



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SISTEMAS DE
COMUNICAÇÃO E AUTOMAÇÃO**

MAGNO MEDEIROS DE ARAÚJO

**CARACTERIZAÇÃO DE UM MODELO NUMÉRICO UTILIZANDO FDTD
PARA USO EM PROCESSOS DE AQUECIMENTO POR MICRO-ONDAS EM
CAVIDADES MULTIMODO**

MOSSORÓ – RN

2014

MAGNO MEDEIROS DE ARAÚJO

**CARACTERIZAÇÃO DE UM MODELO NUMÉRICO UTILIZANDO FDTD
PARA USO EM PROCESSOS DE AQUECIMENTO POR MICRO-ONDAS EM
CAVIDADES MULTIMODO**

Dissertação de mestrado acadêmico apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Comunicação e Automação, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Sistemas de Comunicação e Automação.

Orientador: Prof. Dr. Augusto Carlos Pavão –
UFERSA

MOSSORÓ – RN

2014

O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade de seus autores

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Biblioteca Central Orlando Teixeira (BCOT)
Setor de Informação e Referência**

A658c Araújo, Magno Medeiros de

Caracterização de um modelo numérico utilizando ftdt para uso em processos de aquecimento por micro-ondas em cavidades multimodo / Magno Medeiros de Araújo -- Mossoró, 2015.

95f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Augusto Carlos Pavão

Dissertação (Mestrado em Sistemas de Comunicação e Automação) – Universidade Federal Rural do Semi-Árido. Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação.

1. Micro-ondas. 2. Aquecimento por micro-ondas. 3. FDTD.

I. Título.

RN/UFERSA/BCOT/073-15
537.5344

CDD:

MAGNO MEDEIROS DE ARAÚJO

CARACTERIZAÇÃO DE UM MODELO NUMÉRICO UTILIZANDO FDTD PARA USO EM PROCESSOS DE AQUECIMENTO POR MICRO-ONDAS EM CAVIDADES MULTIMODO

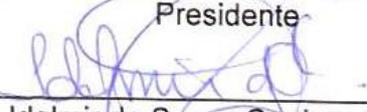
Dissertação de mestrado acadêmico apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Comunicação e Automação, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Sistemas de Comunicação e Automação.

APROVADA EM: 21/01/2015

BANCA EXAMINADORA



Prof. D.Sc. Augusto Carlos Pavão – UFERSA
Presidente



Prof. D.Sc. Idalmir de Sousa Queiroz Júnior – UFERSA
Primeiro Membro



Prof. D.Sc. Humberto Dionísio de Andrade – UFERSA
Segundo Membro



Prof. D.Sc. Marinaldo Pinheiro de Sousa Neto – IFRN
Terceiro Membro

Mossoró, 21 de janeiro de 2015

RESUMO

O aquecimento por micro-ondas é amplamente utilizado nas indústrias, para o tratamento de minérios e secagem de madeira, e na produção de alimentos. Além disso, estudos aplicados ao tratamento de células cancerígenas demonstram que o aquecimento por micro-ondas é mais eficaz no combate do que os procedimentos convencionais, como quimioterapia e radioterapia, por ser de ação localizada e não apresentar a mesma quantidade de efeitos colaterais. Neste sentido, o presente trabalho tem como objetivo desenvolver um modelo numérico utilizando FDTD que possa relacionar os parâmetros da cavidade e de sua alimentação com o aquecimento final de materiais dielétricos em aplicações industriais, servindo como base para o desenvolvimento de um software para estudo destas aplicações. Inicialmente são abordados os temas bases que envolvem a propagação das ondas eletromagnéticas e as equações que a regem e em seguida é feito o tratamento matemático para relacionar parâmetros conhecidos com os obtidos na simulação. Por fim, foram feitos experimentos baseados no ambiente simulado para verificar o erro do modelo desenvolvido que permitiram concluir que os resultados fornecidos numericamente estão de acordo e servem como referência para aplicações de baixa ou média precisão, mas a necessidade de um sistema em que as propriedades dielétricas variem com a temperatura é essencial para procedimentos que necessitam de maior precisão.

Palavras-Chave: Micro-ondas, Aquecimento por micro-ondas, FDTD

ABSTRACT

The microwave heating is largely used on industry, for treatment of ores and wood drying, and on food production. Besides this industry use, researches applied to cancer cells treatment, demonstrates that the microwave heating is more effective than regular procedures, such as, chemotherapy and radiotherapy, because it is a directional action and does not presents the same side effects amount. This work aims to develop a numeric model using FDTD in order relate the microwave spread, with the dielectric material heating on industry applications, standing as a base to future development of a software, which can study the microwave effects on these applications. Initially the basic issues involving the propagation of electromagnetic waves are discussed, as well as the equation that govern it. Then the mathematical treatment is performed, in order to related the known parameters to those obtained on the simulation. Lastly, experiments based in the simulated medium were performed, for the purpose of verify the error presented on the developed model. Those experiments allowed to conclude that the results numerically given, serve as a reference to situations where high precision is not necessary on the final temperature of the dielectric medium.

Keywords: Microwaves, Microwave heating, FDTD

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Duração das simulações	48
Tabela 2 – Propriedades térmicas da água	51
Tabela 3 – Evolução da temperatura (°C) para os 16 copos	56
Tabela 4 – Evolução da temperatura (°C) para os 32 copos	57
Tabela 5 – Propriedades térmicas e elétrica da madeira	81

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Onda Eletromagnética com componente de campo magnético em vermelho e componente de campo elétrico em azul	18
Figura 2 – Permissividade complexa em função da temperatura em °C.....	25
Figura 3 – Estrutura simplificada de um <i>magnetron</i>	26
Figura 4 – Guia de onda retangular WR-340.....	28
Figura 5 – Exemplo de modos transversais	29
Figura 6 – Cavity monomodo	30
Figura 7 – Cavity multimodo.....	30
Figura 8 – Célula de Yee.....	34
Figura 9 – Cavity com limites definidos pelo ambiente de simulação	40
Figura 10 – Cavity acoplada à guia de onda	41
Figura 11 – Cavity com trecho aberto para visualização.....	41
Figura 12 – Permissividade da água em função da temperatura	42
Figura 13 – Copos no primeiro nível.	43
Figura 14 – Copos em dois níveis	44
Figura 15 – 16 copos: visão lateral.....	44
Figura 16 – 32 copos: visão lateral.....	45
Figura 17 – 16 copos: visão frontal.	45
Figura 18 – 32 copos: visão frontal.	46
Figura 19 – 16 copos: visão superior.	46
Figura 20 – 32 copos: visão superior do nível 1.	47
Figura 21 – 32 Copos: visão superior do nível 2.	48
Figura 22 – Dimensões da prateleira de acrílico	52
Figura 23 – Termômetro Digital MT-350, Minipa.....	53
Figura 24 – Numeração dos copos, nível inferior.	54
Figura 25 – Forno micro-ondas com 16 copos.	54
Figura 26 – Forno micro-ondas com 32 copos.....	55
Figura 27 – Simulação 16 copos, t = 30 s, vista superior.....	59
Figura 28 - Simulação 16 copos, t = 30 s, vista frontal.....	59
Figura 29 - Simulação 16 copos, t = 30 s, vista lateral.....	60
Figura 30 – Simulação 16 copos, t = 60 s, vista superior	60
Figura 31 - Simulação 16 copos, t = 60 s, vista frontal.....	61
Figura 32 - Simulação 16 copos, t = 60 s, vista lateral.....	61

Figura 33 – Simulação 16 copos, t = 90 s, vista superior	62
Figura 34 - Simulação 16 copos, t = 90 s, vista frontal.....	62
Figura 35 - Simulação 16 copos, t = 90 s, vista lateral	63
Figura 36 – Simulação 16 copos, t = 120 s, vista superior	63
Figura 37 - Simulação 16 copos, t = 120 s, vista frontal.....	64
Figura 38 - Simulação 16 copos, t = 120 s, vista lateral	65
Figura 39 – Simulação 32 copos, t = 30 s, vista superior, nível 1	66
Figura 40 - Simulação 32 copos, t = 30 s, vista superior, nível 2	66
Figura 41 - Simulação 32 copos, t = 30 s, vista frontal.....	66
Figura 42 - Simulação 32 copos, t = 30 s, vista lateral	67
Figura 43 – Simulação 32 copos, t = 60 s, vista superior, nível 1	67
Figura 44 - Simulação 32 copos, t = 60 s, vista superior, nível 2	67
Figura 45 - Simulação 32 copos, t = 60 s, vista frontal.....	68
Figura 46 - Simulação 32 copos, t = 60 s, vista lateral	68
Figura 47 - Simulação 32 copos, t = 90 s, vista superior, nível 1	68
Figura 48 - Simulação 32 copos, t = 90 s, vista superior, nível 2	69
Figura 49 - Simulação 32 copos, t = 90 s, vista frontal.....	69
Figura 50 - Simulação 32 copos, t = 90 s, vista lateral	69
Figura 51 - Simulação 32 copos, t = 120 s, vista superior, nível 1	70
Figura 52 - Simulação 32 copos, t = 120 s, vista superior, nível 2	70
Figura 53 - Simulação 32 copos, t = 120 s, vista frontal.....	70
Figura 54 - Simulação 32 copos, t = 120 s, vista lateral.....	71
Figura 55 – Erro (%) x Tempo (s), Configuração de 16 copos	72
Figura 56 - Erro (%) x Tempo (s), Configuração de 32 copos, nível inferior	72
Figura 57 - Erro (%) x Tempo (s), Configuração de 32 copos, nível superior ..	73
Figura 58 – Vista frontal	74
Figura 59 – Intensidade de campo elétrico para diferentes comprimento do guia	75
Figura 60 – Distribuição de campo elétrico para cavidade com guia elevada ..	76
Figura 61 – Distribuição de campo elétrico para cavidade com guia localizada na parte superior	77
Figura 62 – Distribuição de campo elétrico para configuração 01	78
Figura 63 – Distribuição de campo elétrico para configuração 02.....	79
Figura 64 – Cavidade industrial, configuração 01	80

Figura 65 – Cavidade industrial, configuração 02	80
Figura 66 – Distribuição do campo elétrico no forno industrial, configuração 01	81
Figura 67 – Distribuição de campo elétrico no forno industrial, configuração 02	82
Figura 68 – Potência dissipada nas amostras (configuração 01), vista superior.	82
Figura 69 - Potência dissipada nas amostras (configuração 02), vista superior.	83
Figura 70 – Aquecimento para t=30s.	83
Figura 71 - Aquecimento para t=45s.	84
Figura 72 - Aquecimento para t=60s.	84
Figura 73 - Aquecimento para t=30s.	84
Figura 74 - Aquecimento para t=45s.	85
Figura 75 – Aquecimento para t=60s.	85
Figura 76 – Aquecimento para t=75s.	85
Figura 77 – Aquecimento para t=90s.	86
Figura 78 – Aquecimento para t=105s.	86
Figura 79 – Aquecimento para t=120s.	87

NOMENCLATURA

Letras Latinas

c – velocidade da luz;

$^{\circ}\text{C}$ – graus Celsius;

D_t - difusibilidade térmica;

f – frequência;

f_c – frequência de corte;

v – velocidade de propagação de onda;

\vec{E} – campo elétrico;

\vec{H} - campo magnético;

t – tempo;

\vec{J} - densidade de corrente de condução;

\vec{S} – vetor de Poynting;

P_c – densidade de potência referente à condutividade;

P_{dp} - densidade de potência associada à relaxação dos dipolos;

C_m – calor específico do meio;

k_t : - condutividade térmica do meio;

T - temperatura do meio;

P_d - densidade de potência eletromagnética;

f_{rel} - frequência de relaxação;

P_T - potência transmitida;

Letras Gregas

Δ_T – diferencial de temperatura;

Δ – incremento espacial;

Δt – incremento temporal;

$\Delta x, \Delta y, \Delta z$ - incremento espacial nas direções x, y e z ;

δ – incremento espacial;

ϵ – permissividade elétrica do meio;

ϵ' – componente real da permissividade do meio;

ϵ'' – componente imaginária da permissividade do meio;

ϵ'_r – componente real relativa da permissividade do meio;
 ϵ''_r – componente imaginária relativa da permissividade do meio;
 ϵ_{ef} – permissividade efetiva;
 ϵ_0 – permissividade do vácuo;
 ϵ''_{cr} - permissividade complexa relativa efetiva;
 ϵ_s - constante dielétrica estática;
 ϵ_∞ - constante dielétrica em uma frequência infinita;
 β – fator de atraso na relaxação dipolar;
 μ - permeabilidade magnética;
 λ - comprimento de onda;
 ρ_v – densidade volumétrica de carga;
 ρ_m – densidade do meio
 σ - condutividade elétrica finita;
 σ_{dc} - condutividade em corrente contínua;
 η - impedância intrínseca do meio;
 ω – frequência angular;

Siglas

2D – Segunda dimensão;
3D – Terceira dimensão;
ABC – Absorbing Boundary Conditions;
FDTD – Finite Difference Time Domain;
(FD)²TD - Frequency-Dependent Finite-Difference Time-Domain
MoM – Method of Moments;
FEM – Finite Elements Method.
TLM – Transmission Line Method;
ISM – Industrial, Scientific and Medical;
DC – direct current;
AM – amplitude modulation;
FM – frequency modulation;
TE – transversal electric;
TM – transversal magnetic;
TEM – transverse electric and magnetic;

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
1.1	JUSTIFICATIVA.....	16
1.2	OBJETIVOS.....	17
1.2.1	Objetivo Geral.....	17
1.2.2	Objetivos Específicos.....	17
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	18
2.1	Micro-ondas	18
2.1.1	Equações de Maxwell	19
2.1.2	Aquecimento por micro-ondas	21
2.1.3	Sistema de aquecimento por micro-ondas.....	26
2.1.3.1	Gerador de micro-ondas.....	26
2.1.3.2	Guia de onda	27
2.1.3.3	Cavidade	28
2.1.4	Métodos Numéricos	31
2.1.4.1	Método FDTD	32
2.1.5	Estado da Arte	37
3	MATERIAIS E MÉTODOS	39
3.1	Metodologia da Pesquisa.....	39
3.1.1	Análise numérica dos campos eletromagnéticos na cavidade.....	39
3.1.2	Relação da potência dissipada e aumento de temperatura do material dielétrico.....	49
3.2	Análise Experimental	52
3.2.1	Mapeamento da temperatura na cavidade	52
4	Resultados e Discussões.....	58
4.1	visualização volumétrica das temperaturas simuladas	58
4.2	Relação entre os valores simulados e medidos.....	71
4.3	Variação dos parâmetros do forno micro-ondas e seus efeitos	73

4.3.1 Comprimento do guia de onda.....	74
4.3.2 Localização do guia de onda	75
4.3.2.1 Guia localizada acima do nível original.....	75
4.3.2.2 Guia localizada na parte superior da cavidade.....	76
4.3.3 Quantidade de Fontes	77
4.3.3.1 Configuração 01 – dois guias de onda simetricamente opostos.....	77
4.3.3.2 Configuração 02 – dois guias de onda em níveis diferentes	78
4.4 Simulação de um forno industrial para secagem de madeira	79
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	88
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	89
REFERÊNCIAS.....	90
ANEXO 1.....	94
ANEXO 2.....	95

1 INTRODUÇÃO

A utilização das micro-ondas para o aquecimento data da Segunda Guerra Mundial (TANG *et al.*, 2002), período que o estudo e pesquisa com radares estavam em evidência. Desde então, o uso e a abrangência do aquecimento por micro-ondas cresceram transportando a tecnologia para vários setores da sociedade, como indústria e medicina.

A facilidade e a rapidez do aquecimento por micro-ondas, comparado ao aquecimento convencional, permitiu o desenvolvimento dos métodos de processamento de minerais, tecidos e alimentos (RATANADECHO *et al.*, 2002), aumentando sua eficiência e a qualidade do produto final.

O aquecimento por micro-ondas recebe grande destaque no tratamento de tumores pelo processo de hipertermia e no aquecimento do sangue durante procedimento de transfusão (DIBBEN, 1995).

Apesar das diversas aplicações e de suas vantagens, o estudo das micro-ondas para o aquecimento ainda necessita de análises volumétricas do comportamento do aquecimento, devido à grande demanda computacional de processamento e memória, além da variação das propriedades intrínsecas do material, que variam com a temperatura, aumentando o esforço computacional.

Na busca pelo desenvolvimento dos métodos, estudos vêm sendo desenvolvidos para verificar como as propriedades se comportam com a variação da temperatura e como isso afeta as ondas eletromagnéticas presentes.

Estes estudos possibilitam o aperfeiçoamento dos métodos numéricos e dos procedimentos de aquecimento, proporcionando maiores eficiência e qualidade seja na indústria ou no setor médico.

1.1 JUSTIFICATIVA

O aquecimento utilizando ondas eletromagnéticas tem sido amplamente utilizado em diversos ramos da indústria e da medicina. As aplicações variam da utilização no setor alimentício até ao tratamento de doenças cancerígenas. Cada processo possui suas especificidades e necessita de métodos computacionais que forneçam informações prévias sobre as condições de operação.

Os métodos numéricos (INAN, MARSHALL, 2011) analisam ondas eletromagnéticas no interior de uma cavidade ao longo do tempo, em que é verificada a potência absorvida pelo material dielétrico, em seguida a variação de temperatura em função desta potência e a influência que esse aumento na temperatura terá na permissividade do material. Esse processo se repete até que se atinja a condição de estabilidade desejada. Sistemas que seguem esse procedimento são denominados acoplados.

A variação da permissividade requer o prévio conhecimento do modelo matemático da forma como se comporta esta variação com a temperatura. Esse conhecimento necessita de experimentos detalhados para efetuar o mapeamento da mudança da permissividade em função da temperatura, permitindo a criação de uma função matemática.

As simulações e os experimentos que serão feitos neste trabalho irão estabelecer um método de análise e projeto de cavidades para uso industrial, desconsiderando a variação da permissividade, a fim de verificar a dimensão da influência desta variação quando comparados os resultados experimentais com os das simulações. Além da influência do material, serão avaliados parâmetros da fonte no desempenho do aquecimento final, como: potência, frequência de operação e localização.

Comprovando que a variação da permissividade com a mudança de temperatura, para uma pequena faixa, representa uma pequena influência no resultado final, o método desenvolvido será uma alternativa mais viável para o projeto de cavidades industriais, reduzindo as análises da permissividade dos materiais.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Caracterizar o aquecimento de materiais dielétricos utilizando ondas eletromagnéticas com um modelo que utiliza o método numérico FDTD, com o intuito de utilizá-lo para o desenvolvimento de estudos e projetos de fornos micro-ondas para aplicações industriais e de pesquisa de interação de campos eletromagnéticos com tecidos biológicos.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Estabelecer uma relação entre as potências calculadas na simulação e os parâmetros de operação de um forno micro-ondas, como a potência transferida para a câmara de cozimento;
- Simular diferentes condições de carga na cavidade de aquecimento para análise do comportamento do campo eletromagnético e da potência absorvida pelo material;
- Calcular a influência da potência absorvida pelo dielétrico no aquecimento utilizando a equação da transferência de calor;
- Comparar os resultados obtidos das simulações com experimentos executados em um forno micro-ondas de uso doméstico;
- Caracterizar parâmetros do modelo relacionados à fonte, constantes dielétricas, forma de onda, entre outras.

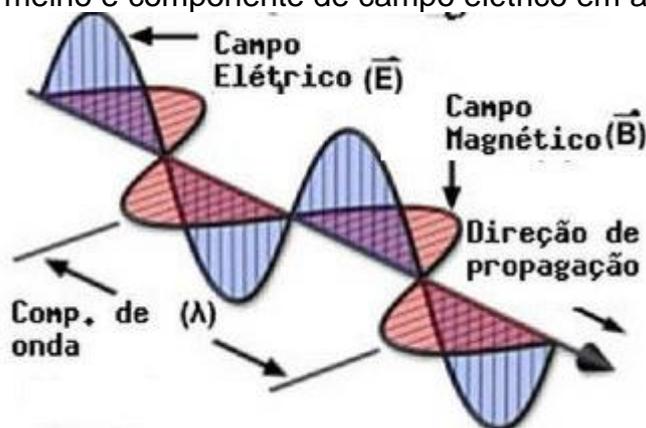
2 REVISÃO DA LITERATURA

O presente Capítulo apresenta inicialmente uma conceituação sobre as micro-ondas e sobre a conversão da energia eletromagnética armazenada nestas ondas em energia térmica nos materiais dielétricos que serão aquecidos. Além disso, analisa trabalhos semelhantes já desenvolvidos, a fim de contextualizar a pesquisa proposta.

2.1 MICRO-ONDAS

As micro-ondas são ondas eletromagnéticas com comprimento de onda variando entre um milímetro e um metro, com frequência entre 300 MHz e 300 GHz. A onda eletromagnética é um campo elétrico conjugado com um campo magnético que servem para transmitir informação ou energia. A estrutura da onda pode ser visualizada na Figura 1.

Figura 1 - Onda Eletromagnética com componente de campo magnético em vermelho e componente de campo elétrico em azul



Fonte: Info Escola, 2014.

O comprimento de onda é caracterizado pela frequência e pela velocidade da onda. A Equação 2.1 define o comprimento de onda λ .

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad 2.1$$

Em que:

v: velocidade de propagação da onda (m/s);

f: frequência da onda (Hz).

A velocidade de propagação de onda eletromagnética no vácuo é igual a velocidade da luz, aproximadamente 3×10^8 m/s. Entretanto, dependendo do material em que a onda se propague, a velocidade será alterada de acordo com as propriedades do meio.

Os materiais podem ser classificados de acordo com sua condutividade, como condutores ou não-condutores. Materiais com elevada condutividade são denominados metais e aqueles com baixa condutividade são denominados isolantes. Os materiais com condutividade intermediária entre a dos metais e dos isolantes são classificados como semicondutores. Os isolantes e os semicondutores também são denominados materiais dielétricos. A principal diferença entre os metais e os dielétricos é a quantidade de elétrons livres para condução de corrente elétrica.

As ondas eletromagnéticas são descritas pelas Equações de Maxwell, que relacionam as variações de campo elétrico e magnético, cargas e correntes elétricas, envolvendo as relações existentes entre as grandezas eletromagnéticas (LIMA, 2006).

2.1.1 Equações de Maxwell

Segundo Balanis(1989), as equações de Maxwell em um meio isotrópico (meio em que as propriedades do material não variam com a direção do campo aplicado) podem ser descritas na forma diferencial como:

- Lei de Gauss

$$\nabla \cdot \epsilon \vec{E} = \rho_v \quad 2.2$$

Em que ϵ é a permissividade elétrica do meio(F/m), \vec{E} é o campo elétrico (V/m) e ρ_v é a densidade volumétrica de carga (C/m³). A Equação 2.2 mostra que as cargas elétricas definidas por ρ_v criam um campo elétrico contrário a elas. A Lei de Gauss também é definida para o magnetismo da seguinte forma:

$$\nabla \cdot \mu \vec{H} = 0 \quad 2.3$$

Sendo μ a permeabilidade magnética (H/m), \vec{H} o campo magnético (A/m). A Equação 2.3 representa matematicamente a inexistência de monopólos magnéticos e afirma que o fluxo magnético é conservativo.

- Lei de Faraday

$$\nabla \times \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad 2.4$$

A Lei de Faraday evidencia que o fluxo magnético variável no tempo produz um campo elétrico rotacional a ele. O sinal negativo é a representação da Lei de Lenz, que exprime que o campo elétrico induzido se opõe às variações do fluxo magnético.

- Lei de Ampère

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad 2.5$$

Em que \vec{J} é a densidade de corrente de condução (A/m²). A Equação 2.5 define que um fluxo elétrico variável no tempo, juntamente com elementos de corrente, ou não, geram campos magnéticos rotacionais aos elementos geradores.

A onda eletromagnética é regida pelas Equações 2.4 e 2.5, que indicam que um campo magnético variável gera um campo elétrico também variável e vice-versa. Sendo assim, desde que exista esta variação, os campos sempre existirão simultaneamente.

Diante disso, as micro-ondas são utilizadas, normalmente, para interagirem com materiais dielétricos. O comportamento desta interação depende não só de características intrínsecas dos materiais como permissividade elétrica, condutividade elétrica e permeabilidade magnética, mas também da frequência de operação.

A permissividade elétrica, também conhecida como constante dielétrica, é um parâmetro que indica a capacidade relativa de acumular energia em um material dielétrico (BALANIS, 1989), quanto maior a permissividade, maior esta capacidade.

Quando as micro-ondas interagem com um meio com perdas, a permissividade elétrica passa a ser uma variável complexa com a parte imaginária sempre negativa (COLLINS, 1992). A Equação 2.6 apresenta a permissividade complexa:

$$\epsilon = \epsilon' - j\epsilon'' \quad 2.6$$

A perda de energia em um material dielétrico também pode ocorrer devido à presença de uma condutividade elétrica finita σ .

A definição da quantidade de energia dissipada por uma onda eletromagnética propagando em um meio qualquer é obtida pelo vetor de Poynting, apresentada na Equação 2.7.

$$\vec{S}(\omega) = \frac{1}{2}[\vec{E}(\omega) \times \vec{H}(\omega)] \quad 2.7$$

O campo de aplicação das micro-ondas abrange os setores de comunicação, radares e no aquecimento de materiais, sendo esse último o foco deste trabalho.

2.1.2 Aquecimento por micro-ondas

O aquecimento por meio de ondas eletromagnéticas tem sido amplamente utilizado em vários ramos da indústria e da medicina. As aplicações mais comuns desse método são: cocção e desidratação de alimentos, secagem de materiais, aceleração de reações químicas, tratamento de células cancerígenas e processamento de polímeros (OSEPCHUK, 2002).

O aquecimento utilizando micro-ondas apresenta algumas vantagens quando comparado ao aquecimento convencional.

No aquecimento convencional, a superfície do material é aquecida e o aquecimento para o interior é feito por convecção, o que pode causar um elevado gradiente de aquecimento, entre o exterior e o interior do material, e em consequência pode levar à redução da qualidade final do produto. O aquecimento por micro-ondas possibilita menores diferenças de temperatura, já que as ondas penetram no material possibilitando um aquecimento mais uniforme em todo o volume (MUKENDI, 2006).

A velocidade da transferência de calor e o tempo reduzido são vantagens presentes do aquecimento por micro-ondas. Além disso, o controle durante o processo é mais simples e rápido do que com o procedimento convencional, já que é necessário apenas ligar ou desligar o gerador (MUKENDI, 2006).

A faixa de frequência estabelecida para aplicações científicas, médicas e industriais (ISM) é de 6,78 MHz até 245 GHz, abrange as duas frequências mais utilizadas para o aquecimento, 915 MHz e 2,45 GHz. A escolha dessas frequências não se dá necessariamente por serem as mais adequadas, mas sim por não existirem geradores de potência adequados para outras frequências

(BENGTSSON e OHLSSON, 1974). A frequência de 2,45 GHz é utilizada em diversas aplicações, inclusive fornos domésticos, já a frequência de 915 MHz é apenas para propósitos industriais (CHAN e CHOW, 2000).

Nesta faixa de frequência existem dois mecanismos para conversão de energia eletromagnética em energia térmica: a condutividade elétrica e a relaxação dos dipolos elétricos (METAXAS e MEREDITH, 1993).

A condutividade elétrica predomina para frequências mais baixas de micro-ondas, menores que 896 MHz. A conversão em calor ocorre devido à corrente que flui dentro do material gerando calor por efeito Joule. Essa corrente é formada devido aos íons presentes no material e a presença do campo elétrico da onda. A densidade de potência referente à condutividade é:

$$P_c = \frac{1}{2} \sigma |\bar{E}|^2 \quad 2.8$$

Em que:

σ : condutividade elétrica do material dielétrico;

$|\bar{E}|$: módulo do campo elétrico.

O segundo mecanismo ocorre em frequências mais elevadas e em função da interação dos dipolos presentes na estrutura molecular do material com o campo eletromagnético aplicado. Nos fornos de micro-ondas, os dipolos da água são os que absorvem a maior parte da energia eletromagnética. Nas frequências baixas, os dipolos se orientam facilmente com as mudanças no campo, entretanto, em altas frequências, a inércia dos dipolos impede que eles se alinhem com o campo, fazendo com que ocorra vibração e consequente liberação de calor.

A densidade de potência associada à relaxação dos dipolos é:

$$P_{dp} = \frac{1}{2} \omega \varepsilon'' |\bar{E}|^2 \quad 2.9$$

Em que:

ω : frequência angular;

ε'' : parte imaginária da permissividade complexa.

Com a finalidade de abranger os dois mecanismos de conversão, define-se a permissividade elétrica efetiva. Fazendo essa definição, trata-se os efeitos da condutividade e permissividade na mesma equação (OLIVEIRA, 2007). A equação baseada no conceito de permissividade efetiva é:

$$\varepsilon_{ef} = \varepsilon_0 \varepsilon_r' - j \varepsilon_0 \left(\varepsilon_r'' + \frac{\sigma}{\varepsilon_0 \omega} \right)$$

$$\varepsilon_{cr}'' = \left(\varepsilon_r'' + \frac{\sigma}{\varepsilon_0 \omega} \right)$$
2.10

em que o subscrito r indica que a permissividade é relativa, cr indica a permissividade complexa relativa efetiva e ε_0 representa a permissividade do vácuo.

Sendo assim, as equações 2.8 e 2.9 podem ser substituídas pela Equação 2.11:

$$P = \frac{1}{2} \omega \varepsilon_0 \varepsilon_{cr}'' |\bar{E}|^2$$
2.11

A conversão da potência eletromagnética absorvida pelo material em calor é tratada pela Equação de Transferência de Calor, também conhecida como Equação de Fourier (TORRES e JECKO, 1997), pode ser vista na Equação 2.12.

$$\rho_m C_m \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} = k_t \nabla^2 T(x, y, z, t) + P_d(x, y, z, t)$$
2.12

Em que:

ρ_m : densidade do meio ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$);

C_m : calor específico do meio ($\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$);

k_t : condutividade térmica do meio ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$);

$T(x, y, z, t)$: temperatura do meio (K);

$P_d(x, y, z, t)$: densidade de potência eletromagnética ($\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$).

A taxa de aquecimento do material dielétrico irradiado com micro-ondas é dada pela densidade de potência eletromagnética expressa pela Equação 2.11, representado por $P_d(x, y, z, t)$ na Equação 2.12.

A variação de temperatura altera as propriedades dos dielétricos, modificando os valores de condutividade e permissividade. Essa variação modifica a taxa real de potência dissipada no material, tornando processos numéricos, que levem em consideração estas mudanças, complexos e numericamente dispendiosos.

Os valores de permissividade efetiva complexa calculados considerando a variação de temperatura são definidos segundo a Equação 2.13, elaborada por Cole e Cole (1941), que rege a maioria dos processos de aquecimento dos líquidos dielétricos.

$$\varepsilon^*(f, T) = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s(T) - \varepsilon_\infty}{1 + j \left(\frac{f}{f_{rel}(T)} \right)^{1-\beta}} - j \frac{\sigma_{DC}(T)}{2\pi f \varepsilon_0} \quad 2.13$$

em que $\varepsilon_s(T)$ é a constante dielétrica estática em função da temperatura em graus Celsius, ε_∞ é a constante dielétrica em uma frequência infinita, f_{rel} é a frequência de relaxação em função da temperatura em graus Celsius, β é um fator que leva em consideração o atraso na relaxação dipolar, $\sigma_{dc}(T)$ é a condutividade DC em função da temperatura.

As variáveis presentes na Equação 2.13, que são funções da temperatura podem ser calculadas segundo as Equações 2.14, 2.15 e 2.16 desenvolvidas por Wraith e Or(1999); Stogryn(1971); Ulany, Moore e Fung (1986), respectivamente.

$$\varepsilon_s[T(^{\circ}C)] = 87.74 - 0.4008T(^{\circ}C) + 9.398 \cdot 10^{-4}T(^{\circ}C)^2 - 1.410 \cdot 10^{-6}T(^{\circ}C)^3 \quad 2.14$$

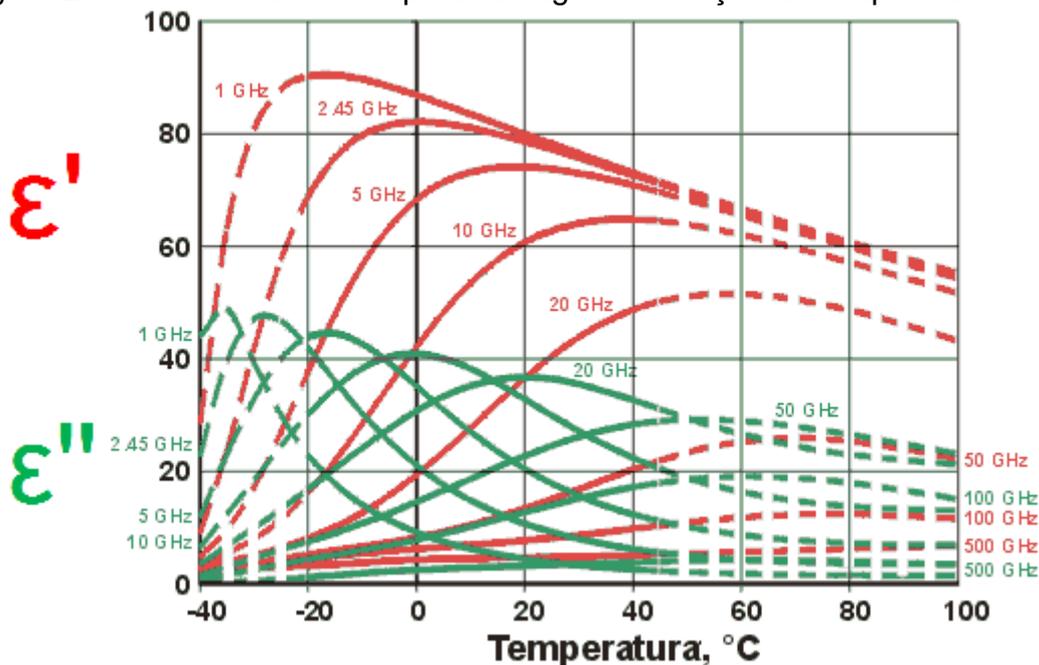
$$f_{rel}[T(^{\circ}C)] = (1.1109 \cdot 10^{-10} - 3.824 \cdot 10^{-12}T(^{\circ}C) + 6.938 \cdot 10^{-14}T(^{\circ}C)^2 - 5.096 \cdot 10^{-16}T(^{\circ}C)^3)^{-1} \quad (\text{Hz}) \quad 2.15$$

$$\sigma_{DC}[T(^{\circ}C)] = \sigma_{DC(25^{\circ}C)} \exp[-\Delta_T(2.033 \cdot 10^{-2} + 1.266 \cdot 10^{-4}\Delta_T + 2.464 \cdot 10^{-4}\Delta_T^2)] \quad (\text{dS/m}) \quad 2.16$$

em que $\Delta_T = [25 - T(^{\circ}C)]$, e $\sigma_{DC(25^{\circ}C)}$ é a condutividade em corrente contínua do meio a 25 °C.

A Figura 2 apresenta o comportamento da parte real e da parte imaginária da permissividade complexa da água variando em função da temperatura.

Figura 2 – Permissividade complexa da água em função da temperatura em °C



Fonte: Adaptado de Chaplin, 2014.

Na Figura 2, para a frequência de 2,45 GHz, é possível visualizar que as partes real e imaginária diminuem com o aumento de temperatura, a partir de 0 °C. Essa diminuição implica em uma menor absorção de energia eletromagnética, tornando o aquecimento por micro-ondas mais lento.

A análise numérica de sistemas de aquecimento trabalha com os valores de potência dissipada no material levando em consideração o comportamento em estado permanente do campo eletromagnético que depende das propriedades do meio. Quando o meio aquece e suas propriedades são alteradas, toda a análise tem que ser refeita para se obter um novo estado em regime e um novo valor de potência dissipada, para que possa ser calculado a nova taxa de aquecimento.

Os próximos itens irão tratar da descrição do sistema de aquecimento e dos métodos numéricos mais comuns para a análise.

Os sistemas de aquecimento por micro-ondas consistem basicamente de: um gerador de micro-ondas, um guia de onda e a cavidade de aquecimento. O Item 2.1.3 explicará cada parte desse sistema.

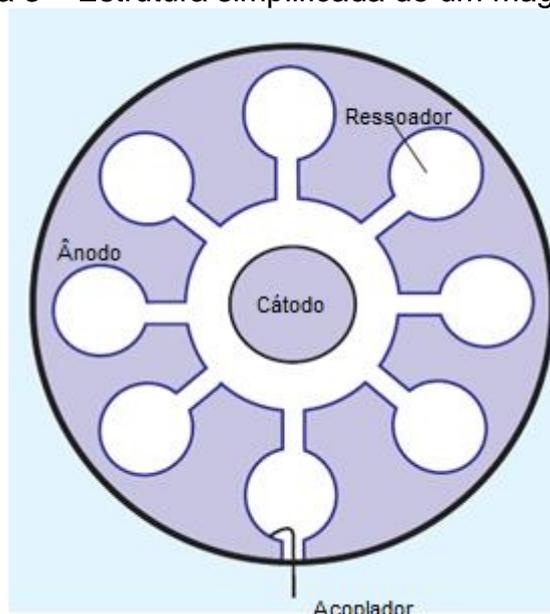
2.1.3 Sistema de aquecimento por micro-ondas

A descrição do funcionamento e das características de cada item do sistema permite que se compreenda como cada componente influencia no processo de aquecimento.

2.1.3.1 Gerador de micro-ondas

Os geradores de micro-ondas mais conhecidos são o *magnetron*, *power grid*, *klystron* e *gyrotron*, que geram ondas eletromagnéticas nas frequências citadas no Item 2.1.2. O *magnetron* pode ser definido como uma forma de diodo cilíndrico a vácuo com um campo magnético axial, consistindo basicamente de um bloco cilíndrico (ânodo) com um espaço central (cátodo), posicionado axialmente. A estrutura do *magnetron* pode ser vista na Figura 3.

Figura 3 – Estrutura simplificada de um *magnetron*



Fonte: Vollmer, 2004.

O *magnetron* permite que sejam criadas ondas eletromagnéticas pulsadas ou contínuas, com potência na ordem dos megawatts e frequência entre 1GHz e 40 GHz, com eficiência de aproximadamente 80% e vida útil de 5000 horas. Uma tensão da ordem de kV é aplicada entre os eletrodos e um campo magnético é aplicado paralelamente ao eixo, de forma que os campos fiquem perpendiculares entre si (VOLLMER, 2004).

O Committee on Microwave Processing of Materials (1994) define os outros tipos de geradores da seguinte forma:

- O *power grid* é um gerador de baixo custo, utilizado em baixas frequências, semelhante aos geradores de transmissão de ondas AM e FM;
- O gerador *klystron* é utilizado para gerar ondas pulsadas de grande potência. Utilizados em radares, processos industriais, pesquisas científicas e na medicina, no tratamento do câncer;
- Para gerar ondas de grande potência e altas frequência é utilizado o *gyrotron*, utilizado em processos de fusão através de plasma.

O campo criado pelo gerador é enviado à cavidade de aquecimento através do guia de onda.

2.1.3.2 Guia de onda

Um guia de onda é uma estrutura guiante, longitudinal, de estrutura metálica, utilizada para o transporte de informação e energia (FONTANA, 2013). O efeito das condições de contorno das guias propicia uma distribuição de campo elétrico e magnético, perpendicular aos dois eixos, semelhante a uma onda estacionária, conhecidos como ondas TE ou TM (BALANYS, 1989).

As dimensões desse guia variam de acordo com o comprimento de onda utilizado. Para uma determinada direção perpendicular ao eixo, o diâmetro interno da guia deverá ser, no mínimo, a metade do comprimento que ela transmitirá. Considerando uma guia que terá uma micro-onda com frequência igual a 2,45 GHz ($\lambda = 12,2$ cm), pelo menos uma das duas dimensões deverá ser maior que 6,1 cm.

Os guias, quanto à forma, podem ser retangulares, circulares ou elípticas. Quanto ao preenchimento podem ser parcialmente ou completamente preenchidas por material dielétrico ou sem nenhum material em seu interior. A Figura 4 apresenta uma guia de onda dimensionada para operar em uma faixa entre 2,2 e 3,3 GHz.

Figura 4 – Guia de onda retangular WR-340



Fonte: Luxtem, 2014.

Após a onda eletromagnética ser emitida pelo *magnetron*, ela é conduzida pela guia para a cavidade de aquecimento.

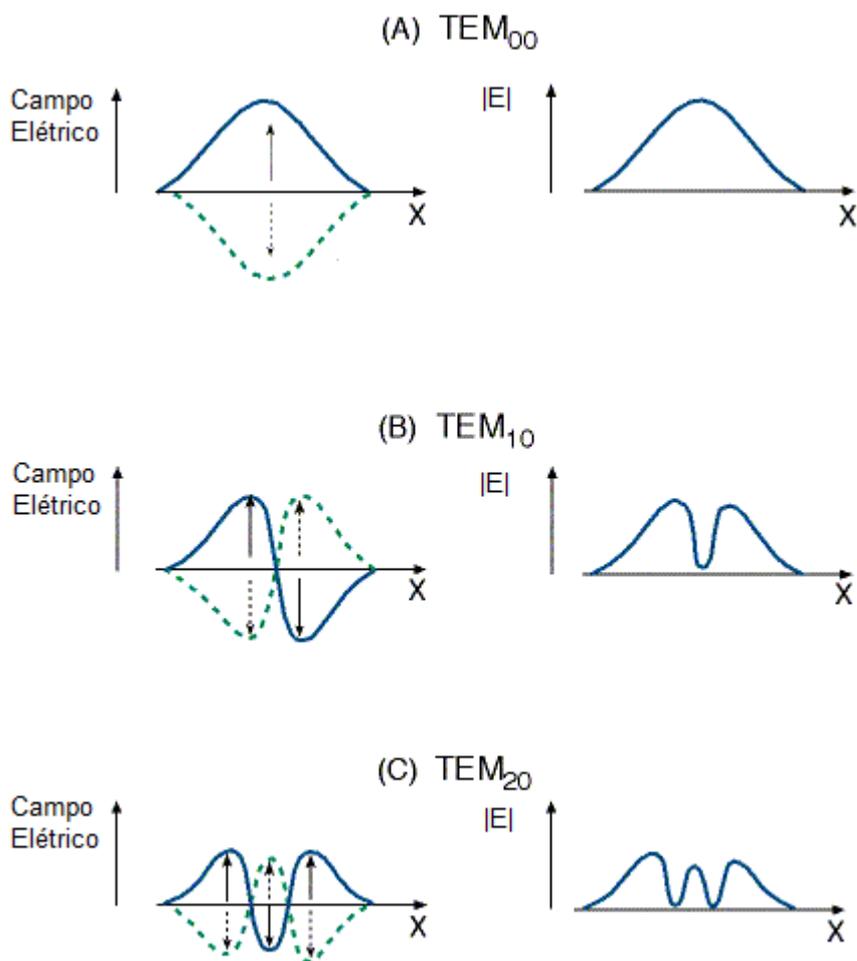
2.1.3.3 Cavidade

As cavidades ressonantes são componentes de micro-ondas utilizados não só no aquecimento, mas também como medidores de frequência ou analisadores de propriedades elétricas de materiais. São amplamente utilizadas devido ao seu alto fator de qualidade, normalmente em torno de 5000 a 10000, e sua simplicidade na construção (BALANIS, 1989).

A construção de uma cavidade consiste em isolar uma seção de um guia com placas condutores nas duas faces. A conexão com a cavidade é feita por meio de *probes* ou orifícios, como o visto na guia da Figura 4.

As cavidades são classificadas de acordo com a quantidade de modos que podem conter. O modo é uma configuração de campo específica que é uma solução para um dado problema eletromagnético delimitado pelas suas condições de contorno. Para um mesmo problema, podem existir diversas soluções e cada solução é conhecida como modo. A Figura 5 apresenta exemplos de configuração de modos.

Figura 5 – Exemplo de modos transversais

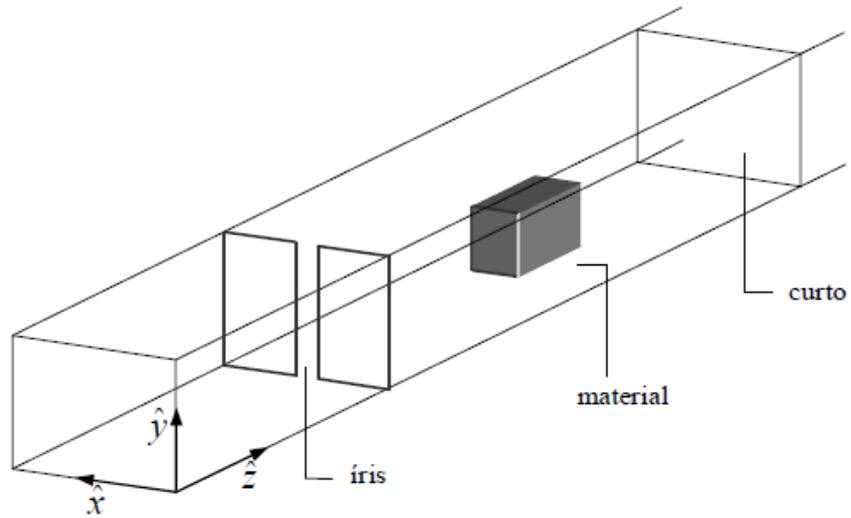


Fonte: Arieli, 2014.

A diferença básica entre os tipos de cavidade é que a primeira apresenta apenas um modo de propagação da onda, enquanto a segunda pode apresentar vários modos.

A cavidade monomodo é utilizada normalmente em aplicações onde o tamanho e a perda do material processado são pequenos, sendo sua utilização restrita em aplicações industriais (OLIVEIRA, 2007). Sua construção é constituída basicamente por uma íris e por um curto. A Figura 6 apresenta um modelo de uma cavidade monomodo.

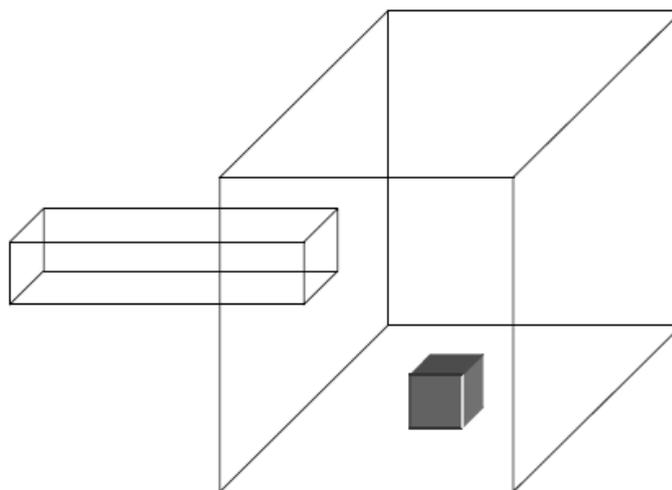
Figura 6 – Cavityde monomodo



Fonte: Oliveira, 2007.

O segundo tipo, a cavidade multimodo, possui a capacidade de processar maior quantidade de material e permite um aquecimento mais uniforme, se o acoplamento com a guia for feito em diversos locais. Essa uniformidade ocorre devido à existência de diversos pontos de máximo nas ondas eletromagnéticas, proporcionando valores de potência dissipada maiores em diversos pontos do material. A Figura 7 exibe uma cavidade multimodo acoplada a uma guia de onda.

Figura 7 – Cavityde multimodo



Fonte: Oliveira, 2007.

O comportamento dos campos nas cavidades depende, além do tipo, da localização da fonte, do volume e do tipo da carga no interior delas. A análise deste comportamento é por meio de método numéricos que analisam iterativamente a relação entre as Equações de Maxwell. O Item 2.1.4 apresenta os métodos mais comuns para essa análise.

2.1.4 Métodos Numéricos

A vasta maioria das análises que envolvem campos eletromagnético requer uma técnica numérica para obter uma solução válida (SADIKU, 2000), dificilmente será encontrado um problema em que seja possível encontrar a solução utilizando métodos analíticos.

Os métodos mais comuns utilizados na análise de campos eletromagnéticos são:

- Método dos elementos finitos (FEM);
- Método dos momentos (MoM);
- Método das linhas de transmissão (TLM);
- Métodos das diferenças finitas no domínio do tempo (FDTD);

Cada método possui sua especificidade e seu campo de aplicação mais indicado. O método dos elementos finitos trabalha dividindo o espaço da simulação em formas geométricas arbitrárias, sendo indicado para análise de campos em elementos de geometria complexa (INAM e MARSHALL, 2011). As formas geométricas mais comuns aplicadas a este método são os tetraedros e os triângulos. A solução deste método não é através da solução das Equações de Maxwell diretamente, mas por aproximação por meio de funções polinomiais em cada subdomínio do espaço, respeitando as condições de contorno da simulação.

O método dos momentos converte as Equações de Maxwell na sua forma integral em sistemas lineares por meio de funções base que relacionam variáveis desconhecidas do sistema com funções impostas conhecidas, como as fontes de excitação. Cada função base da solução interage entre si por meio da função de Green. A escolha da função base é arbitrária, mas a mais comum é a do método de Galerkin, em que a própria função base pode ser usada como função de

comparação. O método dos momentos é utilizado para resolver principalmente problemas no domínio da frequência (GIBSON, 2008).

O método das linhas de transmissão é um processo que resolve problemas eletromagnéticos convertendo-os em seus equivalentes elétricos das linhas de transmissão, sendo simples sua formulação e programação (SADIKU, 2000). Pode ser aplicado em situações com meios não homogêneos (diferentes características), não lineares (as propriedades variam com a localização), e meios anisotrópicos (características variam de acordo com a dimensão) com propriedades dependentes do tempo e com geometrias variadas. Esse método é apropriado para o estudo de ondas milimétricas e micro-ondas, em que o que realmente interessa é o comportamento da onda, seja a propagação, transmissão ou reflexão. O desenvolvimento do método é baseado no princípio de Huygens por meio de elementos discretos (FILHO, 1997).

O método das diferenças finitas no domínio do tempo é usado para cálculo de campos eletromagnéticos utilizando equações discretizadas no espaço e no tempo (LIMA, 2006). A simplicidade matemática do método, por não utilizar conceitos de álgebra linear, a facilidade e rapidez no desenvolvimento do algoritmo popularizou o desenvolvimento e a utilização deste método que consiste na solução das Equações de Maxwell por meio da aproximação por diferenças finitas centrais de forma iterativa, atendendo as condições de contorno impostas pelo método.

O método escolhido para as análises deste trabalho foi o método das diferenças finitas no domínio no tempo, do inglês *Finite Difference Time Domain* (FDTD). O Item 2.1.4.1 irá tratar especificamente sobre esse método.

2.1.4.1 Método FDTD

O método das diferenças finitas no domínio do tempo foi criado por Yee (1966) com o objetivo de solucionar as equações rotacionais de Maxwell diretamente no domínio do tempo em um espaço discretizado. O algoritmo do método FDTD foi desenvolvido por Taflove e Brodwin (1975) em que eles adicionaram a correta condição de contorno para o método, depois Mur(1981) criou a primeira condição absorvente de contorno (ABC) numericamente estável e com segunda ordem de precisão para a malha de Yee.

O método FDTD possui uma série de vantagens em comparação aos outros métodos (INAM e MARSHALL, 2011), como:

- Rápido desenvolvimento;
- Algoritmo simples e intuitivo;
- Não necessita da aplicação de álgebra linear ou de inversão de matrizes em sua forma tradicional.

Em contrapartida, o método FDTD apresenta a desvantagem de não representar devidamente objetos com geometria que não seja retangular. Além dessa desvantagem, tem seu tempo de simulação limitado pela dimensão do espaço que se deseja analisar, fazendo com que a simulação consuma muito tempo até encontrar uma solução.

A análise dos campos utilizando o método FDTD considera as equações de Maxwell na forma diferencial, de acordo com as Equações 2.4 e 2.5, sendo esta modificada de acordo com a Equação 2.17.

$$\nabla \times \vec{H} = \sigma \vec{E} + \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad 2.17$$

As Equações 2.5 e 2.17 podem ser reescritas em coordenadas retangulares segundo apresentado no conjunto de Equações 2.18 e 2.19, respectivamente.

$$\begin{aligned} \frac{\partial H_x}{\partial t} &= \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_y}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial y} \right) \\ \frac{\partial H_y}{\partial t} &= \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial z} \right) \\ \frac{\partial H_z}{\partial t} &= \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x} \right) \end{aligned} \quad 2.18$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial E_x}{\partial t} &= \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} - \sigma E_x \right) \\ \frac{\partial E_y}{\partial t} &= \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} - \sigma E_y \right) \\ \frac{\partial E_z}{\partial t} &= \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} - \sigma E_z \right) \end{aligned} \quad 2.19$$

De acordo com a notação desenvolvida por Yee (1966) pode-se definir um ponto da solução de acordo com a Equação 2.20.

$$(i, j, k) = (i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z) \quad 2.20$$

Qualquer função definida no espaço e no tempo é definida pela mesma notação segundo a Equação 2.21.

$$F^n(i, j, k) = F(i\delta, j\delta, k\delta, n\Delta t) \quad 2.21$$

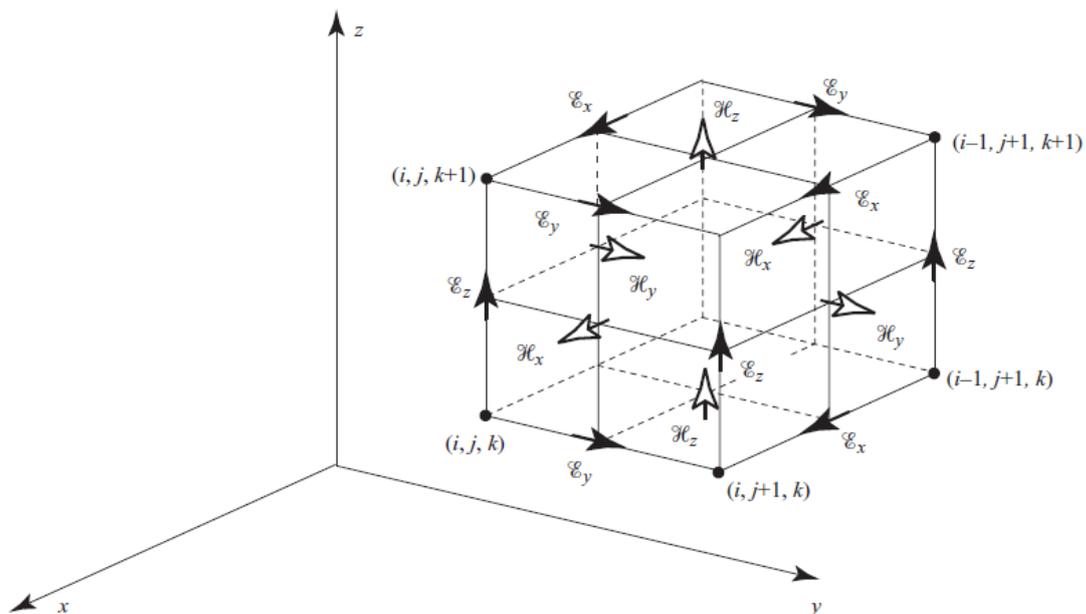
em que $\delta = \Delta x = \Delta y = \Delta z$ é o incremento espacial e Δt o incremento temporal, enquanto i, j, k e n são valores inteiros. Segundo Sadiku (2000), depois de aplicar a aproximação por diferença finita central na Equação 2.21 para o espaço e o tempo, obtém-se as Equações 2.22 e 2.23.

$$\frac{\partial F^n(i, j, k)}{\partial x} = \frac{F^n(i + 1/2, j, k) - F^n(i - 1/2, j, k)}{\delta} + O(\delta^2) \quad 2.22$$

$$\frac{\partial F^n(i, j, k)}{\partial x} = \frac{F^{n+1/2}(i, j, k) - F^{n-1/2}(i, j, k)}{\Delta t} + O(\Delta t^2) \quad 2.23$$

Aplicando as Equação 2.22 e 2.23 as Equações 2.18 e 2.19, obtém-se as aproximações das diferenças finitas das equações de Maxwell. Essa aproximação relaciona os campos elétricos e magnéticos em uma malha 3D conhecida como o cubo de Yee, apresentado na Figura 8.

Figura 8 – Célula de Yee



Fonte: Inam e Marshall, 2011.

As Equações 2.18 e 2.19 são representas em sua forma discretizada segundo a notação de Yee tem a estrutura apresentada nas Equações 2.24 e 2.25, respectivamente.

$$\begin{aligned}
 H_x \Big|_{i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} &= H_x \Big|_{i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}^{n-\frac{1}{2}} + \frac{\Delta t}{\mu_{i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}} \left[\frac{E_y \Big|_{i,j+\frac{1}{2},k+1}^n - E_y \Big|_{i,j+\frac{1}{2},k}^n}{\Delta z} - \right. \\
 &\quad \left. \frac{E_z \Big|_{i,j+1,k+\frac{1}{2}}^n - E_z \Big|_{i,j,k+\frac{1}{2}}^n}{\Delta y} \right] \\
 H_y \Big|_{i+\frac{1}{2},j,k+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} &= H_y \Big|_{i+\frac{1}{2},j,k+\frac{1}{2}}^{n-\frac{1}{2}} + \frac{\Delta t}{\mu_{i+\frac{1}{2},j,k+\frac{1}{2}}} \left[\frac{E_z \Big|_{i+1,j,k+\frac{1}{2}}^n - E_z \Big|_{i,j,k+\frac{1}{2}}^n}{\Delta x} - \right. \\
 &\quad \left. \frac{E_x \Big|_{i+1/2,j,k+1}^n - E_x \Big|_{i+\frac{1}{2},j,k}^n}{\Delta z} \right] \\
 H_z \Big|_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k}^{n+\frac{1}{2}} &= H_z \Big|_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k}^{n-\frac{1}{2}} + \frac{\Delta t}{\mu_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k}} \left[\frac{E_x \Big|_{i+\frac{1}{2},j+1,k}^n - E_x \Big|_{i+\frac{1}{2},j,k}^n}{\Delta y} - \right. \\
 &\quad \left. \frac{E_y \Big|_{i+1,j+\frac{1}{2},k}^n - E_y \Big|_{i,j+1/2,k}^n}{\Delta x} \right]
 \end{aligned} \tag{2.24}$$

$$\begin{aligned}
E_x|_{i+\frac{1}{2},j,k}^{n+1} &= E_x|_{i+\frac{1}{2},j,k}^n + \frac{\Delta t}{\varepsilon_{i+\frac{1}{2},j,k}} \left[\frac{H_z|_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k}^{n+\frac{1}{2}} - H_z|_{i+\frac{1}{2},j-\frac{1}{2},k}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y} - \right. \\
&\quad \left. \frac{H_y|_{i+\frac{1}{2},j,k+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} - H_y|_{i+\frac{1}{2},j,k-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta z} \right] \\
E_y|_{i,j+\frac{1}{2},k}^{n+1} &= E_y|_{i,j+\frac{1}{2},k}^n + \frac{\Delta t}{\varepsilon_{i,j+\frac{1}{2},k}} \left[\frac{H_x|_{i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} - H_x|_{i,j+\frac{1}{2},k-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta z} - \right. \\
&\quad \left. \frac{H_z|_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k}^{n+\frac{1}{2}} - H_z|_{i-\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x} \right] \\
E_z|_{i,j,k+\frac{1}{2}}^{n+1} &= E_z|_{i,j,k+\frac{1}{2}}^n + \frac{\Delta t}{\varepsilon_{i,j,k+\frac{1}{2}}} \left[\frac{H_y|_{i+\frac{1}{2},j,k+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} - H_y|_{i-\frac{1}{2},j,k+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x} - \right. \\
&\quad \left. \frac{H_x|_{i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} - H_x|_{i,j-\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y} \right]
\end{aligned} \tag{2.25}$$

Para que as análises desenvolvidas utilizando o método FDTD forneçam resultados adequados algumas considerações devem ser tomadas. Essas considerações permitem que se obtenham os resultados com a precisão esperada e a estabilidade adequada para as simulações.

Atendendo o critério definido pela Equação 2.26 resultam na inexistência de erros de fase e magnitude. Essa condição estabelece que o incremento espacial (Δ) deve ser dez vezes menor que o menor comprimento de onda (λ) presente na simulação (Taflove e Korada, 1989).

$$\Delta \leq \frac{\lambda}{10} \tag{2.26}$$

O comprimento de onda é a distância que a onda eletromagnética percorre durante um ciclo de sua frequência, em metros. Para uma onda propagando no vácuo, o comprimento é dado pela relação entre a velocidade da luz, em metros por segundo, e a frequência (Hz) de oscilação da onda. Entretanto, o

comportamento da onda varia de acordo com o meio dielétrico que ela atravessa, causando uma variação no comprimento de onda, dado pela Equação 2.27.

$$\lambda \leq \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r} f} \quad 2.27$$

em que ϵ_r é a maior permissividade relativa que a onda atravessará.

A estabilidade numérica do método FDTD é limitada pelo valor do incremento temporal, que deve satisfazer a Equação 2.28 (Taflove e Brodwin, 1971).

$$\Delta t \leq \frac{1}{v_{\max} \sqrt{\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} + \frac{1}{\Delta z^2}}} \quad 2.28$$

Em que:

v_{\max} : velocidade máxima de fase esperada no modelo.

A utilização do método FDTD ainda considera o tipo de excitação que deverá ser utilizado, assim como quais serão as condições de contorno aplicadas ao modelo em análise. A escolha desses itens depende de qual o resultado que se espera e da situação que se deseja simular.

O Item 2.1.5 apresentará algumas pesquisas, nacionais e internacionais, em desenvolvimento na área de aquecimento por micro-ondas que utilizam o método FDTD para a análise, como também outros métodos numéricos.

2.1.5 Estado da Arte

O trabalho desenvolvido por Torres e Jecko (1997) desenvolveu um novo algoritmo para a análise da influência do aquecimento nas características elétricas dos materiais. Foi analisada a influência da permissividade complexa, segundo o modelo de Debye, e depois a análise dos campos eletromagnéticos foi feita utilizando o método das diferenças finitas no domínio do tempo com frequência dependente ((FD)²TD). Este novo algoritmo foi útil para efetuar as análises e diminuir consideravelmente o tempo de simulação.

A pesquisa de Dev *et al* (2010) utilizou o aquecimento por micro-ondas para verificar a possibilidade da pasteurização de ovos. Foi desenvolvido um modelo utilizando o método FDTD para verificar a intensidade do campo elétrico e a

distribuição de potência no dielétrico, levando em consideração a geometria irregular do material, a composição heterogênea e as propriedades dielétricas complexas.

O trabalho desenvolvido por Rattanadecho (2006) explorou a secagem de madeira em uma guia de onda. O autor utiliza o método FDTD para verificar a distribuição de potência absorvida em um modelo 2D. A influência do tempo de irradiação, da frequência de operação e do volume da madeira são analisados.

A análise da influência das micro-ondas em processos químicos foi verificada por Huang *et al.* (2004), em seu trabalho ele verificou que as micro-ondas aceleram significativamente as reações químicas. Foi desenvolvido um modelo numérico para verificar o aquecimento em reações de saponificação usando FDTD e a influência na equação de transporte de calor. Os resultados obtidos pelo modelo foram confirmados experimentalmente e apresentaram boa precisão.

Pegoraro (2012) desenvolveu o modelo numérico de forno micro-ondas baseada no método dos elementos finitos em que foram verificadas a eficiência, coeficiente de reflexão no interior da cavidade e as formas da carga aquecidas. O método utilizado foi o dos elementos finitos no domínio do tempo em uma formulação no espaço de estados estendida.

Nascimento (2012) verificou o desempenho da hidrólise da cana-de-açúcar na produção de etanol influenciado por micro-ondas em um reator do tipo batelada. A verificação em sua dissertação foi toda experimental e teve o objetivo de aumentar a produção de etanol sem a necessidade de maior quantidade de matéria-prima.

O processamento térmico de materiais cerâmicos utilizando o aquecimento por micro-ondas foi verificado experimentalmente por Luz (2012), em que foi feita a verificação de novas matérias-primas cerâmicas que sejam aptas para serem utilizadas na formulação de novas massas sintetizadas pelo método convencional e por aquecimento por micro-ondas.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente Capítulo caracteriza a pesquisa realizada, de acordo com a metodologia empregada, materiais e meios utilizados em seu desenvolvimento.

3.1 METODOLOGIA DA PESQUISA

A metodologia adotada neste trabalho baseia-se na construção de um modelo numérico utilizando o método numérico FDTD para analisar o aquecimento de materiais dielétricos em fornos de micro-ondas multimodo e a verificação da validade do método por meio experimental.

O desenvolvimento da pesquisa foi realizado em três etapas. A primeira consistiu no levantamento bibliográfico sobre o estado da arte dos modelos numéricos que acoplam análise de campos eletromagnéticos e aquecimento, e as pesquisas desenvolvidas nessa área.

A segunda etapa foi adaptar o modelo numérico desenvolvido por Pavão (2004) para utilizar os valores de potência absorvida no material para utilizar a Equação 2.12 para verificar o aquecimento de água em uma cavidade referente a um forno micro-ondas doméstico. A água estará disposta em diversos pontos da cavidade em cilindros que representam copos plásticos.

Depois de obter os resultados numéricos, a terceira etapa consistiu em validar os resultados de forma experimental. Foi utilizado um forno micro-ondas de 30 litros, com potência útil de saída de 820 W. A água foi disposta em copos descartáveis, em prateleiras de acrílico, e a temperatura foi medida por um termômetro infravermelho.

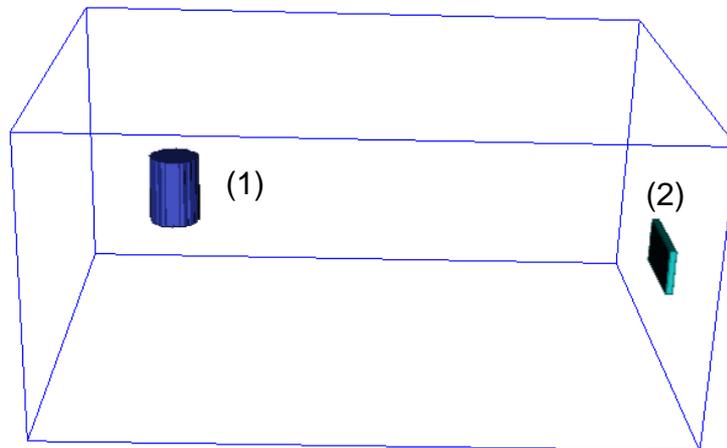
Os itens a seguir apresentam detalhadamente cada etapa.

3.1.1 Análise numérica dos campos eletromagnéticos na cavidade

O estudo do comportamento dos campos eletromagnéticos na cavidade foi feito baseado no modelo desenvolvido por Pavão (2004). O modelo analisa a intensidade dos campos em uma cavidade preenchida total ou parcialmente por materiais dielétricos, permitindo verificar a distribuição dos campos na cavidade para frequências determinadas.

O ambiente da simulação permite inserir materiais dielétricos no interior da cavidade, sendo essa representada pelos limites do ambiente de simulação, sendo também a condição de contorno. A Figura 9 apresenta um exemplo de uma cavidade com um cilindro dielétrico em seu interior.

Figura 9 – Cavidade com limites definidos pelo ambiente de simulação



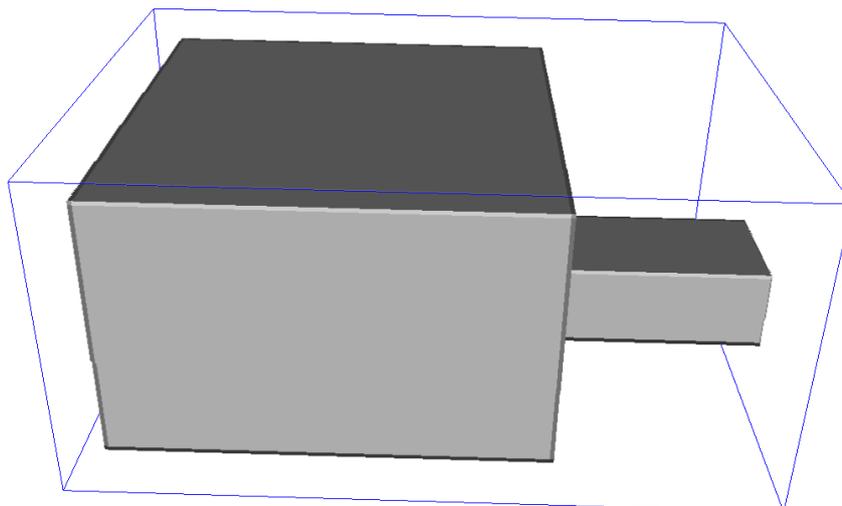
Fonte: Autoria própria, 2014.

A cavidade na Figura 9 apresenta o material dielétrico pelo número (1), a fonte pelo número (2) e os limites da cavidade pelas linhas externas. Este modelo permite verificar o comportamento dos campos elétricos em cavidades ou guias de ondas separadas.

Entretanto, para estudar o comportamento das ondas eletromagnéticas em fornos de micro-ondas é necessário verificar o acoplamento entre guias de onda e cavidades. Para atender a essa necessidade foi acrescentado ao modelo um módulo que permite adicionar materiais perfeitamente condutores, que eram representados apenas pelos limites da cavidade, como na Figura 9.

A Figura 10 apresenta uma cavidade acoplada com uma guia de onda representado pela cor cinza.

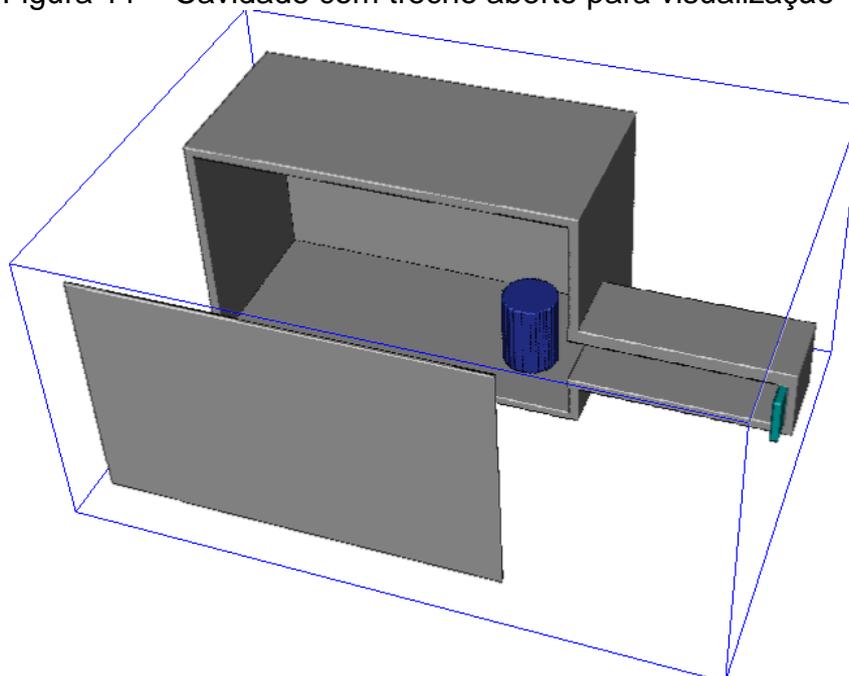
Figura 10 – Cavidade acoplada à guia de onda



Fonte: Autoria própria, 2014.

Diferente da Figura 9, onde era possível visualizar o material dielétrico no interior da cavidade, a Figura 10 só permite a visualização utilizando o sistema de câmera do programa. A Figura 11 apresenta um corte em que se verifica a existência do material no interior da cavidade.

Figura 11 – Cavidade com trecho aberto para visualização



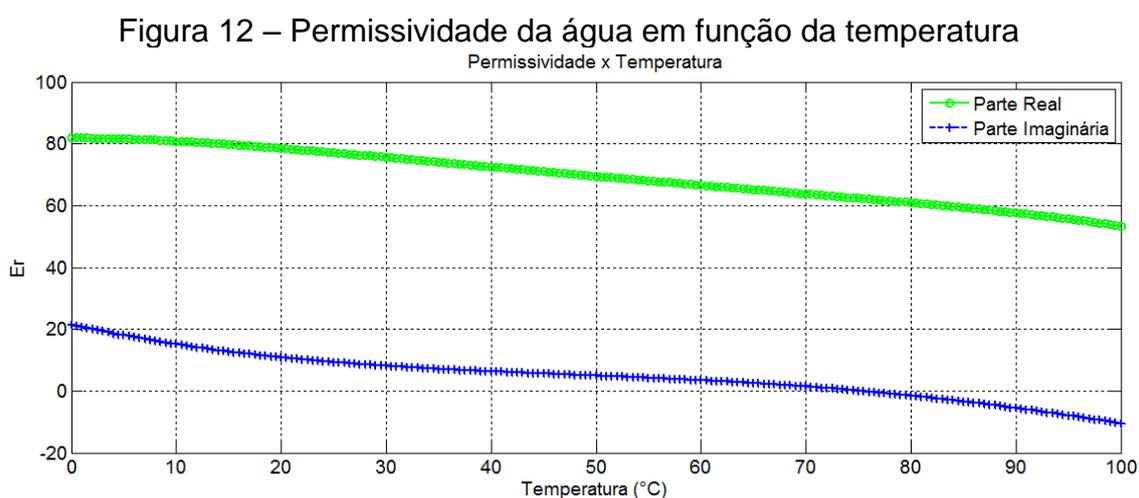
Fonte: Autoria própria, 2014.

Na Figura 11, o material identificado em verde representa a fonte emissora de micro-ondas.

O comportamento do campo eletromagnético no interior da cavidade depende das dimensões do guia e da própria cavidade, além do volume e das

propriedades do material dielétrico em seu interior. O forno micro-ondas utilizado foi um Brastemp BMS45ABBNA de 30 litros, com dimensão interna de 36 x 22 x 37 cm³. Para este trabalho, o prato giratório, que tem a função de proporcionar maior uniformidade de campo, foi retirado. Essa retirada foi em função de que em fornos industriais esse tipo de mecanismo não é utilizado, outros meios são adotados para atingir a uniformidade.

Como observa-se pela Equação 2.13, a permissividade varia com a temperatura e essa variação influencia diretamente no comportamento dos campos e na densidade de potência dissipada no material. Para estabelecer um valor de permissividade em uma faixa de temperatura que forneça resultados adequados para este modelo, foi utilizada a Equação 2.13 para obter todos os valores entre 0 °C e 60 °C para a água. A Figura 12 apresenta a variação da permissividade para essas temperaturas.



Fonte: Autoria própria, 2014.

Considerando que a temperatura inicial das amostras utilizadas estava em 28,5 °C, aproximadamente, o valor médio entre esta temperatura e a temperatura máxima de análise é de 47 °C. Para a temperatura analisada os valores relativos dos componentes real e imaginária da permissividade são 70,4 e 5,31, respectivamente.

O valor da condutividade na Equação 2.13 foi encontrado a partir da Equação 2.16 e do valor de condutividade em corrente contínua a 25 °C fornecido pelo fabricante da água mineral que foi utilizada na parte experimental, que é de 73,4 μS/cm.

Para atender o modelo numérico desenvolvido por Pavão (2004), é necessário calcular o valor de condutividade equivalente que represente as

perdas por rotação do dipolo e por condução. A Equação 3.1 apresenta o cálculo para este valor

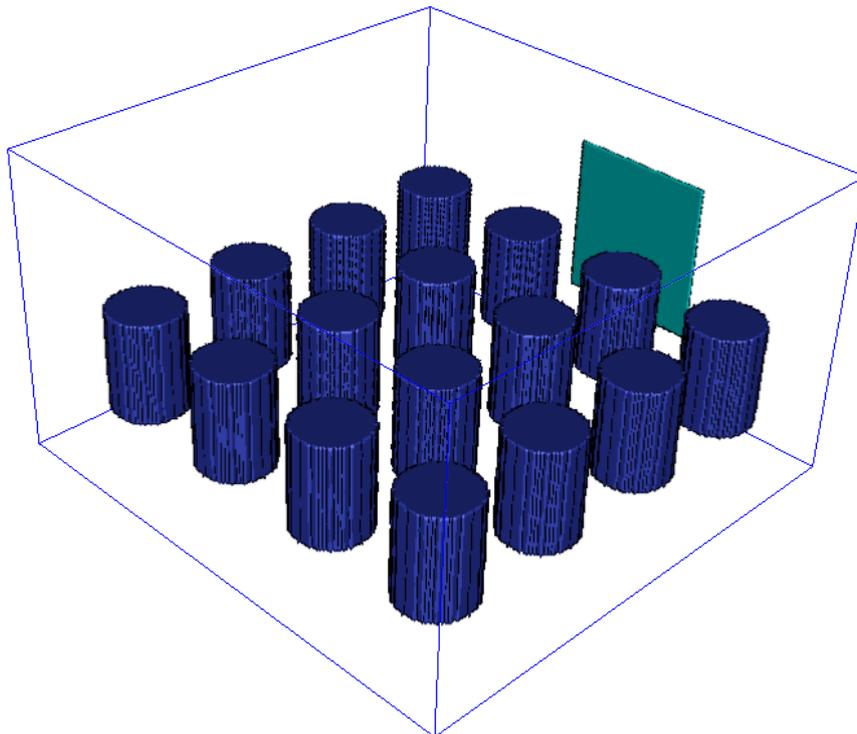
$$\begin{aligned}\sigma_e &= \omega \varepsilon'' \\ \sigma_e &= 2\pi f \cdot 5,31\varepsilon_0 \\ \sigma_e &= 0,7238 \text{ S/m}\end{aligned}\tag{3.1}$$

Depois de obtidos os dados dos materiais, foram criados os arquivos de entrada da simulação. Inicialmente foram analisadas duas situações:

- 16 copos de 150 mL, totalizando 2,4 litros, dispostos ao longo da parte inferior do forno;
- 32 copos de 150 mL, 4,8 litros, localizados em dois níveis dentro do forno.

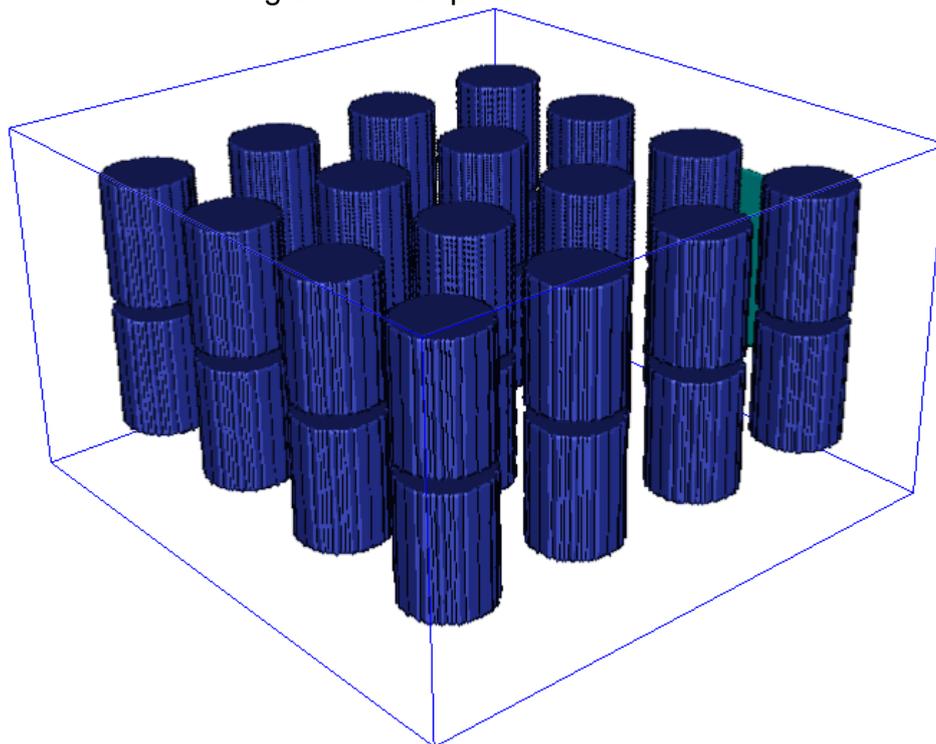
As Figura 13 e Figura 14 apresentam a visualização, sem a parte metálica da cavidade, dos copos dentro do forno micro-ondas nos dois níveis.

Figura 13 – Copos no primeiro nível.



Fonte: Autoria própria, 2014.

Figura 14 – Copos em dois níveis



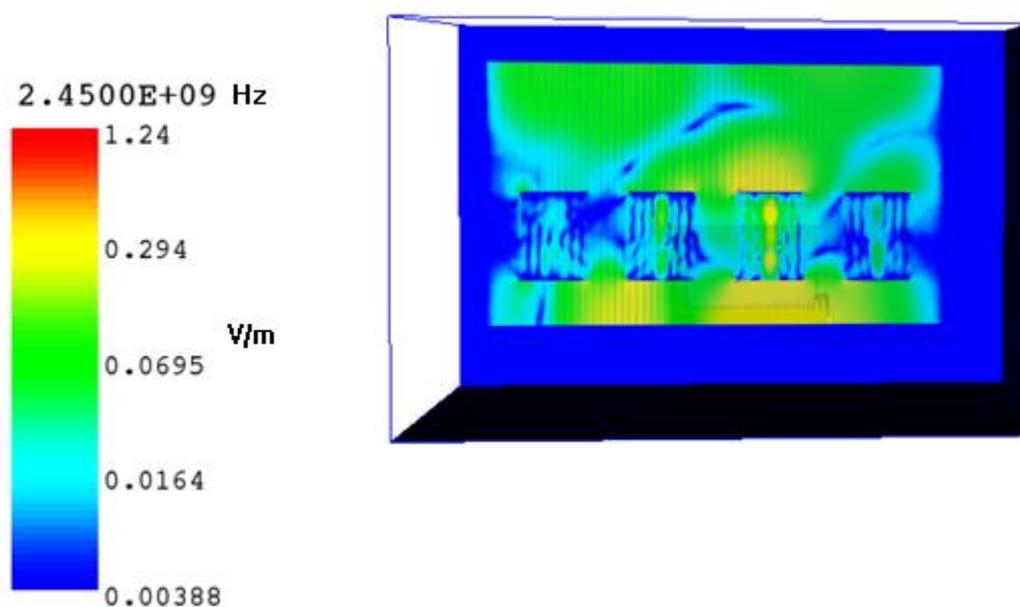
Fonte: Autoria própria, 2014.

O comportamento do campo eletromagnético para os dois cenários pode ser visualizado da Figura 15 à Figura 19.

Os valores de campo elétrico apresentados estão normalizados.

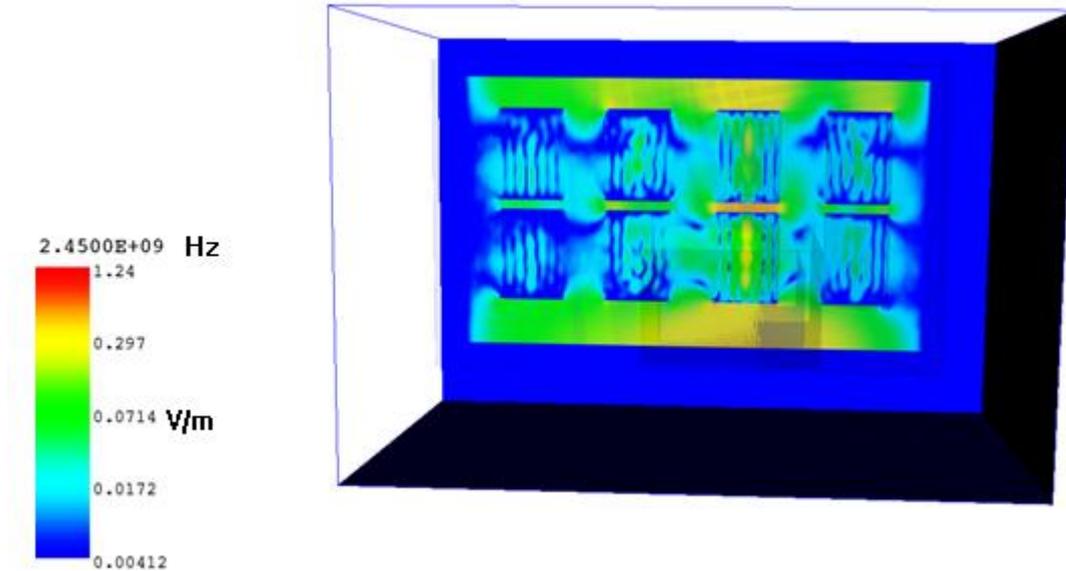
A inserção do campo eletromagnético foi feita através de um guia com as medidas iguais a de um WR-340, excitado em 2,45 GHz, modo TE₁₀.

Figura 15 – 16 copos: visão lateral.



Fonte: Autoria própria, 2014.

Figura 16 – 32 copos: visão lateral.

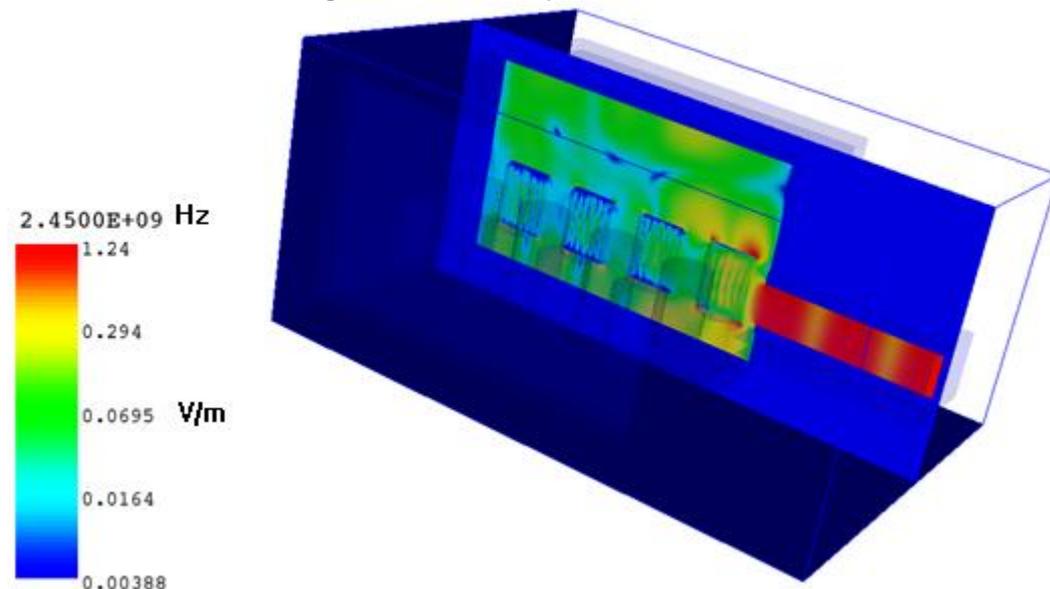


Fonte: Autoria própria, 2014.

As Figura 15 e Figura 16 apresentam a visualização lateral para 16 e 32 copos, respectivamente. Em ambos os casos é possível verificar o mesmo comportamento do campo no nível inferior, sendo a intensidade bem superior para os copos alinhados com o guia e os adjacentes com valores menores.

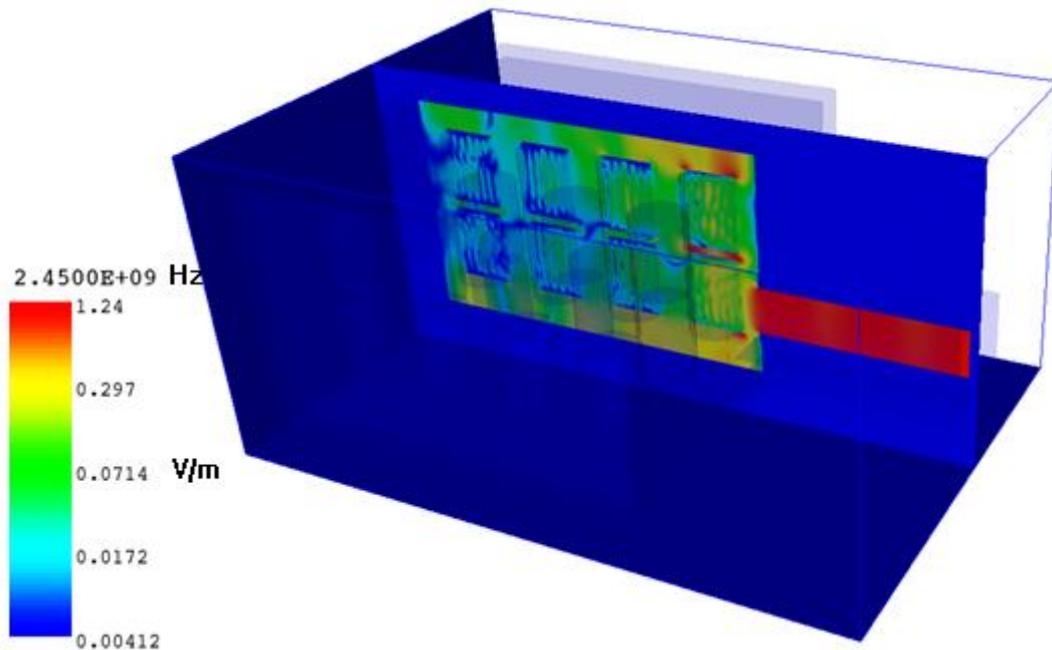
Na Figura 16 verifica-se que para o nível superior a distribuição do campo elétrico é semelhante ao nível inferior, indicando que os copos alinhados com a alimentação absorvem mais energia em virtude de sua localização, enquanto os copos localizados lateralmente possuem intensidades de campos reduzidas.

Figura 17 – 16 copos: visão frontal.



Fonte: Autoria própria, 2014.

Figura 18 – 32 copos: visão frontal.

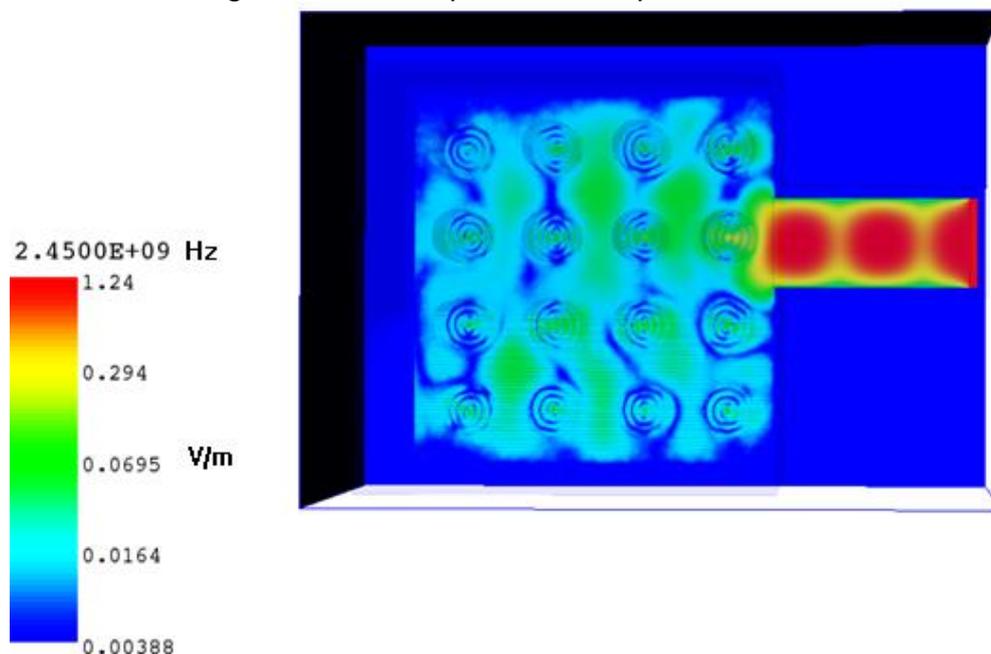


Fonte: Autoria própria, 2014.

Na Figura 17 percebe-se uma distribuição de intensidade do campo mais uniforme nos copos localizados após o copo que está localizado junto à saída do guia.

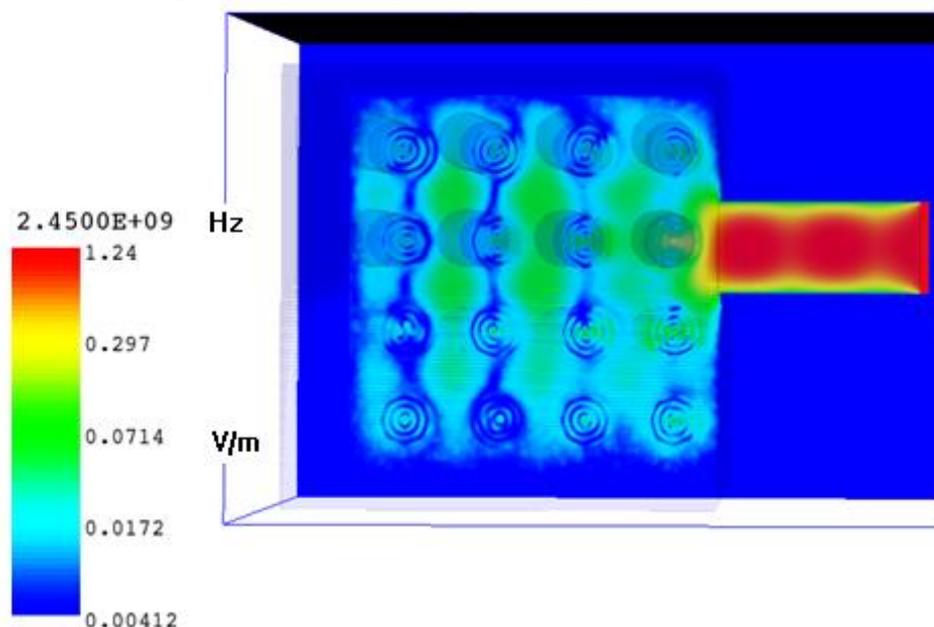
A Figura 18 mostra a distribuição ao longo do eixo do guia, sendo os copos mais afastados da saída do guia com menor intensidade de campo, quando comparados aos copos da Figura 17, para os dois níveis.

Figura 19 – 16 copos: visão superior.



Fonte: Autoria própria, 2014.

Figura 20 – 32 copos: visão superior do nível 1.

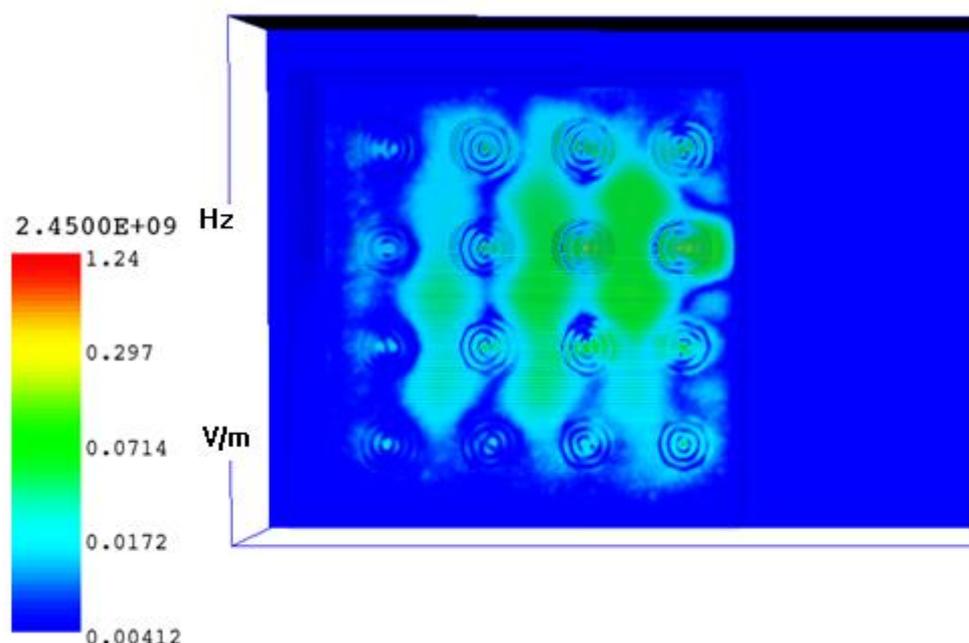


Fonte: Autoria própria, 2014.

As Figura 19, Figura 20 e Figura 21 apresentam a intensidade de campo elétrico em vista superior, para os copos do nível 1, e mostram que no interior dos copos a intensidade é maior e diminui à medida que se dirige à superfície. Esse comportamento ocorre devido à mudança do meio durante a propagação da onda eletromagnética, modificando seus parâmetros. Além disso, a água é um meio com perdas, em que a onda é atenuada à medida que se propaga.

A simulação de 16 copos apresenta maiores intensidades no centro comparada com a de 32 copos. Essa diferença é em função da quantidade de material dielétrico presente na cavidade para a mesma energia eletromagnética fornecida, no mesmo intervalo de tempo.

Figura 21 – 32 Copos: visão superior do nível 2.



Fonte: Autoria própria, 2014.

A Figura 21 apresenta a vista superior para o nível 2 dos 32 copos. Os copos na extremidade oposta do guia (à esquerda), possuem intensidades bem inferiores quando comparadas com os outros elementos.

O modelo computacional desenvolvido por Pavão (2004) também fornece o fator de qualidade Q e a potência total dissipada no dielétrico normalizada em watts.

As simulações foram efetuadas em um computador com processador Intel® Xeon® E5506 de 2,13 GHz e memória RAM de 32 GB. Os tempos de processamento são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Duração das simulações

Configuração	Tempo de processamento
Cavidade vazia	08h22min
Cavidade com 16 copos	04h52min
Cavidade com 32 copos	03h50min

Fonte: Autoria própria, 2014.

Para atender a Equação 2.12, transferência de calor, é necessário obter a densidade de potência dissipada em W/m^3 em cada célula da simulação. O Item 3.1.2 apresenta o procedimento para adquirir estes valores.

3.1.2 Relação da potência dissipada e aumento de temperatura do material dielétrico

Para estabelecer a relação dos valores obtidos na simulação com os valores do experimento, primeiramente foi definido o valor da intensidade de campo elétrico no guia de onda em função da potência fornecida pelo *magnetron*.

Segundo Orfanidis (2014), a potência transportada em um guia de onda é em função da intensidade do campo elétrico e de suas dimensões, além da frequência da onda que é transmitida. Essa potência pode ser calculada utilizando a Equação 3.2.

$$P_T = \frac{1}{4\eta} |E_o|^2 ab \sqrt{1 - \frac{f_c^2}{f^2}} \quad 3.2$$

Em que:

P_T : potência transmitida, W;

η : impedância intrínseca do meio, Ω ;

a, b: dimensões do guia, m;

f_c : frequência de corte do guia, Hz;

f: frequência de propagação, Hz.

A potência emitida pelo *magnetron* é fornecida pelo fabricante do forno micro-ondas e a partir desse valor é possível encontrar o valor de pico do campo elétrico no guia. Esse valor de pico é equivalente a 1,0 nas simulações e dessa forma é possível calcular a intensidade de campo elétrico em toda região da simulação.

Para o micro-ondas utilizado, a potência de saída informada pelo fabricante é de 820 W. Entretanto, foi efetuado um experimento para verificar a potência real fornecida pelo *magnetron*. O experimento consiste em aquecer 1,0 litro de água por dois minutos e verificar o acréscimo de temperatura, então a diferença entre o valor inicial e o final é multiplicado por 70. As medições forneceram um valor médio de 650 W.

Essa potência aplicada na Equação 3.3, fornece:

$$E_o = \sqrt{\frac{4\eta P_T}{ab\sqrt{1 - \frac{f_c^2}{f}}}}$$

$$E_o = \sqrt{\frac{4 \cdot 377 \cdot 650}{0,086 \cdot 0,043 \cdot \sqrt{1 - \frac{1,737 \cdot 10^9}{2,45 \cdot 10^9}}}} = 2,216 \cdot 10^4 \frac{V}{m}$$
3.3

A partir do valor de campo elétrico obtido, foi possível calcular a potência dissipada em todo o material dielétrico utilizando a Equação 2.8 e depois verificar o aquecimento dos copos utilizando a Equação 2.12, adequada para a simulação como pode ser visto na Equação 3.4.

$$T^{n+1}(i, j, k)$$

$$= T^n(i, j, k) + \Delta t \alpha D_t$$

$$\times \left[\frac{T^n(i+1, j, k) - 2T^n(i, j, k) + T^n(i-1, j, k)}{\Delta x^2} \right.$$

$$+ \frac{T^n(i, j+1, k) - 2T^n(i, j, k) + T^n(i, j-1, k)}{\Delta y^2}$$

$$\left. + \frac{T^n(i, j, k+1) - 2T^n(i, j, k) + T^n(i, j, k-1)}{\Delta z^2} + \frac{P_d^n(i, j, k)}{k_t} \right]$$
3.4

Em que:

Δt : precisão temporal, segundos;

$\Delta x, \Delta y, \Delta z$: precisão espacial nos três eixos, metros;

As variáveis α e D_t são apresentadas nas Equações 3.5 e 3.6, respectivamente.

$$\alpha = \frac{T_{\text{aquecimento}}}{T_{\text{simulação}}}$$
3.5

A constante α é utilizada para relacionar os tempos da simulação, da ordem de nano segundos ou menores, e o tempo de aquecimento da ordem de segundos, ou minutos. Neste trabalho, o tempo de simulação equivale à um período de oscilação de uma onda de 2,45 GHz, aproximadamente 0,41 nano segundos.

$$D_t = \frac{k_t}{\rho_m C_m} \quad 3.6$$

A Equação 3.6 fornece o valor da difusibilidade térmica em função da densidade, do calor específico e da condutividade térmica do meio. Os valores utilizados na Equação 3.6 estão na Tabela 2.

Condutividade térmica	0,55 W·m ⁻¹ ·K ⁻¹
Densidade	1000 kg·m ⁻³
Calor específico	4180 J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹
Difusibilidade térmica	131,58·10 ⁻⁹ m ² ·s ⁻¹

Fonte: Torres e Jecko, 1997.

Para considerar o efeito da troca de calor da água com o ar no interior da cavidade é necessário incluir uma condição de contorno para a superfície do material denominada Condição de Neumann (Kopyt e Celuch, 2007), apresentada na Equação 3.7.

$$\frac{\partial T}{\partial n} = \frac{h}{k_t} (T_{\text{ext}} - T_{\text{superf}}) \quad 3.7$$

Em que n é o vetor normal à superfície no ponto considerado, h é parâmetro de transferência de calor por convecção (W·m⁻²·K⁻¹), T_{ext} é a temperatura na cavidade e T_{superf} é a temperatura na superfície do material dielétrico que está sendo aquecido.

O código que implementa a Equação 3.4 foi desenvolvido no MATLAB® e trabalha carregando os dados obtidos do modelo desenvolvido por Pavão (2004). São apresentados nos Anexos ANEXO 1 e Anexo 2 fluxogramas que apresentam o procedimento de simulação das cavidades e o processo de validação deste trabalho, respectivamente.

Os resultados obtidos nesta etapa do trabalho podem ser vistos no Item 4, em que são exibidos o mapa de temperatura na cavidade e a evolução da temperatura ao longo do tempo. O Item 3.2 apresenta o procedimento para obter os dados do aquecimento que permitem a validação do método.

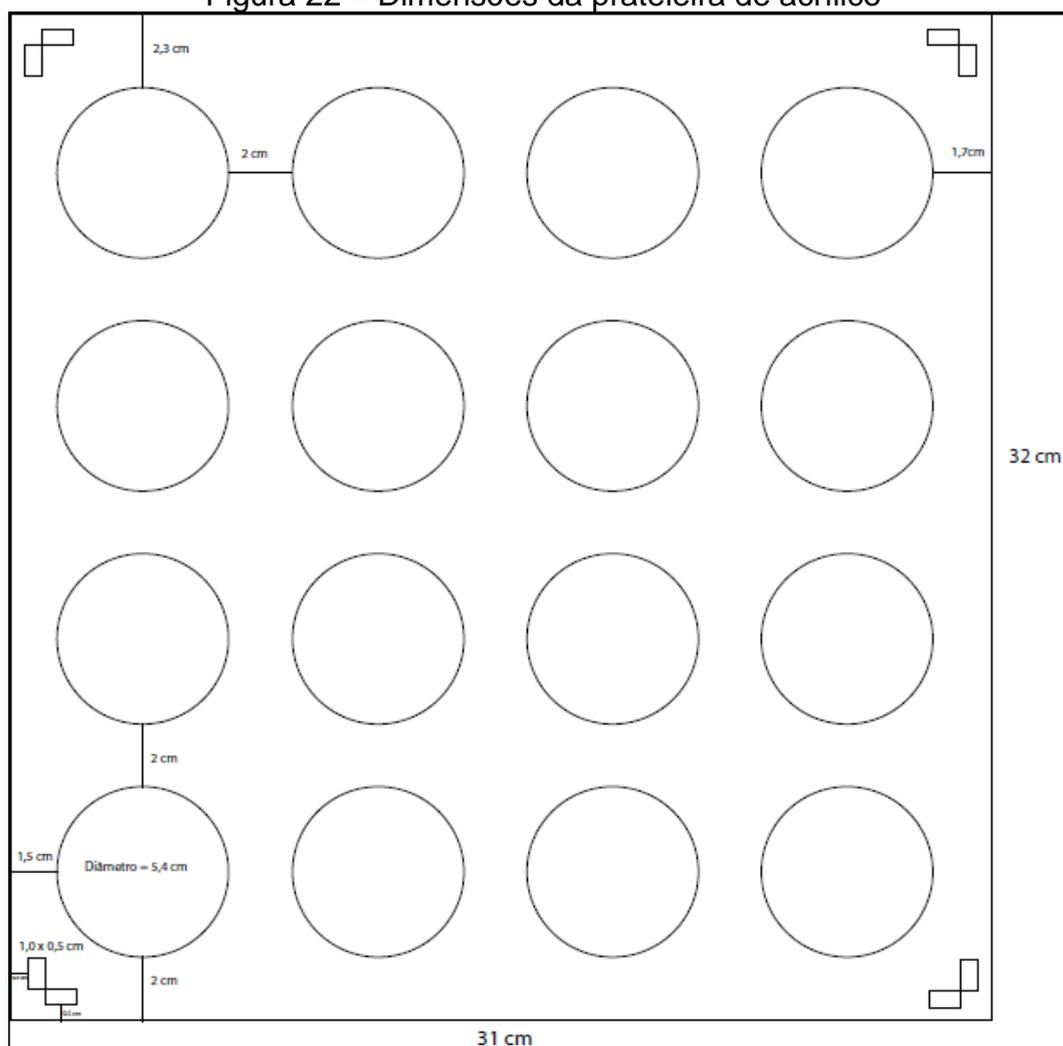
3.2 ANÁLISE EXPERIMENTAL

A validação dos dados obtidos na simulação foi feita baseada nos dados coletados durante a fase experimental deste trabalho. Essa etapa consistiu na medição da temperatura, ao longo do tempo, em copos com água em 32 pontos diferentes da cavidade. O Item 3.2.1 descreve o procedimento em detalhes.

3.2.1 Mapeamento da temperatura na cavidade

As medições foram feitas no forno micro-ondas indicado no Item 3.1.1. Para representar fisicamente a localização dos copos das simulações dos Item 3.1.1, foram confeccionadas duas prateleiras de acrílico com orifícios para encaixe dos copos, com dimensões exibidas na Figura 22.

Figura 22 – Dimensões da prateleira de acrílico



Fonte: Autoria própria, 2014.

O acrílico foi escolhido por possuir baixa permissividade relativa ($\epsilon_r = 2,6$) em comparação à água, fazendo com que sua influência na absorção dos campos seja desprezada no aquecimento.

A medição da temperatura foi efetuada com o auxílio de um termômetro digital com infravermelho, modelo MT-350 Minipa, indicado na Figura 23.

Figura 23 – Termômetro Digital MT-350, Minipa



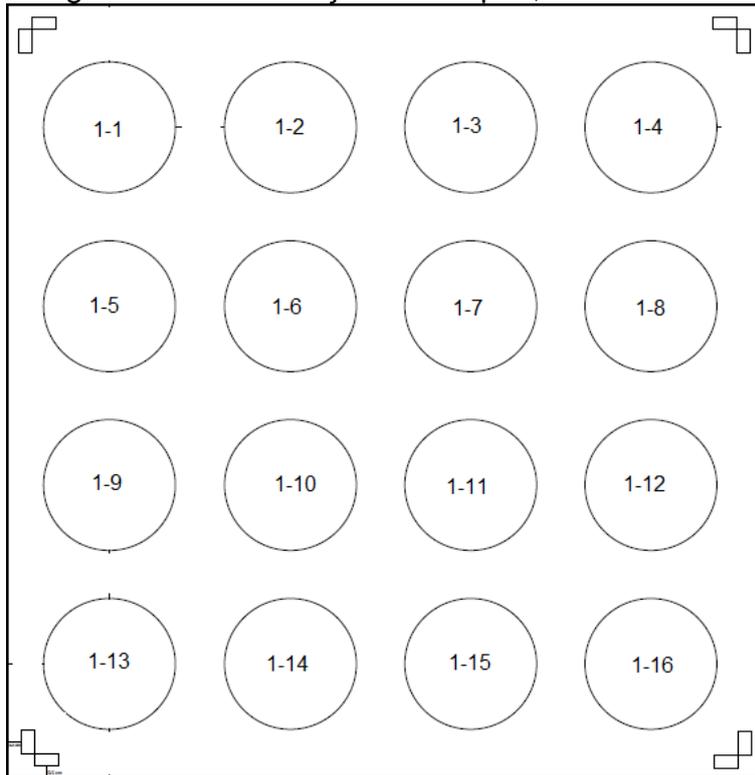
Fonte: Minipa, 2014.

Com o objetivo de reduzir mudanças na composição do material dielétrico durante o experimento, foi utilizada a água mineral de apenas uma fonte. Neste caso, apenas de um vasilhame de 20 litros.

Para verificar a variação da temperatura ao longo do tempo, o aquecimento foi feito em intervalos de 15 segundos para a situação com 16 copos e de 30 segundos para os 32 copos. Essa diferença nos intervalos foi adotada em função do tempo de manuseio e leitura da temperatura ser maior na situação com 32 copos.

Durante a leitura, foi registrada a temperatura da água em todos os copos de acordo com sua posição. Cada copo foi numerado em função do nível e da localização que se encontrava. A Figura 24 exibe a numeração adotada para o nível inferior, sendo a do nível superior diferente apenas no primeiro dígito, representado por 2.

Figura 24 – Numeração dos copos, nível inferior.



Fonte: Autoria própria, 2014.

Figura 25 – Forno micro-ondas com 16 copos.



Fonte: Autoria própria, 2014.

Figura 26 – Forno micro-ondas com 32 copos



Fonte: Autoria própria, 2014.

A Figura 24 e a Figura 25 apresentam as fotografias das duas organizações de copos dentro da cavidade do micro-ondas, nas bases de acrílico. A temperatura inicial da água em todos os copos foi de 29,0 °C.

A Tabela 3 e a Tabela 4 apresentam a variação da temperatura ao longo do tempo em cada copo, para as duas organizações.

A medição foi feita até que um dos copos atingisse 60 °C, já que esse é o valor limite da faixa de estudo deste trabalho. Ao registrar o valor limite, foi feita mais uma medição para verificar o comportamento nos copos vizinhos.

Na Tabela 3, o copo 1-8 é o que apresenta maior gradiente de temperatura, seguido pelos copos 1-4, 1-12 e 1-7. Comparando com a Figura 24 e com a Figura 17, percebe-se que o copo 1-8 é o copo localizado junto à saída do guia de onda e os outros citados são os copos vizinhos a este.

Tabela 3 – Evolução da temperatura (°C) para os 16 copos

Tempo(s)								
Copo	15	30	45	60	75	90	105	120
1-1	29,5	30,5	31,0	31,5	31,5	32,0	32,5	33,0
1-2	30,0	31,0	31,5	32,5	32,5	33,0	33,5	34,5
1-3	30,0	32,0	32,5	33,5	34,0	35,0	36,5	37,0
1-4	32,5	35,0	37,5	40,0	42,5	43,5	46,0	48,0
1-5	30,0	30,5	31,0	31,5	31,5	32,0	32,0	33,0
1-6	31,0	32,0	32,5	33,0	33,5	34,5	35,0	36,5
1-7	32,5	34,5	37,0	38,5	39,5	41,0	42,5	43,5
1-8	36,0	42,0	47,0	51,0	56,0	59,0	63,0	65,0
1-9	29,5	30,0	30,0	30,5	31,0	31,5	32,0	32,5
1-10	29,5	30,5	31,0	31,5	32,0	32,5	32,5	33,0
1-11	30,5	31,5	32,0	33,0	33,5	34,0	35,0	35,0
1-12	32,5	35,0	37,0	38,5	40,0	41,0	43,0	44,0
1-13	30,5	32,0	33,0	34,0	35,0	36,0	37,0	38,0
1-14	30,0	30,5	31,0	31,5	32,0	32,5	33,0	33,5
1-15	30,0	30,5	31,0	32,0	32,0	32,5	33,0	33,5
1-16	31,0	32,0	33,0	33,0	33,5	34,0	35,0	35,5

Fonte: Autoria própria, 2014.

O Item 4.2 apresenta a relação dos resultados obtidos na simulação com os coletados na etapa experimental.

Tabela 4 – Evolução da temperatura (°C) para os 32 copos

Tempo(s)	30	60	90	120
Copo				
1-1	29,5	30,0	30,5	31,0
1-2	30,0	31,0	31,5	32,5
1-3	31,0	33,0	34,5	38,0
1-4	34,0	38,5	42,0	46,0
1-5	29,0	29,5	30,0	30,5
1-6	30,0	30,5	31,5	31,5
1-7	31,0	33,0	33,5	35,0
1-8	42,5	54,0	60,5	64,0
1-9	29,0	29,5	29,5	30,0
1-10	29,5	30,0	30,0	30,5
1-11	30,0	30,5	31,5	32,5
1-12	32,0	34,5	36,0	38,5
1-13	29,5	29,5	30,0	30,0
1-14	29,5	29,0	29,5	30,5
1-15	29,5	30,0	31,0	31,5
1-16	30,5	30,5	31,0	31,5
2-1	29,0	29,5	29,5	30,5
2-2	29,5	29,5	30,0	31,0
2-3	30,0	31,0	31,5	32,5
2-4	32,0	33,5	35,0	37,0
2-5	29,5	29,5	30,0	30,0
2-6	30,0	30,0	30,0	30,5
2-7	30,0	31,0	31,5	32,0
2-8	31,5	34,0	36,0	38,0
2-9	29,0	29,5	29,5	29,5
2-10	29,0	29,0	29,5	29,5
2-11	29,5	30,0	30,0	30,0
2-12	30,0	31,0	31,5	30,5
2-13	29,5	29,5	29,5	32,5
2-14	29,5	30,0	29,5	30,0
2-15	29,5	30,0	30,0	30,5
2-16	30,0	31,0	31,5	32,5

Fonte: Autoria própria, 2014.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O presente capítulo compara os dados obtidos nas simulações para as situações com 16 e 32 copos e com os dados coletados nos experimentos para as mesmas configurações. Além desta comparação, são feitas avaliações dos dados obtidos com as situações citadas e também com novas configurações propostas.

Para verificar a precisão do método desenvolvido foram efetuadas novas simulações com o objetivo de analisar o desempenho do forno com novas configurações de alimentação.

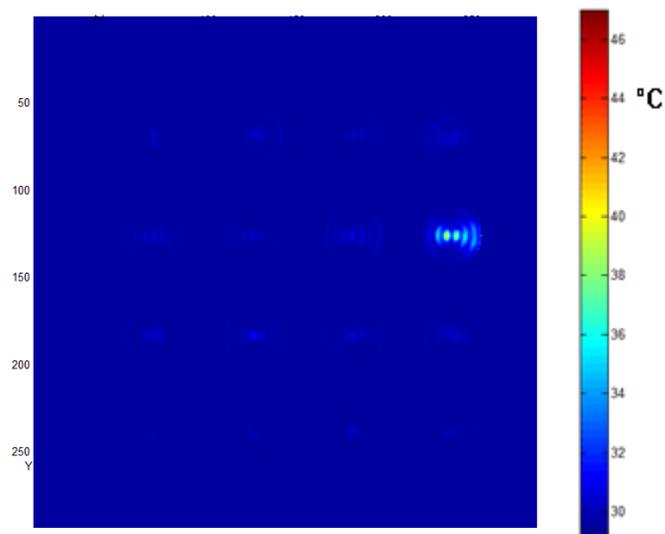
Foi analisada também uma simulação com as configurações de um forno industrial, do tipo contínuo, para secagem de madeira. Para as configurações adicionais simuladas foi analisado o comportamento do campo eletromagnético e o gradiente de temperatura dos materiais.

4.1 VISUALIZAÇÃO VOLUMÉTRICA DAS TEMPERATURAS SIMULADAS

Pela Tabela 3 é possível verificar que os maiores gradientes de temperatura ocorrem nos copos 1-8, 1-4, 1-12 e 1-7, respectivamente. Dessa forma, a análise das temperaturas na simulação será focada nesses 4 copos para a simulação com 16 copos e para a simulação de 32 copos serão analisados os copos 2-4, 2-7, 2-8 e 2-12, além dos copos do nível inferior.

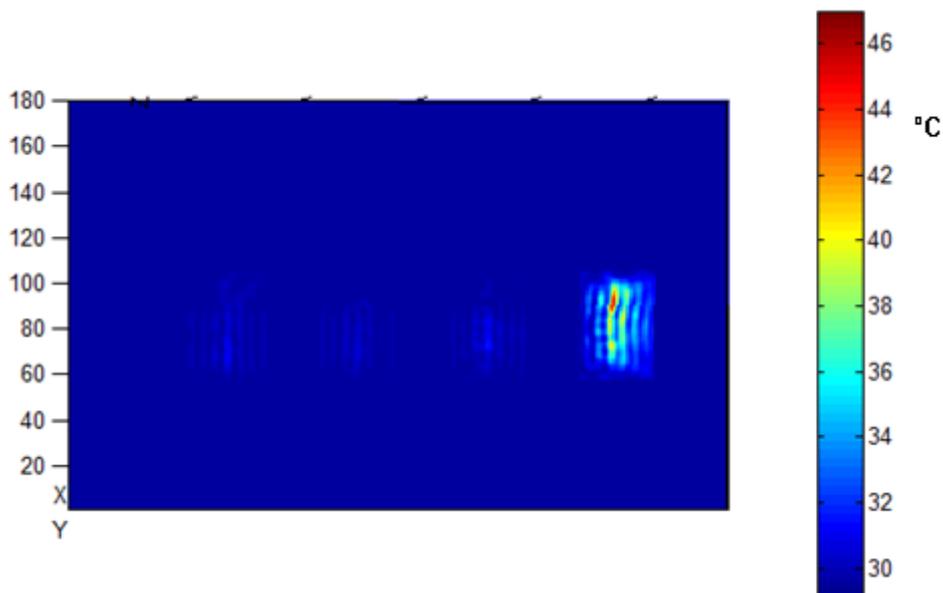
As Figuras Figura 27 a Figura 54 apresentam a evolução da temperatura ao longo do tempo para todos os copos, focando a visualização nos pontos citados.

Figura 27 – Simulação 16 copos, t = 30 s, vista superior



Fonte: Autoria própria, 2014.

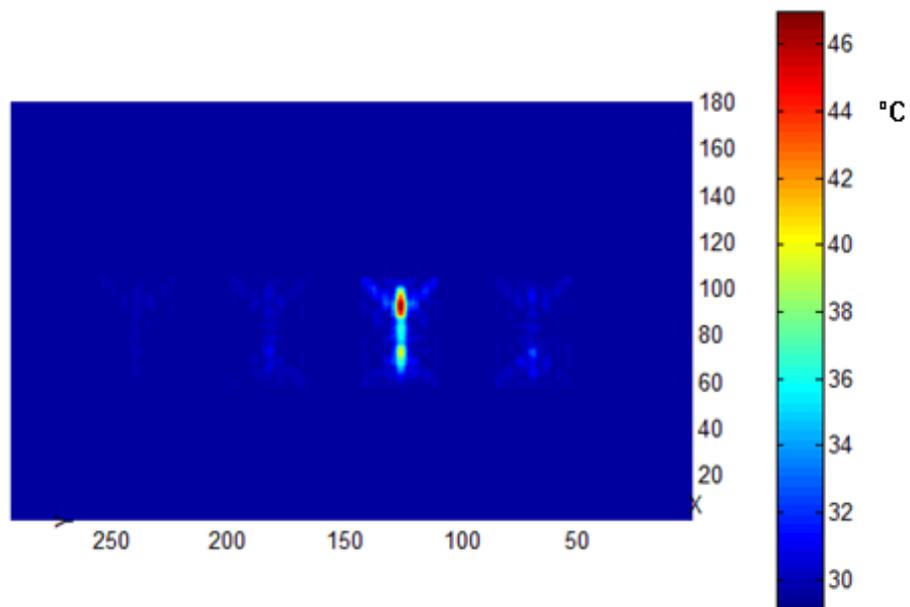
Figura 28 - Simulação 16 copos, t = 30 s, vista frontal



Fonte: Autoria própria, 2014.

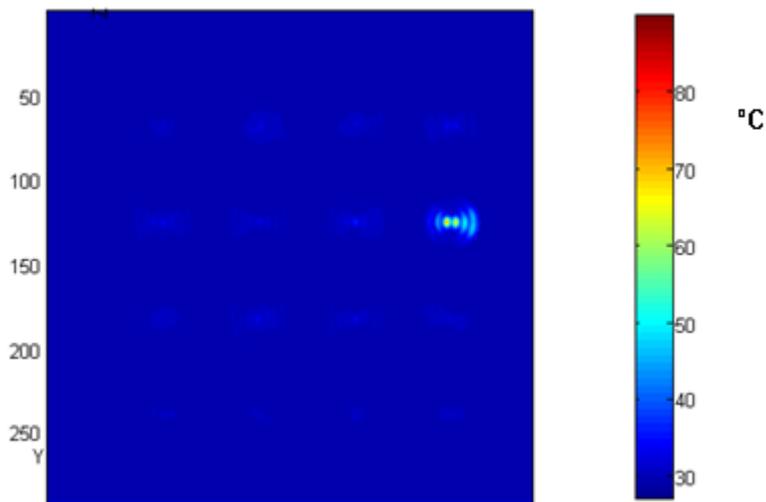
Analisando as Figuras Figura 27, Figura 28 e Figura 29 percebe-se que o copo 1-8 apresenta a maior variação de temperatura, em relação aos demais, como comprovado pelos dados da Tabela 3 e que em seu interior ocorre um aumento de temperatura superior ao restante de seu volume. Os copos adjacentes apresentam valores simulados de acordo com o dado obtido experimentalmente.

Figura 29 - Simulação 16 copos, t = 30 s, vista lateral



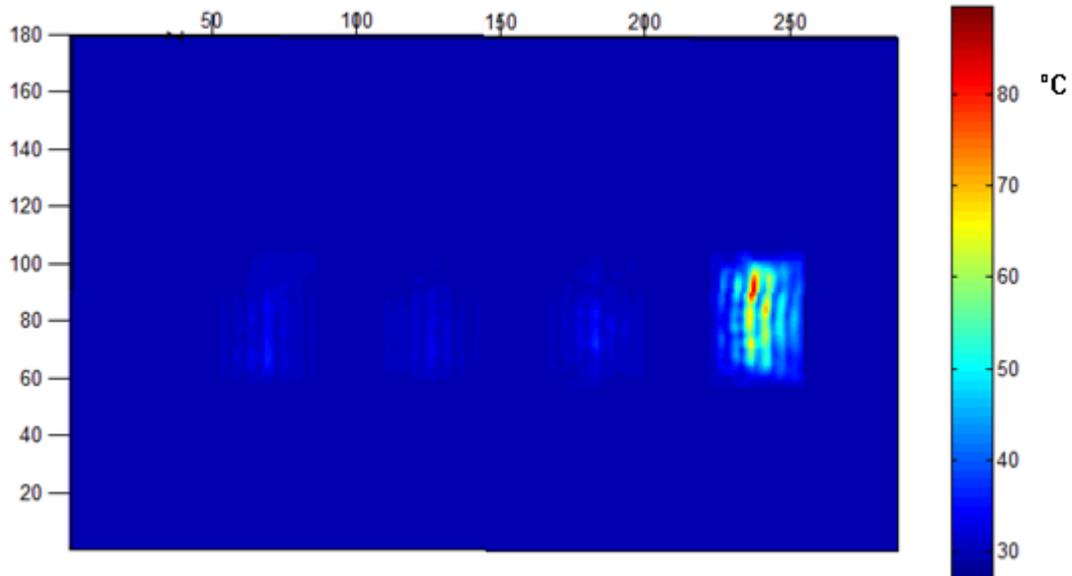
Fonte: Autoria própria, 2014.

Figura 30 – Simulação 16 copos, t = 60 s, vista superior



Fonte: Autoria própria, 2014.

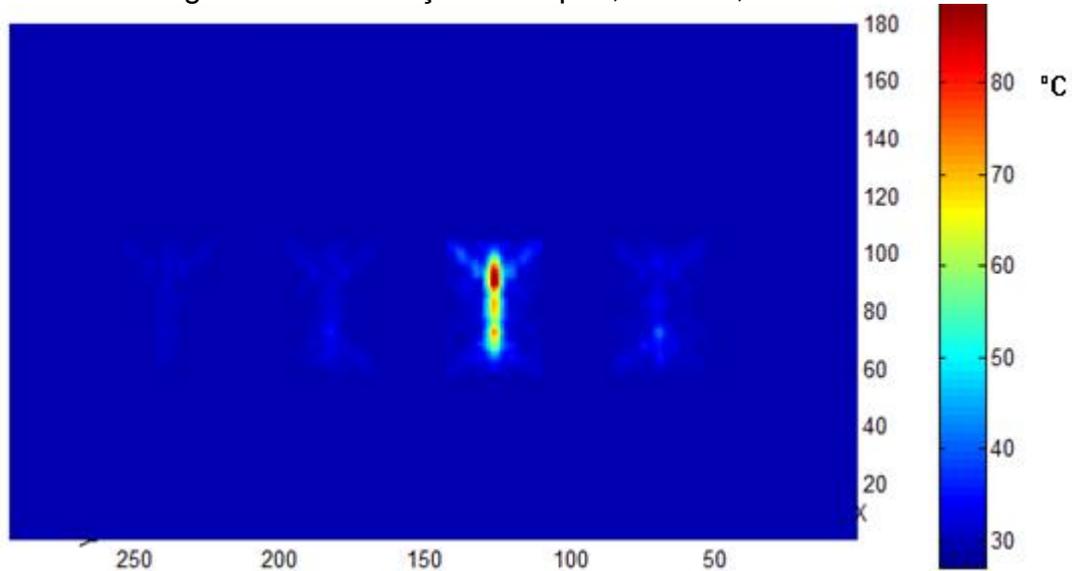
Figura 31 - Simulação 16 copos, t = 60 s, vista frontal



Fonte: Autoria própria, 2014.

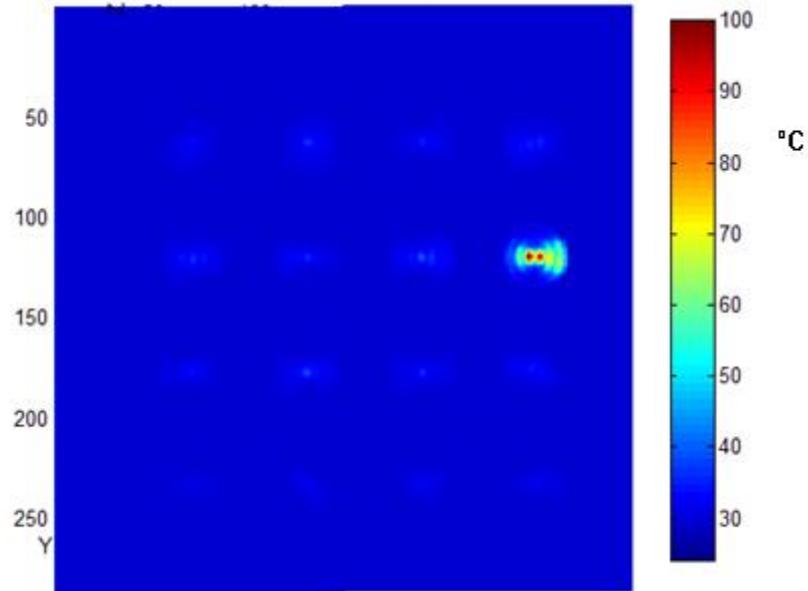
A Figura 31 - Simulação 16 copos, t = 60 s, vista frontal apresenta claramente a distribuição da temperatura no copo 1-8, com valores na faixa de 45°C a 50 °C na maior parcela do volume e pontos já atingindo valores de até 80°C.

Figura 32 - Simulação 16 copos, t = 60 s, vista lateral



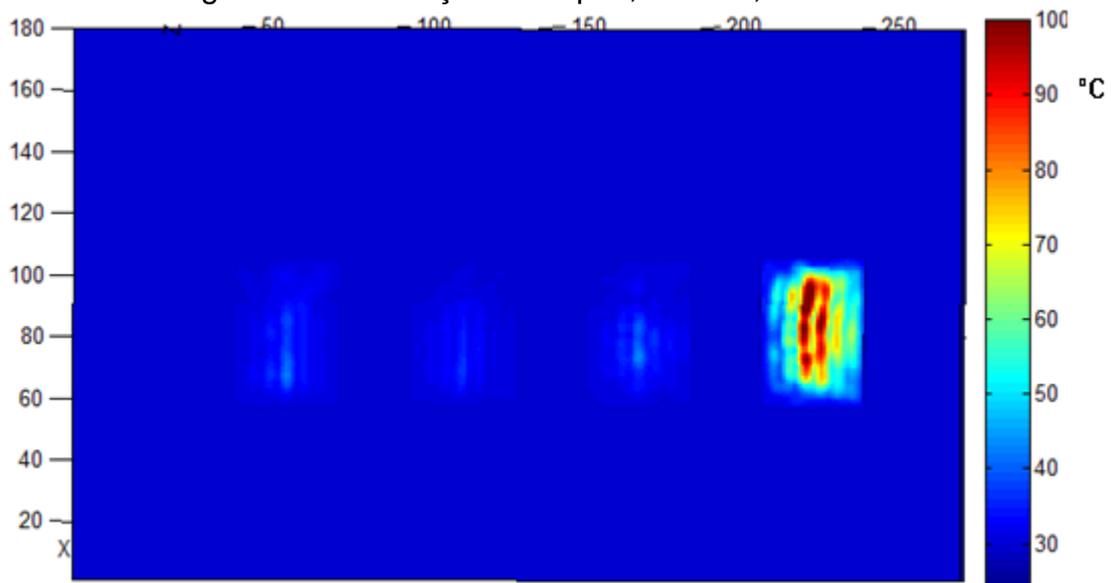
Fonte: Autoria própria, 2014.

Figura 33 – Simulação 16 copos, t = 90 s, vista superior



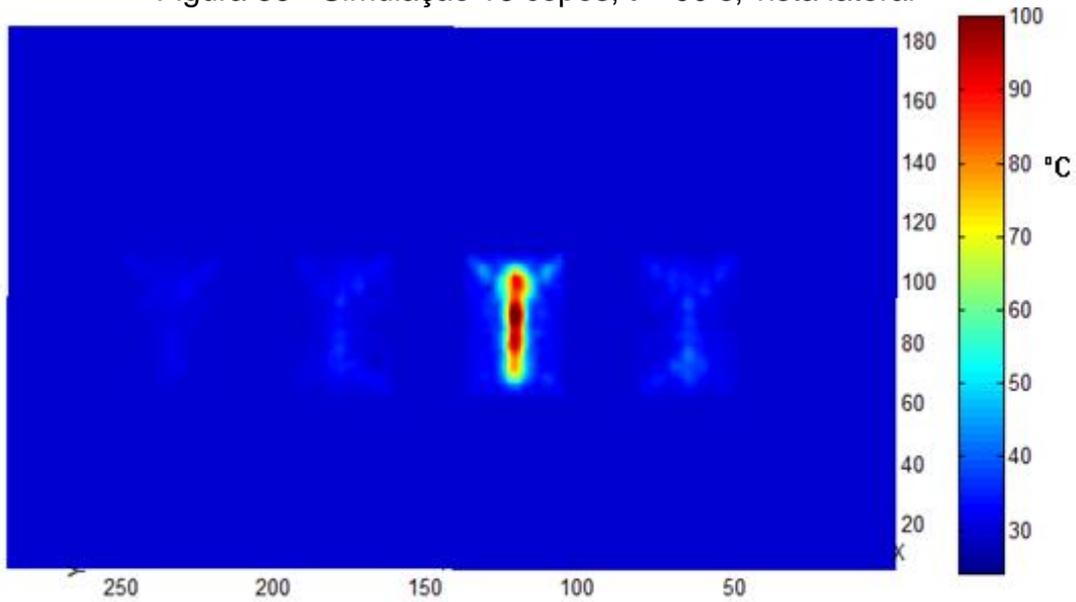
Fonte: Autoria própria, 2014.

Figura 34 - Simulação 16 copos, t = 90 s, vista frontal



Fonte: Autoria própria, 2014.

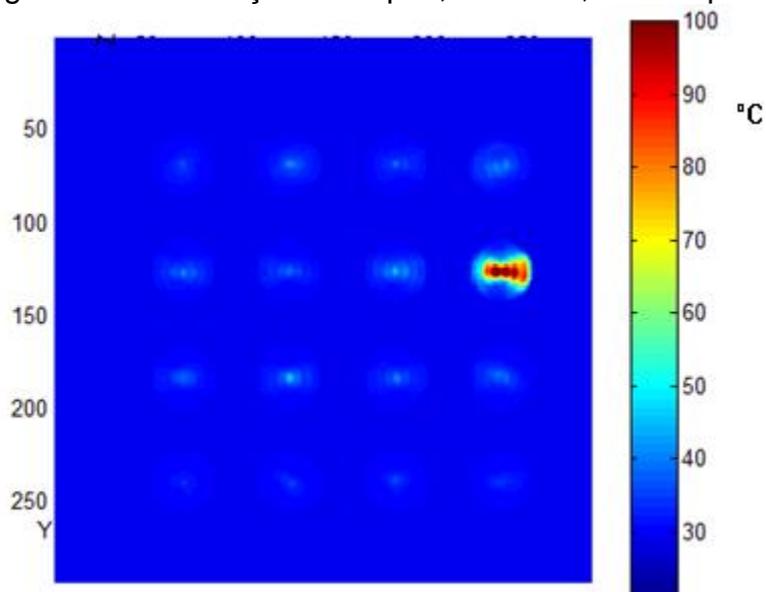
Figura 35 - Simulação 16 copos, t = 90 s, vista lateral



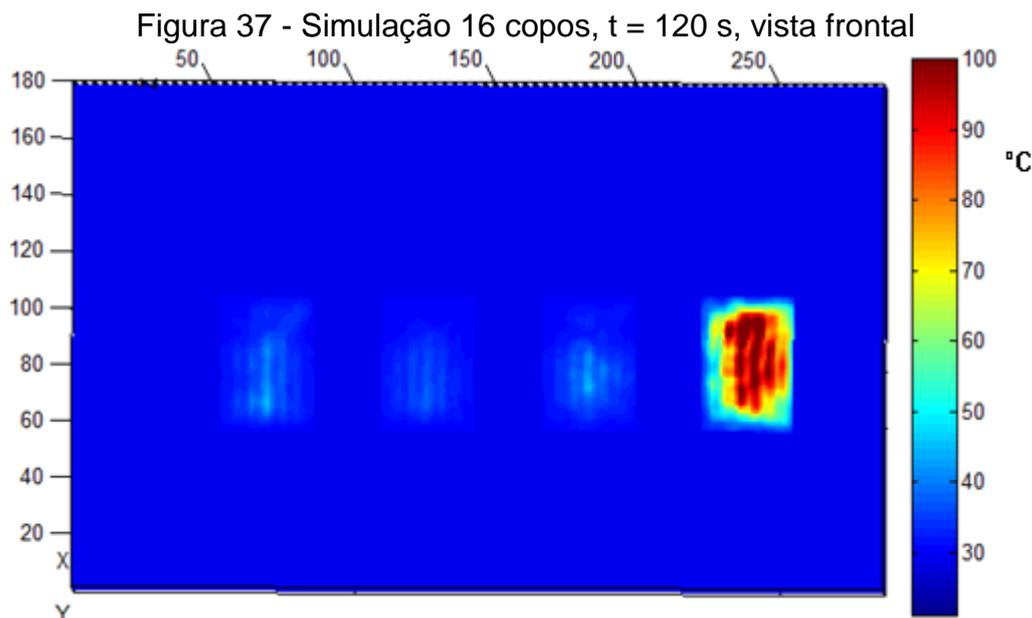
Fonte: Autoria própria, 2014.

As Figuras Figura 33 a Figura 35 exibe temperaturas de até 100 °C já, no interior do copo 1-8, mas com a maior parcela da temperatura na faixa de 50 °C a 70°C. Os copos vizinhos apresentam temperaturas de aproximadamente 40 °C.

Figura 36 – Simulação 16 copos, t = 120 s, vista superior



Fonte: Autoria própria, 2014.



Fonte: Autoria própria, 2014.

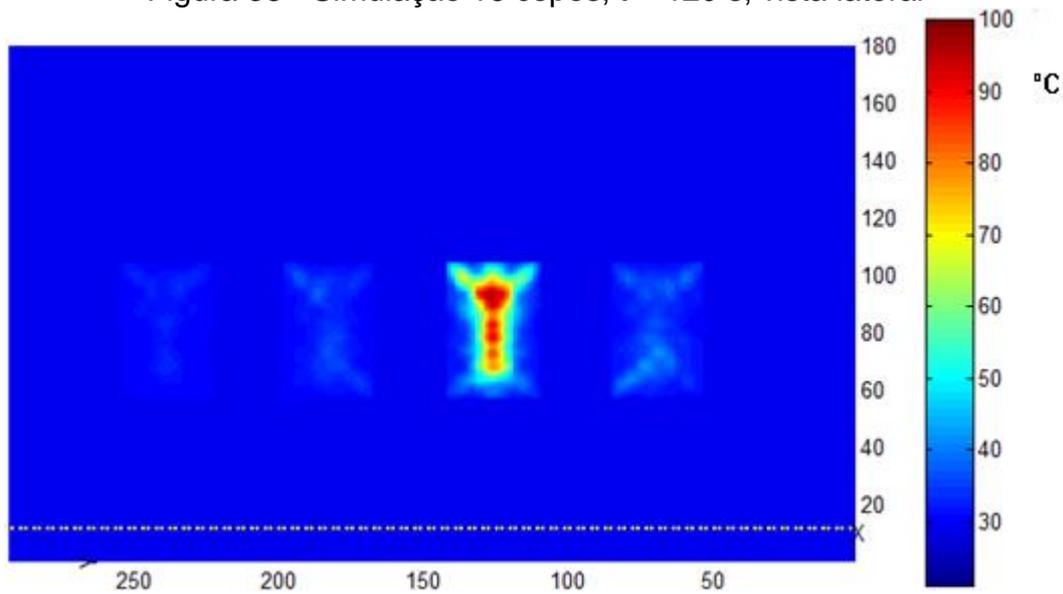
Pelo exposto nas Figuras Figura 36 a Figura 38, a água contida no copo 1-8 apresenta, aproximadamente, 30% do seu volume na temperatura de 100 °C. Mesmo que uma parcela da água esteja nesta temperatura, não considera-se que a água esteja em processo de ebulição, pois seria necessário que toda a massa líquida apresentasse formação tumultuosa de bolhas (FERRARO, 2013). A temperatura apresentada na Tabela 3 é de 65 °C para este copo. A diferença de temperatura apresentada nas Figuras Figura 27 a Figura 38 e na Tabela 3 pode ser explicada devido ao método de medição utilizado e aos valores de permissividade escolhidos.

O termômetro infravermelho, em superfícies transparentes, mede apenas a temperatura de superfície do material (MINIPA, 2014). Dessa forma a medição está de acordo com o apresentado nas simulações. Esse fato mostra que o equipamento utilizado não é o ideal, mesmo apresentando resultados adequados para o nível inferior. O dispositivo adequado seria um termovisor que apresentaria a distribuição de temperatura da mesma forma visualizada nas simulações. Ainda em relação à medição, o aquecimento do nível superior pode ocorrer mais na parte inferior dos copos, devido à localização do guia, fazendo com que a parte superior leve mais tempo para atingir a mesma temperatura.

A influência do valor da permissividade aumenta o erro na simulação para os pontos em que a temperatura ultrapassa os 60 °C. Com o aumento da

temperatura, a permissividade diminui e a intensidade de campo elétrico também, fazendo com que a potência dissipada seja menor. No método deste trabalho, a permissividade é mantida constante fazendo com que a potência dissipada seja a mesma durante todo o aquecimento, o que ocasionou as altas temperaturas apresentadas nas Figuras Figura 36 a Figura 38.

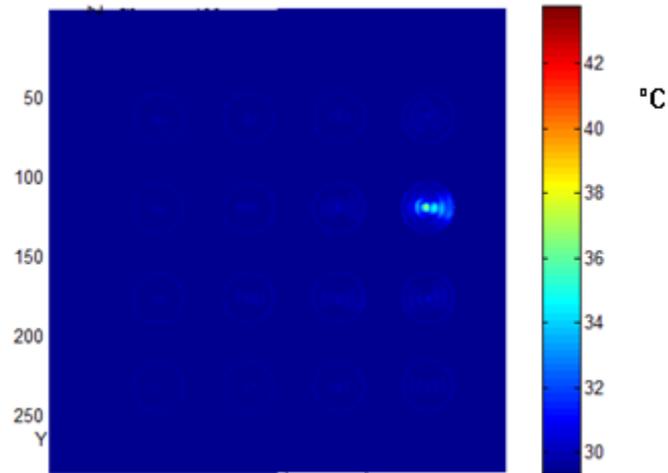
Figura 38 - Simulação 16 copos, $t = 120$ s, vista lateral



Fonte: Autoria própria, 2014.

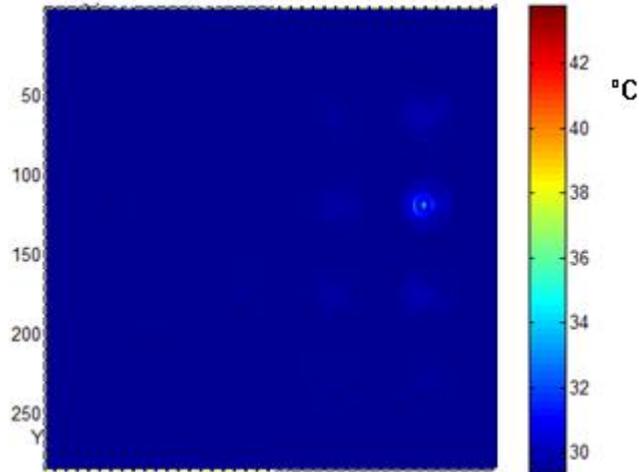
As Figuras Figura 39 a Figura 54 mostram a mudança de temperatura para a simulação com 32 copos, com foco nos mesmos itens apresentados nas Figuras Figura 27 a Figura 38. O comportamento da temperatura para o nível inferior é semelhante ao visto na simulação com 16 copos, reafirmado pelos dados exibidos na Tabela 4. Os dados dessa Tabela também estão de acordo com o exibido para o nível superior, sendo o copo 2-8 o de maior aumento de temperatura.

Figura 39 – Simulação 32 copos, t = 30 s, vista superior, nível 1



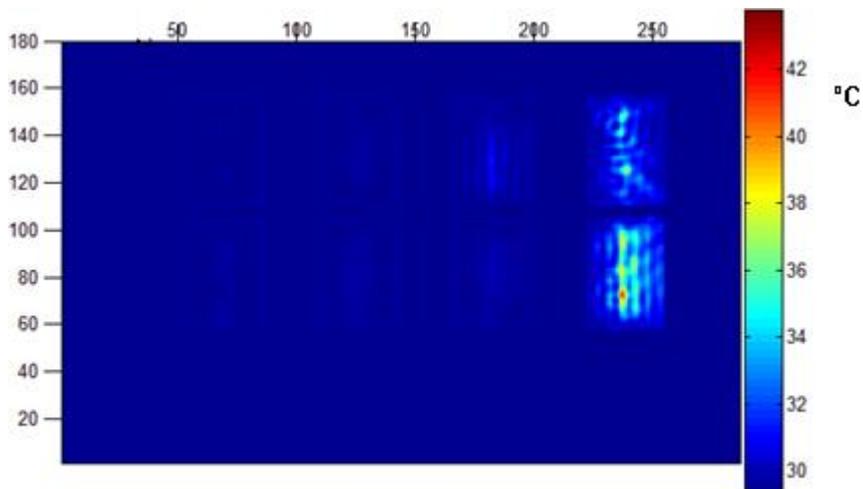
Fonte: Autoria própria, 2014.

Figura 40 - Simulação 32 copos, t = 30 s, vista superior, nível 2



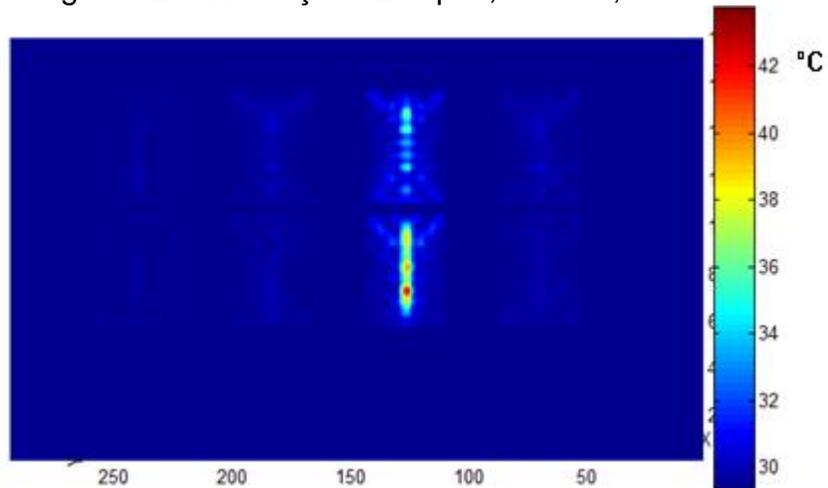
Fonte: Autoria própria, 2014.

Figura 41 - Simulação 32 copos, t = 30 s, vista frontal



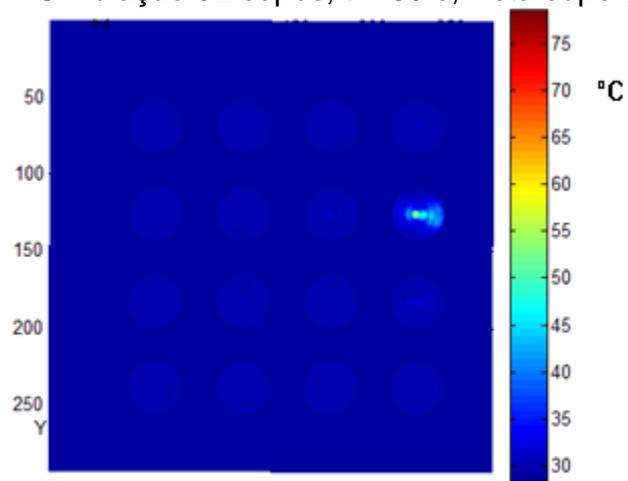
Fonte: Autoria própria, 2014.

Figura 42 - Simulação 32 copos, t = 30 s, vista lateral



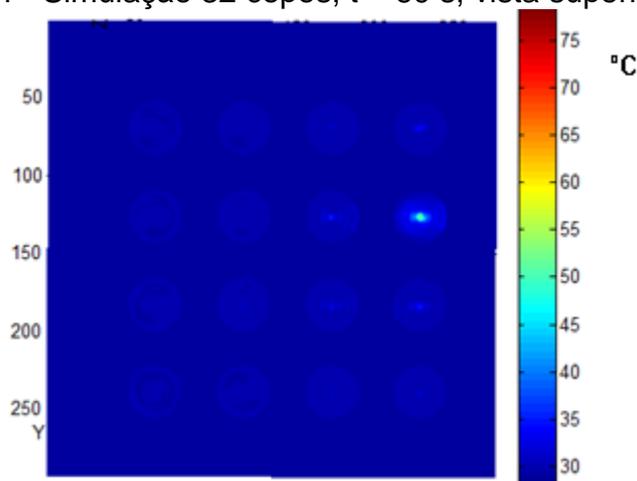
Fonte: Autoria própria, 2014.

Figura 43 – Simulação 32 copos, t = 60 s, vista superior, nível 1



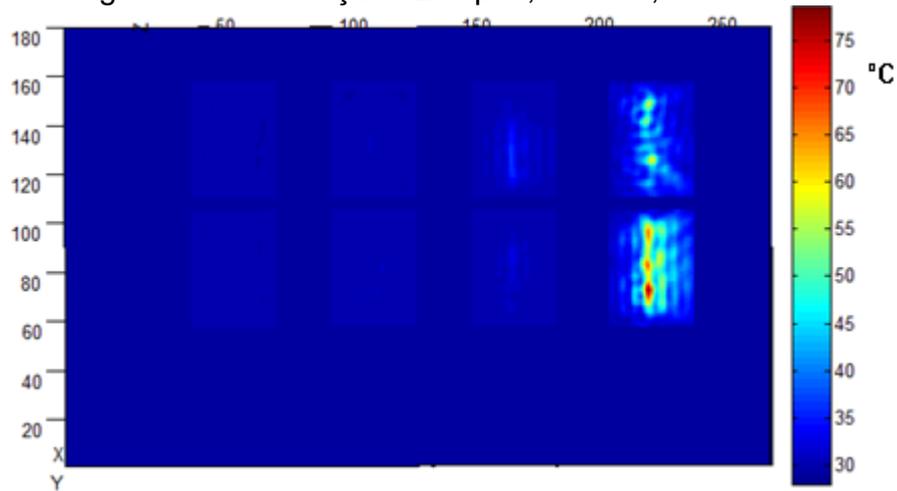
Fonte: Autoria própria, 2014.

Figura 44 - Simulação 32 copos, t = 60 s, vista superior, nível 2



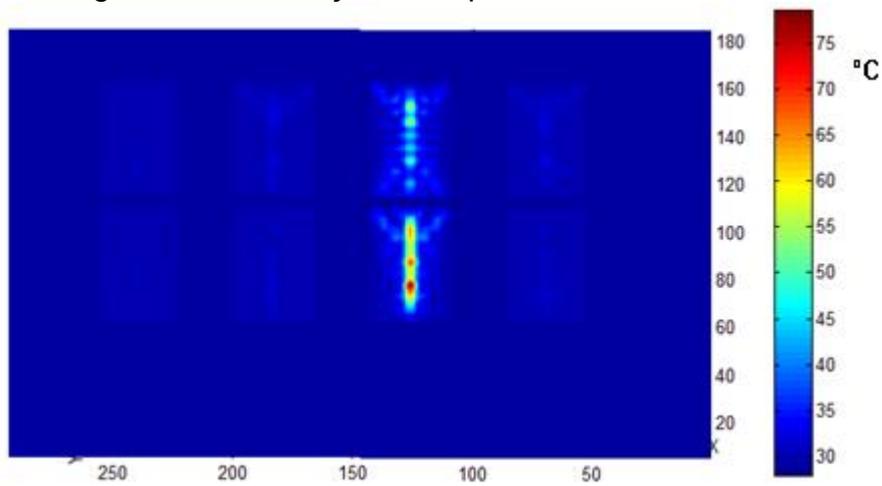
Fonte: Autoria própria, 2014.

Figura 45 - Simulação 32 copos, t = 60 s, vista frontal



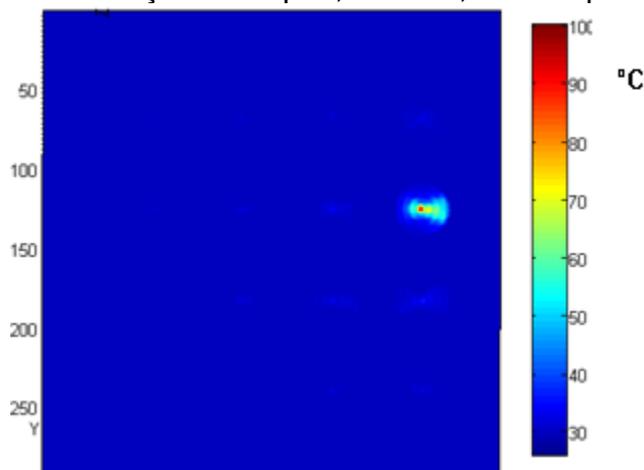
Fonte: Autoria própria, 2014.

Figura 46 - Simulação 32 copos, t = 60 s, vista lateral



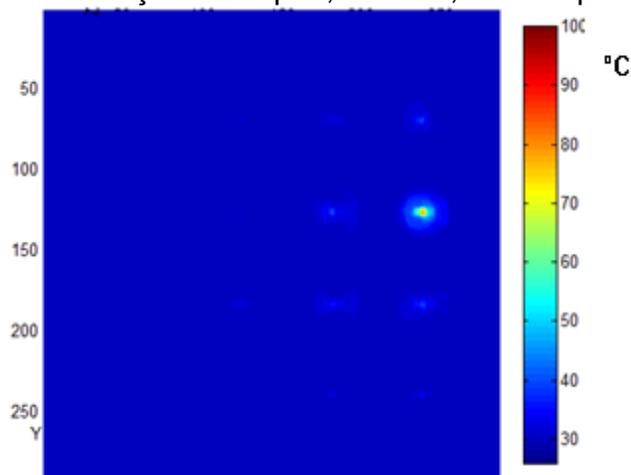
Fonte: Autoria própria, 2014.

Figura 47 - Simulação 32 copos, t = 90 s, vista superior, nível 1



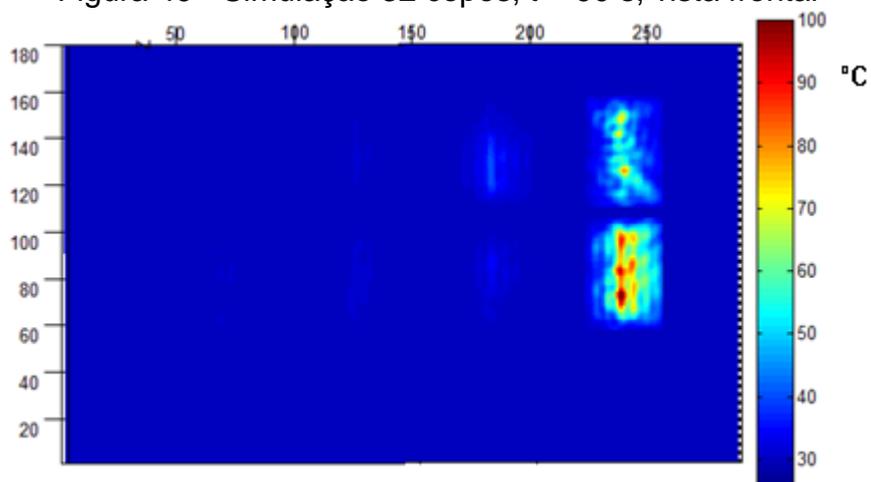
Fonte: Autoria própria, 2014.

Figura 48 - Simulação 32 copos, t = 90 s, vista superior, nível 2



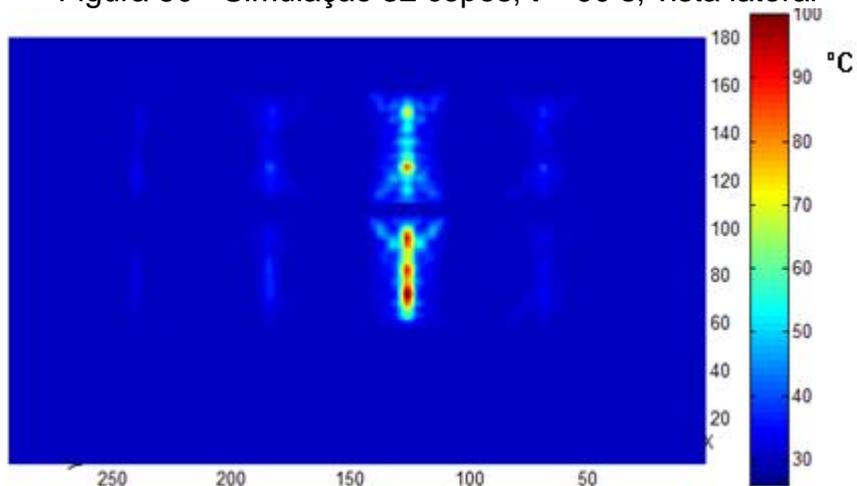
Fonte: Autoria própria, 2014.

Figura 49 - Simulação 32 copos, t = 90 s, vista frontal



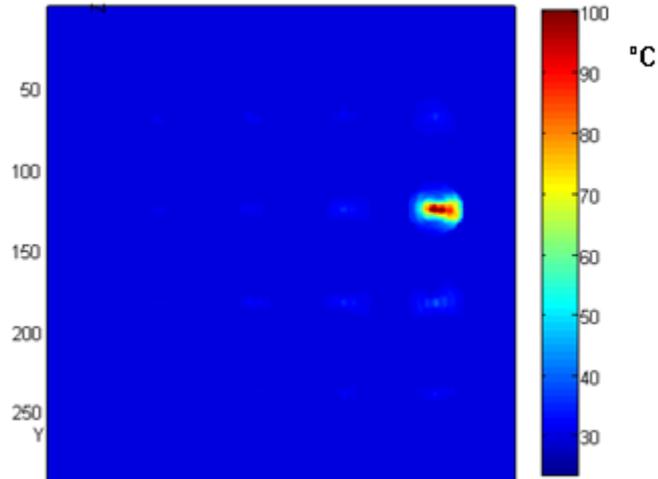
Fonte: Autoria própria, 2014.

Figura 50 - Simulação 32 copos, t = 90 s, vista lateral



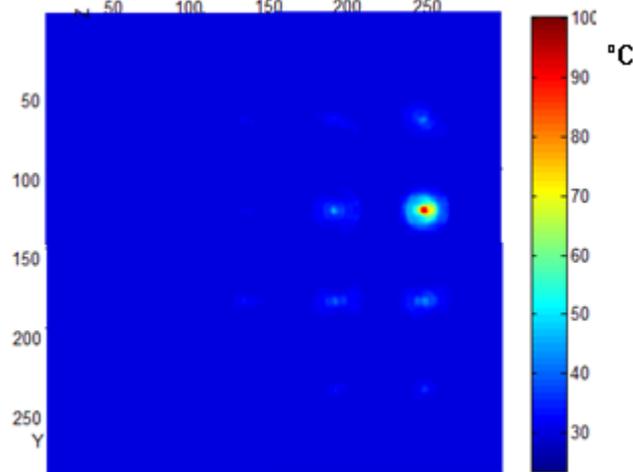
Fonte: Autoria própria, 2014.

Figura 51 - Simulação 32 copos, $t = 120$ s, vista superior, nível 1



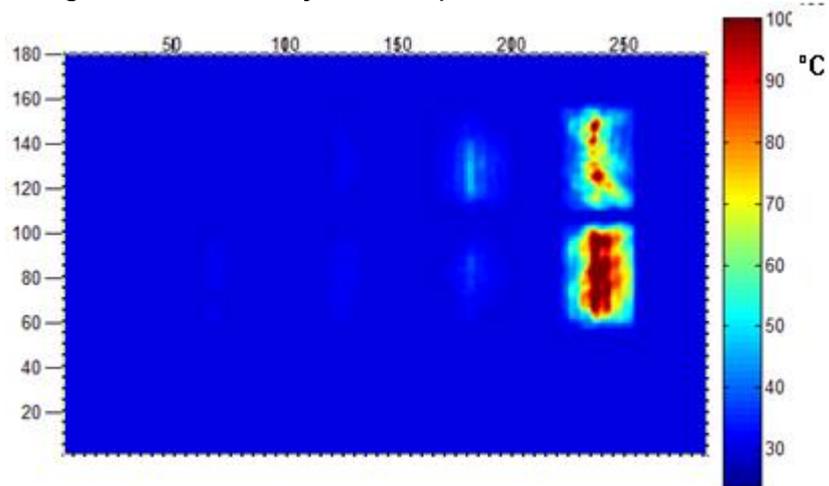
Fonte: Autoria própria, 2014.

Figura 52 - Simulação 32 copos, $t = 120$ s, vista superior, nível 2



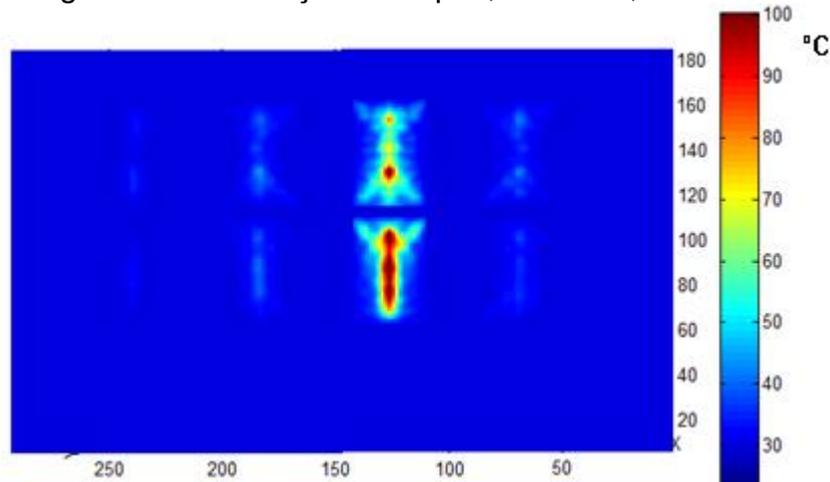
Fonte: Autoria própria, 2014.

Figura 53 - Simulação 32 copos, $t = 120$ s, vista frontal



Fonte: Autoria própria, 2014.

Figura 54 - Simulação 32 copos, t = 120 s, vista lateral



Fonte: Autoria própria, 2014.

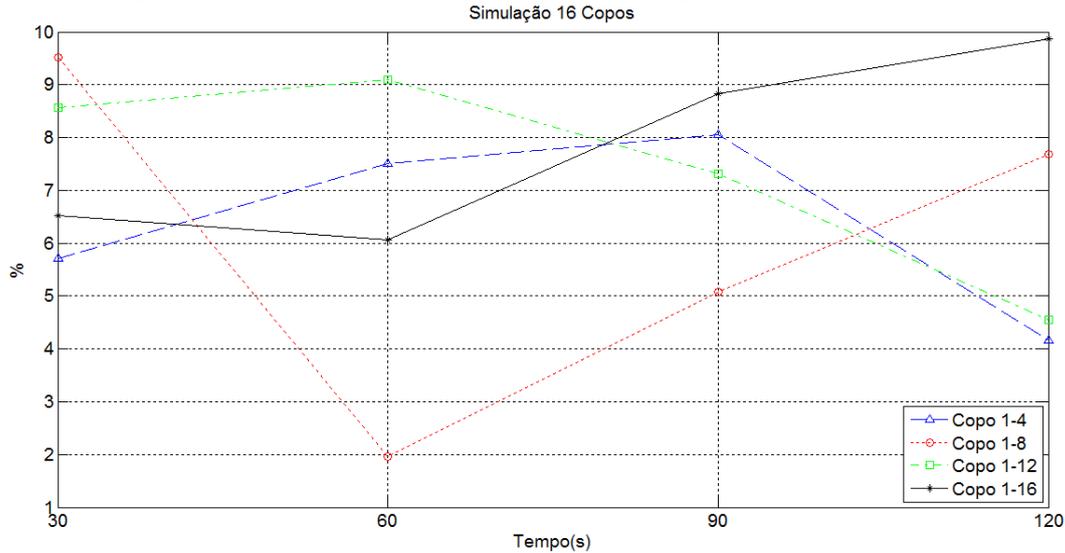
As altas temperaturas apresentadas nas Figuras Figura 51 a Figura 54 surgem devido aos mesmo motivos explicados para as Figuras Figura 36 a Figura 38.

4.2 RELAÇÃO ENTRE OS VALORES SIMULADOS E MEDIDOS

Para quantificar, aproximadamente, a precisão do modelo desenvolvido foi comparado os valores medidos experimentalmente com os indicados na camada superior da simulação. Esta aproximação desconsidera os fatores explicados no Item 4.1 que podem ser responsáveis pelos desvios citados, com o objetivo de ser um mecanismo de referência para correções.

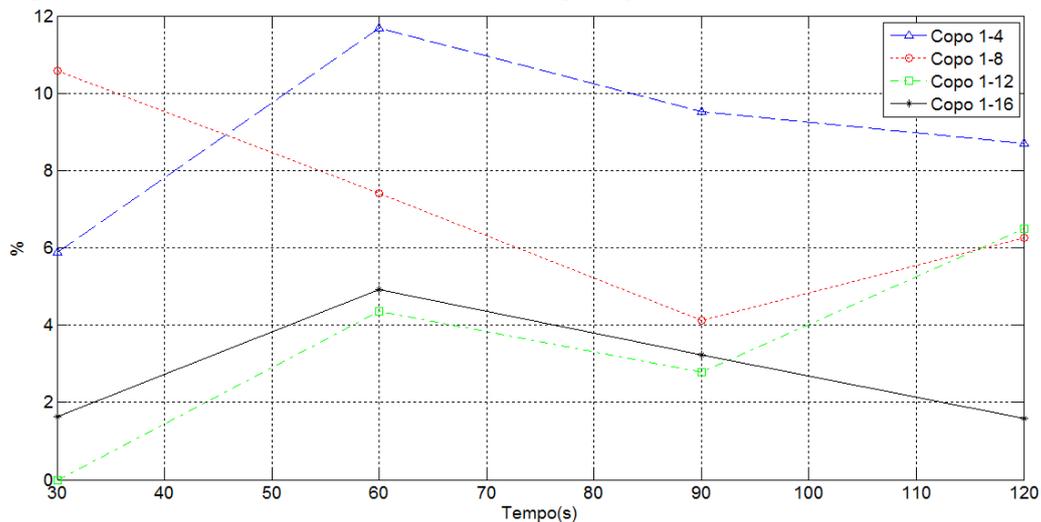
A Figura 55 apresenta a precisão dos resultados obtidos na simulação comparados com o obtido experimentalmente, para a configuração de 16 copos. Nesta Figura observa-se que o erro percentual não ultrapassa 10%, para os quatro elementos apresentados, que foram os que apresentaram a maior divergência das medições.

Figura 55 – Erro (%) x Tempo (s), Configuração de 16 copos



Fonte: Autoria própria, 2014.

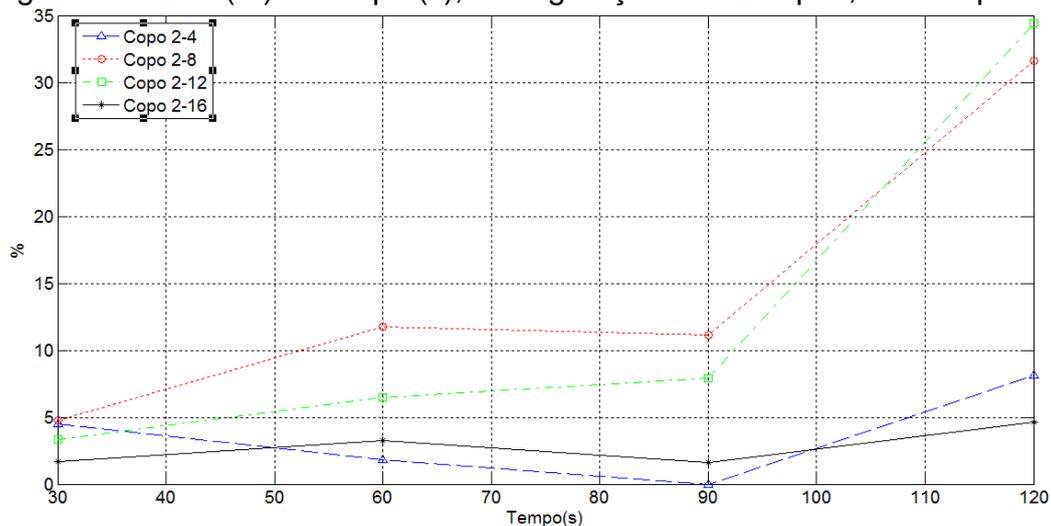
Figura 56 - Erro (%) x Tempo (s), Configuração de 32 copos, nível inferior



Fonte: Autoria própria, 2014.

A Figura 56 apresenta para os copos inferiores da simulação com 32 copos. Nesse caso, o erro flutua até aproximadamente 12%, mantendo os resultados próximos dos medidos experimentalmente. Entretanto, a Figura 57 apresenta erros maiores que 30% para os copos 2-8 e 2-12, para o tempo de aquecimento de 120 segundos. Este comportamento é esperado por ser um modelo numérico, que propaga o erro ao longo da simulação. O comportamento para os tempos anteriores manteve-se com erros na faixa de 10%.

Figura 57 - Erro (%) x Tempo (s), Configuração de 32 copos, nível superior



Fonte: Autoria própria, 2014.

Depois de verificada a validade dos dados obtidos nas simulações com os adquiridos experimentalmente, foram feitas novas simulações para verificar a influência dos parâmetros construtivos do forno no aquecimento.

4.3 VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS DO FORNO MICRO-ONDAS E SEUS EFEITOS

Os parâmetros analisados foram o comprimento, a localização do guia de onda e a quantidade de fontes.

O comprimento do guia de onda foi testado para verificar se a distância percorrida pela onda no guia de onda iria influenciar na intensidade do campo elétrico no interior da cavidade.

A localização do guia em diferentes pontos da cavidade tem o objetivo de verificar a melhor distribuição do campo elétrico, de forma a ter uma potência dissipada no material uniforme.

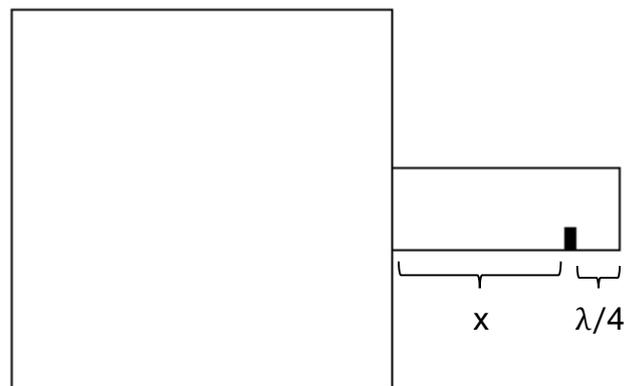
A quantidade de fontes também tem o objetivo de analisar a uniformidade dos campos.

Os itens 4.3.1, 4.3.2 e 4.3.3 apresentam os resultados obtidos.

4.3.1 Comprimento do guia de onda

A variável alterada está representada na Figura 58 pela letra x . Os valores para estudo foram alterados de $\lambda/4$ até λ , em que o comprimento de onda é igual a 12,3 centímetros.

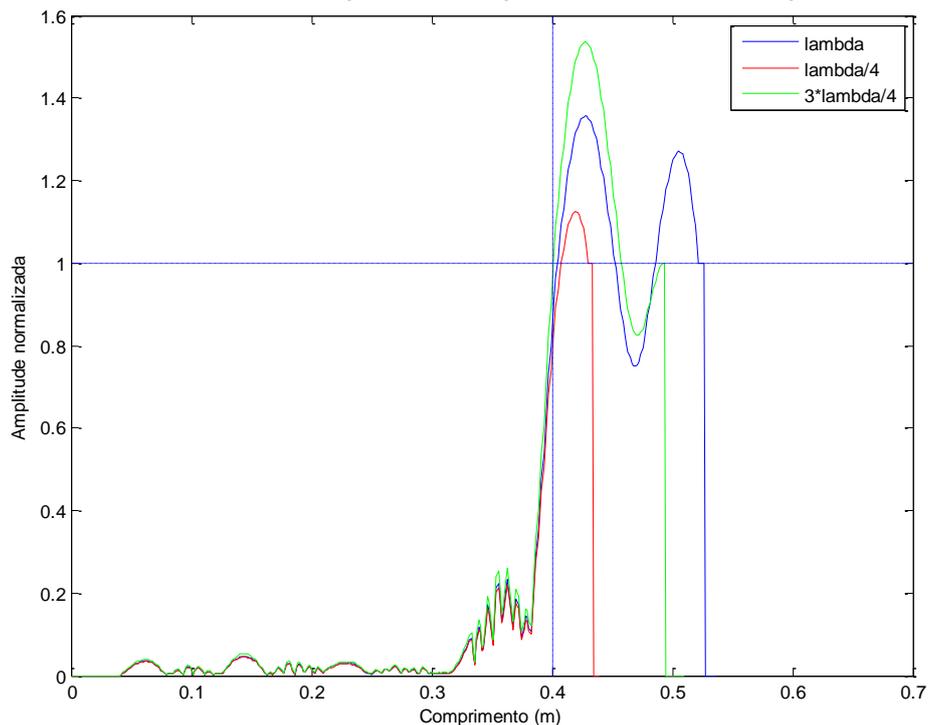
Figura 58 – Vista frontal



Fonte: Autoria própria, 2014.

O comportamento do campo elétrico pode ser visualizado na Figura 59 para os três comprimentos da guia. Percebe-se que para o espaço a partir de 0,4 m (localização do início do guia), as amplitudes de campo são diferentes para as três situações, sendo maior para o guia com $3\lambda/4$. Entretanto, essa diferença se torna quase nula ao passar para o interior da cavidade, já que a intensidade dos campos para os três comprimentos da guia de onda se sobrepõem no gráfico da Figura 59. Esse resultado mostra que o comprimento não apresenta influência significativa no desempenho do aquecimento.

Figura 59 – Intensidade de campo elétrico para diferentes comprimento do guia



Fonte: Autoria própria, 2014.

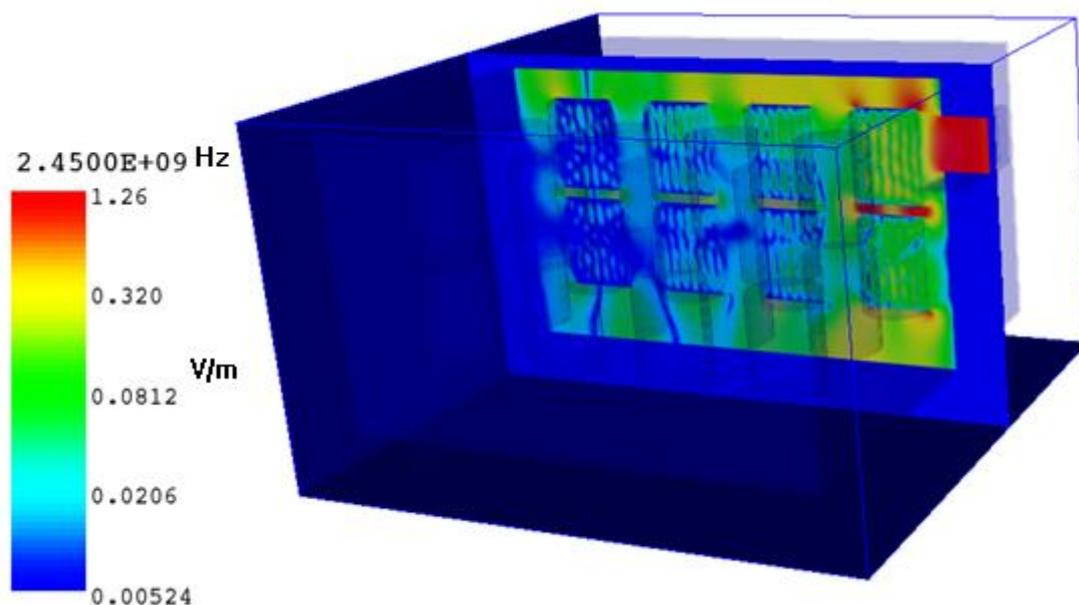
4.3.2 Localização do guia de onda

Para verificar como se comporta o campo, foram simuladas duas situações: guia de onda no topo da cavidade e na mesma posição, com altura superior a original. O item 4.3.2.1 e 4.3.2.2 apresentam a distribuição de campo elétrico para essas situações.

4.3.2.1 Guia localizada acima do nível original

Com o guia de onda instalado na lateral superior da cavidade, obtêm-se uma distribuição de campo semelhante ao obtido na Figura 18, sendo as maiores intensidades são encontradas na parte superior. Essa distribuição de campo, em função dos resultados obtidos, apresentará maior e mais uniforme aquecimento nos copos próximo ao guia de onda, tendo os copos do nível superior maior temperatura final. Os itens localizados no lado oposto da cavidade terão variações de temperatura mínimas.

Figura 60 – Distribuição de campo elétrico para cavidade com guia elevada

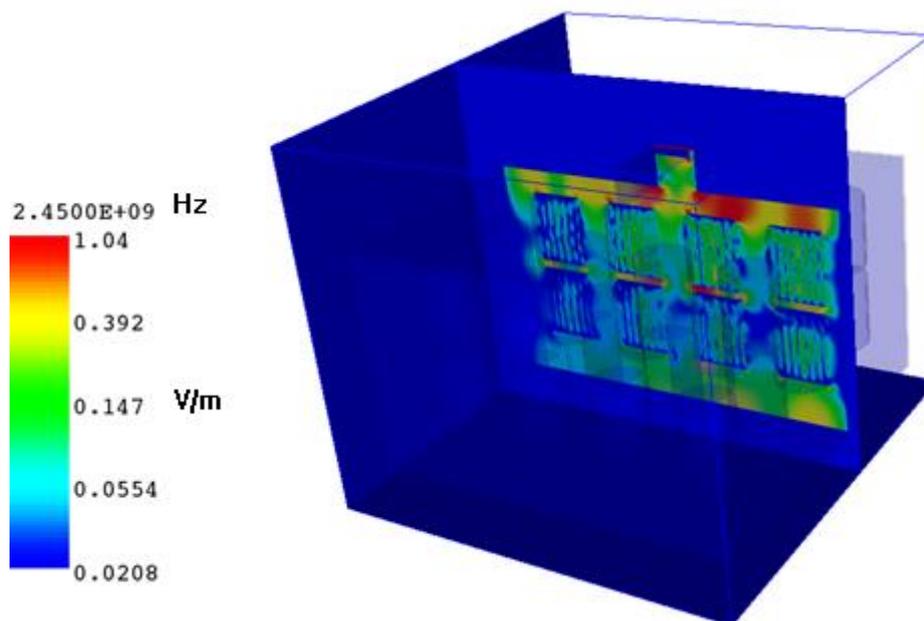


Fonte: Autoria própria, 2014.

4.3.2.2 Guia localizada na parte superior da cavidade

O guia de onda localizado no topo da cavidade, como apresentado na Figura 61, apresenta uma distribuição de campo mais uniforme que a construção original, pois não foram apenas os copos localizados na saída do guia que tiveram as maiores intensidades. Como a localização deste guia foi mais central, os copos localizados nas extremidades da cavidade também tiveram intensidades de campo elétrico significativas. A posição do guia de onda nessa simulação representa o posicionamento de um guia para cavidades industriais, que tem o objetivo de distribuir melhor o campo eletromagnético para todo o volume, buscando melhor uniformização da potência dissipada. Esta localização é uma alternativa à inexistência de pratos giratórios para a distribuição do campo.

Figura 61 – Distribuição de campo elétrico para cavidade com guia localizada na parte superior



Fonte: Autoria própria, 2014.

O Item 4.3.3 apresenta os resultados para as simulações com duas fontes localizadas em pontos diferentes da cavidade.

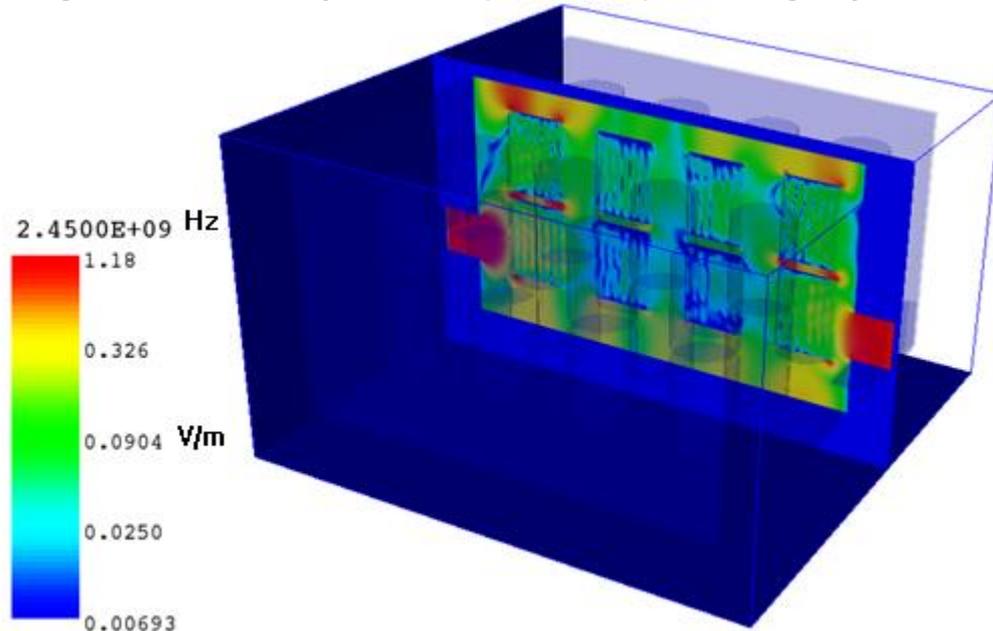
4.3.3 Quantidade de Fontes

A simulação trabalhou com duas fontes em duas situações diferentes: duas fontes em lados opostos na mesma altura e em alturas diferentes. As duas fontes possuem a mesma amplitude e fase. Os Itens 4.3.3.1 e 4.3.3.2 apresentam os resultados.

4.3.3.1 Configuração 01 – dois guias de onda simetricamente opostos

A presença da segunda fonte nesta simulação possibilita uma distribuição de campo elétrico bastante uniforme, permitindo um aquecimento semelhante em todos os elementos no interior da cavidade. A intensidade de campo, para esse caso, não modifica significativamente a intensidade do campo elétrico, como pode ser visto na Figura 62. O motivo disto pode ser atribuído ao fato de que as fontes possuem a mesma amplitude e fase, e devido à localização em que encontram os efeitos destrutivos são mais significativos que os construtivos.

Figura 62 – Distribuição de campo elétrico para configuração 01



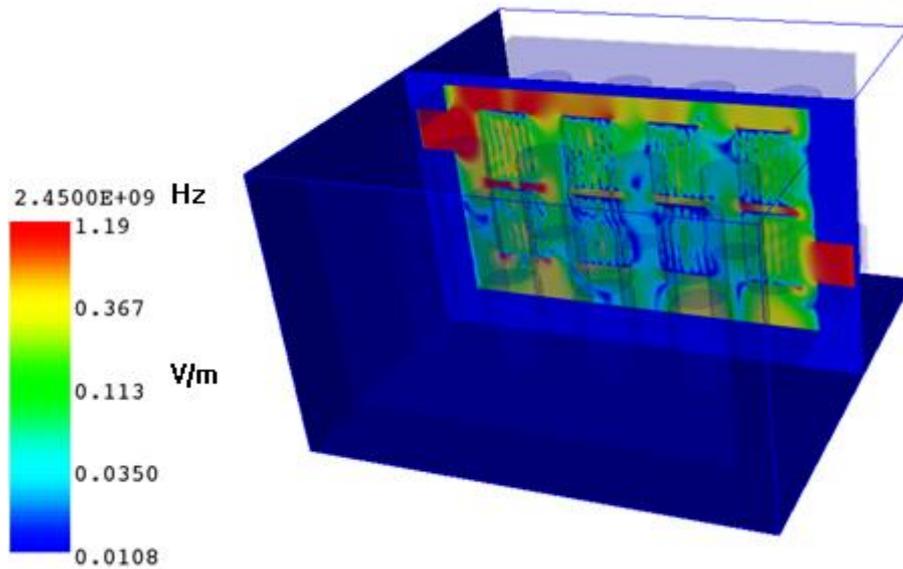
Fonte: Autoria própria, 2014.

4.3.3.2 Configuração 02 – dois guias de onda em níveis diferentes

A segunda configuração tem o segundo guia de onda localizado na parte superior da parede oposta da cavidade, apresentado na Figura 63. Essa configuração já apresenta uma distribuição de campo com maiores intensidades, quando comparada com a Figura 62.

Sendo assim, pode-se supor que um forno micro-ondas construído nessa configuração terá um aquecimento mais uniforme em toda a cavidade, diminuindo o surgimento dos *hot spots*, termo em inglês que se refere aos pontos que apresentam aquecimento excessivo em comparação à sua vizinhança. Este tipo de disposição das fontes também é adequado para cavidades industriais, pois possibilitam melhor uniformidade ao campo, sem a necessidade de mecanismos de espalhamento.

Figura 63 – Distribuição de campo elétrico para configuração 02



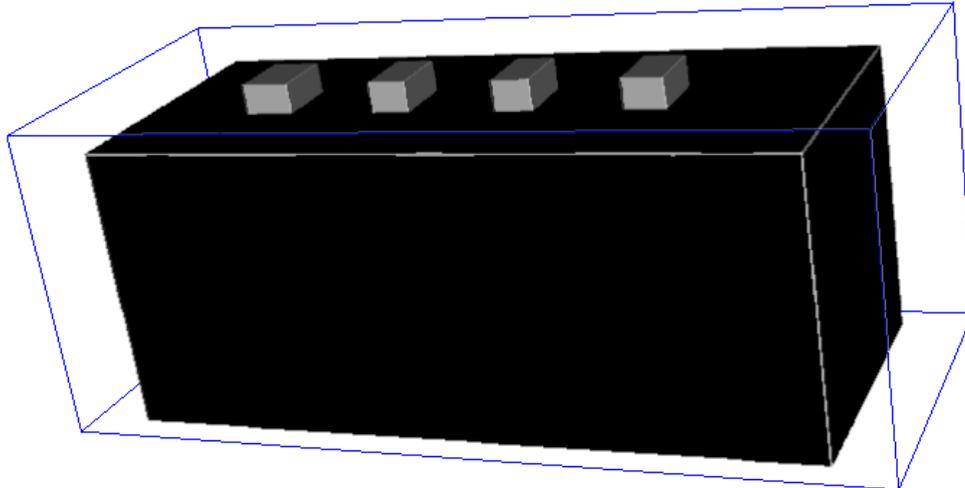
Fonte: Autoria própria, 2014.

Com o estudo da variação das mudanças construtivas da cavidade analisada, seguiu-se para a verificação do desempenho de um forno industrial, baseado em Methlouthi, Rouaud, Boillereaux (2010) e Rattanadecho (2006).

4.4 SIMULAÇÃO DE UM FORNO INDUSTRIAL PARA SECAGEM DE MADEIRA

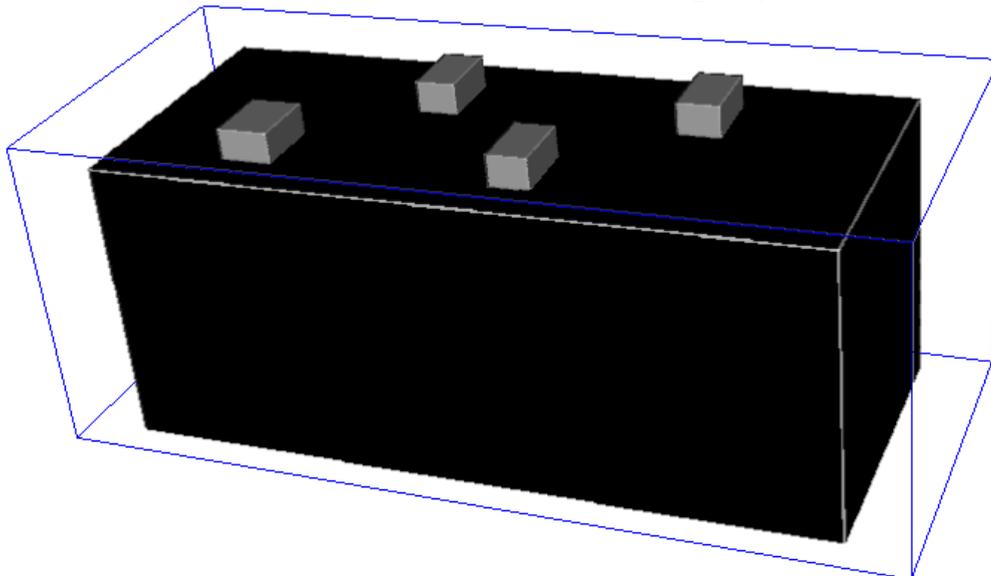
O modelo utilizado como base utiliza alimentação contínua e para evitar que o campo eletromagnético flua para fora da cavidade é utilizado um segmento externo onde flui água por tubulações na entrada e na saída do forno. Para diminuir o consumo de recurso computacional e simplificar a análise, este elemento de redução foi retirado e foi considerado um forno fechado. A cavidade possui $1,2 \times 0,45 \times 0,5 \text{ m}^3$. Foram simuladas duas configurações para esta cavidade, com localização das fontes diferenciadas, como apresentado nas FigurasFigura 64 e Figura 65.

Figura 64 – Cavity industrial, configuration 01



Fonte: Autoria própria, 2014.

Figura 65 – Cavity industrial, configuration 02



Fonte: Autoria própria, 2014.

Foram utilizadas quatro fontes (cinza) com a mesma potência da utilizada no forno residencial simulado nos itens anteriores. Foram aquecidas cinco amostras de madeira do tipo pinho. As propriedades das amostras estão na Tabela 5 – Propriedades térmicas e elétricas da madeira.

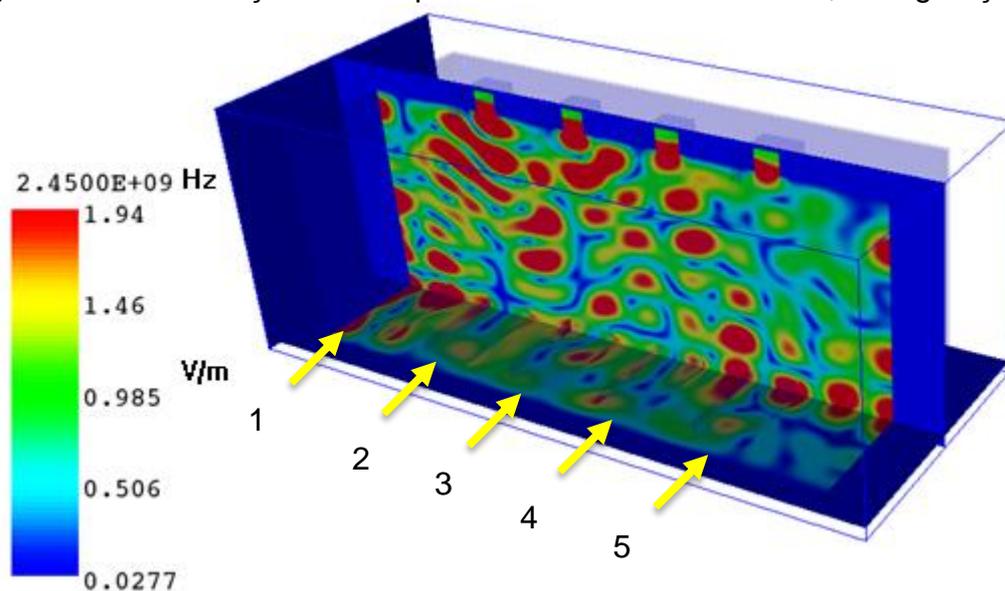
A configuração 01 foi analisada por apresentar um aspecto construtivo simplificado, já a configuração 02 foi adaptada da cavidade estudada por Methlouthi, Rouaud, Boillereaux (2010).

Tabela 5 – Propriedades térmicas e elétricas da madeira	
Condutividade térmica	0,12 W·m ⁻¹ ·K ⁻¹
Densidade	721 kg·m ⁻³
Calor específico	2500 J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹
Difusibilidade térmica	6,65·10 ⁻⁸ m ² ·s ⁻¹
Umidade	12,5 %
Temperatura inicial	25 °C
Permissividade relativa	1,591
Condutividade equivalente	4,5·10 ⁻³ S·m ⁻¹

Fonte: Autoria própria, baseado em The Engineering ToolBox (2014) e Rattanadecho (2006), 2014.

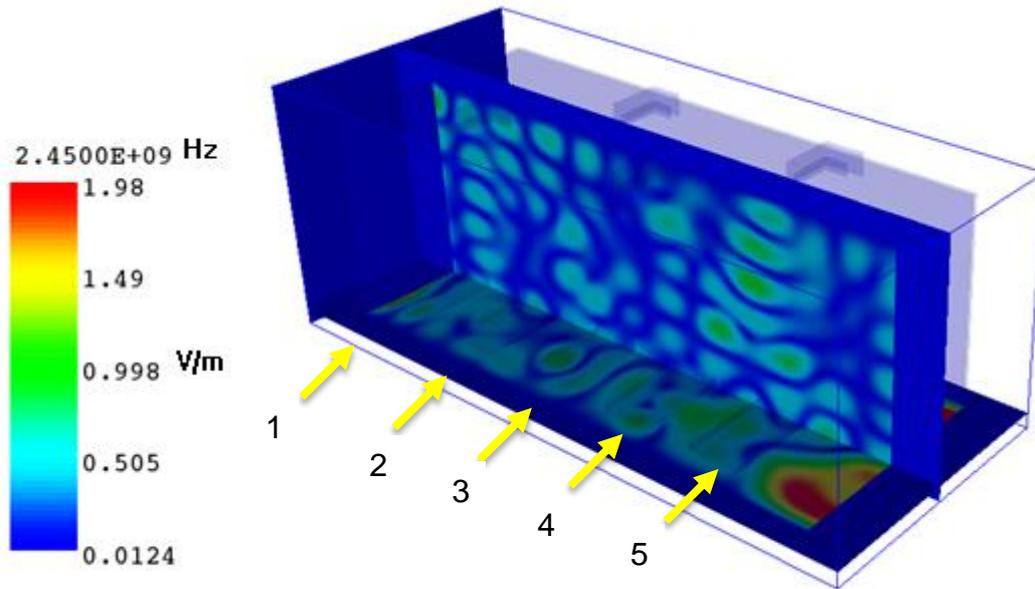
As amostras possuem dimensões de 10,0 × 4,0 × 34,0 cm³. A Figura 66 apresenta a distribuição do campo elétrico, com planos cortando ao centro na altura e no comprimento, para a configuração 01. A Figura 67 apresenta os campos para a configuração 02. As amostras estão indicadas pelas setas amarelas.

Figura 66 – Distribuição do campo elétrico no forno industrial, configuração 01



Fonte: Autoria própria, 2014.

Figura 67 – Distribuição de campo elétrico no forno industrial, configuração 02

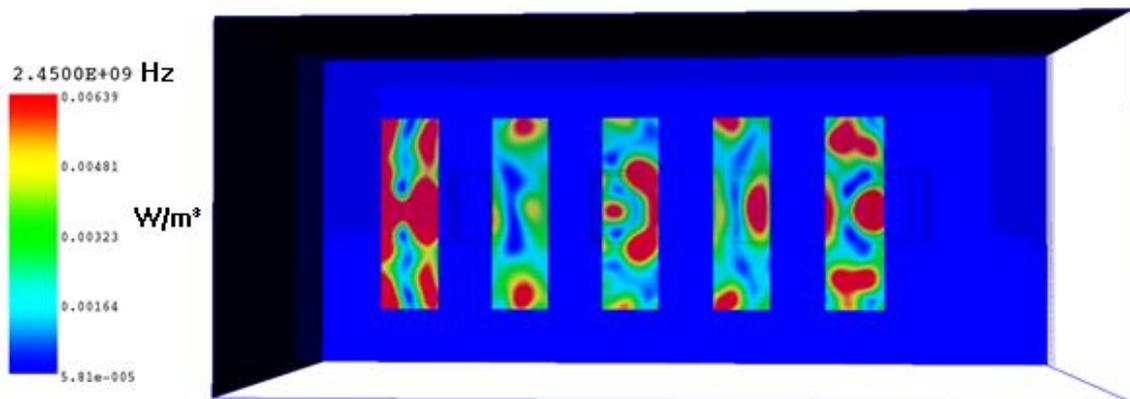


Fonte: Autoria própria, 2014.

A Figura 67 mostra que a intensidade do campo resultante para a configuração 02 apresenta menores valores, quando comparada com a configuração 01 na Figura 66.

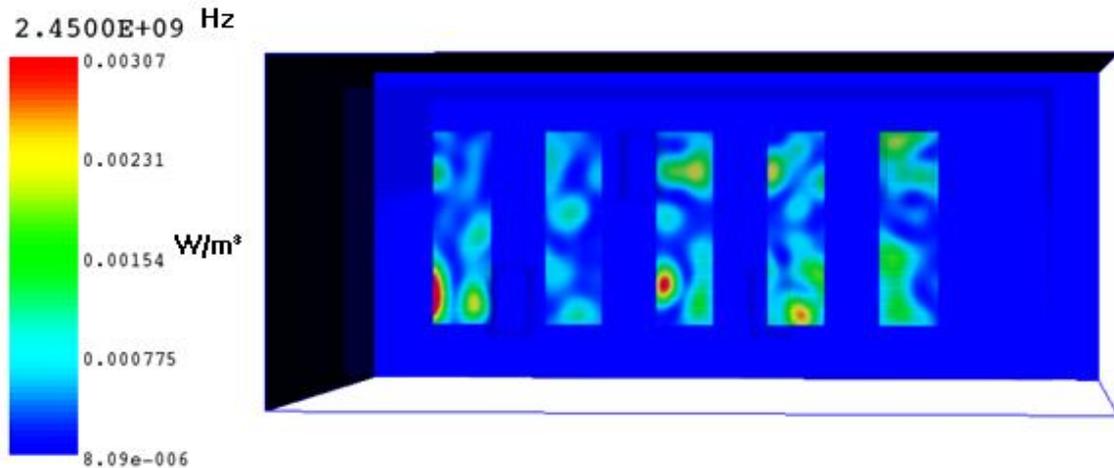
A visualização da potência dissipada em cada amostra, pode ser vista na Figura 68 (configuração 01) e na Figura 69 (configuração 02).

Figura 68 – Potência dissipada nas amostras (configuração 01), vista superior.



Fonte: Autoria própria, 2014.

Figura 69 - Potência dissipada nas amostras (configuração 02), vista superior.

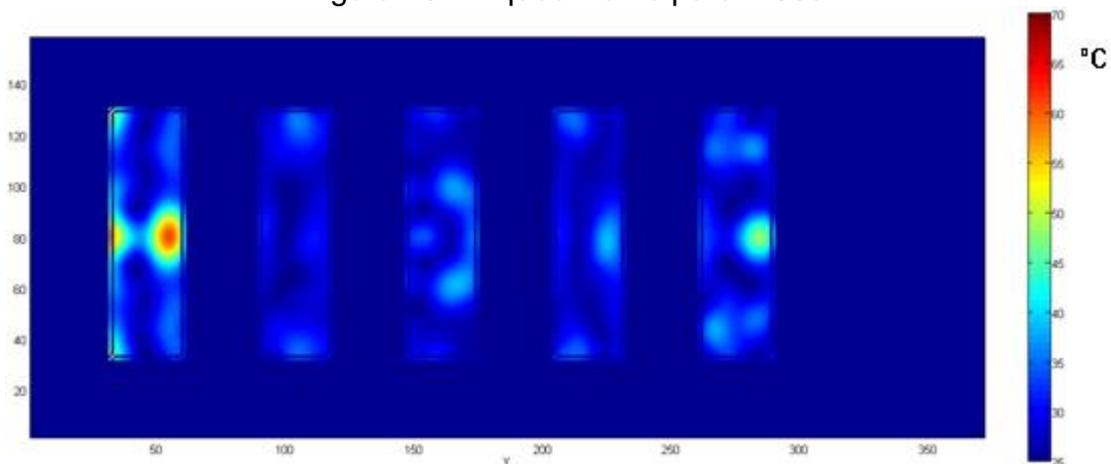


Fonte: Autoria própria, 2014.

Na Figura 69, os valores de potência dissipada são menores em comparação à potência dissipada na Figura 68 e com uma distribuição de campo mais irregular.

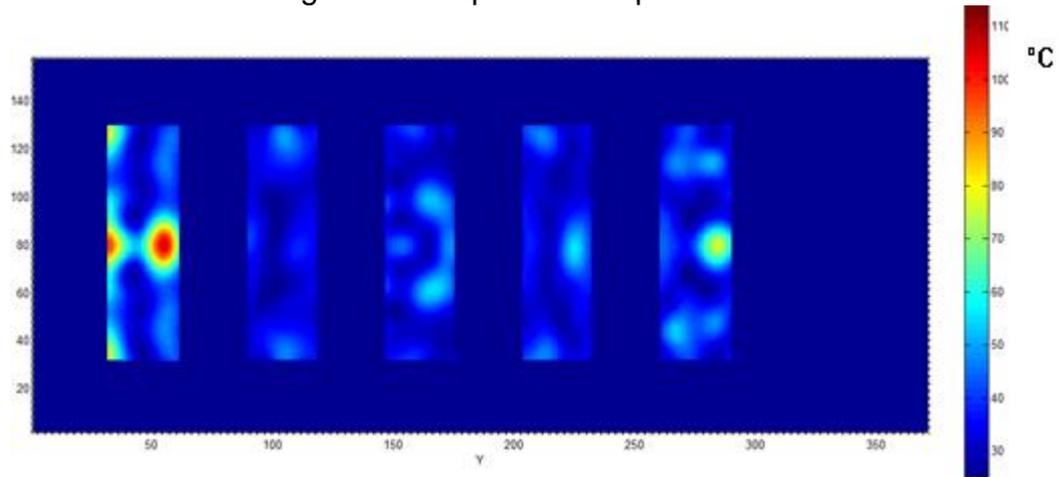
Para estudar o comportamento do aquecimento das amostras no forno, nas duas configurações, foram feitas simulações com diferentes durações de aquecimento de 30, 45 e 60 segundos para a configuração 01. Como a configuração 02 apresenta valores de potência dissipada menores, os tempos de aquecimento foram estendidos até 120 segundos, com acréscimo de 15 segundos. As Figuras Figura 70 a Figura 72 mostram os resultados para a configuração 01 e as Figuras Figura 73 a Figura 79 para a configuração 02.

Figura 70 – Aquecimento para $t=30s$.



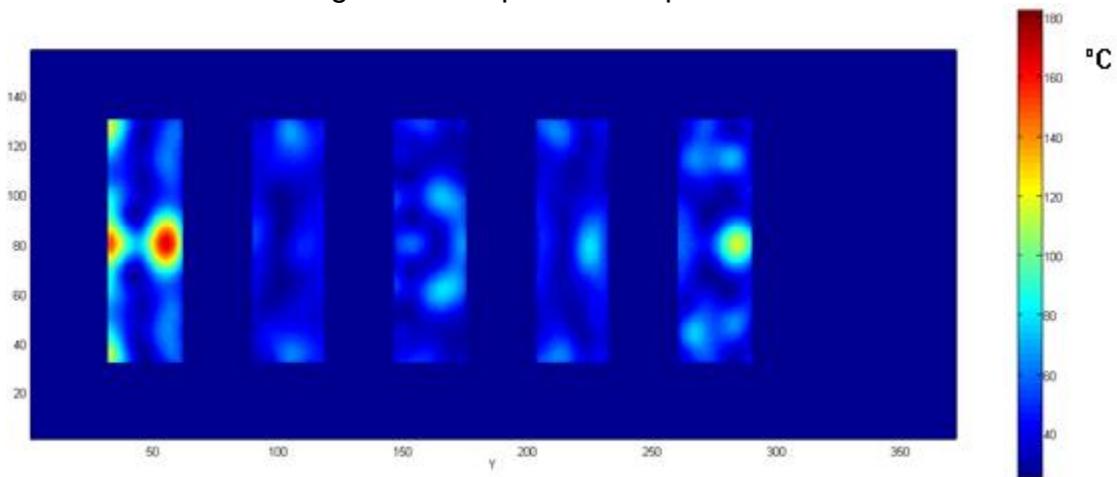
Fonte: Autoria própria, 2014.

Figura 71 - Aquecimento para t=45s.



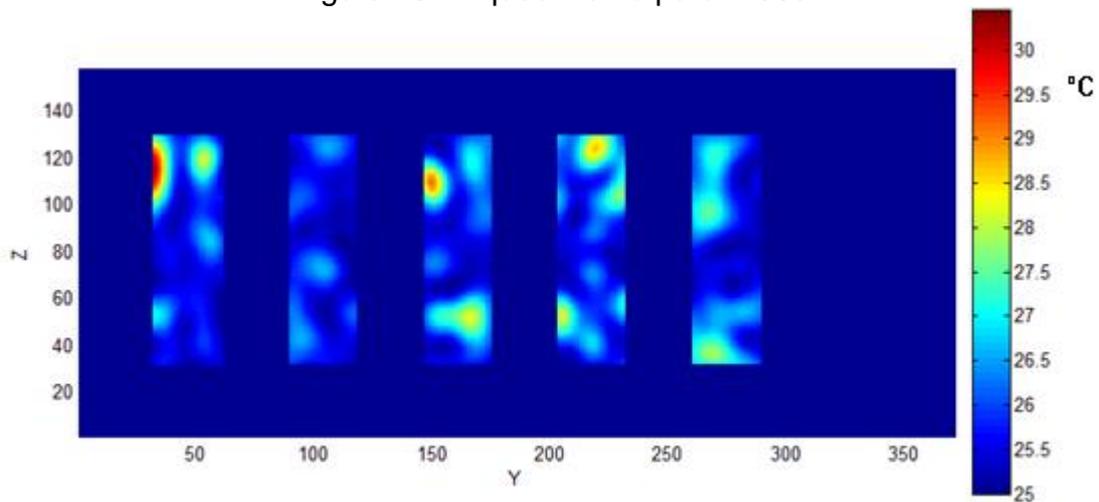
Fonte: Autoria própria, 2014.

Figura 72 - Aquecimento para t=60s.



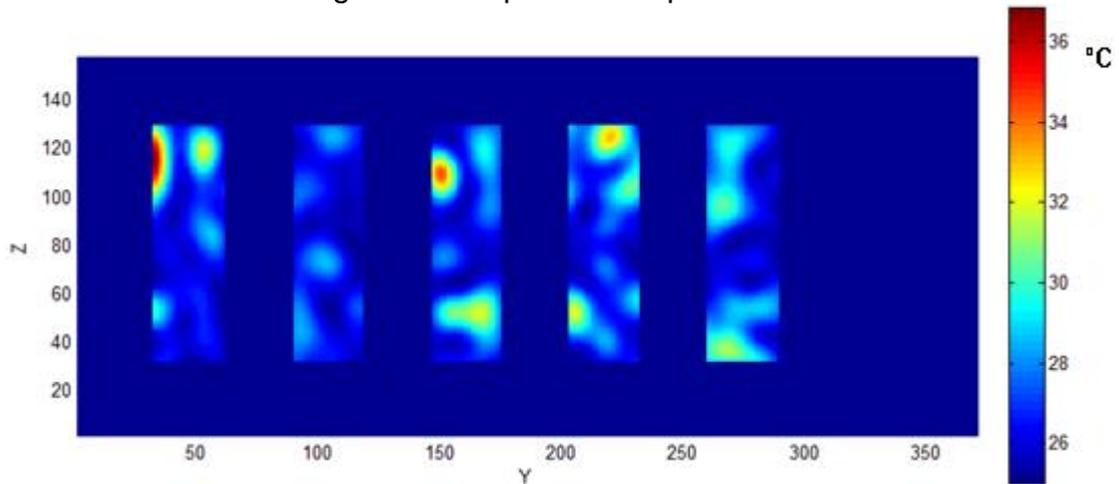
Fonte: Autoria própria, 2014.

Figura 73 - Aquecimento para t=30s.



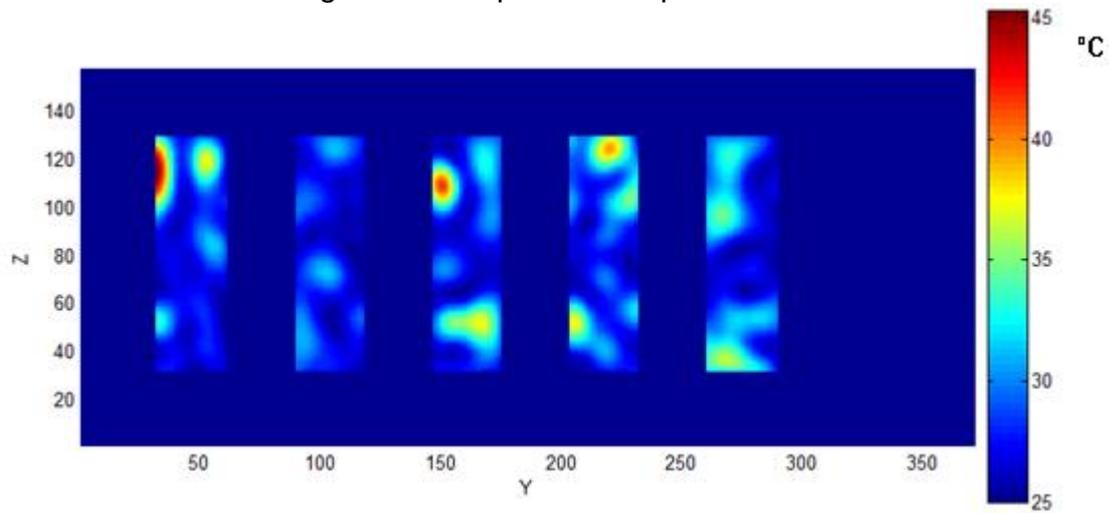
Fonte: Autoria própria, 2014.

Figura 74 - Aquecimento para t=45s.



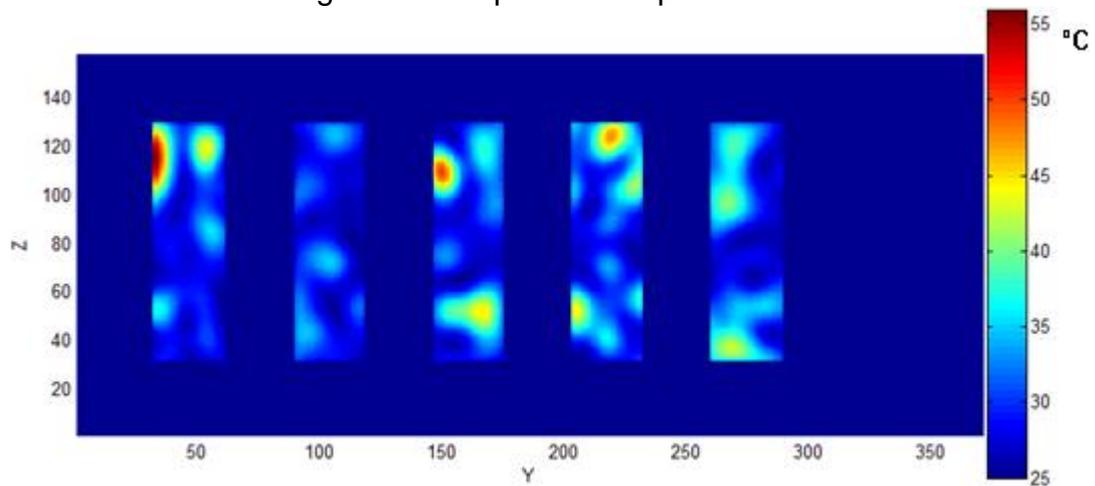
Fonte: Autoria própria, 2014.

Figura 75 – Aquecimento para t=60s.



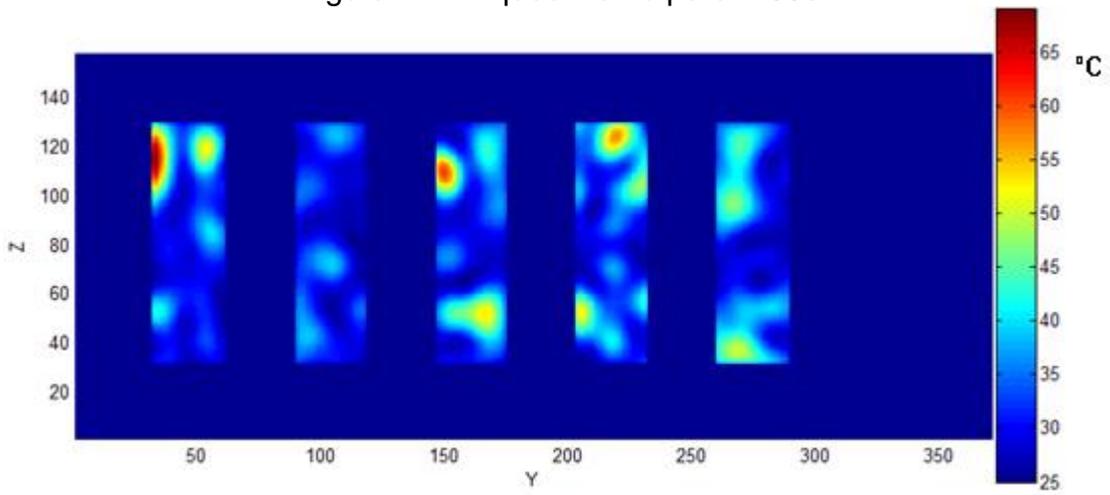
Fonte: Autoria própria, 2014.

Figura 76 – Aquecimento para t=75s.



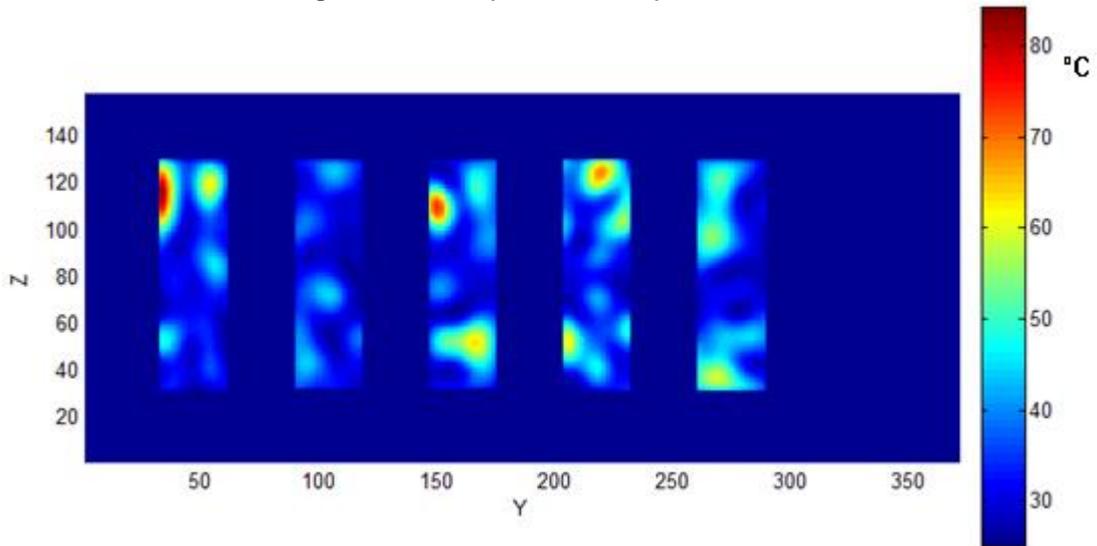
Fonte: Autoria própria, 2014.

Figura 77 – Aquecimento para $t=90s$.



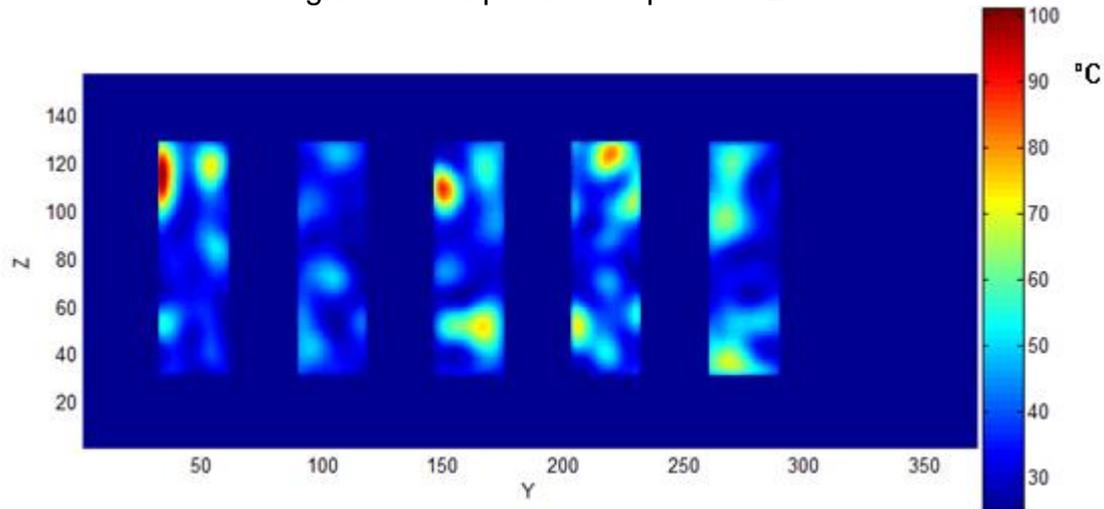
Fonte: Autoria própria, 2014.

Figura 78 – Aquecimento para $t=105s$.



Fonte: Autoria própria, 2014.

Figura 79 – Aquecimento para t=120s.



Fonte: Autoria própria, 2014.

Para a simulação desse forno, considerado estático, percebe-se claramente pelas Figura 70 a Figura 72 o surgimento de *hot spots* nas amostras 1 e 5. As temperaturas atingidas depois de um minuto de aquecimento são suficientes para efetuar a secagem da madeira, entretanto a temperatura no interior da madeira pode vir a danificar a composição da mesma.

Nas Figuras Figura 73 a Figura 79 observa-se que o gradiente de temperatura é consideravelmente menor durante o tempo de aquecimento, mesmo esse sendo o dobro, entretanto, a distribuição da temperatura pelas amostras é mais uniforme para a configuração 02, do que na configuração 01. Na Figura 79 surgem *hot spots* nas amostras 01, 03 e 04, mas com valores de temperatura que são inferiores aos encontrados na configuração 01.

A escolha da configuração, neste caso, dependerá do objetivo do aquecimento:

- Aquecimento rápido sem tamanha preocupação com a qualidade do produto final, ou;
- Aquecimento lento, com maior gasto de energia, mas com a preocupação de não danificar o material aquecido.

Considerando que a configuração 02 deixe de ser estática e passe a ser em movimento, levando 45 segundos para os blocos cruzarem toda a cavidade, a distribuição de campo será uma média do desempenho apresentando na Figura 74, o que acarretará em uma melhor distribuição do aquecimento em todos os elementos.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Considerando a importância do estudo das ondas eletromagnéticas para diversas aplicações e a possibilidade do desenvolvimento de novas soluções envolvendo as áreas da indústria e da medicina, o trabalho em questão se propôs a desenvolver um método numérico para servir como base no projeto de fornos micro-ondas, para reduzir o tempo de desenvolvimento e os custos na produção do protótipo.

Os resultados obtidos no teste com o forno micro-ondas residencial mostraram que os dados obtidos pela simulação são válidos até que cerca de 70% do volume do objeto aquecido atinja 60 °C, para a permissividade adotada para a água. O estudo comparativo das mudanças construtivas mostra a possibilidade de melhorias nos modelos adotados usualmente, mas cada modificação deve levar em consideração o objeto final do aquecimento.

A simulação simplificada do forno micro-ondas industrial permitiu verificar a validade dos resultados obtidos com outros trabalhos desenvolvidos na área, confirmando a utilidade do método desenvolvido para o estudo e projeto de cavidades utilizadas para o aquecimento. Permitiu também visualizar o desempenho das duas formas de organização da alimentação, mostrando que para cada objetivo final deve-se atentar para a estrutura da cavidade.

Por ter sido desenvolvido utilizando o Matlab®, o algoritmo permite que a mudança de temperatura dos materiais possa ser apresentada em forma de animação ao longo do tempo e também na forma de gráficos de pontos específicos do material aquecido.

Além das contribuições citadas para o modelo, também foi adicionado a utilização de camadas perfeitamente absorvedoras, que permite simular a propagação de ondas em campo aberto. Possibilitando a representação de cavidades industriais com armadilhas de micro-ondas.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir dos resultados obtidos, bem como os conhecimentos adquiridos ao longo deste trabalho, pode-se sugerir alguns melhoramentos para trabalhos futuros, tais como:

- Efetuar os experimentos utilizando um termovisor, para verificar o comportamento da água em seu volume;
- Adicionar condições para alterar proporcionalmente a potência dissipada em função da temperatura, sem necessidade de novas simulações de distribuição de campo elétrico;
- Simular cavidades monomodos para verificar a validade do modelo para atividades industriais que utilizam este tipo de forno;
- Estudar o comportamento de minérios e cerâmicas aquecidas em fornos de micro-ondas;
- Adicionar a variação das propriedades elétricas e térmicas em função da temperatura para estudo da interação com tecidos biológicos e em aplicações de alta precisão, como na indústria química.

REFERÊNCIAS

ARIELI, Rami. The Laser Adventure. Disponível em <<http://perg.phys.ksu.edu/vqm/laserweb/ch-4/f4s3t1p3.htm>>. Acesso em 05 de janeiro de 2015.

BALANIS, C. A. Advanced Engineering Electromagnetics. John Wiley & Sons Inc., 1st ed., 1989.

BENGTSSON, N. E; OHLSSON, T. Microwave Heating in the Food Industry. Proceedings of the IEEE, v. 62, n. 1, p. 44-55, jan. 1974.

CHAN, T. V.; CHOW T.; READER, H. C. Understanding microwave heating cavities. Boston: Artech House, 2000. 275 p.

CHAPLIN, M. Disponível em: <http://www1.lsbu.ac.uk/water/microwave_water.html>. Acesso em 30 de julho de 2014.

COLE, K. S.; COLE, R. H. Dispersion and Absorption in Dielectrics. Journal of Chemical Physics, v. 9, p. 341-351, apr. 1941.

COLLINS, R. E. Foundations for microwave engineering. New York: McGraw Hill, 2nd ed., 1992.

COMMITTEE ON MICROWAVE PROCESSING OF MATERIALS. Microwave Processing of Materials. Publication NMAB-473. Washington, D.C.: National Academy Press, 1994.

DEV, S. R. S. GARIÉPY, T. ORSAT, V. RAGHAVAN, G. S. V. FDTD modeling of microwave heating of in-shell eggs. Progress in Electromagnetic Research M, vol. 13, p. 229-243, 2010.

DIBBEN, D. C. Numerical and experimental modelling of microwave applicators. Tese de doutorado. University of Cambridge. Department of Engineering. Reino Unido, 1995.

FONTANA, Eduardo. Eletromagnetismo – Parte II, Capítulo 10: Guias de Onda. Disponível em <<https://www.ufpe.br/fontana/Eletromagnetismo2/EletromagnetismoWebParte02/mag2cap10.htm#mozTocId909567>>. Acesso em 05 de janeiro de 2015.

GIBSON, W. C. The method of moments in electromagnetics. CRC Press, 2008.

HUANG, K. M; LIN. Z; YANG, X.Q. Numerical simulation of microwave heating of chemical reaction in dilute solution. Progress in Electromagnetics Research, vol. 49, p. 273-289, 2004.

INAN, U. S.; MARSHALL, R. A. Numerical Electromagnetics: the FDTD method. EUA: Cambridge University Press, 2011.

INFO ESCOLA. Disponível em: <<http://www.infoescola.com/quimica/espectrofotometria>>. Acesso em 18 de julho de 2014.

KOPYT, P; CELUCH, M. Coupled Eletromagnetic-Thermodynamic Simulations of Microwave Heating Problems Using the FDTD Algorithm. Journal of Microwave Power & Electromagnetic Energy ONLINE, vol. 41, n. 4, p. 18-29, 2007.

LIMA, C. B. Análise de dispositivos eletromagnéticos para hipertermia usando o método FDTD. Tese de doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Brasil, 2006.

LUXTEM. Disponível em: <http://www.luxtem.com/WaveGuide/WR340_1kW_Simpletype.jpg>. Acesso em: 05 de agosto de 2014.

LUZ, J. C. O efeito da tecnologia de micro-ondas nas propriedades tecnológicas dos componentes de cerâmicas estrutural. Brasil, 2012. Tese de doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do norte. Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharias de Materiais.

FERRARO, B. Os Fundamentos da Física. Disponível em: <http://osfundamentosdafisica.blogspot.com.br/2013/04/cursos-do-blog-termologia-optica-e-ondas_16.html>. Acesso em 07 de janeiro de 2014.

FILHO, M. F. O método da modelagem por Linhas de Transmissão (TLM) e aplicações em Compatibilidade Eletromagnética (EMC). Brasil, 1997. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

METAXAS, A. C.; MEREDITH, R. J. Industrial Microwave Heating. London: Peter Peregrinus Ltd, 1993.

METHLOUTHI, A; ROUAUD, O; BOILLEREAUX, L. Microwave Applicator with Conveyor Belt System. COMSOL Conference. 2010.

MINIPA. Disponível em: <<http://www.minipa.com.br/5/94/172-Minipa-Termometros-Infravermelho-MT-350>>. Acesso em: 17 de outubro de 2013.

MUKENDI, W. M. Modeling and Simulation of Heat Transfer Between Microwaves and a Leachate. Dissertação de Mestrado. University of Johannesburg. Department of Mechanical Engineering Technology. South Africa, 2006.

MUR, Gerrit. Absorbing Boundary Conditions for Finite-Difference Approximation of the Time-Domain Electromagnetic-Field Equations, IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility, Vol. EMC-23, No. 4, pp. 377-382, 1981.

NASCIMENTO, R. B. Contribuição ao desenvolvimento de processos químicos incentivados por micro-ondas para hidrólise em alta pressão de bagaço de cana.

Dissertação de mestrado. Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia. Escola de Engenharia Mauá. Brasil, 2012.

OR, D., WRAITH, J.M. Temperature effects on soil bulk dielectric permittivity measured by time domain reflectometry. A physical model. *Water Resources Research*, vol.25, p.371-383,1999.

ORFANIDIS, S. J. *Electromagnetic Waves and Antennas*. Disponível em: <<http://www.ece.rutgers.edu/~orfanidi/ewa>>. Acesso em: 01 de novembro de 2014.

OSEPCHUK, J. M. *Microwave Power Applications*. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, v. 50, n. 3, p. 975-985, mar. 2002.

OLIVEIRA, D. B. *Análise do aquecimento por micro-ondas em uma cavidade monomodo utilizando uma técnica semi-analítica*. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Brasil, 2007.

PAVÃO, A. C. “*Cavidades Carregadas - Estudo Da Perturbação Dos Campos Eletromagnéticos*”, Tese de doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Brasil, Departamento de Engenharia Elétrica, 2004.

PEGORARO JR, L. C. *Validação de técnicas para modelagem numérica de fornos de micro-ondas baseadas no método dos elementos finitos*. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica. Brasil, 2012.

RATTANADECHO, P. *The simulation of microwave heating of wood using a rectangular wave guide: influence of frequency and sample size*. *Chemical Engineering Science*, vol 61, p. 4798-4811, mar. 2006.

RATANADECHO, P. *et al.* *A numerical and experimental investigation of the modeling of microwave heating for liquid layers using a rectangular wave guide (effect of natural convection and dielectric properties)*. *Applied Mathematical Modelling*, vol 26, p. 449-472, 2002)

SADIKU, M. N. O. *Numerical techniques in electromagnetics*. CRC Press, 2nd ed, 2000.

STOGRYN, A. *Equations for calculating the dielectric constant of saline water*. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. MIT-19, p. 733-736, 1971.

TAFLOVE, Allen. BRODWIN, M. E. *Numerical Solution of Steady-State Electromagnetic Scattering Problems Using the Time-Dependent Maxwell's Equations*, *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, Vol. MTT-23, No. 8, pp. 623-630, 1971.

TAFLOVE, A.; KORADA R. U. The Finite-Difference Time-domain (FD-TD) Method for Numerical Modeling of Electromagnetic Scattering, IEEE Trans. Magnetics, Vol. 25, No.4, pp. 3086-3091, July 1989.

TANG, J., LAU, H. LAU, M. Microwave heating in food processing. Advances in Bioprocessing Engineering, p 1-44. 2002.

THE ENGINEERING TOOLBOX. Disponível em <
<http://www.engineeringtoolbox.com/>>. Acesso em 01 de dezembro de 2014.

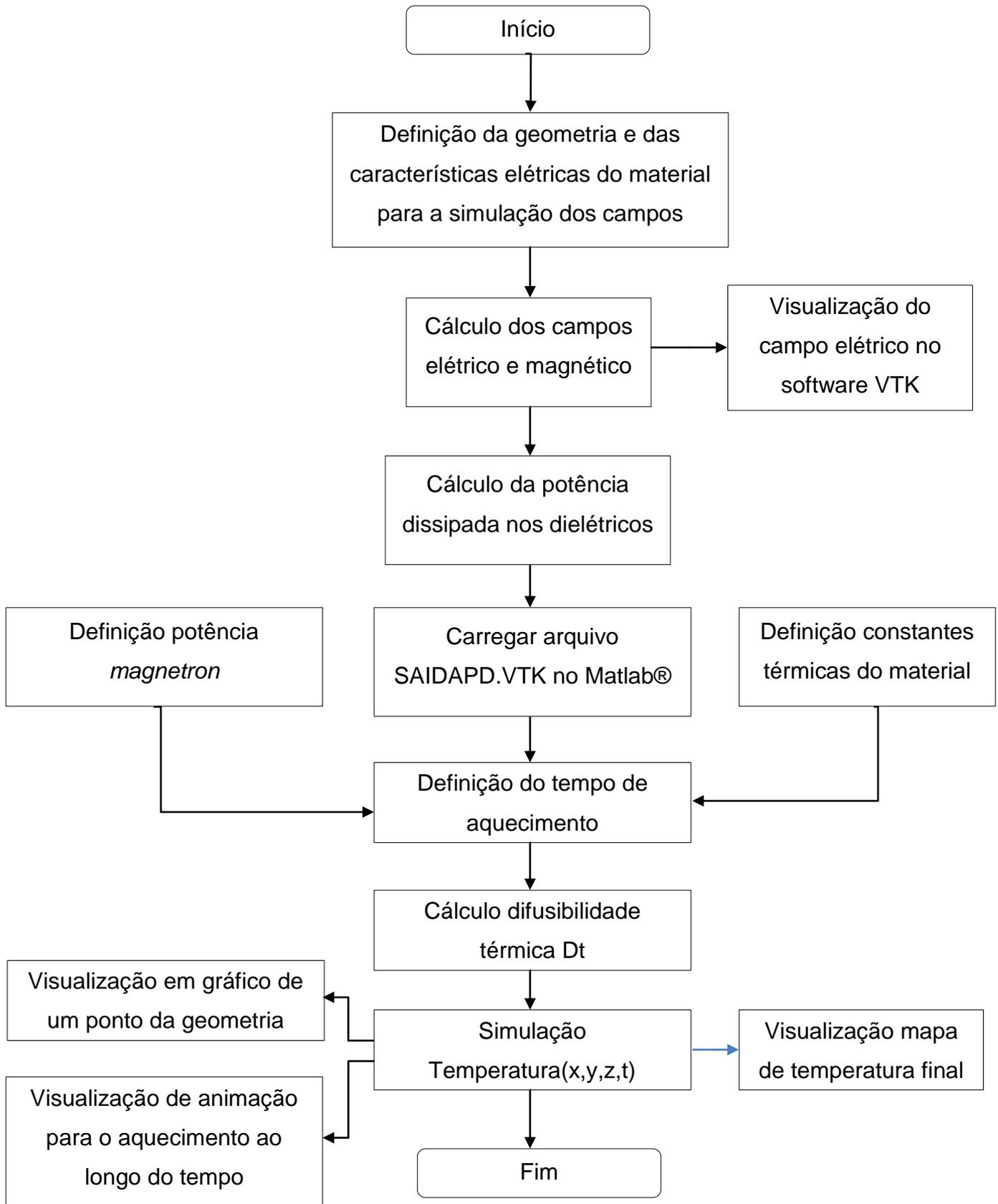
TORRES, F., JECKO, B. Complete FDTD Analysis of Microwave Heating Processes in Frequency-Dependent and Temperature-Dependent Media. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 45 (1), 108-117, 1997.

ULANY, F.T.; MOORE, R. K.; FUNG, A. K. Microwave Remote Sensing: Active and Passive, vol III: From Theory to Applications. Dedham, MA: Artech House, Inc. 1986.

VOLLMER, M. Physics of the microwave oven. Physics Education, vol. 39, p. 74-81, 2004.

YEE, Kane S. Numerical Solution of Initial Boundary Value Problems Involving Maxwell's Equations in Isotropic Media, IEEE Trans. Antennas and Propagation, Vol. AP-4, No. 3, pp. 302-307, 1966.

ANEXO 1



ANEXO 2

