



Universidade Federal de Campina Grande

Centro de Engenharia Elétrica e Informática

Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

JOÃO RUBENS ALVES ZACARIAS

**SIMULAÇÃO DE UMA CAVIDADE PARA TRATAMENTO
TÉRMICO**

Campina Grande, Paraíba
Junho de 2016

JOÃO RUBENS ALVES ZACARIAS

SIMULAÇÃO DE UMA CAVIDADE PARA TRATAMENTO TÉRMICO

*Relatório de Trabalhos de Conclusão de Curso
submetido à Unidade Acadêmica de Engenharia
Elétrica da Universidade Federal de Campina
Grande como parte dos requisitos necessários
para a obtenção do grau de Bacharel em
Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Micro-ondas Aplicadas

Orientador:

Glauco Fontgalland, D. Sc.

Campina Grande, Paraíba
Junho de 2016

JOÃO RUBENS ALVES ZACARIAS

SIMULAÇÃO DE UMA CAVIDADE PARA TRATAMENTO TÉRMICO

*Relatório de Trabalhos de Conclusão de Curso submetido
à Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Campina Grande como parte
dos requisitos necessários para a obtenção do grau de
Bacharel em Ciências no Domínio da Engenharia
Elétrica.*

Área de Concentração: Micro-ondas Aplicadas

Aprovado em / /

Professor Avaliador
Universidade Federal de Campina Grande
Avaliador

Glauco Fontgalland, D. Sc.
Universidade Federal de Campina Grande
Orientador, UFCG

Dedico a Deus esse trabalho, por ter me dado paciência, inteligência e perseverança, aos meu pais, e irmãos e familiares pelo apoio imensurável, e por ultimo aos professores, técnicos e, principalmente, ao orientador.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me conceder saúde e intelecto para realização do trabalho. Em segundo lugar aos meu familiares, em especial meus pais que sempre me apoiaram. Agradeço os professores do departamento de Engenharia Elétrica, bem como seus funcionários e técnicos, que contribuíram direta ou indiretamente para realização do trabalho. Principalmente ao meu orientador, professor doutor da Universidade Federal de Campina Grande, Glauco Fontgalland, por me orientar neste trabalho e me auxiliar em toda a pesquisa.

*“Os céus proclamam a glória de Deus
e o firmamento anuncia a obra de suas mãos”*

Salmo 19:1.

RESUMO

O aquecimento por micro-ondas (MO) é rápido e conveniente, mas é altamente não uniforme. Quando um material é submetido a um aquecimento por micro-ondas, algumas partes do material podem aquecer desigualmente. Um modelo de aquecimento por micro-ondas ajuda a compreender a não uniformidade distribuição de temperatura em fornos de micro-ondas domésticos e industriais, e é uma ferramenta útil para desenvolver fornos mais eficientes. O objetivo deste estudo foi desenvolver um modelo computacional, por meio de um *software* de simulação chamado COMSOL Multiphysics. O modelo utiliza a resolução das equações Maxwell, conjuntamente com o método dos elementos finitos (FEM), conjuntamente com equações de transferência de calor. O modelo foi usado para descrever um aquecimento de uma esfera (vermiculita) durante 30s e 5s, com uma potência injetada de 1500W, e a cavidade apresenta dimensões domésticas. Por fim, foram feitas modificações na cavidade e na localização da amostra, com a finalidade de aumentar a eficiência do forno de micro-ondas.

Palavras-chave: Aquecimento por Micro-ondas, Transferência de Calor, Eficiência Energética.

ABSTRACT

The heating microwave (MO) is fast and convenient, but it is highly nonuniform. When a material is subjected to heating by microwave, some parts of the material can heat unevenly. A model of microwave heating helps to understand the temperature distribution non-uniformity in furnaces of domestic and industrial microwave, and is a useful tool to develop more efficient furnaces. The aim of this study was to develop a computer model through a simulation software called COMSOL Multiphysics. The model uses the resolution of Maxwell equations using finite element method (FEM), in conjunction with heat transfer equations. The model was used to describe the heating of a sphere (vermiculite) for 30s and 5s, with a power of 1500W injected, and the cavity has dimensions household. Finally, changes were made in the sample cavity and the location, in order to increase the efficiency of the microwave oven

Keywords: Microwave heating, Heat Transfer, Energy Efficiency.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Magnetron.....	9
Figura 2 - Distribuição da temperatura na amostra e intensidade do campo elétrico na direção z.....	15
Figura 3 - - Distribuição da intensidade do campo elétrico dentro da cavidade	15
Figura 4 - Aumento da temperatura em relação a potencia injetada na caviade	16
Figura 5 - Regiões dentro da cavidade (Modificação 1).	17
Figura 6 - Aquecimento da amostr (Modificação 1).	17
Figura 6 - - Regiões dentro da cavidade (Modificação 2).	18
Figura 7 - Aquecimento da amostra (Modificação 2).....	18

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Avaliação dos <i>Softwares</i>	12
Tabela 2 - Propriedades Elétricas e térmicas da amostra (argila).....	14

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CEM	Campo Eletromagnético
EM	Eletromagnético
GHz	Giga Hertz
kg	Quilograma
kW	Quilowatt
LEMA	Laboratorio de Eletromagnetismo Aplicado
LT	Linha de Transmissão
MHz	Mega Hertz
MO	Micro-ondas
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Ampére
ϵ'	Permissividade relativa
ϵ_0	Permissividade absoluta no vácuo= $8,85 \times 10^{-12}$ F/m
ϵ_r	Permissividade relativa
f	Frequência em Hertz
s	Segundo
Tanδ	Tangente de perdas
V	Volt
W	Watt
θ	Temperatura
λ	Comprimento de onda
μ_0	Permeabilidade magnética no vácuo= $1,257 \times 10^{-6}$ H/m
μ_r	Permeabilidade magnética relativa
π	Constante Pi= 3,14
σ	Condutividade
ω	Frequência em radianos por segundo

SUMÁRIO

Agradecimentos	v
Resumo	vii
Abstract.....	viii
Lista de Figuras	ix
Lista de Tabelas	x
Lista de Abreviaturas e Siglas	xi
Lista de Símbolos	xii
Sumário.....	xiii
1 Introdução	1
1.1 Objetivos.....	2
2 Fundamentação Teórica	4
2.1 Introdução.....	4
2.2 Ondas Eletromagnéticas.....	5
2.3 Energia de Micro-ondas	6
2.4 Fundamentos de Aquecimento por Micro-ondas	7
2.5 Modelagem de Aquecimento de Micro-ondas.....	10
2.6 Necessidade de um Modelo.....	11
2.7 Métodos Numéricos.....	11
2.8 Avaliação do Software COMSOL Multiphysics.....	12
3 Resultados e Discussões	14
3.1 Metodologia.....	14
3.2 Simulação da Cavidade Doméstica.....	14
4 Conclusão.....	19
Referências	20

1 INTRODUÇÃO

O uso de micro-ondas para aplicações de aquecimento remonta à Segunda Guerra Mundial (Tang et al., 2002). A aplicação de micro-ondas em produtos alimentares ganhou popularidade no início dos anos 1990. A energia eletromagnética de micro-ondas (EM) tem sido amplamente utilizada em aplicações de processamento de alimentos como uma alternativa aos métodos de aquecimento convencionais para aumentar a taxa de aquecimento e reduzir o tempo de processo (Ohlsson, 1983). O aquecimento por micro-ondas é um método cozimento de alimentos, amplamente diferenciada no países desenvolvidos.

Nos EUA, a utilização de fornos de micro-ondas na produção contribui com um papel significativo na geração de receita quanto na melhora do processamento de materiais. O aquecimento em forno de micro-ondas é bastante rápido. No entanto, o aquecimento não uniforme é uma desvantagem do aquecimento por MO. A interação complexa de micro-ondas com propriedades alimentares produz aquecimento não uniforme. Um forno de micro-ondas particular pode se comportar de forma diferente para um mesmo material dependendo do seu estado físico, congelado ou não-congelado. Este aquecimento não uniforme em um forno de micro-ondas não só afeta a segurança alimentar, mas também influencia a qualidade dos alimentos (Ma et al., 1995).

A maioria dos trabalhos na concepção de sistemas por aquecimento de micro-ondas e processos tem sido feitos com base em apenas experiência e percepções de engenheiros (Risman e Celuch, 2000). Avaliações experimentais por si só não podem identificar facilmente as razões por trás do aquecimento não uniforme em um forno de micro-ondas. A técnica de modelagem pode fornecer uma plataforma completa para estudar os efeitos das propriedades de *design*. Simulações computacionais casadas com equações de transferência eletromagnética de calor ajudaria na concepção de fornos de micro-ondas na otimização dos parâmetros do processo para minimizar os problemas de não-uniformidade (Chen et al., 2008). A modelagem começou com muitas aproximações / simplificações sem considerar situações realistas de aquecimento por micro-ondas (Schubert e Reiger, 2005).

Inicialmente, soluções numéricas de aquecimento por micro-ondas foram desenvolvidos através da resolução de equações analíticas para a lei de Lambert (Dolande e Datta, 1993; Yang e Gunasekaran, 2004). A lei de Lambert considera potência incidente do magnetron que decai exponencialmente para certas profundidades no material ao longo de uma dimensão.

Na realidade, a energia é absorvida ou deteriorada em três dimensões e não apenas uma dimensão. O efeito de onda estacionária, de onda sinusoidal, típico de energia de micro-ondas não pode ser considerado usando a lei de Lambert (Barringer et al, 1995;. Yang e Gunasekaran, 2004).

As equações eletromagnéticas e térmica acopladas que descrevem o aquecimento por micro-ondas são equações diferenciais parciais (EQP) em coordenadas tridimensionais. AS equações EQP de coordenadas tridimensionais com condições de contorno e formas complexas de objetos não podem ser resolvidos analiticamente e exigem métodos numéricos iterativos. Métodos numéricos, como de diferenças finitas no domínio do tempo (FDTD), método dos elementos finitos (FEM), e os métodos de linha de transmissão (TLM) estão disponíveis para resolver equações de transferência eletromagnéticas e calor acopladas. Destes métodos numéricos, diferenças finitas no domínio do tempo (FDTD) é mais comumente utilizados para a resolução de equações electromagnéticas porque requer menos tempo de cálculo e de memória (Chen et al., 2008). Contudo, o *software* utilizado (COMSOL) utiliza o método FEM. Este trabalho de conclusão de curso explora o uso de FEM baseado em *software* COMSOL Multiphysics, bem conhecido para resolver equações eletromagnéticas e de transferência de calor acoplados para aquecimento por micro-ondas.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho de conclusão de curso é desenvolver um modelo eletromagnético e de transferência térmica para entender o comportamento do processo dentro da cavidade. Os objetivos específicos seguem a baixo:

1. Desenvolver o modelo de aquecimento a micro-ondas, utilizando uma amostra de cerâmica ou argila.
2. Testar modificações na cavidade e verificar o efeito sobre o processo de aquecimento térmico.

3. Modificar a localização de uma amostra dentro da cavidade, onde será aquecida, com a finalidade de observar um “ponto quente” (hotpot) dentro da cavidade.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 INTRODUÇÃO

O forno de micro-ondas (MW) é um dos inventos predominantes do século XX. Quase 90% das casas em os EUA têm pelo menos um forno de micro-ondas (USDAFSIS, 2006a). Cerca de 25 milhões de fornos de micro-ondas domésticos são produzidos globalmente a cada ano (Ohlsson e Bengtsson, 2001).

Desde os anos 1940, as micro-ondas têm sido utilizadas para aquecer materiais alimentares. Energia de micro-ondas têm sido utilizadas em diferentes áreas, tais como alimentos, química, medicina, indústrias de telecomunicações e cerâmicas. A indústria de alimentos ainda é o maior consumidor de energia de micro-ondas, onde foi aplicada para descongelar, cozinhar, têmpera, secagem, pasteurização, esterilização, o aquecimento e reaquecimento (Ayappa et al., 1991). A Comissão Federal de Comunicações dos EUA (FCC) concedeu duas frequências para processamento de alimentos via micro-ondas na América do Norte, 2.450 MHz e 915 MHz. Destas duas frequências, a 2.450 MHz é utilizada principalmente para em forno de micro-ondas doméstico, e a frequência de 915 MHz é utilizado no aquecimento por micro-ondas na área industriais. É interessante notar que as frequências de 433.92, 896, e 2.375 MHz são utilizados para aplicação de aquecimento por micro-ondas fora da América do Norte (Datta e Davidson, 2000). No Brasil a frequência utilizada para aquecimento por meio de micro-ondas é 2450 MHz.

As principais utilizações de fornos micro-ondas, no início da década de 1990, foram o reaquecimento e descongelamento de alimentos, cozimento de legumes, preparo de lanches e preparação de refeições (Happel, 1992). Enquanto fornos de micro-ondas são comuns em lares, aplicação industrial de aquecimento por micro-ondas não é tão comum. Esta situação ainda prevalece com relação à alimentos na indústria de micro-ondas.

As razões da falta de uso desta tecnologia é a pouca compreensão de informações sobre as propriedades dielétricas de alimentos e suas interações com o aquecimento por micro-ondas, o custo elevado de instrumentos e da eletricidade (Tang et al., 2002). Estudos experimentais têm essencialmente sido focado na utilização de

energia de micro-ondas para vários processos alimentares tais como aquecimento (Dahl et al., 1981), secagem (Drouzas et al., 1999; Wang e Xi, 2005), liofilização (Wang e Chen, 2005), a descongelação (Taher e Farid, 2001) e inativação esporos microbianos (Welt et al., 1994).

Um grande revés no desenvolvimento de novas tecnologias de processamento com base em energia de micro-ondas é distribuição não uniforme do campo eletromagnético não uniforme distribuição (Ohlsson, 1991; Ryyänen e Ohlsson, 1996). Em uma cavidade de micro-ondas, são localizados pontos "quentes" e "frios", que se refletem no interior dos alimentos por causa da distribuição não uniforme de energia de micro-ondas. O aquecimento por micro-ondas pode resultar em aquecimento irregular (não uniforme) e deixar regiões "frias".

Embora o aquecimento por micro-ondas tem problemas de não uniformidade, ele também fornece numerosas vantagens sobre os métodos convencionais de aquecimento. No aquecimento por micro-ondas, o calor é gerado por todo o material como aquecimento volumétrico, o que leva a um rápido cozimento e reduz o tempo de processamento. Por outro lado, o aquecimento convencional tem lugar como o aquecimento de superfície e ainda mais a absorção de calor é por condução térmica e processos de difusão.

Outra vantagem importante de aquecimento por micro-ondas é de que a temperatura desejada do produto pode ser conseguido em um tempo de processamento mais curto

2.2 ONDAS ELETROMAGNÉTICAS

Energia de micro-ondas (MO) é uma forma de radiação. O termo significa que a energia de radiação é transportada pelos campos de ondas eletromagnéticas; que pode irradiar através de um vácuo perfeito e não precisa de nenhum meio para transferir energia de um objeto para outro. Todas as ondas eletromagnéticas têm dois componentes, 1) O campo elétrico (\vec{E}) e 2) O campo magnético (\vec{H}). Quando uma carga (elétrica) num meio muda de posição no espaço, o campo correspondente que produz também alterações no espaço. Estas alterações nos campos elétricos e magnéticos produz uma onda oscilatória, o qual é chamado uma onda eletromagnética. As ondas eletromagnéticas são caracterizadas pela sua frequência, velocidade e força do campo

elétrico. Duas características fundamentais de qualquer fenômeno periódico de onda são a frequência e comprimento de onda. Para as ondas eletromagnéticas, essas propriedades estão relacionadas por v , que é a velocidade da luz no meio (m/s), é a frequência da onda (Hz), f , e o comprimento de onda (m), λ .

$$v = f \cdot \lambda \quad (1)$$

Em 1873, Maxwell descobriu que as ondas eletromagnéticas são composta de componentes elétricas e magnéticas de campos que estão alinhados perpendicularmente para uma outra, no caso de propagação TEM. Os componentes (\vec{E} e \vec{H}) variam no tempo e no espaço, pois se propagam pelo meio. A orientação dos componentes pode ser verificada pela regra da direita, onde o dedo indicador indica a direção da propagação, o polegar indica o alinhamento do campo \vec{E} , e o dedo médio indica o alinhamento do componente de campo \vec{H} . Tal como acontece com outras ondas eletromagnéticas como ondas de rádio, micro-ondas também são propensos a reflexão, refração e polarização.

2.3 ENERGIA DE MICRO-ONDAS

As micro-ondas (MO's) são ondas eletromagnéticas compreendidas em uma larga banda de frequências que se estende de 300 a 300.000 MHz (0,3 a 300 GHz) (WATKINS, 1987). As micro-ondas apresentam a capacidade de aquecer e dissolver rapidamente e de forma limpa pequenas amostras de espécies minerais e biológicas em ácidos fortes como os ácidos nítrico e clorídrico.

A energia de micro-ondas pode ser empregada para aquecimento da água tendo em vista seu uso no aquecimento de alimentos (todos os alimentos contêm uma fração maior ou menor de água). Entretanto, as micro-ondas também podem ser empregadas para aquecimento de outros solventes polares como metanol, etanol e acetona. Esses solventes são comumente empregados na indústria, em síntese de compostos orgânicos e inorgânicos (THOSTENSON, 1999). O mecanismo de aquecimento de solventes por micro-ondas é relacionado com a existência de um dipolo elétrico na molécula da solução. Na água, por exemplo, o dipolo se origina da diferença de afinidade do oxigênio e hidrogênio pela densidade eletrônica disponível e pelo formato angular das moléculas da água. A densidade eletrônica está quase que totalmente deslocada sobre o

átomo de oxigênio, mais eletronegativo, o que leva a existência de um momento de dipolo para a molécula de água.

Os princípios envolvidos no aquecimento por MO's envolvem conceitos físico-químicos, como temperatura, capacidade calorífica, ligação química, estrutura molecular, momento de dipolo, polarização, constante dielétrica, estado de excitação, relaxamento, etc (WATKINS, 1987).

2.4 FUNDAMENTOS DE AQUECIMENTO POR MICRO-ONDAS

Um forno micro-ondas é muito utilizado como eletrodoméstico para aquecimento de alimentos e líquidos, e sua constituição é composta por três componentes principais: A fonte, a linha de transmissão (guia de onda) e a cavidade onde será aquecido o material. As fontes de micro-ondas irradiam a radiação eletromagnética, e as linhas de transmissão fornecem a energia eletromagnética da fonte para o aplicador. No aplicador, a energia é então absorvida ou refletida pelo material. A análise teórica de cada um desses componentes das micro-ondas é governada por condições de fronteira dadas pelas equações de Maxwell:

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{j} \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (4)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (5)$$

As equações de Maxwell são as leis físicas que descrevem campos eletromagnéticos que variam com o tempo (THOSTENSON, 1999). O uso da energia de micro-ondas para o processamento de materiais possui potencial para oferecer vantagens quanto à redução do tempo de processamento e economia de energia (MARAND E., 1992).

Embora o aquecimento direto por micro-ondas possa oferecer vantagens em relação ao aquecimento convencional, o mecanismo diferente na transferência de energia, culmina com novos desafios. Em virtude de a energia ser transferida pelo campo eletromagnético, tem-se um aquecimento não uniforme. À medida que os materiais são processados, eles geralmente sofrem modificações físicas e estruturais que afetam as propriedades dielétricas. Dessa maneira, a habilidade das micro-ondas em gerar calor varia durante o processo. Acentuadas transformações na habilidade das micro-ondas gerarem calor podem gerar dificuldades com o controle do processo. Portanto, é importante saber como as propriedades dielétricas variam com a temperatura para obter maior controle do processo.

As propriedades do campo eletromagnético, a composição química do material a ser processado, as mudanças estruturais que ocorrem durante o processamento, o tamanho e formato do objeto a ser aquecido (por exemplo, vermiculita), e a física das interações entre o material e as micro-ondas devem ser levadas em consideração no processamento por micro-ondas. A geração de irradiação eletromagnética é resultado da aceleração de uma carga.

Os magnetrons, que são usados em fornos de micro-ondas domésticos, são eficientes e confiáveis e por serem fabricados largamente são as fontes de micro-ondas de baixo custo mais disponíveis. Este dispositivo utiliza estruturas ressonantes para gerar campo eletromagnético, e, portanto, são capazes de gerar campo eletromagnético de frequências fixas (KITGAWA, 1986).

A figura 1 representa a estrutura interna de um magnetron, onde um ímã externo é usado para criar um campo magnético ortogonal ao campo elétrico, e o campo magnético aplicado cria uma força circunferencial nos elétrons à medida que este é acelerado até o anodo. Esta força faz com que o elétron “viaje” numa direção espiral, e isto cria uma nuvem eletrônica giratória. À medida que os elétrons atravessam as cavidades ressonantes, as cavidades oscilam a nuvem eletrônica, e a frequência das oscilações depende do tamanho das cavidades. A energia eletromagnética é acoplada de uma das cavidades ressonantes até as linhas de transmissão por meio de uma linha coaxial ou um guia de onda.

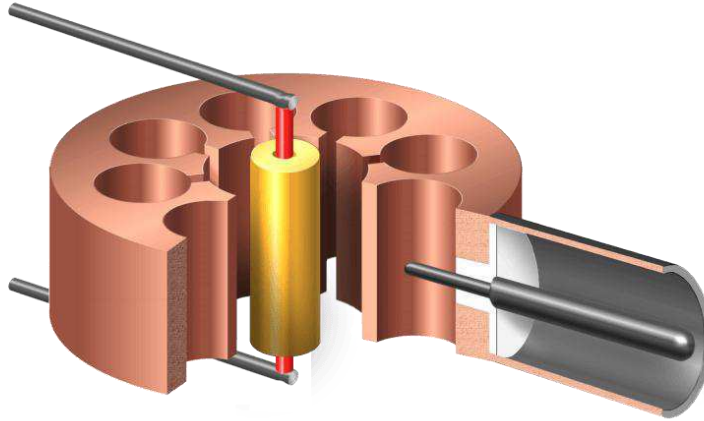


FIGURA 1 - MAGNETRON.

As micro-ondas são absorvidas pelos componentes que tem alta perda dielétrica com pequena perda de energia. Este processo de aquecimento seletivo não é possível em aquecimentos convencionais. Dois parâmetros importantes no processamento por micro-ondas são: a energia absorvida e a profundidade de penetração de micro-ondas.

Diferentemente do aquecimento convencional, estes parâmetros são altamente dependentes das propriedades dielétricas dos materiais e, na prática, podem promover outro grau na flexibilidade do processo. O aquecimento por micro-ondas é o resultado da absorção de energia de micro-ondas pelo material exposto num campo eletromagnético distribuído dentro de uma cavidade refletiva. Isto é baseado na energia de absorção por unidade de volume, de acordo com a equação 6(Chan, 2000).

$$P = \frac{1}{2} \omega \epsilon_0 \epsilon'' |\vec{E}|^2 = \frac{1}{2} \omega \epsilon_r' \tan \delta |\vec{E}|^2 \quad (6)$$

Em que E é a magnitude do campo magnético interno, ϵ'' é a permissividade complexa efetiva, ω é a frequência da micro-onda, σ é a condutividade em S.m-1, e $\tan \delta$ é a tangente de perdas. Como podemos ver nesta equação, as propriedades dielétricas (ϵ'' , ϵ' e $\tan \delta$) assumem uma função importante no grau de energia absorvida pelo material. A maior parte da energia de micro-ondas absorvida é convertida em calor dentro do material, como demonstra a equação 7 (Chan, 2000):

$$\Delta T / \Delta t = 2\pi f \epsilon_0 \epsilon_{\text{eff}}'' |E|^2 / \rho C_p \quad (7)$$

Em que T é a temperatura, t é o tempo, ρ é a densidade e C_p é a capacidade calorífica. As propriedades dielétricas são também parâmetros importantes na determinação da profundidade que as micro-ondas irão penetrar no material.

2.5 MODELAGEM DE AQUECIMENTO DE MICRO-ONDAS

O processo de aquecimento utilizando MO tem sido modelado matematicamente utilizando técnicas analíticas. Estudos relacionados à modelagem do processo de aquecimento por micro-ondas começou com Ohlsson e Bengtsson (1971). Eles usaram diferenças finitas no domínio, técnica para modelar o aquecimento por micro-ondas em lajes infinitas de presunto salgado e carne bovina. Os perfis de temperatura do modelo numérico e medição experimental favoravelmente comparados usando perfis espaciais. Em estudos anteriores, a transferência de calor de micro-ondas, foram modelo realizadas por métodos analíticos (Shou-Zheng e Han-Kui, 1988; Watanabe et al., 1978).

Com o advento das tecnologias de computação potentes, as soluções de aquecimento por micro-ondas puderam ser obtidas por meio de diferentes métodos numéricos tais como o método das diferenças finitas no domínio do tempo (FDTD) (Dincov et al., 2004;.. Ma et al, 1995) e elementos finitos método (FEM) (Zhang e Datta, 2000). Outros estudos têm modelado aquecimento por micro-ondas, resolvendo a equação de calor e transferência de massa e assumindo um termo de origem com decaimento exponencial (lei de Lambert) em vez de resolver um conjunto de equações de Maxwell para o campo eletromagnético (Ni et al., 1999; Zhou et al, 1995;. e Campanone Zaritzky, 2005).

Devido à variação na geometria e propriedades dielétricas de alimentos, a modelagem consiste em resolver problemas específicos e limitados em aquecimento por micro-ondas. No entanto, a modelagem pode ser uma ferramenta útil para estudar o efeito dos parâmetros de modelagem que influenciam o aquecimento por micro-ondas. A modelagem precisa por micro-ondas requer os métodos mais eficazes para resolver tanto o as condições de contorno no domínio eletromagnético, quanto termodinâmico (Kopyt e Celuch, 2006).

Uma ferramenta numérica ideal deve integrar todos os processos físicos envolvidos no problema de aquecimento de micro-ondas como eletromagnetismo,

termodinâmica e dinâmica de fluxo. Não há nenhuma ferramenta de modelação único disponível para todos os efeitos como um pacote. No entanto, existem pacotes de software separados disponíveis para cuidar de cada fenómeno físico (Kopyt e Gwarek, 2004). Até agora, modelagem electromagnética foi realizada através de um procedimento de tentativa-e-erro (Knoerzer et al., 2006).

Esta situação surge devido a uma falta de compreensão do aquecimento não uniforme e interações complicadas de microondas com alimentos envolvendo eletromagnetismo, transferência de massa e calor. Knoerzer et al. (2006) mencionou que é impossível prever temperaturas realistas nem distribuições de campo electromagnético dentro de um forno de micro-ondas quando alimentos estão envolvidos, de forma analítica. Assim, modelagem requer FDTD ou FEM para resolver equações de ondas eletromagnéticas e transferência de calor para ser resolvido em uma abordagem acoplada a minimizar a variação no resultado da simulação. As seções a seguir irão discutir a modelagem do aquecimento por micro-ondas e os desafios em desenvolvimento de um modelo preciso.

2.6 NECESSIDADE DE UM MODELO

As principais razões para a realização de modelagem no aquecimento por micro-ondas são as seguintes:

- 1) Devido ao aquecimento não uniforme, é necessário a compreensão dos pontos "frios" e "quentes" da cavidade
- 2) É necessário otimizar as dimensões da cavidade de forno de micro-ondas, para que seja possível aumentar sua eficiência.

2.7 MÉTODOS NUMÉRICOS

As principais razões para a realização de modelagem no aquecimento por microondas são as seguintes: 1) aquecimento não uniforme compreensão do forno aquecida produtos alimentares. 2) abordando o efeito de diversas variáveis na absorção de energia. Na maioria das situações, espaço e tempo métodos numéricos discretos são utilizados para resolver as equações de Maxwell eletromagnéticas. Niziolek (2009) analisou os métodos numéricos disponíveis para simulação electromagnética com cada

um dos seus pontos fortes e fracos. A Diferença Finita no Domínio do Tempo (FDTD) e Método dos Elementos Finitos (FEM) são os métodos numéricos adotados principalmente na resolução de problemas eletromagnéticos. Tradicionalmente, Método de Linha de Transmissão (TLM) e Método dos Momentos (MOM) são usados em aplicações de engenharia de energia de micro-ondas, mas são menos poderosos e flexíveis para outras aplicações (Yakovlev, 2001b).

2.8 AVALIAÇÃO DO SOFTWARE COMSOL MULTIPHYSICS

COMSOL Multiphysics é um pacote de *software* de análise de elementos finitos, solução e simulação de *software* para várias aplicações de física e engenharia, fenômenos especialmente acoplados, ou multi domínios. Além de interfaces convencionais baseados na física, COMSOL Multiphysics também permite introduzir sistemas acoplados de equações diferenciais parciais (PDE). As PDEs podem ser inseridos diretamente ou usando o chamado forma fraca. Desde a versão 5.0 (2014), COMSOL Multiphysics também é usado para a criação de aplicativos baseados na física. A tabela

TABELA 1- AVALIAÇÃO DOS *SOFTWARES*.

Software (Eletromagnetismo e termodinâmica)	Método Numérico	Características	Aplicações
High Frequency Structure Simulator (HFSS) – Ansoft Corp.	FEM	<ul style="list-style-type: none"> • Processo de solução automatizada. • Extrações rápidas e precisas s-parâmetros. • Geração de malha automática e adaptativa • Refinamento. decomposição de domínio (um emprego pode ser distribuídos em rede múltiplos computadores). • Adoção de elementos curvilíneos e mista ordens elemento. 	<ul style="list-style-type: none"> • microondas e frequência de radio análise. • integridade de sinal e desenvolvimento de chips.
Multiphysics – ANSYS Ins.	FEM	<ul style="list-style-type: none"> • Ambiente de simulação unificada para resolver • Multi -physics disciplinas. • Importação de geometrias cad. 	<ul style="list-style-type: none"> • Alta frequência eletromagnético análise. • térmica e fluida análise de fluxo.

		<ul style="list-style-type: none"> • suporte para processamento paralelo. • suporte para interface de malha diferente entre os modelos de física. • inclui efeitos geométricos não-lineares. 	<ul style="list-style-type: none"> • Análise estrutural • projeto Circuito • Acoustics
Microwave studio - CST	FIT	<ul style="list-style-type: none"> • Perfeito aproximação limite. • sistema Multi Nível subgridding. • Estratégias de otimização para múltiplos parâmetros. 	<ul style="list-style-type: none"> • microondas e frequência de radio. • Estática e baixa frequência • Biomedical • integridade de sinal
COMSOL Multiphysics	FEM	<ul style="list-style-type: none"> • Definição global de variáveis do modelo. • Simplificada construção de modelos. • in-built biblioteca de modelo para comum 	<ul style="list-style-type: none"> • Micro-ondas • Acústica • Ciências da Terra • Baterias e combustível <p>design da célula</p>

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 METODOLOGIA

A metodologia a ser empregada nesse trabalho será a modelagem no *software* COMSOL Multiphysics, de uma cavidade de dimensões domésticas, afim de conhecer a distribuição de campo elétrico dentro da cavidade. O trabalho partirá de simulações já executadas em trabalho utilizando a argila vermiculita. Contudo, será necessário fazer mudanças no modelo para se conhecer o melhor ponto de aquecimento dentro da cavidade.

3.2 SIMULAÇÃO DA CAVIDADE DOMÉSTICA

O modelo COMSOL Multiphysics a ser discutido neste trabalho é para o aquecimento à micro-ondas a 2,45 GHz, e a temperatura inicial da cavidade à 25 °C. Foi modificado um exemplo da biblioteca de modelos do COMSOL para realização desta simulação. A amostra aquecida foi mantida na forma de uma esfera a ser aquecida, e as propriedades do material são de uma argila. Ver tabela 2.

TABELA 2 - PROPRIEDADES ELÉTRICAS E TÉRMICAS DA AMOSTRA (ARGILA).

Propriedades	Símbolo	Valor
Condutividade Térmica	k	0.55 S/m
Calor Específico	Cp	3.64e3 J/(kg*K)
Massa Específica	ρ	1050 Kg/m ³
Condutividade Elétrica	σ	0 S/m
Permissividade	$\epsilon' - \epsilon''*j$	30 - 8*j
Permeabilidade	$\mu' - \mu''*j$	1 - 0.001*j

Na ausência de valores de permeabilidade na temperatura ambiente, foi utilizado os valores da Tabela 2. A condutividade elétrica é efetivamente zero. Os valores da condutividade térmica e calor específico foram mantidos os mesmo valores do modelo do COMSOL. A valor da condição inicial inserido no modelo foi de 25 °C.

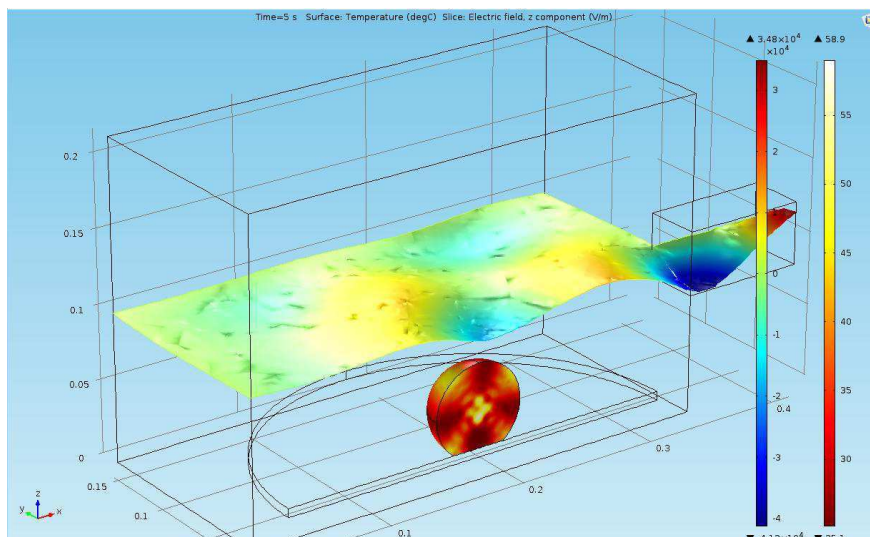


FIGURA 2 - DISTRIBUIÇÃO DA TEMPERATURA NA AMOSTRA E INTENSIDADE DO CAMPO ELÉTRICO NA DIREÇÃO Z.

A simulação, inicialmente utilizando um forno de 800 watts (potência de entrada), obteve um aquecimento de 400 watts, ou seja, 50% de eficiência determinada pelas medidas calorimétricas dos resultados simulados. Na figura 3 é uma simulação de distribuição da temperatura através da amostra esférica. O aquecimento nesta dada região da cavidade não é muito uniforme, existindo gradientes de temperatura consideráveis. Após 5 segundos, porções na amostra atingiram 56 °C, um ganho considerável de temperatura.

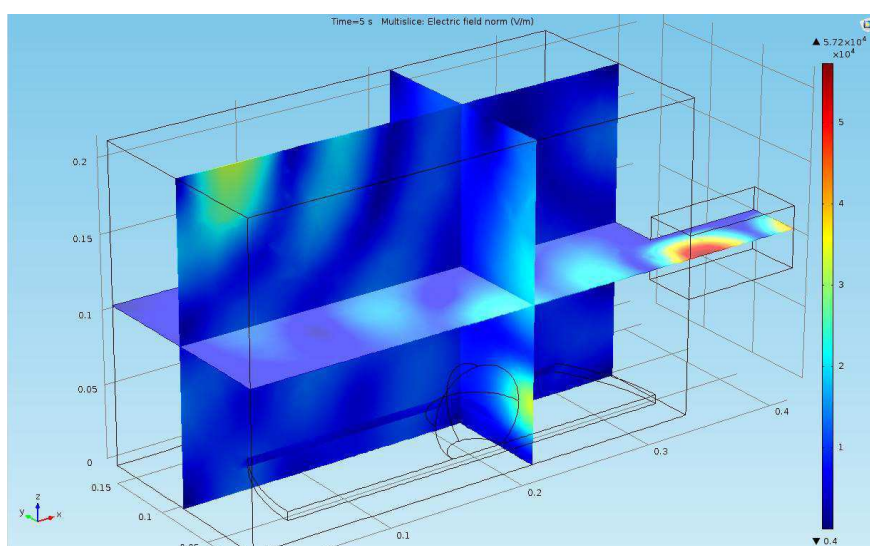


FIGURA 3 - - DISTRIBUIÇÃO DA INTENSIDADE DO CAMPO ELÉTRICO DENTRO DA CAVIDADE

O aquecimento desigual na amostra é causado por uma intensidade de campo elétrico não uniformemente distribuído dentro do forno, como é averiguado pela figura

4. Por este motivo o alimento é girado dentro de um forno doméstico, afim de que o alimento percorra as regiões onde há maior intensidade de campo elétrico. A utilização mais eficiente de cavidade para aquecimento é necessário maximizar o desenho do forno, rotacionar a amostra ou inserir um agitador de modos dentro da cavidade.

Como pode ser visualizado na figura 3, a intensidade do campo elétrico próximo amostra é em torno $2.5 \cdot 10^4$ V/m, portanto, a amostra está próxima a um *hotspot* dentro da cavidade.

Para se obter relação melhor do aumento da temperatura em relação a potencia de entrada na cavidade, foram simuladas, na Figura 4, três curvas com potencias diferentes, 800, 1000 e 1500 watts, durante um intervalo de tempo de 30 segundos

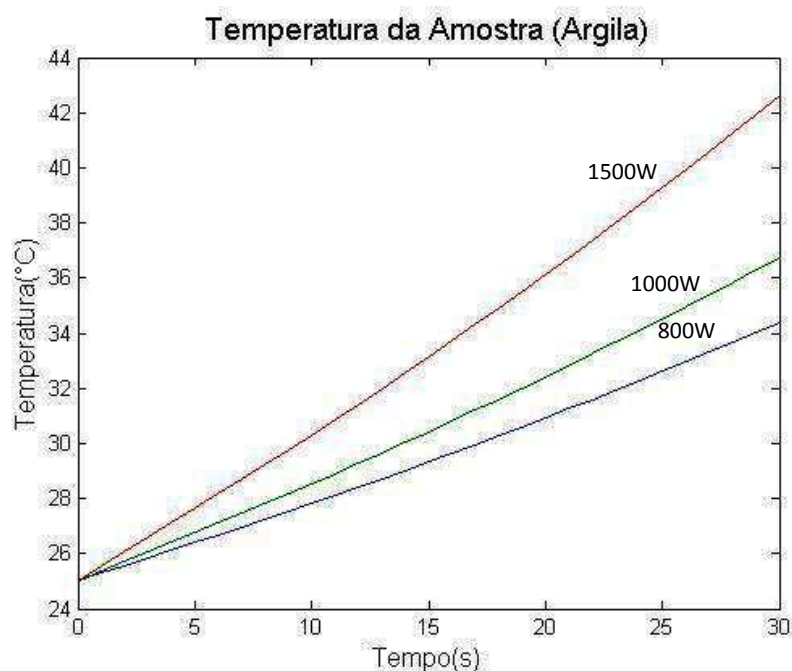


FIGURA 4 - AUMENTO DA TEMPERATURA EM RELAÇÃO A POTÊNCIA INJETADA NA CAVIDADE

Observa-se que quanto maior a potência injetada na cavidade, a taxa de aumento da temperatura da amostra aumenta com o tempo. No decorrer de 30 segundos houve um acréscimo 17°C com uma potência de entrada de 1500 watts.

Contudo, como não se conhece as propriedades dielétricas em relação a temperatura da vermiculita, os cálculos não podem ser mais precisos. Para temperaturas mais elevadas o gráfico da figura 5 não terá o comportamento linear.

Como é sabido, o campo elétrico dentro da cavidade não é uniforme, ou seja, existem regiões onde a intensidade do campo elétrico é mais intensa (hotspots). Para observar qual região é melhor para aquecer amostra de vermiculita anteriormente

aquecida, é necessário deslocá-la dentro da cavidade afim de observar a evolução de sua temperatura em relação ao tempo. Na Figura 5 são mostrados as seis regiões, onde a amostra será deslocada, e em seguida é realizada a simulação.

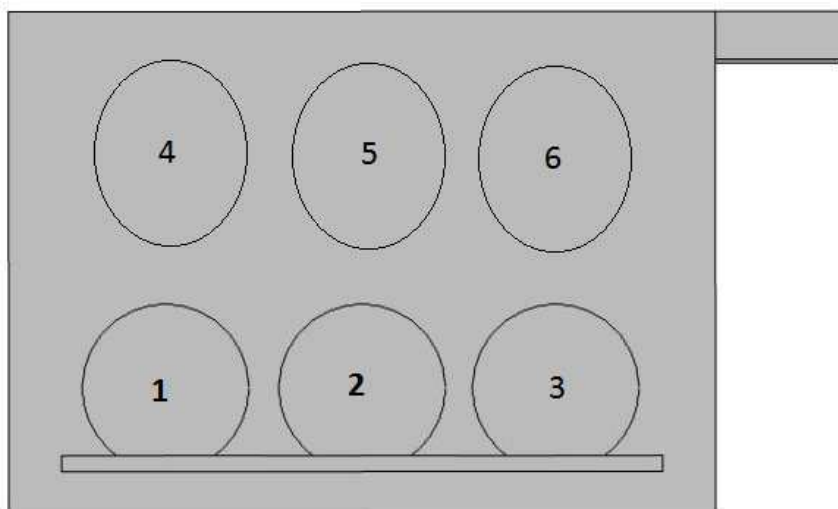


FIGURA 5 - REGIÕES DENTRO DA CAVIDADE (MODIFICAÇÃO 1).

A posição do guia de onda na cavidade também foi modificada para observar se a eficiência da cavidade aumenta. As dimensões da cavidade também foram alteradas, afim de observar mudanças do aquecimento da amostra. Na figura 5, pode-se observar como a temperatura da amostra evolui com o tempo, e sabendo que foi injetado 1500W na cavidade.

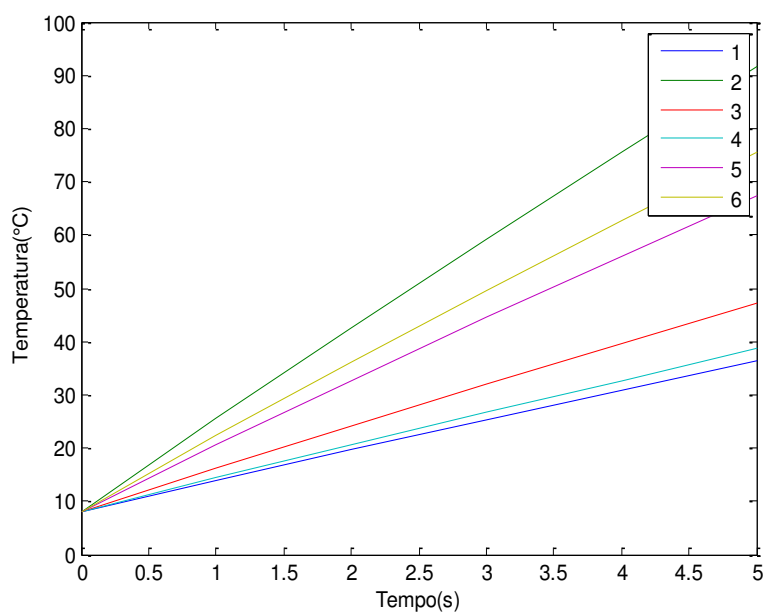


FIGURA 6 - AQUECIMENTO DA AMOSTRA (MODIFICAÇÃO 1).

É notável, que com as mudanças implementadas a amostra aqueceu muito mais rápido que no primeiro modelo utilizado. A região que mais aqueceu a amostra foi a

região 2. Por fim, uma última mudança foi realizada. Para que o modelo se assemelhe a uma cavidade construída no LEMA, foi modificada a localização do guia de onda retangular, como pode ser visto na figura 6.

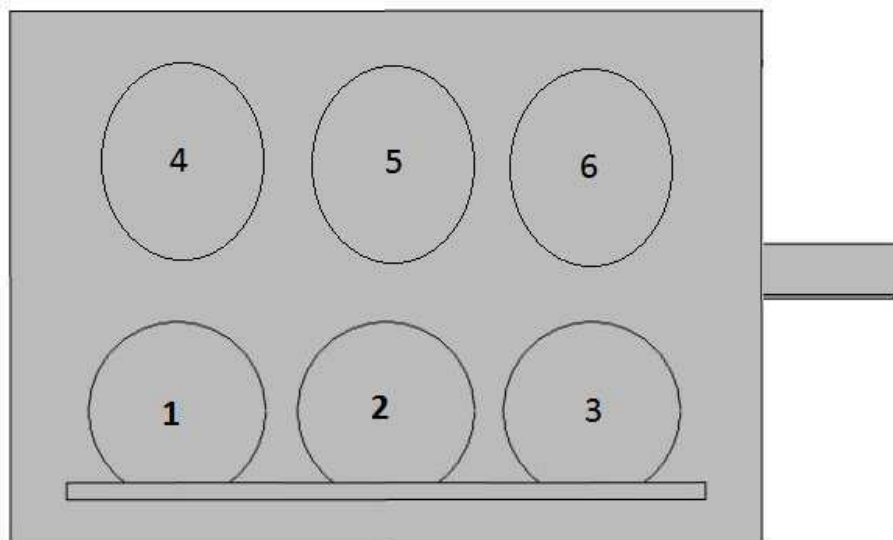


FIGURA 7 - - REGIÕES DENTRO DA CAVIDADE (MODIFICAÇÃO 2).

Em seguida foi feita as simulações para as seis regiões, como pode ser constatado na figura 7. Podemos perceber que a modificação feita por última diminuiu a eficácia da cavidade, aquecendo menos a amostra.

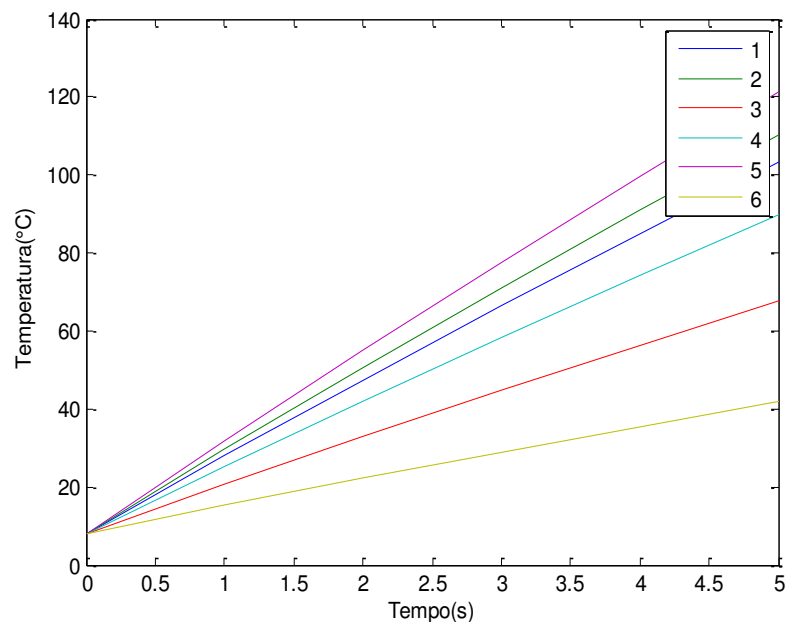


FIGURA 8 - AQUECIMENTO DA AMOSTRA (MODIFICAÇÃO 2).

4 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos evidenciam que a aplicação de energia de micro-ondas para tratamento térmico de materiais é complexa, mas possível com o estudo para melhorar a eficiência de aquecimento, e melhorar a intensidade do campo na amostra por meio de assimetrias na estrutura da cavidade.

É evidente a necessidade do conhecimento das propriedades dielétricas do material a ser tratado (vermiculita), a fim de observar o comportamento da amostra no interior da cavidade. Todavia, com os resultados observados, o aumento de temperatura na amostra foi considerável, uma variação de 17° C em 30 segundos.

É notável também, que as modificações na cavidade de tratamento térmico aumentaram e muito a eficiência de aquecimento da amostra, no caso, a argila. Principalmente a primeira modificação, é observável uma grande evolução no crescimento da temperatura da amostra.

Outras modificações poderão ser feitas, como por exemplo um chanfro na quina superior da cavidade, e assim, fazendo com que a reflexão da potência injetada diminua pelo guia de onda.

REFERÊNCIAS

Ayappa, K. G., H. T. Davis, E. A. Davis and J. Gordon. 1992. Two dimensional finite element analysis of microwave heating. *AICHE Journal* 38(10): 1577-1592.

Barringer, S. A., E. A. Davis, J. Gordon, K. G. Ayappa and H. Davis. 1995. Microwave heating temperature profiles for thin slabs compared to Maxwell and Lambert.

Bengtsson, N. E. and T. Ohlsson. 1974. Microwave heating in the food industry. *Proceedings of the IEEE* 62(1): 44-55.

C. H. READER, "Understanding Microwave Heating Cavities", Artech House, 2000.

Cavalcanti, E.E.N., Vermiculita, Sumário Mineral, DNPM, pgs. 117-118, 2001 Martins, J.M., Processo Aperfeiçoado de Hidrofobização de Vermiculita Expandida, Instituto Nacional da Propriedade Industrial, PI 9004025-A, 25/02/92, 1992. MARAND E., BAKER, K. R., GRAYBEAL

Chan, Tse V. Chow Ting., Understanding microwave heating cavities, Library of Congress Cataloging-in-Publication Data, 2000, p. 27-28.

Chen, H., J. Tang and F. Liu. 2008. Simulation model for moving food packages in microwave heating processes using conformal FDTD method. *Journal of Food Engineering* 88(3): 294-305.

Dolande, J. and A. Datta. 1993. Temperature profiles in microwave heating of solids: a systematic study. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy* 28(2): 58-67.

Gomes, U. J., Adsorção de óleo em água de produção sobre vermiculita hidrofobizada, em banho finito. Tese de Doutorado, Natal-RN, DEQ/UFRN, 2002.

H. S. HAUCK, "Design Considerations for Microwave Oven", *Microwave Journal*, 1980, pp. 44-50. Ugarte J.F., Sampaio J.A., França S.C.A., Vermiculita, Cap.32, pp.677-698, CT2005-143-00, CETEM 2005.

J. D., Comparison of reaction mechanisms of epoxy resins undergoing thermal and microwave cure from in situ measurements of microwave dielectric properties and infrared spectroscopy, *Macromolecules*, Vol.25, p. 2243 – 2252, 1992.

Knoerzer, K., M. Regier and H. Schubert. 2008. A computational model for calculating temperature distributions in microwave food applications. *Innovative Food Science & Emerging Technologies* 9(3): 374-384.

Law predictions. *Journal of Food Science* 60(5): 1137-1142.

Ma, L., D. L. Paul, N. M. Potheary, C. J. Railton, J. Bows, L. Barratt, J. Mullin and D.

Ohlsson, T. 1983. Fundamentals of microwave cooking. *Microwave world* 2(4): 4-9.

Ohlsson, T. and N. Bengtsson. 2001. Microwave technology and foods. *Advances in food and nutrition research* 4:365-140.

Reichenbach H.G., Beyer J., Dehydration and Rehydration of Vermiculites: IV-Arrangement of Interlayer Components in the 1.43 nm and 1.38 nm Hydrates of Mg-vermiculite, Clay miner. Vol.29, pp. 327-340, 1994.

Risman, P. O. and M. Celuch-Marcysiak. 2000. Electromagnetic modeling for microwave heating applications. In 13th International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications. 2000. MIKON-2000.

Simons. 1995. Experimental validation of a combined electromagnetic and thermal FDTD model of a microwave heating process. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* 47.

THOSTENSON E. T., CHOU T. W., Microwave processing: fundamentals and applications. *Applied Science and Manufacturing*, Vol.30, pp. 1055- 1071, 1999.

WATKINS K. W., Heating in microwave ovens: an example of dipole moments in action. *Journal of Chemical Education*., Vol.60, pp.1043-1044, 1983.