

# ESTUDO DE MODELOS DE AQUECIMENTO VIA MICRO-ONDAS: REPLICANDO A GEOMETRIA DE UM FORNO COMERCIAL

L. M. RAYMUNDO<sup>1</sup>, J. O. TRIERWEILER<sup>1</sup>, F. C. BORGES<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Engenharia Química  
E-mail: raymundo@enq.ufrgs.br

**RESUMO** – O uso de micro-ondas em aquecimento é bem estabelecido na sociedade, sendo usado no meio doméstico e também em alguns processos industriais. Um dos desafios para a utilização de aquecimento via micro-ondas em processos é a obtenção de um equipamento de aquecimento que supra suas condições, seja compatível com sua escala e que seja eficiente. Um componente principal de um equipamento desse tipo é a cavidade ressonante, onde a energia das micro-ondas é transferida aos materiais que serão aquecidos. O campo elétrico dentro da cavidade ressonante define o perfil de aquecimento que será obtido, e está ligado à sua geometria. Nesse trabalho, são estudados modelos de aquecimento via micro-ondas em um forno comercial, cuja geometria real foi modelada em menor e maior detalhamento utilizando o software COMSOL Multiphysics®. Os resultados obtidos divergem de dados reais de aquecimento, indicando a importância da modelagem de detalhes geométricos e demais componentes de um forno real.

## 1. INTRODUÇÃO

O aquecimento via micro-ondas, utilizado amplamente em fornos domésticos para aquecimento de alimentos, tem um potencial para ser utilizado em muitos processos de aquecimento industriais, pois oferece vantagens únicas não alcançadas pelos meios de aquecimento convencionais. Em processos de tratamento de resíduos, a tecnologia de micro-ondas tem sido pesquisada como um método de apoio, apresentando as seguintes vantagens: (i) redução no volume de resíduo, (ii) aquecimento rápido, (iii) aquecimento seletivo, (iv) melhor reatividade química, (v) a possibilidade de tratar resíduos in-situ, (vi) processos rápidos e flexíveis que podem ser controlados remotamente, (vii) facilidade de controle, (viii) economia de energia, (ix) custo-benefício geral, (x) portabilidade de equipamentos e de processos, (xi) uma fonte de energia mais limpa comparada aos sistemas convencionais (Fernández, Arenillas e Menéndez, 2011).

No entanto, existem desafios para a utilização do aquecimento via micro-ondas em processos, sendo os principais a necessidade de sistemas diferenciados para o sensoriamento de temperatura (Mehdizadeh, 2010), a limitação de materiais utilizáveis em um meio de propagação de micro-ondas (Javadi, 1995) e especialmente a obtenção de um equipamento de aquecimento compatível com o processo e com sua escala e que seja eficiente (Thostenson e Chou, 1999). Os componentes principais de qualquer equipamento desse tipo são uma fonte, responsável pela geração de radiação

eletromagnética, linhas de transmissão, que entregam a energia eletromagnética da fonte ao aplicador, e o aplicador, que no caso de um forno doméstico é uma cavidade ressonante onde a energia das micro-ondas é transferida aos materiais aquecidos. O campo elétrico que se estabelece dentro da cavidade ressonante é definido por sua geometria, e está intrinsecamente ligado aos gradientes de temperatura que se estabelecerão durante o aquecimento e à eficiência de conversão de energia eletromagnética em térmica (Thostenson e Chou, 1999).

Nesse sentido, o projeto do aplicador de micro-ondas é crítico para a utilização de aquecimento via micro-ondas em processos. O objetivo deste trabalho é verificar a representatividade de modelos de aquecimento via micro-ondas, visando sua aplicação como ferramenta de projeto de um sistema de aquecimento desse tipo. Para tanto, foram estudados modelos utilizando o software de modelagem e simulação COMSOL Multiphysics, como instrumento de validação foi usado um forno de micro-ondas comercial.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1. Forno de Micro-ondas

Para a realização de experimentos de aquecimento dielétrico e modelagem, foi utilizado um forno micro-ondas doméstico da marca LG classe Intellowave Grill modelo MB-274PL. As informações técnicas do aparelho são apresentadas na Tabela 1:

Tabela 1: Informações técnicas do forno micro-ondas

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

Conforme a Tabela 1, o forno possui, além do aquecimento por micro-ondas, as funções de aquecimento resistivo, dito “Grill”, e aquecimento combinado, tendo uma geometria diferenciada de fornos micro-ondas simples, conforme visto na Figura 6.

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

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

fica a antena do magnetron, e a cavidade ressonante (Figura 1).

As medições da geometria para réplica em *software* foram realizadas manualmente utilizando réguas e paquímetros. Nas fronteiras da cavidade ressonante existem mais reentrâncias de menor escala em formato oval, ao fundo, e em formato de grade, próximas ao guia de onda, além de diversos pequenos furos para ventilação, entrada de luz e visualização, que tiveram de ser desconsiderados.



Figura 1: Visão frontal do interior da cavidade ressonante e porta de micro-ondas de altura variável, refletor angulado e fresta; Guia de ondas e magnetron escondidos por parede metálica; Placa de mica removida

## 2.2. Metodologia Experimental

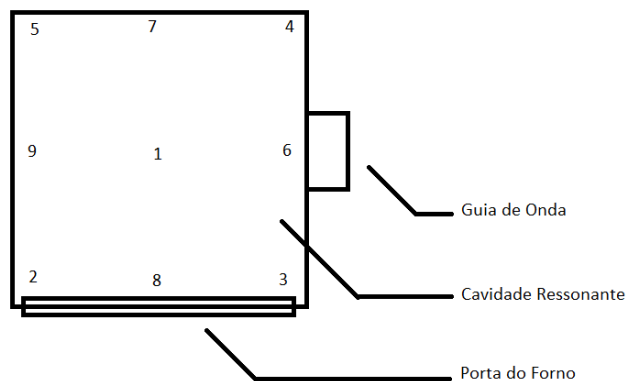


Figura 2: Esquema dos pontos experimentais em vista superior do forno.

Foram analisados 9 pontos da cavidade ressonante, esquematizados na Figura 2. Para cada ponto, um recipiente de polietileno era preenchido com 50 ml de água, vedado e aquecido por 30 segundos. As temperaturas inicial e final foram medidas com um termopar e assim obtido o calor gerado pela absorção de micro-ondas em cada posição.

## 2.3. Software

O software utilizado para modelagem e simulação foi o COMSOL Multiphysics versão 4.3a, que utiliza exclusivamente o método de elementos finitos. O módulo do COMSOL utilizado foi o Microwave Heating (mh), parte do Radio Frequency Module (RF Module). Trata-se de um módulo voltado ao aquecimento dielétrico, onde são resolvidas principalmente as equações de propagação de ondas eletromagnéticas e de transporte de calor (1) e (2):

$$\nabla \times \left( \frac{\nabla \times \mathbf{E}}{\mu} \right) - k_0^2 \left( \epsilon_r - \frac{j\sigma}{\omega\epsilon_0} \right) \cdot \mathbf{E} = 0 \quad (1)$$

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \bar{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k_t \nabla T) + Q \quad (2)$$

As condições de contorno e de materiais utilizadas são apresentadas abaixo:

- Propriedades dos materiais

As propriedades dos materiais utilizados na modelagem são listadas na Tabela 2. Os valores “padrão” são retirados da biblioteca interna do programa, os demais são extraídos de Javadi (1995).

Tabela 2: Propriedades dos materiais utilizados na modelagem

Material	$\epsilon_r$	$\mu_0$	$\sigma$ [S/m]	k [W/m.K]	$C_p$ [J/kg.K]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
Ar	1	1	0	padrão	padrão	padrão
Água	79,85. (1-0,123.j)	1	0	padrão	padrão	padrão
Vidro	2,09	1	0	padrão	padrão	padrão
Polietileno	2,5. (1-0,0003.j)	1	0	padrão	padrão	padrão
Aço	1	1	4,032.10 <sup>6</sup>	padrão	padrão	padrão

- Condutor elétrico perfeito

A condição de condutor elétrico perfeito é utilizada para simplificação das superfícies metálicas e é modelada pela Equação (3).

$$\bar{n} \times \mathbf{E} = 0 \quad (3)$$

Onde  $\bar{n}$  é o vetor normal à superfície, uma análise da origem da equação no manual do RF

Module (COMSOL, 2008) mostra que o campo elétrico na superfície terá módulo zero.

- Isolante térmico

O isolamento térmico é descrito pela Equação (4), e é utilizado nas fronteiras externas das geometrias dos modelos, pois a troca térmica com o meio externo não é importante neste caso.

$$-\vec{n} \cdot (-k\nabla T) = 0 \quad (4)$$

- Porta (Fonte)

A condição de porta utilizada nos modelos se refere à fonte de micro-ondas. O modo de propagação do guia foi configurado como TE<sub>10</sub>, o modo permitido em um guia de ondas de um forno comum. A energia da porta foi dada como 682,5 W, valor obtido pela potência de 1050 W de consumo elétrico do forno de micro-ondas real com uma eficiência comum de 65%.

## 2.4. Hardware

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

## 3. MODELOS

### 3.1. Modelo 1

O Modelo 1 replica o forno real com pouquíssimo detalhamento, conforme apresentado na Figura 3 e foi utilizado para obtenção de resultados iniciais e para realização de teste de malha.

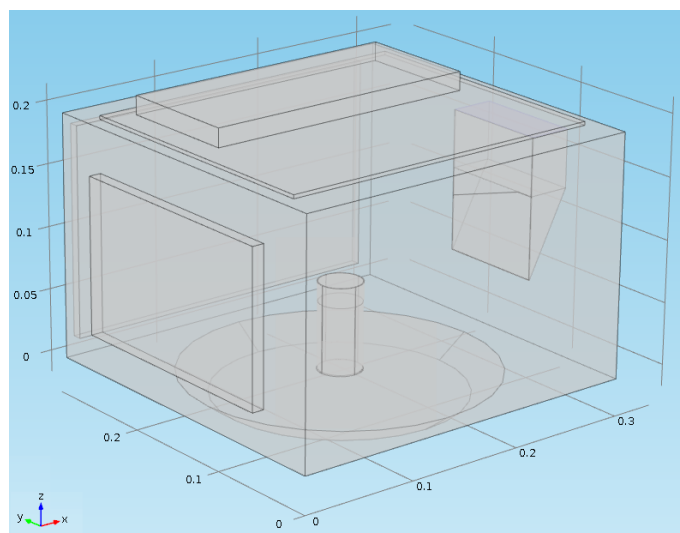


Figura 3: Geometria do forno no Modelo 1

### 3.2. Modelo 2

O Modelo 2 replica o forno real com algum detalhamento, conforme apresentado na Figura 4 e foi utilizado para obtenção dos resultados finais.

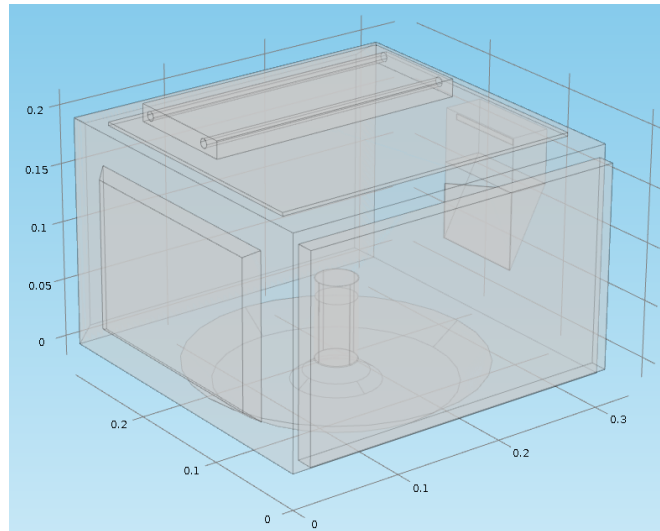


Figura 4: Geometria do forno no Modelo 2

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. Teste de Malha

O teste de malha foi realizado utilizando o método iterativo do resíduo mínimo (GMRES) para resolução dos perfis de campo elétrico e temperatura. Foi finalizado com uma malha de 176.802 elementos, não foi possível um maior refino devido à falta de memória RAM no computador. Apesar disso, a variação da taxa de aquecimento para o recipiente no ponto central (variável observada), frente ao valor obtido com 122.775 elementos, foi inferior a 1% (265,21W para 263,46W) e a malha final respeita o critério de Nyquist (Salvi et al., 2011) para o tamanho máximo de malha, conforme as Equação (5).

$$S_{m\acute{a}x} < \frac{\lambda}{2} = \frac{c}{2f\sqrt{\mu_r\epsilon_r}} \quad (5)$$

### 4.2. Aquecimento

Os resultados de aquecimento obtidos no Modelo 2 são comparados com os dados experimentais na Tabela 3. Estima-se que os erros não estejam relacionados à variação de propriedades dielétricas dos materiais com a temperatura, pois existem desvios positivos e negativos. Alguns dos possíveis motivos para os desvios são listados abaixo:

- Detalhes geométricos não inclusos

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

- Modelagem da fonte de micro-ondas

A condição de porta retangular, utilizada nos modelos, não é a ideal para descrever a emissão da antena do magnetron. Normalmente, a estrutura do guia de onda poderia ser substituída por uma porta retangular em sua fronteira com o refletor, no entanto, a geometria do forno real não permite essa simplificação comumente utilizada.

Tabela 3: Resultados experimentais

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

## 5. CONCLUSÃO

O Modelo 2 ainda não é representativo, e deve passar por mudanças antes de sua aplicação. Com a obtenção de representatividade, pretendem-se projetar equipamentos de aquecimento por micro-ondas adequados ao formato e escala dos equipamentos presentes nos laboratórios, e que apresentem um ganho de eficiência em relação aos comumente utilizados, facilitando a viabilidade econômica dos processos. Uma segunda utilidade de um modelo de aquecimento por micro-ondas representativo em COMSOL é seu acoplamento com demais modelos de fenômenos físicos que possam ser importantes nos processos estudados.

Os resultados experimentais obtidos foram válidos e servem como ponto de comparação para demais trabalhos envolvendo fornos de micro-ondas.

## 5.1. Trabalhos Futuros

Como sugestões para trabalhos futuros sugerem-se:

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

## 6. BIBLIOGRAFIA

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

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

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

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

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