro ondas nessa frequência é de 0,0016 eV, as energias de ligação de H-OH e CH₃-CH₃, por exemplo, são de 5,2 e 3,8 eV, respectivamente. Naturalmente, a energia das micro-ondas é pequena demais para quebrar ligações químicas, o que as caracteriza como radiações não ionizantes, incapazes de induzir reações químicas por si só (Kappe, 2004).

Existe uma diversidade de mecanismos que contribuem para a resposta de um material às micro-ondas (Thostenson e Chou, 1999), nas frequências de micro-ondas as participantes na transformação de energia eletromagnética em energia térmica são a polarização de dipolo e polarização interfacial ou de Maxwell-Wagner (Mijovic e Wijawa, 1990).

A polarização de dipolo é o principal mecanismo de aquecimento por micro-ondas em sistemas com solventes orgânicos polares em temperaturas amenas, nesse caso, o dipolo é uma característica natural do material dielétrico. No entanto, um dipolo pode também ser temporariamente induzido pela presença de um campo elétrico externo (Fernández, Arenillas e Menéndez, 2011), através da distorção da nuvem eletrônica de moléculas não polares ou de átomos. Os dipolos presentes no material exposto ao campo eletromagnético alternado se realinham conforme este varia, causando a rotação dos dipolos. A Figura 1 apresenta um esquema do mecanismo de polarização de dipolo. Nesse processo, a energia eletromagnética é dissipada sob a forma de calor por fricção molecular e perdas dielétricas. Se os dipolos não tiverem tempo suficiente para se realinharem com o campo aplicado, não haverá aquecimento. Da mesma forma, não há aquecimento se os dipolos tiverem tempo de seguir o campo elétrico precisamente. A frequência de 2,45 GHz situa-se entre esses dois extremos, a reorientação dos dipolos ocorre à frequência de alteração do campo eletromagnético, aproximadamente 4,9 bilhões de vezes por segundo (Yin, 2012).

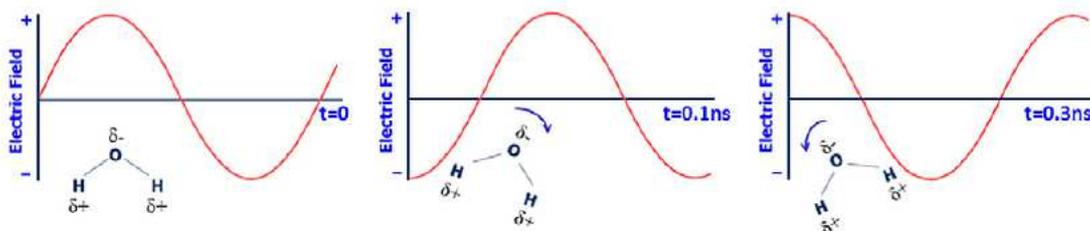


Figura 1: Rotação de Dipólos submetidos a um campo eletromagnético.

Extraído de (Yin, 2012)

A polarização de Maxwell-Wagner acontece na fronteira entre dois materiais de diferentes propriedades dielétricas ou em materiais dielétricos sólidos com partículas carregadas livres para movimentação, como é o caso de elétrons π em compostos orgânicos (Zlotorzynski, 1995). O fenômeno de Maxwell-Wagner ocorre quando essas partículas carregadas não conseguem acompanhar as mudanças de fase do campo elétrico, ocorre o acúmulo de carga na interface do material e energia é dissipada na forma de calor (Zlotorzynski, 1995).

A habilidade de um material em absorver energia de micro-ondas e convertê-la em calor depende das propriedades dielétricas do material, ou sua permissividade complexa, $\varepsilon = \varepsilon' + j\varepsilon''$, dada por ε' , sua constante dielétrica, que descreve a habilidade das moléculas serem polarizadas por um campo elétrico, e ε'' , sua perda dielétrica. O quociente de perda dielétrica em relação à constante dielétrica é a tangente de perda dielétrica $\tan\delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}$, uma medida da eficiência de conversão de energia de uma radiação eletromagnética em calor. Um material pode ser classificado em três tipos, conforme suas interações com micro-ondas (Yin, 2012).

1. **Transparentes:** onde as micro-ondas passam sem nenhuma perda.
2. **Condutores:** onde as micro-ondas são refletidas e tem dificuldade em penetrar.
3. **Absorvedores ou dielétricos:** absorvem a radiação de micro-ondas, são também chamados de dielétricos, por isso o aquecimento via micro-ondas é também chamado de aquecimento dielétrico.

Quanto à absorção de micro-ondas, materiais podem ser classificados como fortes ($\tan\delta > 0,5$), médios ($0,1 < \tan\delta < 0,5$) e fracos ($\tan\delta < 0,1$). Um meio reativo com um valor alto de $\tan\delta$ é desejável para que haja um aquecimento rápido (Kappe, 2004). No entanto, um valor baixo de $\tan\delta$ não impede que um material seja utilizado em uma reação química aquecida por micro-ondas. Para tanto, podem ser utilizados aditivos para que o material pouco absorvente possa ser aquecido. Biomassa pode ser misturada com carvão ativado ou cinzas antes de ser alimentada em um reator de pirólise via micro-ondas. O fenômeno de absorção de energia pode também ser aprimorado pela interação de micro-ondas com metais ou pó metálico (Marken, 2006).

O grau de penetração da radiação no material também está relacionado às suas propriedades dielétricas. A penetração é nula em materiais condutores como os metais, e infinita em meios transparentes, como o quartzo e o Teflon (Krug, 2008). Na Figura 2 são representadas as propriedades dielétricas da água destilada em função da frequência de micro-ondas aplicada, à 25°C. Os valores de perdas dielétricas são potencialmente maiores a 22,1 GHz do que na frequência de operação dos fornos micro-ondas convencionais, de 2,45 GHz, no entanto, essa frequência é usada devido à necessidade de eficiência no aquecimento interno dos alimentos. Se for usada uma frequência voltada para maior velocidade de aquecimento, as micro-ondas serão absorvidas nas regiões externas do alimento, ou haverá

pouca

penetração

(Krug,

2008).

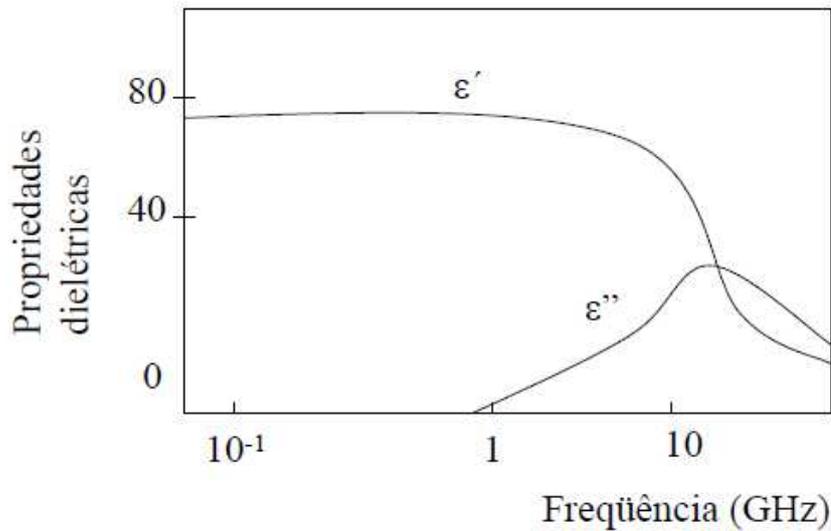


Figura 2: Propriedades Dielétricas da Água em Função da Frequência (a 25°C).

Extraído de (Krug, 2008).

Infelizmente, as propriedades dielétricas dos materiais não são facilmente encontradas na literatura, e para a maioria dos solventes mais comuns, foram determinadas apenas para a temperatura ambiente. Além disso, as perdas dielétricas de um material dependem do tempo de relaxação de suas moléculas, que é relacionado à natureza dos grupos funcionais e do seu volume (Gabriel *et al.*, 1998).

No entanto, o aquecimento por micro-ondas não é apenas função das perdas dielétricas dos materiais. O campo eletromagnético aplicado e as condições de operação são também importantes e devem ser levados em conta. O fenômeno está relacionado ao módulo do campo elétrico que se estabelece nos pontos de aquecimento (Clark, Folz e West, 2000). Desta forma, procura-se obter um campo elétrico mais intenso nos pontos em que se deseja maior aquecimento. Em um forno micro-ondas, o campo eletromagnético é definido basicamente pelas características de três principais componentes: uma fonte, responsável pela geração de radiação eletromagnética, linhas de transmissão, que entregam a energia eletromagnética da fonte ao aplicador, e este último que, por sua vez, é o meio onde a energia das micro-ondas é transferida aos materiais aquecidos (Fernández, Arenillas e Menéndez, 2011).

A fonte de micro-ondas mais utilizada para aquecimento é o magnetron de onda contínua. É formado basicamente por um cátodo, um ânodo, um ímã e uma saída para transmissão de micro-ondas. A Figura 2 apresenta um esquema desses componentes. A potência do magnetron é definida pela temperatura, ou tensão aplicada ao cátodo, o campo magnético aplicado pelo ímã, tensão e corrente no ânodo e a capacidade de dissipação de calor dos eletrodos. A eficiência de conversão de energia elétrica em energia eletromagnética dos magnetrons comuns é de cerca de 65% (Love, 1995).

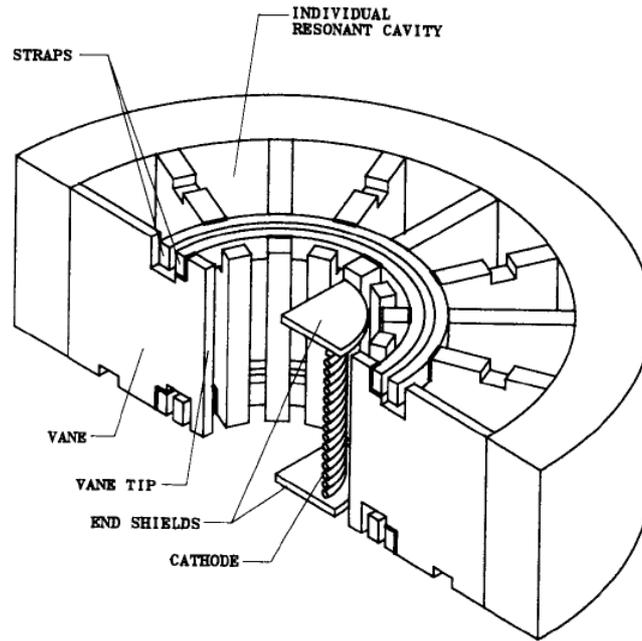


Figura 3 – Desenho do corte transversal de um magnetron de onda contínua.

Extraído de Love (1995)

As micro-ondas geradas pelo magnetron são emitidas por uma antena externa posicionada concentricamente. As ondas emitidas podem ser direcionadas, através de linhas coaxiais e guias de onda. A linha de transmissão usada nos fornos micro-ondas comerciais é o guia de onda, um tubo metálico de seção retangular ou circular de dimensões específicas, que definem a frequência de micro-ondas o guia de ondas é capaz de propagar (Love, 1995).

O aplicador de um forno micro-ondas se trata de uma cavidade ressonante (Clark, Folz e West, 2000), onde a radiação trazida pelo guia de ondas deve ser direcionada ou refletida ao material aquecido. No aplicador, a energia eletromagnética pode ser convertida em térmica nos materiais por aquecimento dielétrico, aquecimento magnético e aquecimento resistivo, no entanto, a radiação pode ser também refletida de volta ao magnetron ou emitida ao meio exterior (Ishii, 1995). O campo elétrico que se estabelece dentro da cavidade refletiva é definido pela geometria deste e do guia de onda, e está intrinsicamente ligado aos gradientes de temperatura que se estabelecerão durante o aquecimento e à eficiência energética. Nesse sentido, o conjunto guia de onda e cavidade podem ser dimensionados para que se obtenha um perfil de aquecimento dielétrico desejado em um dado processo, bem como maior eficiência de aquecimento, como demonstrado por (Li *et al.*, 2011).

2.2. Modelo Matemático

2.2.1. Aquecimento

O calor por unidade de volume cedido a uma amostra devido à absorção de radiação de micro-ondas, Q_v [W/m^3], levando em conta exclusivamente o aquecimento dielétrico é dado pela Equação (1) (Clark, Folz e West, 2000):

$$Q_v = \sigma |E|^2 = 2\pi f \epsilon_0 \epsilon_r'' |E|^2 = \omega \epsilon_0 \epsilon_r' \tan \delta |E|^2 \quad (1)$$

Onde E [V/m] é a magnitude do campo elétrico interno, f [Hz] a frequência da onda eletromagnética, ω a frequência angular [rad/s], ϵ''_r [F/m] é o fator de perda dielétrica relativo, ϵ_0 [F/m] é a permissividade do vácuo, σ é a condutividade elétrica efetiva total, $\epsilon'_r = \epsilon'/\epsilon_0$ é a constante dielétrica relativa à do vácuo e $\tan\delta = \epsilon''/\epsilon'$ é a tangente de perda dielétrica, que representa a eficiência energética de conversão de energia eletromagnética das micro-ondas em energia térmica (Yin, 2012). A maior parcela da radiação de micro-ondas absorvida é convertida em calor dentro do material (Clark, Folz e West, 2000). Considerando-se o caso do aquecimento de uma amostra onde não ocorrem mudanças de fase, reações químicas e perda de calor, é válida a Equação (2):

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{2\pi f \epsilon_0 \epsilon''_r |E|^2}{\rho C_p} \quad (2)$$

Onde T [K] é a temperatura, t [s] é o tempo, ρ [kg/m³] é a massa específica da amostra e C_p [J/kg.K] sua capacidade calorífica. Nota-se que não existem parâmetros estruturais na equação, esses são levados em conta sob a forma de mudanças nas propriedades dielétricas (Clark, Folz e West, 2000), como foi comprovado por Yoshikawa (2011), que alterou a permissividade de um meio experimental através da introdução de diferentes quantidades de pequenas esferas de perovskita, material de alta permissividade, em uma matriz de baixa permissividade. Nos experimentos de Yoshikawa (2011), é possível observar a redução do comprimento de onda em um meio de maior permissividade, relacionada pela Equação (3)

$$\lambda = \frac{c}{f \sqrt{\mu_r \epsilon_r}} \quad (3)$$

Onde λ [m] é o comprimento de onda no meio, f [Hz] é a frequência da onda eletromagnética, μ_r [adimensional] é a permeabilidade do material relativa à do vácuo, que será mencionada a seguir e c [m/s] é a velocidade da luz. A fundamentação da Equação (2) será descrita a seguir levando-se em conta o equacionamento eletromagnético envolvido no processo.

2.2.2. Perdas e Propagação

O calor cedido a uma amostra devido à radiação de micro-ondas pode ser obtido pela Equação (4) de conservação de energia (Ishii, 1995):

$$Q = P_{mw}(1 - \rho_{volt})^2 \quad (4)$$

Onde Q [W] é o calor cedido à amostra, P_{mw} [W] é a potência de micro-ondas irradiada e ρ_{volt} (adimensional) é a reflexão de voltagem das micro-ondas, parâmetro indicador da força elétrica da radiação eletromagnética não convertida em energia térmica, ou refletida de volta à porta de onda. O termo $(1 - \rho)^2$ pode ser obtido pelo aproveitamento térmico da energia eletromagnética (Ishii, 1995), conforme descrito pela Equação (5):

$$P_{mw}(1 - \rho)^2 = \omega \epsilon'' E^2 + R i_{ind}^2 \quad (5)$$

Onde E [V/m] é o valor quadrático médio do campo elétrico de micro-ondas à qual a amostra está exposta, ω [rad/s] é a frequência angular da onda dada por $\omega = 2\pi f$, ϵ'' [F/m] trata-se da perda dielétrica, R [ohms] é a resistência elétrica do material e i_{ind} [A] a corrente induzida no material pelo campo eletromagnético (Richie, 1995).

O segundo termo da Equação representa o aquecimento indutivo, usado para aquecer metais, e que ocorre através do aquecimento Joule de um material através de correntes

elétricas induzidas pelo campo eletromagnético (correntes de *Eddy* ou parasitas). Devido à baixa profundidade de penetração de micro-ondas em metais (pouca corrente é induzida), a temperatura de um corpo metálico sofre pouco aquecimento (Ishii, 1995). O aquecimento indutivo de metais por micro-ondas é, portanto, limitado apenas a filmes e pequenas partículas (Ishii, 1995), para a modelagem de um forno micro-ondas, os componentes metálicos, ou suas paredes, são considerados condutores perfeitos ($R = 0$), ignorando o efeito de aquecimento indutivo. Outro fenômeno de aquecimento relacionado a micro-ondas que não é abordado nesse trabalho e nem mesmo apresentado na Equação (5) é o aquecimento magnético, utilizado para aquecer materiais ferro-magnéticos (Yoshikawa, 2011). O primeiro termo trata-se do aquecimento dielétrico, relacionado diretamente ao fator de perda dielétrica, ϵ'' , já discutido anteriormente.

A propagação de ondas eletromagnéticas pode ser descrita pelas Leis de Ampère e de Faraday, utilizadas para descrever a propagação de ondas eletromagnéticas (Mehdizadeh, 2010), em geral e apresentadas sob a forma das Equações (6) e (7) abaixo:

$$\nabla \times \vec{H} = \sigma \vec{E} + \epsilon \frac{d\vec{E}}{dt} \quad (6)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\mu \frac{d\vec{H}}{dt} \quad (7)$$

As equações são válidas nesta forma para materiais lineares e isotrópicos. As três propriedades dos materiais apresentadas são: (i) a permissividade ϵ [$A^2 \cdot s^4 / kg \cdot m^3$], já discutida neste trabalho; (ii) a permeabilidade μ [N/A^2], que pode ser entendida como análoga à permissividade, porém para efeitos do comportamento do campo magnético no material e (iii) a condutividade elétrica σ [S/m].

Uma análise das Equações (6) e (7) mostra que a variação temporal de um campo elétrico (correntes de deslocamento) induz um campo magnético perpendicular ao primeiro, bem como a variação temporal de um campo magnético induz um campo elétrico da mesma forma, explicando a existência de ondas eletromagnéticas. Uma exceção à variação no tempo é o primeiro termo da Equação (6), σE , que implica que na presença de cargas móveis (como em correntes elétricas) um campo elétrico não variante pode induzir um campo magnético, o contrário não é válido, pois não são conhecidas cargas magnéticas, um campo elétrico variante não existe sem a presença de um campo magnético acoplado. As Equações (6) e (7) mostram também que a razão entre a intensidade dos campos elétrico e magnético é dependente das propriedades dos materiais do meio. Mesmo o vácuo possui permissividade e permeabilidade, mas não condutividade, já que, nesse caso, não existem cargas livres para se movimentarem (Mehdizadeh, 2010).

Um forno micro-ondas e seus componentes podem ser considerados sistemas de variação temporal em estado estacionário, o que significa que a variação dos campos elétrico e magnético no tempo, presentes nas Equações (6) e (7), possui forma senoidal (Mehdizadeh, 2010), por isso é possível utilizar a análise harmônica e usar a notação fasorial para escrever a solução da Equação de onda $A_0 = kx + \omega t$:

$$A_0(kx + \omega t) = |A_0| \cdot \text{Re}(e^{j(kx + \omega t + \varphi)}) = |A_0| \cdot (e^{j(kx + \varphi')}) = A_0 e^{jkx} \quad (8)$$

$$A_0 = |A_0| \cdot e^{j\varphi'} \quad (9)$$

Onde $|A_0|$ é o valor de pico de amplitude da onda, φ e φ' constantes de fase, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ é a constante de propagação da onda e x é a posição no espaço (Richie, 1995). Através da análise, a amplitude da onda para um ponto no espaço fica representada por $A = A_0 e^{j\omega t}$ (senoidal em notação exponencial). Desta forma $\frac{dA}{dt} = j\omega \cdot |A_0| \cdot e^{j\omega t} = j\omega \cdot A$, e as Equações vetoriais (6) e (7) podem ser apresentadas na forma:

$$\nabla \times \vec{H} = \sigma \vec{E} + \epsilon j\omega \vec{E} \quad (10)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\mu j\omega \vec{H} \quad (11)$$

A equação (10) mostra como um campo de micro-ondas aplicado ao material causa o realinhamento dos dipolos na frequência dessas micro-ondas, com uma densidade de corrente de deslocamento $j\omega E\epsilon = j\omega E\epsilon' + \omega E\epsilon''$ [A/m²], onde $\omega E\epsilon''$ [A/m²], é a densidade de corrente resistiva de aquecimento micro-ondas (Richie, 1995), que, com o campo elétrico aplicado E [V/m] gera um calor $\omega E\epsilon'' \cdot E$ ou $\omega \epsilon'' E^2$, a componente de aquecimento dielétrico na Equação (5).

A Equação (11) pode também ser escrita:

$$\vec{H} = -\frac{\nabla \times \vec{E}}{\mu j\omega} \quad (12)$$

E inserida na Equação (10), chegando ao seu formato vetorial somente em termos do campo elétrico:

$$\nabla \times \left(\frac{\nabla \times \vec{E}}{\mu} \right) - \epsilon_0 \omega^2 \left(\epsilon_r - \frac{j\sigma}{\omega \epsilon_0} \right) \cdot \vec{E} = 0 \quad (13)$$

A Equação (13) possui forma semelhante à resolvida pelo COMSOL 4.3 nos pacotes do *RF Module* (Comsol, 2012) para obtenção do campo elétrico, onde $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{12}$ F/m é a permissividade do vácuo e $\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} = \epsilon_r' + j\epsilon_r''$ (Mehdizadeh, 2010).

2.2.3. Energia Eletromagnética

A energia de uma onda eletromagnética [W/m²] é expressa em termos do vetor de Poynting $\vec{S} = (\vec{E} \times \vec{H})$. Tomando seu divergente e substituindo nas Equações (10) e (11), obtemos a Equação (15).

$$\nabla \cdot (\vec{S}) = \nabla \cdot (\vec{E} \times \vec{H}) = \vec{H} \cdot (\nabla \times \vec{E}) - \vec{E} \cdot (\nabla \times \vec{H}) \quad (14)$$

$$\nabla \cdot (\vec{S}) = -\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\epsilon \vec{E}^2}{2} + \frac{\mu \vec{H}^2}{2} \right) - \sigma \vec{E}^2 \quad (15)$$

A Equação (15) mostra que a energia eletromagnética é armazenada sob a forma de campo elétrico (primeiro termo) e magnético (segundo termo). O trabalho realizado pelo aquecimento Joule seria expresso pelo terceiro termo, as perdas dielétricas, ou o aquecimento dielétrico, é descrito pela parte imaginária da permissividade ϵ , o aquecimento magnético poderia ser incluso também através de uma componente imaginária da permeabilidade μ (Yoshikawa, 2011).

2.2.4. Penetração e Reflexão de Micro-ondas

As Equações de Ampère e Faraday podem ser também apresentadas em suas formas diferenciais, completamente iguais em relação aos campos elétrico e magnético, E e H respectivamente (Yoshikawa, 2011).

$$\nabla^2(\bar{H}) - \mu\sigma \frac{\partial \bar{H}}{\partial t} - \mu\varepsilon \frac{\partial^2 \bar{H}}{\partial t^2} = 0 \quad (16)$$

$$\nabla^2(\bar{E}) - \mu\sigma \frac{\partial \bar{E}}{\partial t} - \mu\varepsilon \frac{\partial^2 \bar{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (17)$$

Também sob uma análise harmônica, se as Equações diferenciais (16) e (17) forem resolvidas em uma dimensão (1D), sua solução é dada pelas Equações (18) e (19):

$$H = |H_0|. e^{-\alpha x}. e^{-j(\omega t - \beta_H x)} \quad (18)$$

$$E = |E_0|. e^{-\alpha x}. e^{-j(\omega t - \beta_E x)} \quad (19)$$

Onde β_H e β_E envolvem a fase de cada componente de campo, diferentes em 90° para ondas elétricas transversais, e a constante de propagação da onda. O termo α é um comprimento característico de atenuação de campo elétrico ou magnético, sendo $\frac{1}{\alpha}$ a profundidade da camada superficial d , onde podem existir, ou penetram, campos elétricos e magnéticos no material conforme a Equação (20) (Yoshikawa, 2011).

$$\alpha = \frac{\omega\sqrt{\mu\varepsilon}}{\sqrt{2}} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\varepsilon}\right)^2} - 1 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (20)$$

O campo eletromagnético em um metal também obedece a Equação (19), portanto α pode ser obtido através da Equação (20), e da relação $\sigma \gg \omega\varepsilon$, assumida para o caso dos metais. A Equação (20) pode ser reescrita pela Equação (21):

$$\alpha = \sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}} \quad (21)$$

O valor de α para o metal se torna muito grande, ou a penetração muito reduzida, o que indica poucas perdas e, portanto, boa reflexão das ondas. Quando se deseja considerar reflexão total em modelos, utiliza-se $\sigma \approx \infty$. Para um material dielétrico, utiliza-se a relação $\sigma = \omega\varepsilon''$, e α passa a ser dado pela Equação (22):

$$\alpha = \omega \sqrt{\left(\frac{\mu_0\varepsilon'}{2}\right) \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\varepsilon'}{\varepsilon''}\right)^2} - 1\right)} \quad (22)$$

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Experimental

3.1.1. Teoria Experimental

Para que pudessem ser posteriormente validados os modelos desenvolvidos, foi elaborado um experimento utilizando um forno de micro-ondas convencional. Consistia no aquecimento de uma quantidade conhecida de material dielétrico em vários pontos do forno durante um tempo definido e na medição das temperaturas inicial e final do material. Através das medições é estimado o calor cedido à amostra através da equação (23):

$$Q_{aq} = m \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (23)$$

Onde m [kg] é a massa do material dielétrico aquecido, C_p [J/kg.K] sua capacidade calorífica, na estimativa sendo utilizado o valor na temperatura média do experimento, $\Delta T = T_f - T_i$ [°C] a diferença entre a temperatura final e inicial, e Q_{aq} [J], a energia térmica cedida à amostra no período de aquecimento. A potência de aquecimento dielétrico é então obtida pela equação (24):

$$P = \frac{Q_{aq}}{t_{aq}} \quad (24)$$

Sendo t_{aq} [s] o período definido de aquecimento do material e P [W] a potência de aquecimento, resultado visado do experimento por sua forte relação com o campo elétrico que se estabelece na cavidade ressonante.

3.1.2. Material Utilizado

3.1.2.1. Material dielétrico e recipiente

Um volume de 50 ml de água foi utilizado como material dielétrico, confinado em um recipiente de polietileno com vedação de silicone. As dimensões são apresentadas na Tabela 2. O recipiente apresentou a vantagem de ser um sistema fechado, evitando a evaporação de água, a vedação de silicone serve também para possibilitar a introdução de um termopar para medição de temperatura. Além disso, o recipiente possui massa e capacidade calorífica reduzidas, sendo sua inércia térmica muito reduzida frente à da massa de água (cerca de 70 vezes menor), evitando os efeitos de equilíbrio térmico do sistema nas medições.

Tabela 2: Dimensões do recipiente de polietileno.

Altura total	70,4 mm
Altura escala (50 ml)	53,7 mm
Diâmetro interno	34,4 mm
Espessura	0,65 mm
Diâmetro externo	53,7 mm

3.1.2.2. Isolante térmico:

Após o experimento, para que a água aquecida mantivesse sua temperatura, o recipiente era isolado termicamente. Para tanto, foi utilizado um Becker de 1000 ml que foi forrado com lã de vidro de 6 onças por jarda quadrada, no centro foi reservado um espaço para inserção do recipiente, conforme ilustrado na Figura 4.

3.1.2.3. Sistema de medição:

Para medição de temperatura foi utilizado um termopar tipo K acoplado a um medidor portátil de temperatura portátil *SmartMeter* da empresa Novus. O *SmartMeter* possui dois canais para termopares, Pt100 ou tensão 0 a 50 mV. No modo tK (termopar K), utilizado para as medições, os valores são mostrados no pequeno display de LCD do aparelho sem casas decimais, conforme visto na Figura 4.



Figura 4: Isolamento térmico e sistema de medição.

Para verificação da exatidão do sistema, inicialmente foi utilizado um termômetro de mercúrio com escala de -10 a 150 °C para comparação. Foram realizadas medições em água entre 20 e 90 °C em um Becker de 250 ml, onde o sistema de medidor e termopar mostrou um desvio de cerca de +2 °C para todo o intervalo, sendo abandonadas as medições por

termômetro de mercúrio em função de sua resposta mais lenta, inércia térmica e dimensão incompatível com o recipiente.

3.1.2.4. Forno de micro-ondas

Para a realização de experimentos de aquecimento dielétrico e modelagem, foi utilizado um forno micro-ondas doméstico da marca LG classe *Intellowave Grill* modelo MB-274PL, mostrado na Figura 5.



Figura 5: Forno de micro-ondas utilizado nos experimentos.

As informações técnicas do aparelho são apresentadas na Tabela 3:

Tabela 3: Informações técnicas do forno micro-ondas

Modelo	MB-274PL
Frequência de micro-ondas	2450 MHz
Tensão de Alimentação Elétrica	120V (60Hz)
Potência de consumo elétrico de aquecimento por micro-ondas	1050 W
Potência de consumo elétrico de aquecimento resistivo (Grelhar)	1000 W

3.1.3. Geometria do Forno Experimental

Conforme a Tabela 3, o forno possui, além do aquecimento por micro-ondas, as funções de aquecimento resistivo, dito “Grill”, e aquecimento combinado, tendo uma geometria diferenciada de fornos micro-ondas simples, conforme visto nas Figuras 6 e 7.



Figura 6: Visão frontal do interior da cavidade ressonante

Os aspectos mais relevantes da geometria em comparação a outros fornos micro-ondas são:

1. A resistência elétrica e seu alojamento, presentes no topo da cavidade ressonante, descentralizados no plano horizontal.
2. A porta de micro-ondas cuja seção possui altura decrescente no sentido da porta do forno para a resistência (Figura 7).
3. Uma pequena fresta, ou uma segunda porta de micro-ondas, entre o guia de onda, onde fica a antena do magnetron, e a cavidade ressonante (Figura 7).



Figura 7: Porta de micro-ondas de altura variável, refletor angulado e fresta; Guia de ondas e magnetron escondidos por parede metálica; Placa de mica removida

Entre o guia e a porta de entrada de micro-ondas existe um setor angulado, também presente em outros aparelhos similares e de outras marcas. A função desse setor angulado é a reflexão e acoplamento da radiação advinda do guia de onda para a cavidade ressonante através da porta de micro-ondas, que é geralmente coberta com uma placa de mica para proteção da antena do magnetron, presente dentro do guia de onda, contra detritos. Na cavidade ressonante, ou aplicador, onde ocorre o aquecimento, pode-se observar 5 reentrâncias presentes na lateral, fundo, topo, piso e porta do forno, cujas dimensões são apresentadas no Anexo 1.

É importante citar que as medições foram realizadas manualmente utilizando régua e paquímetros. Nas fronteiras da cavidade ressonante existem mais reentrâncias de menor escala em formato oval, ao fundo, e em formato de grade, próximas ao guia de onda, além de diversos pequenos furos para ventilação, entrada de luz e visualização, que não foram desconsiderados.

3.1.4. Metodologia Experimental

Foram analisados 9 pontos da cavidade ressonante, esquematizados na Figura 8. Para cada ponto, o recipiente era preenchido com 50 ml de água e vedado.. Após, era realizada a medição da temperatura inicial ao introduzir-se o termopar em um pequeno furo no silicone. Obtida a temperatura inicial, o recipiente era posicionado em uma das 9 localizações de interesse e seu conteúdo aquecido durante 30 segundos em potência máxima. Após o aquecimento, o recipiente era inserido no bquer com isolamento térmico, onde era realizada a medição da temperatura final.

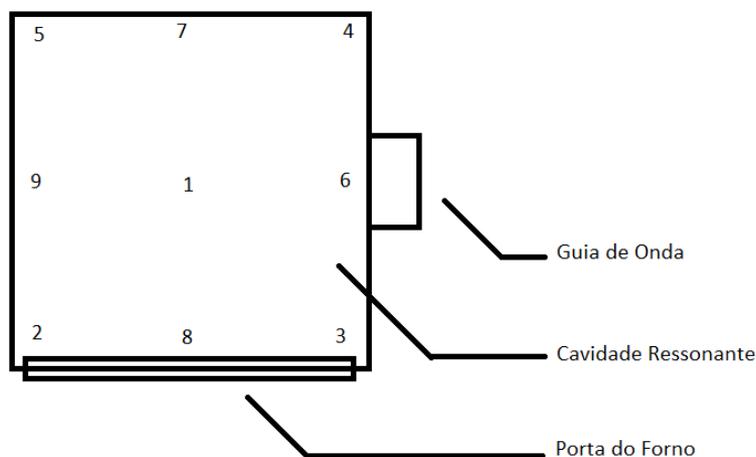


Figura 8: Esquema da vista superior da cavidade do forno micro-ondas, evidenciando os pontos experimentais.

3.2. Modelagem e Simulação

3.2.1. Hardware e Software Utilizados

O Microcomputador utilizado possui 8GB de memória RAM um processador *Intel® Core™i5 750*, com frequência de processamento de 2,67GHz.

O *software* utilizado para modelagem e simulação foi o *COMSOL Multiphysics* versão 4.3a. O programa possui uma ferramenta de construção de modelos que permite a resolução de diversos problemas científicos e de engenharia, segregada em módulos, cada um focado

em um fenômeno físico. Para resolução dos modelos, o COMSOL utiliza exclusivamente o método de elementos finitos. A escolha do *software* teve por principais motivadores:

1. Disponibilidade ao grupo de pesquisa.
2. Possibilidade de agregar material de outros pacotes posteriormente.
3. Possibilidade de análises de frequência harmônica e modos de propagação para estudos posteriores.

3.2.2. Módulo utilizado e hipóteses envolvidas

O módulo do COMSOL utilizado foi o *Microwave Heating (mh)*, parte do *Radio Frequency Module (RF Module)*. Trata-se de um módulo voltado ao aquecimento dielétrico, onde são resolvidas principalmente as equações de eletromagnetismo e de transporte de calor (Equações (25) e (26)):

$$\bar{\nabla} \times \left(\frac{\bar{\nabla} \times \bar{E}}{\mu} \right) - k_0^2 \left(\epsilon_r - \frac{j\sigma}{\omega\epsilon_0} \right) \cdot \bar{E} = 0 \quad (25)$$

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \bar{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k_t \nabla T) + Q \quad (26)$$

Onde \bar{u} [m/s] é o vetor de velocidade, parte do termo transporte de calor por advecção, não utilizado nos modelos deste trabalho e k_t [W/m.K] a condutividade térmica. As variáveis dependentes do módulo (resolvidas na simulação) são a temperatura T , e o vetor campo elétrico \bar{E} . A relação entre as duas variáveis se dá através do acoplamento de suas respectivas equações através do termo Q [J] e ϵ_r . O campo elétrico é calculado através das propriedades dielétricas do material, a atenuação do campo elétrico, causada pela parte complexa de ϵ_r , é usada para calcular a energia eletromagnética dissipada, cujo valor é o do termo Q . Esse termo, por sua vez, é usado para calcular um novo perfil de temperatura, o que pode causar mudanças no valor de ϵ_r , função de T , alterando o campo elétrico obtido no próximo passo temporal.

3.2.3. Simplificações assumidas

Nos modelos não foram inclusos os efeitos da temperatura nas propriedades dielétricas dos materiais, pois foi dado foco aos efeitos da geometria da cavidade ressonante nos perfis de aquecimento, e estimou-se que erros relacionados aos efeitos de temperatura seriam facilmente detectáveis, caso se tornassem importantes na validação do modelo podendo ser incluídos em um segundo momento. Outro ponto que encorajou a exclusão desses efeitos foi a dificuldade de encontra-los na literatura. Levando a hipótese de propriedades dielétricas constantes em conta, a resolução do campo elétrico deve ser a mesma para todos os passos em uma análise transiente, e o cálculo do perfil de temperaturas e do termo Q sob essa análise tem apenas a finalidade de parâmetro de comparação com os dados experimentais.

3.2.4. Condições de contorno

3.2.4.1. Condutor elétrico perfeito

A condição de condutor elétrico perfeito é utilizada para simplificação das superfícies metálicas e é modelada pela Equação (27).

$$\vec{n} \times \vec{E} = 0 \quad (27)$$

Onde \vec{n} é o vetor normal à superfície, uma análise da origem da equação no manual *do RF Module* (COMSOL, 2008) mostra que o campo elétrico na superfície terá módulo zero.

3.2.4.2. Isolante térmico

O isolamento térmico é descrito pela Equação (28), e é utilizado para simplificação das fronteiras externas das geometrias dos modelos, pois a troca térmica com o meio externo não é importante neste caso.

$$-\vec{n} \cdot (-k\nabla T) = 0 \quad (28)$$

3.2.4.3. Porta (Fonte)

A condição de porta utilizada nos modelos se refere à fonte de micro-ondas, o local e a maneira onde elas entram no sistema. Para os modelos, a condição de porta foi configurada como uma porta retangular, um modelo da chegada de ondas eletromagnéticas propagadas por um guia de ondas retangular com as dimensões da superfície aplicada. O modo de propagação do guia foi configurado como TE₁₀, o modo permitido em um guia de ondas de um forno comum. A energia da porta foi dada como 682,5 W, valor obtido pela potência de 1050 W de consumo elétrico do forno de micro-ondas real com uma eficiência comum de 65%.

3.2.5. Propriedades dos materiais

As propriedades dos materiais utilizados na modelagem são listadas na Tabela 4.

Tabela 4: Propriedades dos materiais utilizados na modelagem

Material	ϵ_r	μ_0	σ [S/m]	k [W/m.K]	C_p [J/kg.K]	ρ [kg/m ³]
Ar	1	1	0	COMSOL "Air"	COMSOL "Air"	COMSOL "Air"
Água	79,85. (1-0,123.j)	1	0	COMSOL "Water"	COMSOL "Water"	COMSOL "Water"
Vidro	2,09	1	0	COMSOL "Silica Glass"	COMSOL "Silica Glass"	COMSOL "Silica Glass"
Polietileno	2,5. (1-0,0003.j)	1	0	COMSOL "Acrylic Plastic"	COMSOL "Acrylic Plastic"	COMSOL "Acrylic Plastic"
Aço	1	1	$4,032 \cdot 10^6$	COMSOL "Structural Steel"	COMSOL "Structural Steel"	COMSOL "Structural Steel"

3.2.6. Descrição de Modelos

3.2.6.1. Modelo de Teste

O Modelo de Teste foi um modelo inicial desenvolvido para testes de influência de malha e como tentativa inicial para análise da influência dos aspectos geométricos e da carga dielétrica (água) sobre o campo eletromagnético.

3.2.6.1.1. Geometria

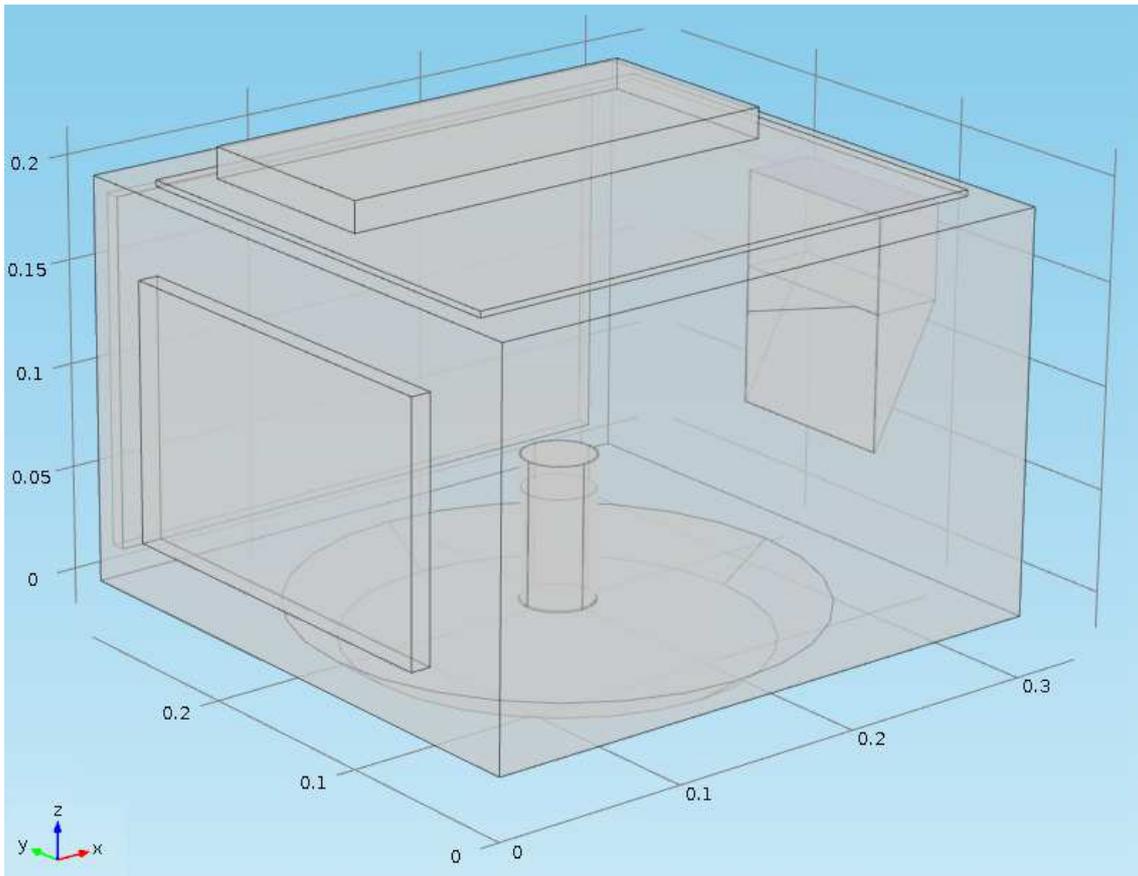


Figura 9: Geometria do modelo de teste sem carga

A geometria simplificada, mostrada na Figura 9, replica as dimensões principais do forno real. No entanto, algumas diferenças geométricas mais importantes entre o forno real e são listadas abaixo:

1. Ausência da fresta próxima ao guia de onda.
2. Ausência da elevação central do motor.
3. Ausência da reentrância da porta do forno.
4. Ausência da resistência de aquecimento.
5. Reentrâncias aproximadas por retângulos.
6. Guia de onda centralizado na cavidade.

3.2.6.1.2. Condições iniciais e de contorno

Na Figura 9 se pode observar (destacada em azul) a face superior do guia de ondas, local no modelo de testes onde foi dada a condição de contorno de porta de micro-ondas

retangular (*Port*). As paredes receberam a condição de condutor elétrico perfeito (*Perfect Electric Conductor*), exceto pela parede entre o guia de ondas e a cavidade ressonante que foi modelada como um volume de aço, o restante do volume foi descrito como ar. O recipiente com água foi excluído nas simulações sem carga, e modelado como um cilindro interno de água e um externo de vidro com a altura do recipiente, excluindo-se a tampa. A condição de isolante térmico foi assumida em todas as fronteiras externas do modelo.

3.2.6.2. Modelo do forno micro-ondas experimental

O Modelo do forno foi desenvolvido para a validação do aquecimento via micro-ondas, desta forma, foi modelado visando replicar a geometria e as condições do forno de micro-ondas utilizado nos experimento.

3.2.6.2.1. Geometria

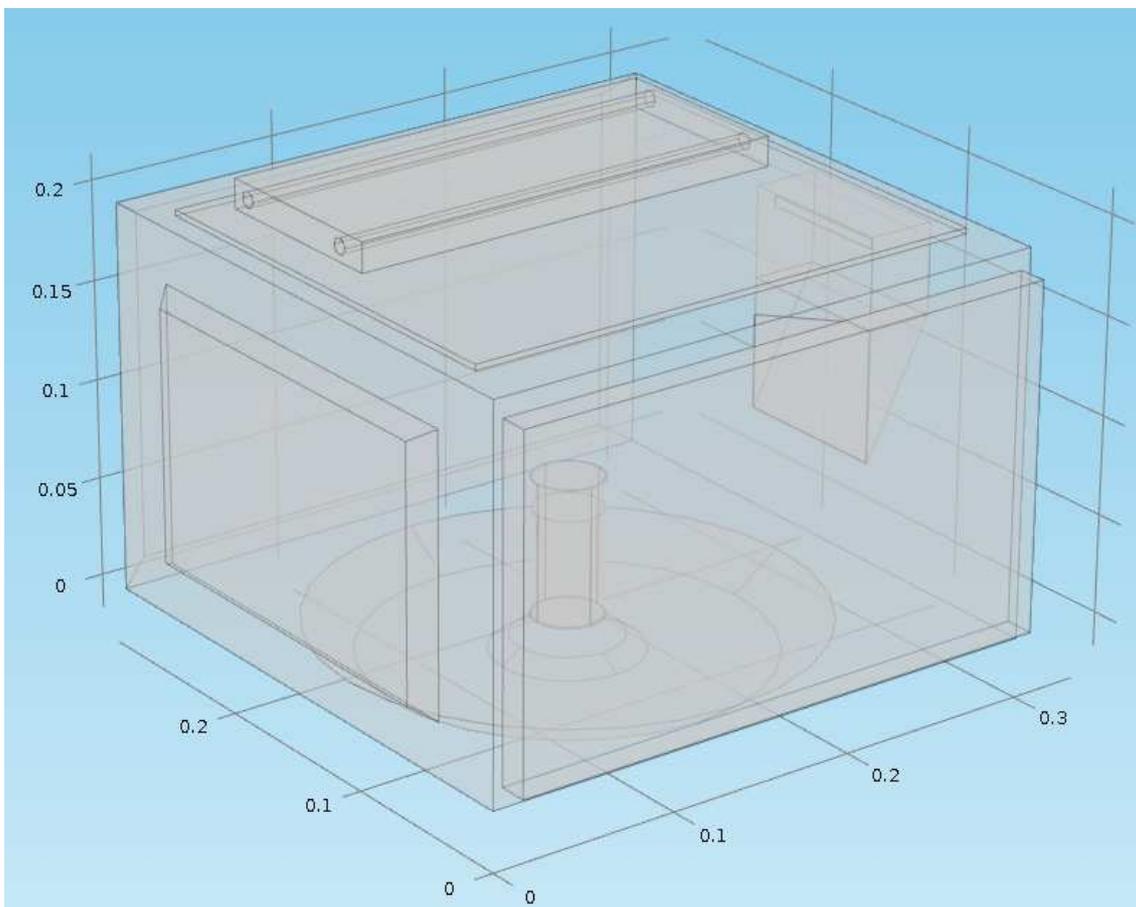


Figura 10: Geometria do modelo do forno micro-ondas experimental

Sua geometria é mostrada na Figura 9 acima, replica as dimensões principais do forno real com um detalhamento maior do que o modelo de testes. Apesar disso, ainda existem diferenças geométricas entre o forno real e o modelo, listadas abaixo:

1. Reentrâncias com cantos arredondados e caimento são aproximadas por pirâmides.
2. Sistema fechado: não são modelados os furos na carcaça da cavidade.
3. Reentrâncias menores não inclusas.
4. Resistência elétrica modelada por dois cilindros retos.

3.2.6.2.2. Condições iniciais e de contorno

A condição de contorno de porta de micro-ondas retangular (*Port*), foi aplicada à face traseira do guia de ondas, onde é acoplado o magnetron no forno real. As paredes receberam a condição de condutor elétrico perfeito (*Perfect Electric Conductor*), inclusive a parede entre o guia de onda e a cavidade. O recipiente com água foi modelado novamente por cilindros concêntricos, formando um volume interno de água e uma parede externa de polietileno. A condição de isolante térmico foi assumida em todas as fronteiras externas do modelo.

3.2.7. Abordagem de Estudo dos Modelos

Para a cavidade vazia, como não havia material dielétrico presente e, portanto, não haveria aquecimento dielétrico, a resolução de I e E era obtida para estado estacionário.

Nos modelos de cavidade com carga, era realizada a simulação transiente de 0 a 1s utilizando o método BDF (*Backward differentiation formula*, ou o método de Runge-Kutta implícito) com ordem mínima 1 (método de Euler invertido) e máxima 5 passo inicial 0,001s e máximo 0,1s, condições padrão do *software*.

3.2.8. Métodos de Resolução de Sistemas Lineares

Para resolução dos sistemas lineares, formados pelas aproximações das Equações (25) e (26) por elementos finitos, foram utilizados os métodos listados na Tabela 5.

Tabela 5: Métodos de resolução de sistema de equações lineares utilizados

	SPOLES	Sparse Object Oriented Linear Equations Solver
DIRETOS	MUMPS	Multifrontal Massively Parallel Sparse Direct Solver
	PARDISO	Parallel Direct Sparse Solver
ITERATIVOS	BICGSTAB	Biconjugated Gradient Stabilized Method
	GMRES	General Minimum Residual Method

Os métodos diretos são variações do método da eliminação Gaussiana, aprimorados para a resolução de matrizes esparsas, já os métodos iterativos aplicam repetidamente uma função que refina a resposta obtida a cada passo. Todos os métodos foram utilizados em sua configuração padrão, exceto pelo GMRES, que foi utilizado com um intervalo de 100 iterações antes do reinício somente para resolução do campo elétrico. Para os métodos iterativos, foi utilizado o método de análise numérica *Multigrid* para aceleração da convergência, também nas configurações sugeridas pelo *software*.

3.2.9. Tamanho Máximo de Elemento de Malha

O tamanho máximo dos elementos formadores da malha computacional é estimado baseado no critério de Nyquist também utilizado por (Salvi *et al.*, 2011) conforme a Equação (29).

$$S_{m\acute{a}x} < \frac{\lambda}{2} = \frac{c}{2f\sqrt{\mu_r\epsilon_r}} \quad (29)$$

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Modelo de Teste

4.1.1. Simulação direta

Inicialmente foi tentado simular o modelo transiente com carga diretamente, utilizando malhas de cerca de 30.000 a 100.000 elementos em conjunto com todos os métodos de resolução listados na Tabela 5. Essa abordagem falhou para todos os métodos, não convergindo em relação ao campo elétrico E, pois não encontrava valores iniciais consistentes.

4.1.2. Simulação sem carga

A simulação sem carga do modelo de teste em estado estacionário foi realizada com o intuito de obter a resolução do campo elétrico para a cavidade ressonante vazia. O que se esperava, pela interpretação da teoria eletromagnética para efeito de uma carga pequena em uma cavidade ressonante grande, é que o perfil de campo elétrico na cavidade vazia fosse semelhante ao da cavidade com carga, com a diferença da última ter menor intensidade devido à dissipação de energia. Desta forma, a resolução da cavidade sem carga teria bons valores iniciais para a simulação da cavidade com carga.

Para a simulação sem carga, foram utilizados somente combinações dos métodos diretos da Tabela 5, utilizando uma malha grosseira, de 13.138 elementos e uma malha de 60.791 elementos conforme disposto nas Tabelas 6 e 7 abaixo.

Tabela 6: Resultados da simulação do modelo de teste sem carga

E	T	Resultado T[°C] MALHA 1	Resultado T[°C] MALHA 2	Tempo de Resolução
MUMPS	MUMPS	FALHA	Temperatura incoerente	-
MUMPS	PARDISO	25,438	25,003	6m46s
MUMPS	SPOOLES	Temperatura incoerente	Temperatura incoerente	-
PARDISO	MUMPS	FALHA	Temperatura incoerente	-
PARDISO	PARDISO	21,222	25,000	3m
PARDISO	SPOOLES	Temperatura incoerente	Temperatura incoerente	-
SPOOLES	MUMPS	FALHA	Temperatura incoerente	-
SPOOLES	PARDISO	25,658	25,004	28m43s
SPOOLES	SPOOLES	Temperatura incoerente	Temperatura incoerente	-

Tabela 7: Configurações das malhas utilizadas para resolução do modelo de teste sem carga

MALHA 1		MALHA 2	
N° elem.	13.138	N° elem.	60.791
Tamanho máximo	$\lambda_{ar}/2$	Tamanho máximo	$\lambda_{ar}/6$
Tamanho mínimo	$\lambda_{ar}/6$	Tamanho mínimo	$\lambda_{ar}/18$
Resolução zonas estreitas	0,1	Resolução zonas estreitas	0,3

A temperatura inicial do sistema foi configurada em 25°C, na Tabela 6 os resultados de “Temperatura Incoerente” são aqueles onde a resolução levou a temperatura de todos os elementos do sistema a valores incoerentes como “-1100 °C” ou “2900°C”, os valores incoerentes apresentavam mudança após nova simulação do mesmo sistema, tal qual seu tempo de resolução. Observa-se que o único método direto adequado para resolução da variável de temperatura é o PARDISO.

Todos os métodos foram capazes de convergir de maneira satisfatória em relação ao campo elétrico. As respostas obtidas foram iguais para todos os métodos convergentes e em ambas as malhas são bastante semelhantes, conforme as Figuras 11 e 12 abaixo. O tempo de resolução para a malha grosseira foi de cerca 30 segundos para as três combinações de métodos adequados. Para a resolução em uma malha mais refinada, os melhores métodos foram PARDISO para T e MUMPS ou PARDISO para E , com baixos tempos de resolução e erros de temperatura. Utilizando esses métodos é possível obter respostas rápidas, e pela observação dos pontos de incoerência de temperatura rapidamente realizar o refino da malha e nova simulação caso seja necessário.

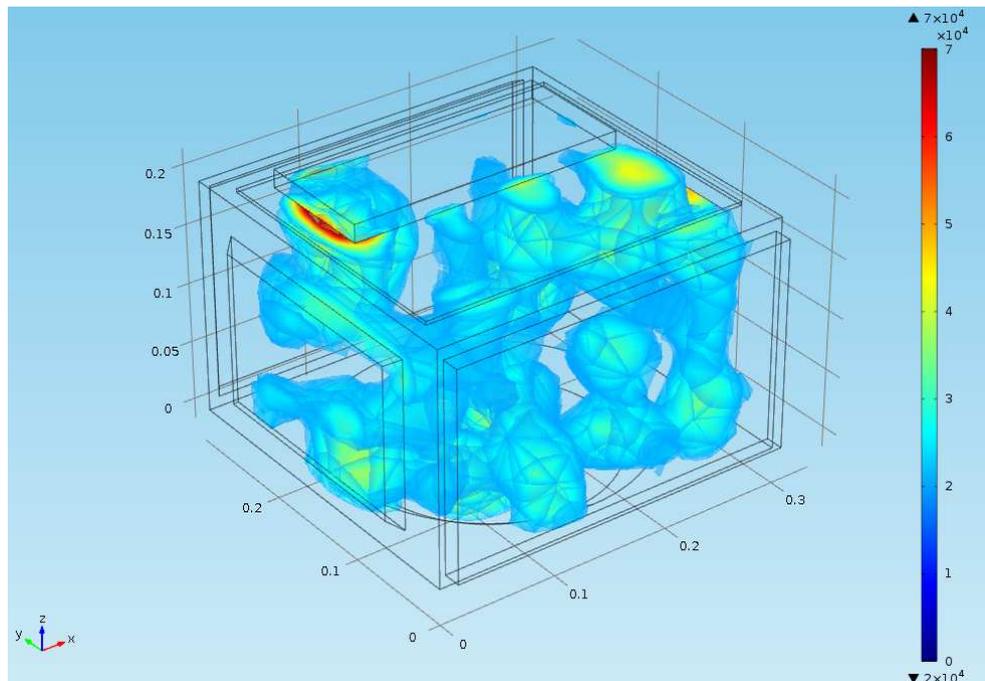


Figura 11: Módulo do campo elétrico [V/m] na cavidade sem carga, Malha 1 com 13.138 elementos; Apenas valores acima de 20.000 V/m mostrados

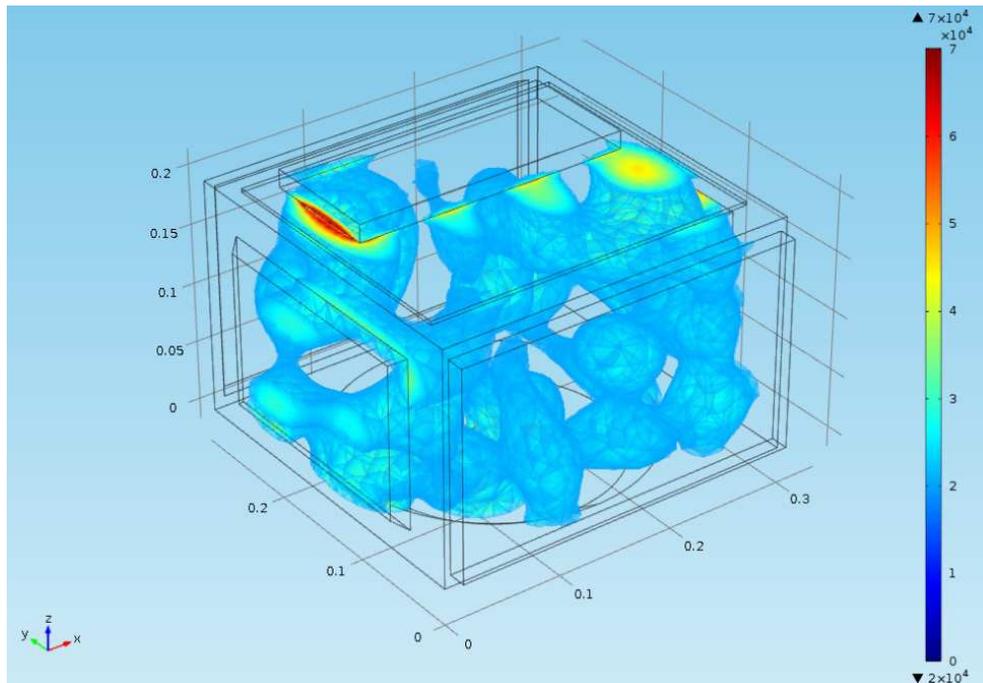


Figura 12: Módulo do campo elétrico [V/m] na cavidade sem carga, Malha 2 com 60.079 elementos; Apenas valores acima de 20.000 V/m mostrados

4.1.3. Simulação com carga:

A simulação do modelo de teste com carga foi realizada a partir de um conjunto de valores iniciais obtido em estado estacionário com uma malha de parâmetros similares à malha 2 descrita na Tabela 7 para uma temperatura inicial de 20°C foi obtido um erro de 0,003°C. O módulo do campo elétrico obtido com em regime estacionário é mostrado na Figura 13. A partir desses valores iniciais, a resolução em estado transiente foi realizada variando-se os parâmetros de malha e os métodos de resolução do sistema de equações lineares de campo elétrico, mantendo fixo o método GMRES para resolução da temperatura.

Simulou-se somente a carga fixa no centro da cavidade para que fossem observados somente os efeitos de malha. Foram analisados os parâmetros P_{rh} [W], a potência de aquecimento dielétrico na carga, $T_{mín}$, a temperatura mínima em todo o volume de material dielétrico no fim da simulação (1,0 s), $T_{máx}$, a temperatura máxima em todo o volume de material dielétrico no fim da simulação (1,0 s) e E_{max} , o módulo de campo elétrico máximo em todos os domínios do modelo.

O parâmetro P_{rh} foi escolhido por ser o resultado de interesse, o resultado esperado com o refino da malha é que P_{rh} convirja a um valor, indicando o ponto em que a malha se encontra suficientemente refinada para os fins de simular o aquecimento dielétrico. $T_{mín}$ foi observado, pois assume valores crescentemente incoerentes com o passar do tempo, reduzindo o seu valor abaixo da temperatura inicial. $T_{máx}$ e E_{max} são utilizados como parâmetros indiretos para verificar a suavização da variação espacial das variáveis T e E . À medida que o espaço é representado por elementos cada vez mais próximos, deve-se observar a redução de valores extremos como $T_{mín}$, $T_{máx}$ e E_{max} .

As Tabelas 8, 9 e 10 a seguir mostram os resultados obtidos com as três primeiras malhas, seguindo ordem crescente de refino.

Tabela 8: Resultados da simulação de estado transiente no modelo de teste com carga utilizando uma malha de 53.312 elementos

MALHA		PARÂMETROS		MÉTODOS		
				Método	Tempo resolução	Memória utilizada
N° elem.	53.312	P _{rh}	299,67 W	MUMPS	11m40s	5,0 GB 5,7 GB
Tamanho máximo	$\lambda_{ar}/3$	T _{mín}	18,928 °C	PARDISO	9m8s	4,9 GB 5,0 GB
Tamanho mínimo	$\lambda_{ar}/16$	T _{máx}	36,640 °C	GMRES	NC 6h	2,5 GB 2,6 GB
Resolução zonas estreitas	0,3	E _{max}	$4,07 \cdot 10^5$ V/m	BICGSTAB	NC 6h	2 GB 2,2 GB

Tabela 9: Resultados da simulação de estado transiente no modelo de teste com carga utilizando uma malha de 77.045 elementos

MALHA		PARÂMETROS		MÉTODOS		
				Método	Tempo resolução	Memória utilizada
N° elem.	77.045	P _{rh}	288,58 W	MUMPS	19m42s	7,1GB 8,3 GB
Tamanho máximo	$\lambda_{ar}/4$	T _{mín}	18,956 °C	PARDISO	15m10s	6,8 GB 7,2 GB
Tamanho mínimo	$\lambda_{ar}/18$	T _{máx}	37,322 °C	GMRES	NC 6h	3,4 GB 3,7 GB
Resolução zonas estreitas	0,45	E _{max}	$2,49 \cdot 10^5$ V/m	BICGSTAB	NC 6h	2,8 GB 3,0 GB

Tabela 10: Resultados da simulação de estado transiente no modelo de teste com carga utilizando uma malha de 122.775 elementos

MALHA		PARÂMETROS		MÉTODOS		
				Método	Tempo resolução	Memória utilizada
N° elem.	122.775	P _{rh}	265,21 W	MUMPS	-	FALTA DE MEMÓRIA
Tamanho máximo	$\lambda_{ar}/6$	T _{mín}	19,279 °C	PARDISO	9h48m	7,4 GB 12,0 GB
Tamanho mínimo	$\lambda_{ar}/24$	T _{máx}	37,023 °C	GMRES	1h55m	4,4 GB 4,7 GB
Resolução zonas estreitas	0,5	E _{max}	$1,79 \cdot 10^5$ V/m	BICGSTAB	9h48m	4,3 GB 4,6 GB

Os resultados obtidos são exatamente iguais para todos os métodos convergentes em uma mesma malha. Os métodos iterativos para as duas primeiras malhas não convergiram em 6 horas de simulação (NC 6h). No entanto, os métodos diretos utilizam mais memória RAM do que os métodos iterativos, sendo que com 122.000 elementos o método MUMPS foi incapaz de ser utilizado por falta de memória, e o método PARDISO teve um tempo de resolução muito elevado, em função da memória virtual (*virtual memory*) ter ultrapassado excessivamente a memória RAM disponível no microcomputador utilizado.

Os resultados de P_{rh} , $T_{mín}$, $T_{máx}$ e E_{max} observados até este ponto são os esperados. Para análise da qualidade das condições iniciais, foi comparado o módulo do campo elétrico destas com o campo elétrico obtido com carga e malha de 77.045 elementos (Figuras 13 e 14). Pode-se também observar a atenuação da intensidade campo elétrico e a quase conservação de sua forma, efeitos da inserção da carga previstos anteriormente.

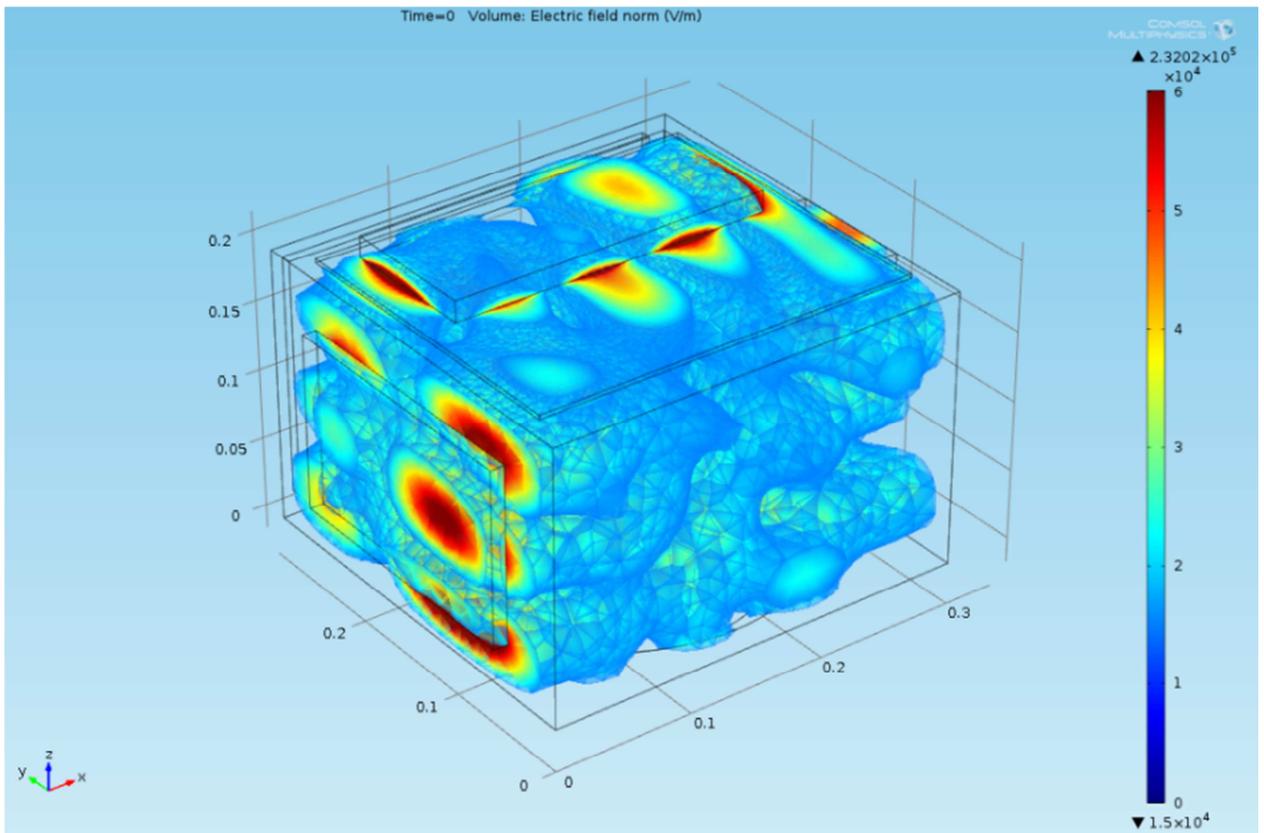


Figura 13: Módulo do campo elétrico [V/m] na cavidade sem carga, condição inicial para simulação com carga; Apenas valores acima de 15.000V/m mostrados.

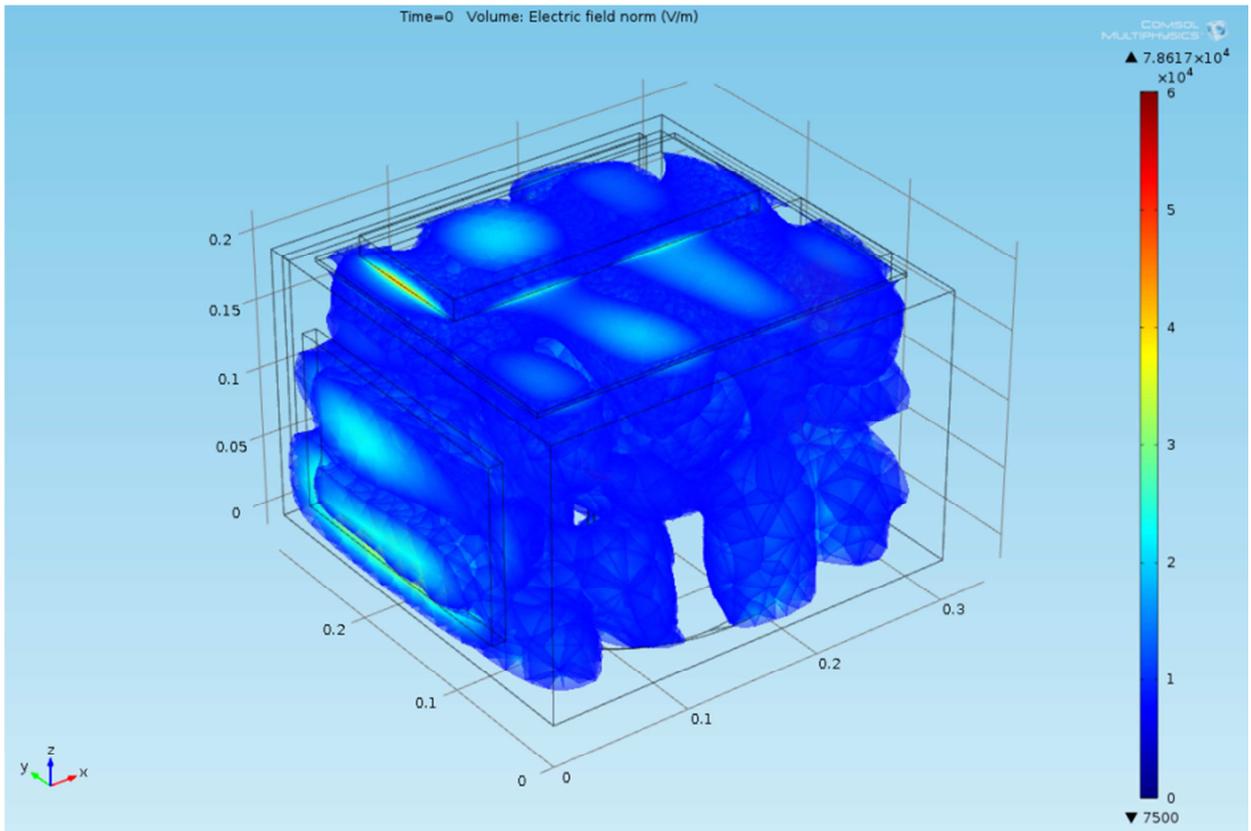


Figura 14: Módulo do campo elétrico [V/m] na cavidade com carga; Apenas valores acima de 7500 V/m mostrados.

No entanto, a observação do módulo de campo elétrico externo ao material dielétrico mostrou sua reduzida variação com o refino da malha (Figura 15 e Figura 16). Além disso, o fato de que o maior e menor elemento da malha nos domínios modelados como ar estão 3 e 12 vezes inferiores à restrição máxima, e de que a restrição não era obedecida dentro do material dielétrico, levaram à continuação do refino da malha somente dentro do volume da carga.

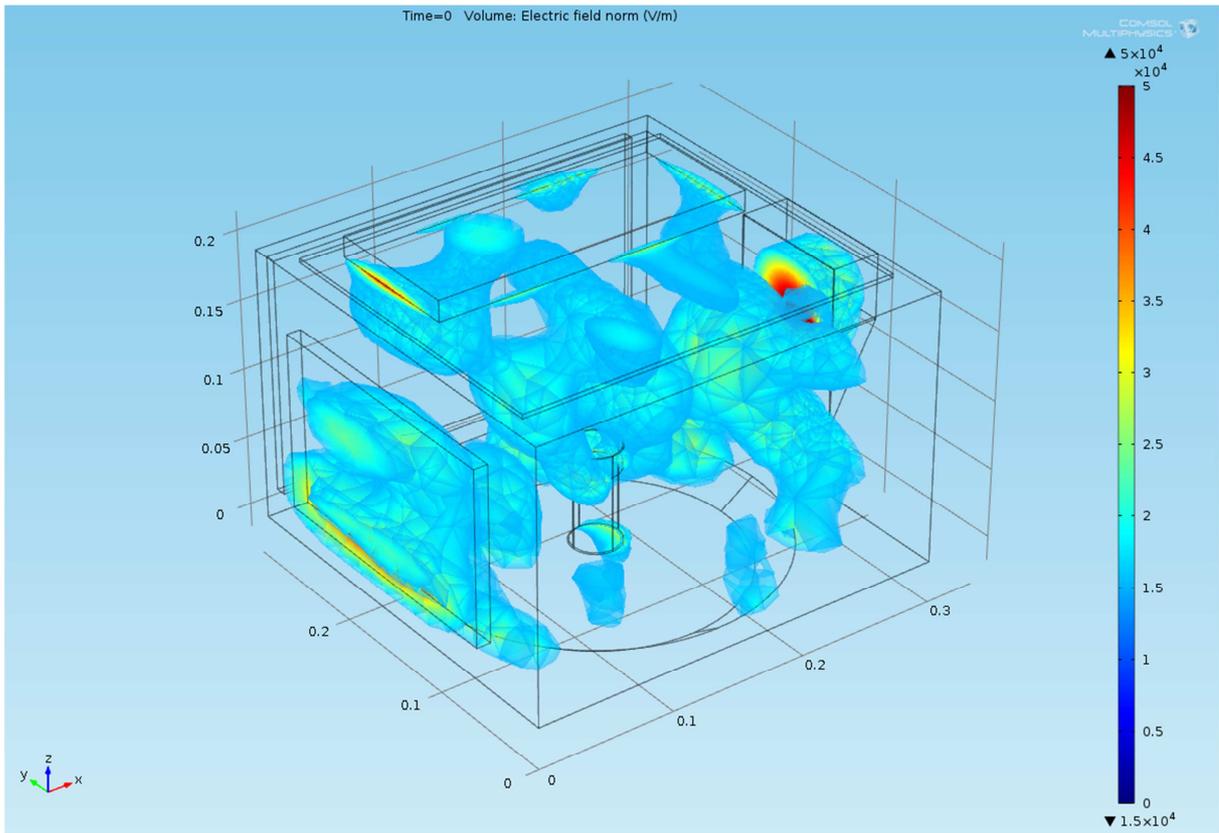


Figura 15: Módulo do campo elétrico resolvido com malha de 53.312 elementos

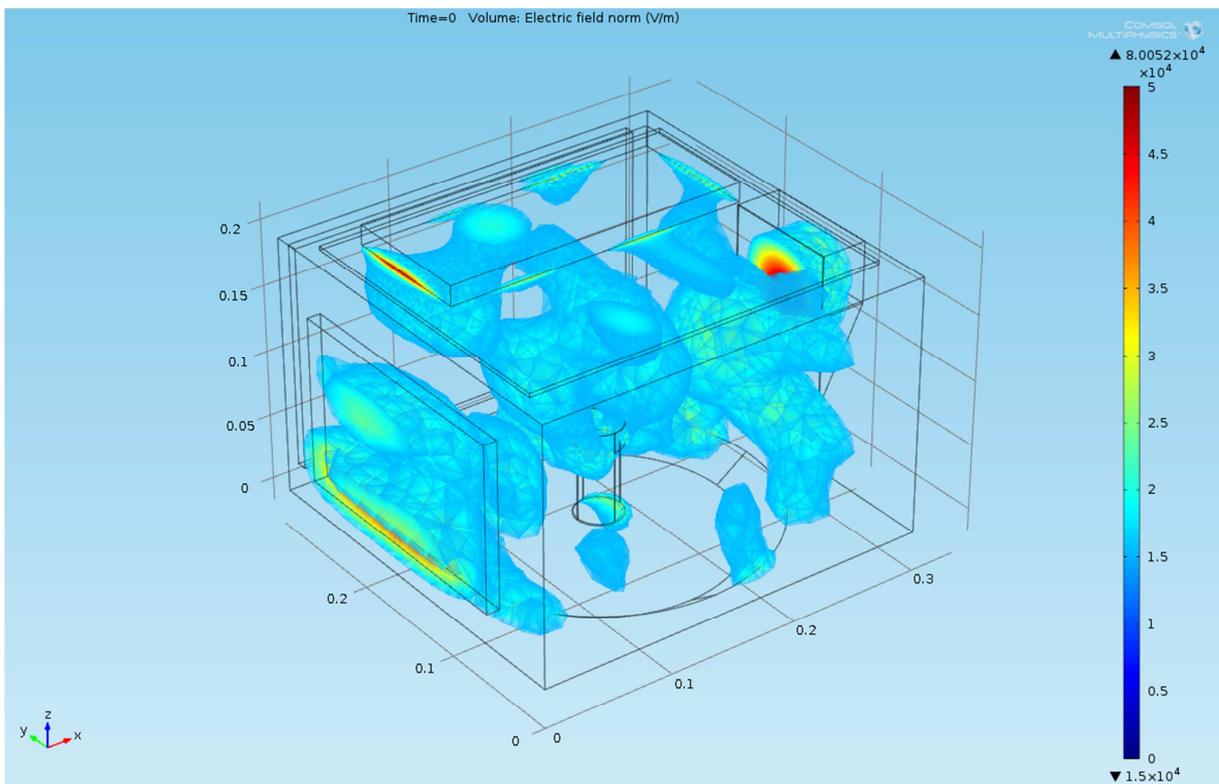


Figura 16: Módulo do campo elétrico resolvido com malha de 122.775 elementos

Tabela 11: Resultados da simulação de estado transiente no modelo de teste com carga utilizando o método GMRES para resolução do campo elétrico e uma malha de 176.802 elementos

MALHA		PARÂMETROS		GMRES	
N° elem.	176.802	P _{rh}	263,46 W	Tempo resolução	11m40s
Tamanho máximo no dielétrico	$\lambda_{die}/2$	T _{mín}	19,851°C		
Tamanho mínimo no dielétrico	$\lambda_{die}/6$	T _{máx}	37,809°C	Memória utilizada	6,5 GB 7,2 GB
Resolução zonas estreitas	0,5	E _{max}	$1,09 \cdot 10^5$ V/m		

Tabela 12: Resultados da simulação de estado transiente no modelo de teste com carga utilizando o método GMRES para resolução do campo elétrico e uma malha de 222.775 elementos

MALHA		PARÂMETROS		GMRES	
N° elem.	222.775	P _{rh}	264,70 W	Tempo resolução	11m40s
Tamanho máximo no dielétrico	$\lambda_{die}/2$	T _{mín}	19,629°C		
Tamanho mínimo no dielétrico	$\lambda_{die}/8$	T _{máx}	36,226°C	Memória utilizada	6,8 GB 9,1 GB
Resolução zonas estreitas	0,5	E _{max}	$1,32 \cdot 10^5$ V/m		

Tendo em vista o parâmetro P_{rh} poderia-se dizer que a malha está suficientemente refinada em 176.802 elementos, com uma variação inferior a 1% com o refino para 222.775 elementos. No entanto, é observada uma nova redução de T_{mín} e aumento de E_{máx}, um resultado que contraria os comportamentos observados anteriormente. Para verificação dos motivos dessa inversão, seria importante realizar simulações com uma malha mais refinada. Foi realizada uma tentativa com cerca de 300.000 elementos que falhou em função de falta de memória no microcomputador.

4.2. Modelo do forno micro-ondas experimental

4.2.1. Simulação sem carga

A simulação sem carga, para obtenção de valores iniciais, foi realizada com a condição inicial de 25°C. Os parâmetros de malha, métodos e resultados são apresentados na Tabela 13 abaixo.

Tabela 13: Parâmetros de malha, métodos e resultado da simulação do modelo do forno sem carga em estado estacionário

MALHA		MÉTODO	
		T	PARDISO
N° elem.	74.807	E	MUMPS
Tamanho máximo	$\lambda_{ar}/4$	RESULTADO	
Tamanho mínimo	$\lambda_{ar}/24$	t	6m34s
Resolução zonas estreitas	0,3	T0	24,882 [°C]

O resultado mostrado e utilizado foi o melhor possível com a utilização de métodos diretos respeitando um uso de memória virtual inferior a 8GB. O campo elétrico obtido é representado na Figura 17.

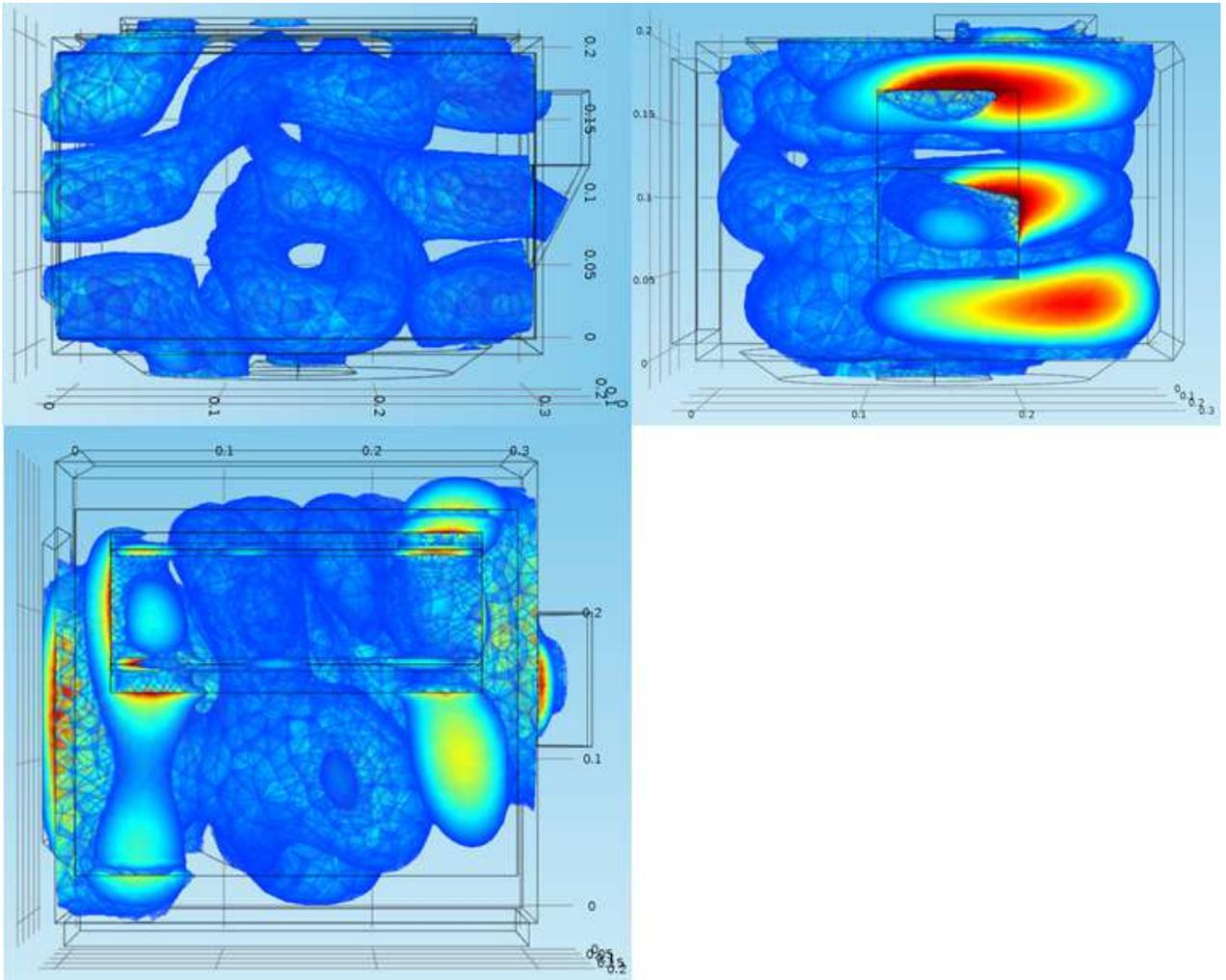


Figura 17: Módulo do campo elétrico no modelo do forno com carga apresentado em vistas ortogonais; Mostrados somente valores acima de 30.000 V/m

4.2.2. Simulação com carga

A simulação com carga, por sua vez, foi realizada utilizando como condição inicial o resultado mencionado anteriormente. Foram realizada 9 simulações, posicionando a carga em nos mesmos pontos de prova do experimento. As condições de malha são mostradas na Tabela 14 a seguir.

Tabela 14: Configurações de malha para a simulação do modelo do forno com carga em estado transiente

MALHA					
N° elem.			~63.000		
AR		DIELÉTRICO		POLIETILENO	
Tamanho máximo	$\lambda_{ar}/4$	Tamanho máximo	$\lambda_{die}/2$	Tamanho máximo	$\lambda_{pet}/2$
Tamanho mínimo	$\lambda_{ar}/16$	Tamanho mínimo	$\lambda_{die}/4$	Tamanho mínimo	$\lambda_{pet}/16$
Resolução zonas estreitas	0,3	Resolução zonas estreitas	0,5	Resolução zonas estreitas	0,5

A restrição de malha foi respeitada, para todos os domínios, para as paredes do recipiente houve necessidade de refino devido à pequena espessura e curvatura. O número de elementos girou em torno dos 63.000, variando com a posição da carga na cavidade, tal qual o tempo de simulação que variou de 11 a 17 minutos.

4.3. Resultados experimentais

Os resultados obtidos nos experimentos são mostrados na Tabela 15. O experimento foi realizado três vezes para cada um dos pontos, exceto 1,2 e 7, onde foi realizado quatro vezes, pois estes apresentaram maior variabilidade nos resultados.

Tabela 15: Resultados experimentais

PONTO	Ti[°C]	Tf[°C]	Energia Dissipada [J]	Potencia Dissipada [W]	Média Potencia Dissipada [W]	Desvio Padrão [W]
1	25	81	12077	403	404	23,9
	26	78	11214	374		
	29	89	12947	432		
	30	87	12299	410		
2	25	66	8840	295	291	19,0
	25	63	8193	273		
	28	72	9488	316		
	31	70	8410	280		
3	25	54	6253	208	199	11,0
	25	53	6037	201		
	28	54	5606	187		
4	25	49	5175	173	194	19,0
	27	56	6253	208		
	29	57	6037	201		
5	25	72	10134	338	331	7,2
	26	72	9919	331		
	29	74	9704	323		
6	27	69	9056	302	326	25,3
	28	77	10567	352		
	29	74	9704	323		
7	27	63	7762	259	286	35,9
	28	75	10135	338		
	29	66	7978	266		
	29	68	8409	280		
8	27	71	9487	316	319	11,0
	29	75	9920	331		
	30	73	9273	309		
9	27	87	12944	431	446	12,6
	29	92	13596	453		
	29	92	13596	453		

4.4. Validação

Para validação do modelo, são comparados os resultados obtidos em experimento e nas simulações na Tabela 16.

Tabela 16: Comparação de dados experimentais e resultados do modelo do forno com carga

PONTO	Média Potencia Dissipada [W]	Potencia Dissipada Modelo [W]	Erro Modelo [W]	Erro Modelo
1	404	358,41	-46	-11,4%
2	291	226,87	-64	-22,1%
3	199	323,73	125	62,8%
4	194	242,53	48	25,0%
5	331	42,56	-288	-87,1%
6	326	501,29	175	53,8%
7	286	661,98	376	131,7%
8	319	660,52	342	107,3%
9	446	324,01	-122	-27,3%

4.5. Discussão

Apesar do pouco refino da malha, estes resultados preliminares já são suficientes para mostrar que o modelo foi insuficiente para predição dos efeitos de aquecimento dielétrico, pois, baseado nos efeitos de malha no modelo de teste, sabe-se que o refino pode reduzir os erros, mas possivelmente não deve levar a resultados coerentes nesse caso. Estima-se que os erros não estejam relacionados à variação de propriedades dielétricas dos materiais com a temperatura, pois existem desvios positivos e negativos. Alguns dos possíveis motivos para os desvios são listados abaixo:

1. Detalhes geométricos não inclusos

Conforme informado anteriormente, existem detalhes geométricos do forno experimental que não puderam ser incluídos ao modelo. Resultados obtidos em modelos intermediários mostraram diferenças significativas de campo elétrico em cavidade vazia e aquecimento dielétrico da carga com a mudança de pequenos detalhes como inclusão da resistência de aquecimento, deslocamento da fresta no guia de onda, mudanças nas dimensões das reentrâncias, etc.

2. Modelagem da fonte de micro-ondas

A condição de porta retangular, utilizada nos modelos, não é a ideal para descrever o campo eletromagnético emitido pela antena do magnetron. Normalmente, a estrutura do guia de onda poderia ser substituída por uma porta retangular em sua fronteira com o refletor, no entanto, a presença da fresta no guia de onda não permite essa simplificação.

Para que o modelo possa ser aplicado no processo de pirólise, deve ser confiável, pois um reator de pirólise rápida pode ter geometrias complexas e os materiais envolvidos como biomassa e catalisadores apresentam as mais variadas características dielétricas e elétricas. Desta forma, o modelo deve passar por melhorias antes de sua aplicação. Com a obtenção de um modelo representativo, pretende-se projetar um equipamento de aquecimento por micro-ondas adequado ao formato e escala de um reator de pirólise e que apresente um ganho de eficiência em relação aos comumente utilizados, facilitando a viabilidade econômica do processo. Uma segunda utilidade de um modelo de aquecimento por micro-ondas representativo em COMSOL é seu acoplamento com demais modelos de fenômenos físicos, agregando efeitos de aquecimento resistivo, fluidização e reação química para simulação do processo de pirólise como um todo.

5. CONCLUSÃO

Este trabalho teve, como maior contribuição, o aprendizado sobre teoria eletromagnética e a tecnologia de micro-ondas. Além disso, foram obtidas técnicas de simulação importantes para convergência dos modelos, obtenção de bons resultados e economia de tempo. O modelo obtido não representa um aquecimento dielétrico real, no entanto é um bom resultado inicial e, passando por melhorias, deve atingir a confiabilidade necessária para sua aplicação no aprimoramento da tecnologia de pirólise rápida.

5.1. Trabalhos Futuros

Como sugestões para trabalhos futuros sugerem-se:

1. Realização de testes de malha mais extensos em um cluster de computadores ou um supercomputador, para continuação da análise do refino.
2. Confecção de cavidades ressonantes e guias de onda com geometrias simples para realização de experimentos e nova modelagem e validação.
3. Estudos da modelagem de antenas e demais dispositivos utilizados para aplicação de micro-ondas para possibilitar a modelagem de geometrias complexas e verificar aplicações desses dispositivos para pirólise rápida com aquecimento via micro-ondas.

Referências Bibliográficas

CLARK, D. E.; FOLZ, D. C.; WEST, J. K. Processing materials with microwave energy. **Materials Science and Engineering: A**, v. 287, n. 2, p. 153-158, 8/15/ 2000. ISSN 0921-5093. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921509300007681> >.

COMSOL. **COMSOL 4.3 RF Module User's Guide** 2012.

FERNÁNDEZ, Y.; ARENILLAS, A.; MENÉNDEZ, J. Á. Microwave Heating Applied to Pyrolysis. In: GRUNDAS, S. (Ed.). **Advances in Induction and Microwave Heating of Mineral and Organic Materials**. Janeza Trdine 9, 51000 Rijeka, Croácia: InTech, 2011.

GABRIEL, C. et al. Dielectric parameters relevant to microwave dielectric heating. **Chemical Society Reviews**, v. 27, n. 3, p. 11, 1998.

ISHII, T. K. Industrial Applications of Microwaves In: ELSEVIER (Ed.). **Handbook of Microwave Technology: Components and Devices**. Milwaukee, Wisconsin, v.1, 1995. cap. 10, p.30.

JAVADI, H. H. S. Microwave Materials. In: ELSEVIER (Ed.). **Handbook of Microwave Technology: Components and Devices**. Milwaukee, Wisconsin, v.1, 1995. cap. 19, p.38.

KAPPE, O. **Controlled microwave heating in modern organic synthesis**. 43. 2004.

KRUG, F. J. Digestão de Amostras Assistidas por Microondas. In: KRUG, F. J. (Ed.). **Métodos de Preparo de Amostras: Fundamentos sobre Preparo de Amostras Orgânicas e Inorgânicas para Análise Elementar**. 1. Piracicaba, SP, Brasil, 2008. p.300.

LI, X. et al. Design and Numerical Simulation of Novel Reentrant Microwave Cavity. **Physics Procedia**, v. 22, n. 0, p. 101-106, // 2011. ISSN 1875-3892. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1875389211006705> >.

LOVE, W. Magnetrons. In: ELSEVIER (Ed.). **Handbook of Microwave Technology: Components and Devices**. Milwaukee, Wisconsin, v.1, 1995. cap. 2, p.30.

MARKEN, F. Focused Microwaves in electrochemical processes. **Electrochimica Acta**, v. 51, n. 11, p. 9, 2006.

MEHDIZADEH, M. Chapter 1 - The Impact of Fields on Materials at RF/Microwave Frequencies. In: MEHDIZADEH, M. (Ed.). **Microwave/RF Applicators and Probes for Material Heating, Sensing, and Plasma Generation**. Boston: William Andrew Publishing, 2010. p.1-34. ISBN 978-0-8155-1592-0.

MIJOVIC, J.; WIJAWA, J. Review of cure of polymers and composites by microwave energy. **Polymer Composites**, v. 11, n. 3, p. 16, 1990.

RICHIE, J. Microwave Mathematics. In: ISHII, T. K. (Ed.). **Handbook of Microwave Technology: Components and Devices**. Milwaukee, Wisconsin: Elsevier, v.1, 1995. cap. 18, p.35.

SALVI, D. et al. COMSOL Multiphysics model for continuous flow microwave heating of liquids. **Journal of Food Engineering**, v. 104, n. 3, p. 422-429, 6// 2011. ISSN 0260-8774. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0260877411000070> >.

THOSTENSON, E. T.; CHOU, T. W. Microwave processing: fundamentals and applications. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 30, n. 9, p. 1055-1071, 9// 1999. ISSN 1359-835X. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359835X99000202> >.

VAN LOOCK, W. European regulations, safety issues in RF and microwaves power. In: WILLERT-PORADA (Ed.). **Advances in Microwave and Radio Frequency Processing**. 8 (85-92), Springer, 3-540-43252-3, Holanda, 2006.

YIN, C. Microwave-assisted pyrolysis of biomass for liquid biofuels production. **Bioresource Technology**, v. 120, n. 0, p. 273-284, 9// 2012. ISSN 0960-8524. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852412009200> >.

YOSHIKAWA, N. Recent Studies on Fundamentals and Application of Microwave Processing of Materials. In: GRUNDAS, S. (Ed.). **Advances in Induction and Microwave Heating of Mineral and Organic Materials**. Janeza Trdine 9, 51000 Rijeka, Croatia: InTech, 2011. cap. 1,

ZLOTORZYNSKI, A. **The applications of microwave radiation to analytical and environmental chemistry**, *Critical Reviews. Analytical Chemistry*. 25: 34 p. 1995.

Anexos

ANEXO 1 – Dimensões internas do forno de micro-ondas

Componente	Dimensão	Valor	Unidade	Detalhes
Paredes metálicas	e	0,8	mm	espessura das paredes metálicas
Cavidade	X	300	mm	-
	Y	290	mm	-
	Z	195	mm	-
Guia de Ondas	X	35	mm	-
	Y	85,4	mm	-
	Z	47,5	mm	-
	Y0	110,5	mm	distância da porta do forno
Porta de Micro-ondas	X	0,8	mm	espessura da parede metálica cortada
	Y1	15,4	mm	parte da seção com altura constante
	Y2	70	mm	parte da seção com altura variável
	Z1	67,5	mm	altura na seção de altura constante
	Z2	48,5	mm	altura ao fim da seção de altura variável
	Inc	15,186	°	inclinação da seção de altura variável
	Y0	110,5	mm	distância da porta do forno
	Z0	50	mm	distância do piso da cavidade
Refletor	X	35	mm	-
	Y	85,4	mm	-
	Z	67,5	mm	-
	Inc	27,408	°	inclinação da face angulada
Fresta	X	0,8	mm	espessura da parede metálica cortada
	Y	71,6	mm	-
	Z	5	mm	-
	Y0	110,5	mm	distância da porta do forno
	Z0	160	mm	distancia do piso da cavidade
Reentrância traseira	X1	275	mm	arestas na fronteira com o meio externo
	X2	300	mm	arestas na junção com a cavidade ressonante
	Y	7,5	mm	profundidade da reentrância
	Z1	170	mm	arestas na fronteira com o meio externo
	Z2	195	mm	arestas na junção com a cavidade ressonante

Componente	Dimensão	Valor	Unidade	Detalhes
Reentrância lateral	X	10	mm	profundidade da reentrância
	Y1	195	mm	arestas na fronteira com o meio externo
	Y2	210	mm	arestas na junção com a cavidade ressonante
	Z1	125	mm	arestas na fronteira com o meio externo
	Z2	140	mm	arestas na junção com a cavidade ressonante
Reentrância porta	X	290	mm	-
	Y	15	mm	profundidade da reentrância
	Z	175	mm	-
Reentrância inferior	Z	17,5	mm	profundidade da reentrância
	Dsup	250	mm	diâmetro da face mais alta
	Dinf	200	mm	diâmetro da face mais baixa
Elevação motor	Z	7,5	mm	altura da elevação (a partir do piso da reentrância inferior)
	Dsup	55	mm	diâmetro da face mais alta
	Dinf	75	mm	diâmetro da face mais baixa
Reentrância superior	X	275	mm	-
	Y	230	mm	-
	Z	3	mm	profundidade da reentrância
Alojamento resistência	X	230	mm	-
	Y	100	mm	-
	Z	15	mm	profundidade da reentrância
	Y0	115	mm	distância da porta do forno
Resistência	D	8	mm	diâmetro do tubo metálico
	Y0	6,5	mm	menor distância da resistência a parede do alojamento (frente do forno)
	Y1	13,5	mm	menor distância da resistência a parede do alojamento (traseira do forno)