

Dissertação apresentada à Pró-Reitoria de Pós-Graduação do Instituto Tecnológico de Aeronáutica, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências no Programa de Pós-Graduação em Física, Área de Física Atômica e Molecular.

**Angélica Zaneze Fia**

## **INTERAÇÃO DE MICRO-ONDAS COM BIOMASSAS**

**Dissertação aprovada em sua versão final pelos abaixo assinados:**



Prof. Dr. Jayr de Amorim Filho  
Orientador

Prof. Dr. Pedro Teixeira Lacava  
Pró-Reitor de Pós-Graduação

Campo Montenegro  
São José dos Campos, SP – Brasil  
2018

**Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)**

**Divisão de Informação e Documentação**

Fia, Angélica Zaneze

Interação de micro-ondas com biomassas / Angélica Zaneze Fia.

São José dos Campos, 2018.

91f.

Dissertação de mestrado – Curso de Física, Área de Física Atômica e Molecular – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2018. Orientador: Prof. Dr. Jayr de Amorim Filho

1. Micro-ondas. 2. Biomassa. 3. Simulação. I. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. II. Título

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

FIA, Angélica Zaneze. **Interação de micro-ondas com biomassas**. 2018. 91f. Dissertação de mestrado em Física – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

## CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Angélica Zaneze Fia

TÍTULO DO TRABALHO: Interação de Micro-ondas com biomassas.

TIPO DO TRABALHO/ANO: Dissertação / 2018

É concedida ao Instituto Tecnológico de Aeronáutica permissão para reproduzir cópias desta dissertação e para emprestar ou vender cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação ou tese pode ser reproduzida sem a sua autorização (do autor).

  
Angélica Zaneze Fia

Rua Capitão Raul Fagundes, Monte Castelo, 919

CEP: 12215030, São José dos Campos - SP

# INTERAÇÃO DE MICRO-ONDAS COM BIOMASSAS

**Angélica Zaneze Fia**

Composição da Banca Examinadora:

Prof. Dr. Manuel Máximo Bastos Malheiro de Oliveira	Presidente	- ITA
Prof. Dr. Jayr de Amorim Filho	Orientador	- ITA
Prof. Dr. Luiz Fernando de Araújo Ferrão	Membro Interno	- ITA
Prof. Dr. Márcio Eduardo da Silva Alves	Membro Externo	- UNESP
Prof. Dr. Arnaldo Dal Pino Júnior	Substituto Interno	- ITA
Prof. Dr. Carlos Eduardo Fellows	Substituto Externo	- UFF

Dedico este trabalho aos meus pais.

## Agradecimentos

Agradeço a Deus, sem explicação cabível.

Agradeço aos meus pais, Eliana Zaneze Fia e Amarildo Fia e ao meu irmão, Diego Zaneze Fia, pelo amor incondicional, pelos ensinamentos e pelo apoio e compreensão, mesmo à distância, durante todo esse período. Eu nunca chegaria aqui sem vocês.

Ao meu namorado, Helder Moreira Braga, por todo amor, companheirismo, paciência e suporte emocional, estando presente em todos os momentos difíceis e alegres durante a realização deste mestrado. Agradeço muito a todos os meus amigos que participaram da minha formação de alguma forma, especialmente a Geissy de Azevedo Mendes, a melhor amiga do mundo, que mesmo à distância sempre esteve ao meu lado me fazendo rir. As colegas de república e aos amigos do ITA, principalmente a Ivana e o Rafael, pelas horas de diversão.

A todos os professores do Instituto Tecnológico de Aeronáutica que de alguma forma contribuíram para minha formação.

Gostaria de agradecer especialmente ao professor Jayr de Amorim Filho, por ter aceitado me orientar, pela imensurável paciência, pelos ensinamentos e conselhos durante a elaboração deste trabalho e principalmente pela compreensão e apoio nos dias difíceis.

Ao Joares Lidovino dos Reis Junior, pela paciência, dedicação, apoio e ajuda na elaboração do programa computacional.

E a todas as outras pessoas que eu não citei aqui, mas que de alguma forma me ajudaram a estar encerrando mais uma grande etapa da minha vida.

Por fim, gostaria de agradecer à agência CAPES pelo apoio financeiro, ao ITA e ao programa de Pós-Graduação em Física pela oportunidade dada.

*"Mesmo quando tudo parece desabar, cabe a mim decidir entre rir ou chorar, ir ou ficar, desistir ou lutar; porque descobri, no caminho incerto da vida, que o mais importante é decidir".*

(Cora Coralina)

## Resumo

Na busca por maior autonomia e diversificação da matriz energética brasileira, a biomassa, proveniente de resíduos florestais, resíduos orgânicos, atividades agrícolas, algas marinhas e alimentos, tem se destacado como uma das fontes renováveis mais promissoras na redução da dependência dos combustíveis fósseis, como petróleo e gás natural. Neste trabalho apresentamos um estudo do aquecimento por micro-ondas de biomassas, visto que, tem se mostrado como uma ferramenta com grande potencial na conversão da biomassa em produtos energéticos úteis, além de apresentar vantagens consideráveis em relação ao aquecimento convencional. No intuito de investigar a influência dos tempos de irradiação, valor do campo elétrico de entrada, teor de umidade, frequências de trabalho e as propriedades dielétricas e térmicas no processo de aquecimento por micro-ondas, foi desenvolvido um modelo matemático unidimensional para a resolução numérica das equações diferenciais parciais derivadas do acoplamento entre o campo elétrico com os processos de transferência de calor, utilizando o método de diferenças finitas e implementado em quatro biomassas diferentes: bagaço de cana-de-açúcar, casca de laranja, cachos vazios da palma de óleo e madeira. Por meio dos resultados obtidos com o modelo matemático, foi possível descrever a influência do valor constante do calor específico, das propriedades dielétricas, do tempo de exposição à radiação e o valor do campo elétrico de entrada no perfil de temperatura simulado. Também se observou que para um aquecimento mais uniforme, a frequência de 2,45 GHz é a mais indicada, principalmente por apresentar a profundidade de penetração da ordem de tamanho das amostras. O teor de umidade foi outro fator importante no aquecimento por micro-ondas, já que está diretamente relacionado à profundidade de penetração e por afetar significativamente as propriedades dielétricas. A concordância entre os resultados numéricos e os encontrados na literatura, destacou que o modelo numérico pode ser empregado com sucesso no estudo do aquecimento por micro-ondas em biomassas.

## Abstract

In the quest for greater autonomy and diversification of the Brazilian energy matrix, biomass, derived from forest residues, organic residues, agricultural activities, seaweeds and food, has stood out as one of the most promising renewable sources for reducing dependence on fossil fuels, such as oil and natural gas. In this work, we present a study of microwave heating of biomass, since it has shown to be a tool with great potential in the conversion of biomass to useful energy products, besides presenting considerable advantages over conventional heating. In order to investigate the influence of irradiation times, the value of the input electric field, moisture content, working frequencies and dielectric and thermal properties in the microwave heating process, we developed a one-dimensional mathematical model in order to solve the partial differential equations derived from the coupling between the electric field and the heat transfer processes, using the finite difference method and implemented for the following biomasses: sugarcane bagasse, orange peel, empty palm and oil palm bunches. By means of the results obtained with the mathematical model, it was possible to describe the influence of the constant value of the specific heat, the dielectric properties, the time of exposure to the radiation and the value of the input electric field in the simulated temperature profile. Also noted that for a uniform heating, the frequency of 2.45 GHz is the most indicated, mainly because it presents the depth of penetration of the order of size of the samples. The moisture content was another important factor in microwave heating, since it directly related to the depth of penetration and because it significantly affects the dielectric properties. The agreement between the numerical results and those found in the literature, emphasized that the numerical model can be successfully employed in the study of microwave heating of biomass.

## Lista de Figuras

Figura 1 – Representação esquemática das principais tecnologias de aproveitamento energético da biomassa (TOLMASQUIM, 2016).....	18
Figura 2 – Diferença entre o aquecimento convencional e o aquecimento por micro-ondas. Fonte: traduzido de (MOTASEMI; AFZAL, 2013).....	19
Figura 3 - Fruto da palma de óleo. Fonte: Modificado de (DOSSIÊ, 2014). ....	33
Figura 4 – Espectro eletromagnético (LIMA, 2016). ....	37
Figura 5 - Diagrama esquemático do magnetron. Fonte: modificado de (WOLFF, 2018). ....	38
Figura 6 – Interação das micro-ondas com os alimentos. (a) iônica. (b) dipolar. Fonte: traduzido de (SAHIN; SUMNU, 2006).....	39
Figura 7 - Variação das propriedades dielétricas da água em função da frequência. Fonte: traduzido de (VOLLMER, 2004). ....	49
Figura 8 - Constante dielétrica, fator de perda e profundidade de penetração em função do teor de umidade em 2.45 GHz. Fonte: traduzido de (OMAR et al., 2011).....	50
Figura 9 - Constante dielétrica e fator de perda para diferentes alimentos em função da temperatura. Fonte: traduzido de (BENGTSSON; OHLSSON, 1974). ....	51
Figura 10 – Divisão da malha retangular (BURDEN; FAIRES, 2011). ....	54
Figura 11 - Representação do ponto $x_i, y_j$ e seus vizinhos na malha (BURDEN; FAIRES, 2011). ....	56
Figura 12 - Representação do método de diferenças progressivas. O x em azul pode ser obtido a partir dos valores de $\omega$ no tempo anterior $t_j$ (BURDEN; FAIRES, 2011).....	57
Figura 13 - Representação do método de diferenças regressivas. O x em azul pode ser obtido a partir dos valores de $\omega$ no tempo $t_j - 1$ (BURDEN; FAIRES, 2011).....	59

Figura 14 - Representação do método Crank-Nicolson. O $x$ em azul pode ser obtido a partir dos valores de $\omega$ no tempo anterior $t_j$ (BURDEN; FAIRES, 2011).....	60
Figura 15 - Configuração do sistema físico adotado, onde o campo elétrico ( $E$ ) incide na direção $y$ e a amostra de biomassa está ao longo de $x$ .....	61
Figura 16 - Fluxograma do modelo matemático. ....	64
Figura 17 – Distribuição da temperatura para a madeira (dimensão 11 cm ( $x$ ) x 5 cm ( $z$ )) na frequência de 2,45 GHz. Fonte: traduzido de (RATTANADECHO, 2006). ....	67
Figura 18 - Distribuição da temperatura dentro das amostras de biomassa. (a) Bagaço de cana-de-açúcar. (b) Casca de laranja. (c) Palma de óleo – 15% de umidade. (d) Madeira. ....	68
Figura 19 - Perfil de temperatura para a madeira, onde $E_{yin} = 3,55 \times 10^4$ V/m. ....	69
Figura 20 - Perfil da temperatura em função do tempo de exposição à radiação. (a) $C_p$ constante. (b) $C_p$ em função da temperatura. Fonte: traduzido de (SALEMA; AFZAL, 2015). ....	70
Figura 21 - Perfil da temperatura máxima em função do tempo de exposição à radiação, com campo elétrico de entrada de $1 \times 10^4$ V/m e frequência de 2,45 GHz. (a) Bagaço de cana-de-açúcar. (b) Casca de laranja. (c) Palma de óleo – 15% de umidade. (d) Madeira. ....	71
Figura 22 - Perfil da temperatura máxima em função do tempo de exposição à radiação para a madeira em um campo elétrico de $3,55 \times 10^4$ V/m e frequência de 2,45 GHz.....	72
Figura 23 - Distribuição da temperatura dentro das amostras de biomassa durante 20 s de exposição à radiação. Campo elétrico de $1 \times 10^4$ V/m e frequência de 2,45 GHz. ....	73
Figura 24 - Distribuição da temperatura ao longo da amostra para a casca de laranja e a palma de óleo. a) 10 s de exposição à radiação. b) 20 s de exposição à radiação. Campo elétrico de $1 \times 10^4$ V/m e frequência de 2,45 GHz. ....	74
Figura 25 - Perfil da temperatura máxima em função do tempo de exposição à radiação, com campo elétrico de entrada de $1 \times 10^4$ V/m e frequência de 2,45 GHz para a casca de laranja e a palma de óleo.....	75

Figura 26 - Influência da constante dielétrica na profundidade de penetração (Dp) para as frequências de 2,45 GHz e 915 MHz. ....	77
Figura 27 - Distribuição da temperatura ao longo das amostras, das biomassas em análise, para as frequências de 2,45 GHz e 915 MHz. ....	78
Figura 28 - Efeito do teor de umidade na distribuição da temperatura durante 10 s de exposição à radiação. ....	79
Figura 29 - Perfil da temperatura máxima em função do tempo de exposição à radiação, com campo elétrico de entrada de $1 \times 10^4$ V/m e frequência de 2,45 GHz para a palma de óleo com 15% de umidade, 45% de umidade e 64% de umidade. ....	80
Figura 30 - Relação do teor de umidade com a profundidade de penetração nas frequências de 2,45 GHz e 915 MHz. ....	81

## Lista de Tabelas

Tabela 1 – Classificação das fontes de biomassa	15
Tabela 2 - Contribuição das biomassas na Matriz Energética Brasileira	24
Tabela 3 - Teor de pectina de algumas frutas	31
Tabela 4 - Propriedades das biomassas em análise	66
Tabela 5 - Tangente de perda e temperatura máxima das biomassas selecionadas	73
Tabela 6 - Propriedades dielétricas e tangente de perda	75
Tabela 7 - Propriedades dielétricas e profundidade de penetração das biomassas selecionadas	76
Tabela 8 - Propriedades dielétricas da Palma de óleo em função do teor de umidade	79

## Sumário

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	14
<b>2. BIOMASSAS</b> .....	22
<b>2.1. Madeira</b> .....	22
<b>2.2. Bagaço de cana-de-açúcar</b> .....	26
<b>2.3. Casca da laranja</b> .....	30
<b>2.4. Óleo de Palma</b> .....	32
<b>3. AQUECIMENTO POR MICRO-ONDAS</b> .....	37
<b>3.1. Equações Eletromagnéticas</b> .....	40
<b>3.2. Equações de transferência de calor</b> .....	46
<b>3.3. Fatores que influenciam nas propriedades dielétricas</b> .....	47
3.3.1. Frequência .....	47
3.3.2. Umidade .....	49
3.3.3. Temperatura .....	50
<b>4. SIMULAÇÃO NUMÉRICA</b> .....	53
<b>4.1. Métodos de Diferenças Finitas</b> .....	56
4.1.1. Método de Diferenças Progressivas (Forward-Difference) .....	57
4.1.2. Método de Diferenças Regressivas (Backward-Difference) .....	58
4.1.3. Método Crank-Nicolson .....	59
<b>4.2. Modelo Térmico e Elétrico</b> .....	60
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	66
<b>5.1. Distribuição da temperatura ao longo da amostra</b> .....	67
<b>5.2. Perfil da temperatura</b> .....	69
<b>5.3. Profundidade de Penetração</b> .....	76
<b>5.4. Dependência das propriedades dielétricas sobre o teor de umidade</b> .....	78
<b>6. CONCLUSÃO</b> .....	83
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	85

# 1. Introdução

A demanda total de combustíveis fósseis, como carvão, petróleo e gás natural, representaram, em 2014, 81% da matriz energética mundial (KUMMAMURU, 2017), os outros 19% foram abastecidos por fontes renováveis de energia. O predomínio dos combustíveis fósseis, desperta preocupações em relação às mudanças climáticas e a segurança energética. A queima de combustíveis fósseis é responsável por mais da metade das emissões de gases de efeito estufa no mundo, além de contribuírem na liberação de metais pesados, como mercúrio e chumbo, e na degradação do solo. A forte dependência dos países na importação de energia, a possibilidade de interrupções no fornecimento, o aumento dos preços e a distribuição desigual dos recursos, contribui na disputa comercial por reservas finitas de combustíveis (FUNDAÇÃO DE AMPARO À PESQUISA DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2010).

As fontes renováveis de energia, como hidrelétrica, biomassa, eólica, solar e oceânica, juntamente com tecnologias que reduzam seus impactos negativos ao meio ambiente, são consideradas fontes limpas de energia, de baixo teor de carbono e enxofre e alternativas econômicas para a diversificação da matriz energética, além de reduzir a poluição e conseqüentemente o aquecimento global. Dentre elas, a biomassa é uma das fontes alternativas mais promissoras, principalmente por emitir baixíssimas quantidades de carbono. Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (TOLMASQUIM, 2016) o dióxido de carbono emitido durante a queima do biocombustível, no caso da madeira e cana-de-açúcar, é o mesmo que foi absorvido pela planta durante o processo de fotossíntese, gerando um balanço quase nulo de emissões de dióxido de carbono. O uso moderno da biomassa pode proporcionar a mitigação das mudanças climáticas, diminuição das emissões dos gases do efeito estufa e reduzir a dependência dos combustíveis fósseis.

Diferentemente dos combustíveis fósseis, a biomassa é proveniente de resíduos florestais, resíduos orgânicos, atividades agrícolas, algas marinhas e alimentos, e é composta principalmente por três componentes, celulose, hemicelulose e lignina (UCZAI, 2012; CORTEZ, LORA, GÓMEZ, 2008). A Tabela 1 apresenta as principais fontes de biomassa segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

Tabela 1 – Classificação das fontes de biomassa

<b>Origem</b>	<b>Fonte Nível 1</b>	<b>Fonte Nível 2</b>
Biomassa	Agroindustriais	Bagaço de Cana de Açúcar
		Biogás-AGR
		Capim Elefante
		Casca de Arroz
	Biocombustíveis líquidos	Etanol
		Óleos vegetais
		Carvão Vegetal
	Floresta	Carvão Vegetal
		Gás de Alto Forno – Biomassa
		Lenha
		Licor Negro
		Resíduos florestais
		Resíduos animais
Resíduos sólidos urbanos	Biogás – RU	
	Carvão – RU	

Fonte: Extraído de ANEEL (2018).

Como a biomassa é um combustível de fácil acesso e armazenagem, o aproveitamento da biomassa tradicional (lenha, esterco animal e resíduos agrícolas) por meio de queima direta (fornos e caldeiras) ainda é utilizada em larga escala por cerca de 10% da população mundial para aquecimento, cozimento e geração de energia residencial e corresponde a aproximadamente 90% do uso da biomassa no setor energético (FUNDAÇÃO DE AMPARO À PESQUISA DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2010). Somente depois do século XX que novas formas de utilização da biomassa entraram em destaque (CARDOSO, 2012).

Segundo a Associação Mundial de Bioenergia (KUMMAMURU, 2017), em 2014, o fornecimento de energia primária da biomassa foi de  $59,2 \times 10^{18}$  J que corresponde a 10,3% de toda a oferta mundial de energia ( $573 \times 10^{18}$  J) e a geração total de bioenergia totalizou 493 TWh que é 2,6 vezes mais se comparada a geração de energia solar e representa 73% de todo o fornecimento de energia renovável.

Com base nos dados do Banco de Informações sobre Geração (BIG) da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2018) no Brasil, o bagaço de cana-de-açúcar é a principal fonte de biomassa para geração de combustível, com aproximadamente 11 GW de potência em 2017, representando 6,72% da matriz energética brasileira. A biomassa do bagaço

de cana se destaca por estar associado às usinas de cana-de-açúcar, que queimam o bagaço para a geração de eletricidade durante o processo de fabricação do açúcar e etanol. Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (TOLMASQUIM, 2016), a cada tonelada de cana processada, 270 Kg são de bagaço, com 50% de umidade, e representa, em média, 27% do peso da cana. Cerca de 70% da energia elétrica obtida pela queima do bagaço, combustão direta em caldeiras, é utilizada para atender as demandas energéticas das usinas sucroenergéticas na produção de açúcar e etanol, os outros 30% excedentes são vendidos às distribuidoras de energia. Com a mecanização da colheita de cana-de-açúcar, as palhas e as pontas, que normalmente são queimadas durante a colheita para facilitar o manuseio, também poderão ser utilizadas como combustível, aumentando a participação da cana-de-açúcar na geração de energia.

No setor florestal o carvão vegetal e madeira tem contribuído para diversificação do uso das fontes de biomassa. Para fins não energéticos, a madeira se destaca nas indústrias de papel e celulose, serrarias e moveleiras. Durante o processo de produção de celulose e papel é liberado um resíduo industrial líquido, conhecido como lixívia ou licor negro, com alto poder energético, que é utilizado como combustível em usinas de cogeração da própria indústria de celulose. O Brasil é considerado o maior produtor mundial de carvão vegetal e em 2016 a lenha representou 26,8% da produção de bioenergia da matriz energética brasileira. Somando toda a potência instalada de biomassa em operação no País, a bioeletricidade contribui com 8,7% de toda a matriz energética brasileira, enquanto o potencial hidráulico, que domina esse setor, representa aproximadamente 61% ((ANEEL, 2018); BRASIL, 2017c; TOLMASQUIM, 2016).

Segundo o Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA) (UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE, 2018b), o Brasil também se destaca por ser o maior produtor mundial de laranja e responsável por 64,47% de todo o suco de laranja consumido no mundo. Segundo a Pesquisa de Estimativa de Safra (PES) (PESQUISA DE ESTIMATIVA DE SAFRA, 2018) a estimativa para a safra 2017/18 é de 397,27 milhões de caixas de laranjas produzidas no cinturão citrícola de São Paulo e Minas Gerais. Atualmente as indústrias processadoras de suco de laranja utilizam os resíduos, tais como sementes, cascas e bagaço, na produção de ração animal, óleos essenciais, fertilizantes e na extração de pectina.

A pectina é amplamente utilizada em indústrias alimentares, como agente gelificante, na confecção de bebidas, na panificação, como substituto de gordura na produção de manteiga, entre outros, e na indústria farmacêutica e química. A pectina é usualmente extraída da casca da laranja ou do bagaço de maçã. A fim de obter uma pectina de alta qualidade e por não haver matéria-prima adequada disponível o ano todo, a secagem adequada da matéria-prima é um processo fundamental durante a produção de pectina.

A palma de óleo, popularmente conhecida como dendezeiro, é uma espécie de palmeira que produz dois tipos de óleo, o óleo de palma que é proveniente da polpa e o óleo de palmiste, derivado da amêndoa da palma. Aproximadamente 80% da produção de óleo de palma é utilizado na indústria alimentícia, já o óleo de palmiste é de grande interesse para a indústria de cosméticos. As usinas de óleo de palma reutilizam os resíduos, como as fibras prensadas e os cachos da palma como combustível para gerar vapor e energia. E, como outros óleos vegetais, o óleo de palma pode ser queimado em motores de combustão interna e caldeiras para geração de energia e na produção de biodiesel (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE ÓLEO DE PALMA, 2015b).

A cultura de palma de óleo ocupa 8% das terras destinadas a produção de oleaginosas, representando a maior produção de óleo por unidade de área, com estimativa de 69,77 milhões de toneladas de óleo de palma na safra de 2017/2018, representando 35,4% da produção mundial de óleo vegetal, enquanto a produção de óleo de soja, segundo óleo mais produzido no mundo, representou 28,4% da produção (USDA, 2018b). Os maiores produtores de óleo de palma são a Malásia e a Indonésia, que juntas são responsáveis por 84,56% da produção mundial. Enquanto o Brasil contribui com apenas 0,59% da produção mundial, com produção de 410 mil toneladas de óleo de palma em 2017 (USDA, 2018b).

A transformação da biomassa em energia útil, como biocombustíveis, biodiesel, eletricidade e produtos químicos ocorre através de uma série de processos de conversão. Esses processos podem ser classificados em conversão termoquímica e bioquímica. As principais tecnologias de aproveitamento energético da biomassa são representadas na Figura 1.

Dentre as principais técnicas de conversão de biomassa para geração de calor e energia elétrica, os processos termoquímicos são os mais adequados e a combustão é a mais utilizada. A combustão direta é a transformação da energia química em calor na presença de oxigênio. O produto principal da combustão é um gás a elevada temperatura (800 °C a 1000 °C), que pode ser queimado em fogões, fornos de metalúrgicas e caldeiras (BRASIL, 2005).

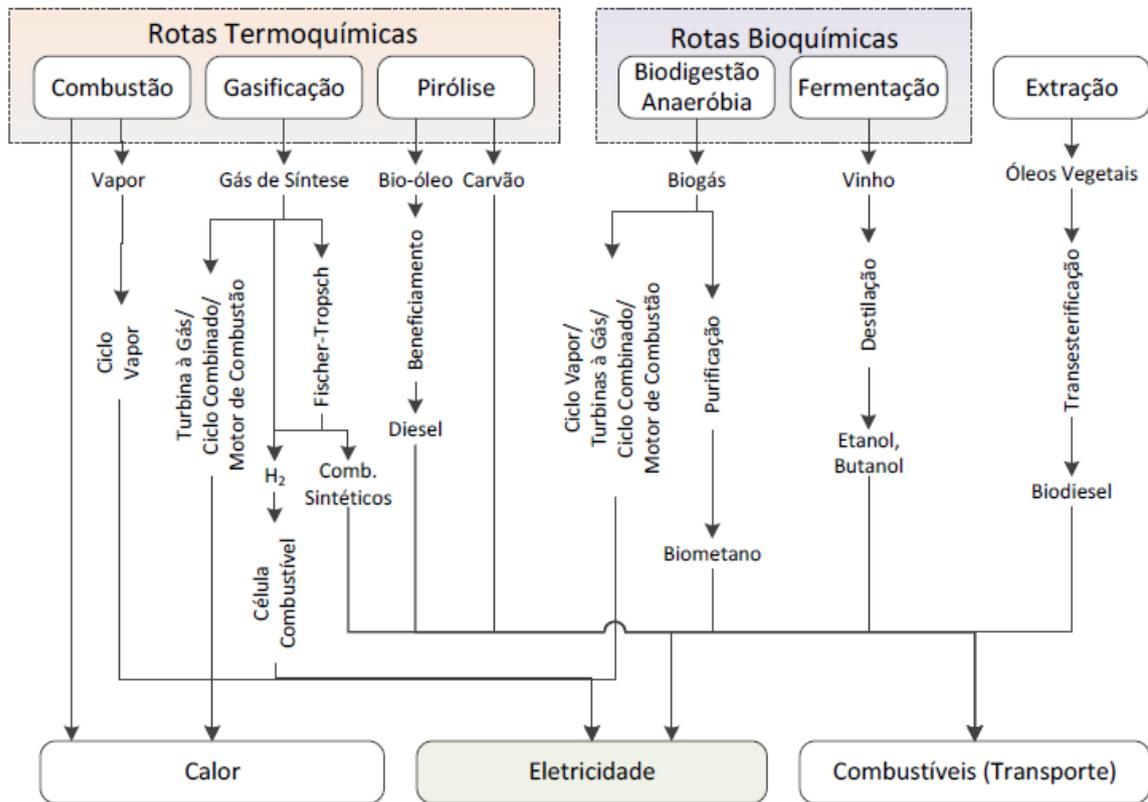


Figura 1 – Representação esquemática das principais tecnologias de aproveitamento energético da biomassa (TOLMASQUIM, 2016).

A pirólise ou carbonização é a decomposição térmica do material orgânico que decorre na quase ausência de oxigênio a temperaturas moderadas (entre 300 °C a 500 °C). É o processo mais antigo de conversão de biomassa tradicional em um combustível de maior valor energético (BRASIL, 2005). A quantidade e a composição dos produtos gerados nesse processo dependem da temperatura, taxa de aquecimento, tempo de permanência e características da matéria-prima, como o teor de umidade e o tamanho de partícula (DINKELBACH et al., 2000). Sob essas condições, pode-se dividir o processo de pirólise em três categorias: 1) Pirólise lenta: utiliza baixas temperaturas de aquecimento (300 °C a 650 °C), longos tempos de residência de vapor, em torno de 450 s – 550 s, que favorecem a produção de carvão vegetal. 2) Pirólise rápida: considerada uns dos métodos mais promissores na conversão de biomassa em líquidos, como alcatrão e bio-óleo, apresenta temperaturas moderadas, por volta de 550 °C até 950 °C e curto tempo de residência de vapor, entre 0,5 s – 10 s. 3) Pirólise ultrarrápida: tem como característica altíssimas temperaturas, 750 °C a 1000 °C, enquanto o tempo de residência é inferior a 0,5 s. Esse processo beneficia a produção de gás (BRIDGWATER, 2012; MOTASEMI, AFZAL, 2013 ).

Na pirólise convencional, o calor é transferido para a biomassa, da superfície externa do material até o interior (processo representado pelas setas azuis na Figura 2), principalmente por condução e convecção, o que acaba gerando um gradiente de temperatura e consequentemente, aumento no consumo de energia, no tempo e no custo de processamento e diminuição na eficiência do processo de aquecimento da biomassa.

Em contraste com a transferência de calor convencional, onde o calor é transferido de uma fonte externa para a superfície do material por convecção, condução e radiação e para o centro do material (região mais fria) por meio de condução térmica, o aquecimento por micro-ondas converte a energia eletromagnética em energia térmica através da interação direta da radiação incidente com o material, aquecendo volumetricamente o alimento, do interior do corpo para as bordas (processo representado pelas linhas vermelhas na Figura 2). As micro-ondas são ondas eletromagnéticas com comprimentos de onda entre 0,01 m a 1 m e com frequências entre 300 MHz e 300 GHz. Devido à possibilidade de interferência das micro-ondas com os sistemas de comunicações, as frequências utilizadas para fins industriais, científicos e médicos são de 915 MHz e 2,45 GHz.

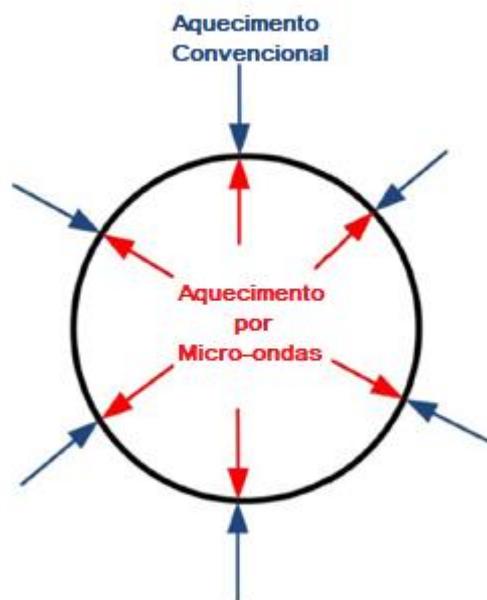


Figura 2 – Diferença entre o aquecimento convencional e o aquecimento por micro-ondas.  
Fonte: traduzido de (MOTASEMI; AFZAL, 2013).

O aquecimento por micro-ondas pode ser aplicado em uma ampla gama de processamento de alimentos, como aquecimento, descongelamento, esterilização e secagem, além de apresentar vantagens consideráveis em relação ao aquecimento convencional, como:

redução do tempo de residência, o que leva à economia de energia; aquecimento sem contato e quase instantâneo devido à geração volumétrica de calor; transferência de energia em vez de transferência de calor; aquecimento seletivo; facilidade em ligar e desligar o equipamento instantaneamente, o que evita o tempo de espera para que a fonte aqueça ou esfrie; não há necessidade de moagem da biomassa; alternativa para mitigação de emissões de gases do efeito estufa; maior recuperação de energia dos resíduos de biomassa; tratamento de materiais com elevado teor de umidade (YIN, 2012; HUANG et al., 2016). Além de melhorar a qualidade e o rendimento dos produtos finais.

No entanto, a pirólise assistida por micro-ondas ainda apresenta vários desafios, dentre eles, o comportamento não uniforme do aquecimento, gerando imprecisão nos perfis de temperatura, o que acaba ocasionando pontos quentes e pontos frios dentro da amostra, a distribuição não homogênea do campo elétrico, variação nas propriedades dielétricas e térmicas do material com o aumento da temperatura, potência do equipamento, tempo de residência e temperatura de processamento (SALEMA; AFZAL, 2015).

Nesse contexto, descrever a interação da radiação eletromagnética com a biomassa durante o processo de aquecimento por micro-ondas e todos os parâmetros que afetam a qualidade final do produto, é o fator determinante para o avanço da tecnologia de pirólise assistida por micro-ondas no processamento de biomassa.

A simulação numérica é uma ferramenta que possibilita resolver as equações de Maxwell com as equações de transferência de calor. Com o modelo matemático é possível estimar o perfil térmico e eletromagnético dentro do material, além das principais características que podem influenciar no processo de aquecimento da biomassa, a saber, tempo de irradiação, frequência utilizada, tamanho da amostra, potência do equipamento, teor de umidade, as propriedades dielétricas e térmicas dos materiais, dentre outros parâmetros. Fornecendo assim, um modelo com as principais características e variáveis do processo de pirólise induzida por micro-ondas.

Devido à quantidade limitada de trabalho teórico e experimental sobre o aquecimento de materiais orgânicos por micro-ondas, o presente trabalho possui como escopo o desenvolvimento de um modelo matemático unidimensional para a resolução numérica de equações diferenciais parciais (EDPs) derivadas do acoplamento entre o campo elétrico com os processos de transferência de calor. Foi utilizado o método Crank-Nicolson, que é um dos modelos mais utilizados na solução de equações parabólicas e baseado no método das Diferenças Finitas – que consiste na discretização do domínio e na substituição das derivadas presentes na equação diferencial por aproximações envolvendo somente valores numéricos da

função. A implementação do modelo matemático foi feita com o auxílio do software Microsoft Developer Studio (Fortran 90) e implementado em quatro biomassas diferentes: bagaço de cana-de-açúcar, casca de laranja, cachos vazios da palma de óleo (EFB - Empty Fruit Bunch) e madeira.

As simulações foram realizadas com o intuito de investigar a influência dos tempos de irradiação, valor do campo elétrico de entrada, teor de umidade, frequências de trabalho e propriedades dielétricas e térmicas, no perfil de aquecimento das amostras, possibilitando uma melhor compreensão do processo de aquecimento por micro-ondas. Com o modelo matemático, também foi possível descrever a influência das propriedades dielétricas na profundidade de penetração ( $D_p$ ) do campo elétrico na biomassa. A validação do programa foi feita por meio de comparação com resultados publicados na literatura.

O presente trabalho foi estruturado em seis capítulos, sendo este primeiro uma introdução ao tema, expondo a relevância, as motivações e os objetivos deste trabalho. O capítulo 2 destina-se a caracterização das biomassas que serão estudadas no decorrer do trabalho, com o intuito de demonstrar a importância de cada uma no setor energético brasileiro. O capítulo 3 apresenta uma revisão bibliográfica, onde são apresentados os fundamentos do aquecimento por micro-ondas, bem como seu equacionamento. No capítulo 4 é apresentado o modelo matemático desenvolvido para descrever a interação do campo elétrico com a biomassa e todos os parâmetros que afetam o processo de aquecimento por micro-ondas. Os parâmetros utilizados na simulação e os resultados obtidos referente à cada biomassa são discutidos no capítulo 5. O capítulo 6 apresenta as principais conclusões pertinente à pesquisa realizada.

## 2. Biomassas

A biomassa pode ser proveniente de resíduos florestais, resíduos orgânicos, atividades agrícolas, algas marinhas e alimentos, e é composta principalmente por três componentes, celulose, hemicelulose e lignina (UCZAI, 2012; CORTEZ; LORA; GÓMEZ, 2008). A geração de energia elétrica através da biomassa pode proporcionar a mitigação das mudanças climáticas pela diminuição das emissões dos gases do efeito estufa, ajudando na redução da dependência dos combustíveis fósseis e das hidrelétricas, diversificando a matriz energética brasileira. No Brasil, 550 empreendimentos termelétricos são movidos à biomassa, somando uma potência instalada de 14,4 GW, contribuindo com 8,7% de toda a matriz energética brasileira, enquanto o potencial hidráulico, que domina esse setor, representa 60,9% (ANEEL, 2018).

Este capítulo destina-se a caracterização das biomassas que serão estudadas no decorrer do trabalho, com o intuito de demonstrar a importância de cada uma no setor energético brasileiro. As biomassas selecionadas neste trabalho foram: bagaço de cana-de-açúcar, casca de laranja, cachos vazios da palma de óleo (EFB - Empty Fruit Bunch) e madeira.

### 2.1. Madeira

A lenha é, provavelmente, a fonte energética mais antiga utilizada pelo homem, por meio de queima direta em fornos e caldeiras para aquecimento, cozimento e geração de energia residencial. Atualmente, a atividade florestal está associada às florestas plantadas (florestas energéticas), cultivadas para suprir a demanda por madeira de forma responsável e sustentável. A cadeia produtiva de base florestal brasileira, é destinada às indústrias de papel e celulose, serrarias, moveleiras e na produção de carvão vegetal.

Em todo o mundo, as florestas plantadas juntamente com as florestas naturais ocupam 3,7 bilhões de hectares (CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA, 2017). Em 2015, de acordo com (OLIVEIRA; OLIVEIRA, 2017), as florestas plantadas totalizaram 264 milhões de hectares, representando 7% de toda área plantada do mundo. No Brasil, em 2016, a área plantada de florestas energéticas foi de 7,84 milhões de hectares, representando 91% de toda madeira produzida para fins industriais. Sendo que, 34% das florestas plantadas pertence às empresas de celulose e papel, o restante encontra-se distribuído em plantios florestais

destinados para comercialização da madeira “in natura” e no segmento de siderurgia e carvão vegetal. Nesse mesmo período, 206 milhões de m<sup>3</sup> de árvores plantadas foram de uso industrial (INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES, 2017).

As principais espécies de madeira cultivadas no Brasil, para suprir as necessidades das indústrias madeireiras, são o eucalipto e o pinus. Os plantios de eucalipto ocupam 5,7 milhões de hectares de área plantada, com produtividade média anual em torno de 35 m<sup>3</sup>/ha ao ano, sendo o estado de Minas Gerais responsável por 24% de toda área plantada de eucalipto do País. Já os plantios de pinus ocupam 1,6 milhões de hectares, com produtividade 30 m<sup>3</sup>/ha ao ano, sendo o estado do Paraná responsável por 42% da plantação (INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES, 2017).

A colheita da madeira gera uma grande quantidade de resíduos, como folhas, galhos, material florestal orgânico, sobras de madeira, casca e raízes, em plantios de eucaliptos e pinus, por exemplo, 22 e 28% respectivamente da produção se tornam resíduos. Já das indústrias de papel e celulose, é obtido um resíduo conhecido como lixívia ou licor negro, proveniente do cozimento da madeira. Normalmente, a lixívia é utilizada como combustível para cogeração (produção de vapor e eletricidade) nas próprias indústrias de papel e celulose (CARDOSO, 2012). Em 2016, a produção total de lixívia foi de 29,5 milhões de toneladas, sendo que, só as indústrias de papel e celulose utilizaram 21,8 milhões de toneladas para cogeração, o restante da produção, cerca de 7,7 milhões de toneladas, foi utilizado para geração de energia elétrica (BRASIL, 2017b).

Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2018), a potência instalada de biomassa florestal em operação no País representa 1,89% da matriz elétrica brasileira, sendo que, dos 95 empreendimentos termelétricos que utilizam a biomassa florestal como combustível, 18 termelétricas são movidas a licor negro, com a capacidade instalada de 2.542.616 KW de potência, representando 17% da capacidade instalada em biomassa e 1,53% do parque gerador de energia elétrica, ficando atrás só da biomassa oriunda do bagaço de cana-de-açúcar. Cerca de 55 termelétricas utilizam os resíduos florestais como energia (na forma de cavacos ou serragem), totalizando uma potência instalada de 425.197 KW, representando 0,26% da matriz energética, enquanto a lenha representa apenas 0,014% da geração de energia, com potência instalada de 23.900 KW (Tabela 2).

Tabela 2 - Contribuição das biomassas na Matriz Energética Brasileira

Biomassas	Capacidade instalada		
	Nº de usinas	(KW)	% (Matriz energética)
Bagaço de Cana de Açúcar	402	11.167.735	6,7147
Biogás-AGR	2	948	0,0006
Capim Elefante	2	31.700	0,0191
Casca de Arroz	12	45.333	0,0273
Etanol	1	320	0,0002
Óleos vegetais	2	4.350	0,0026
Carvão Vegetal	8	43.197	0,0260
Gás de Alto Forno – Biomassa	10	114.265	0,0687
Lenha	4	23.900	0,0144
Licor Negro	18	2.542.616	1,5288
Resíduos florestais	55	425.197	0,2557
Biogás – RA	14	4.481	0,0027
Biogás – RU	19	128.851	0,0775
Carvão – RU	1	2.700	0,0016

Fonte: Extraído de ANEEL (2018).

Outro importante produto das florestas plantadas é o carvão vegetal, produto resultante da queima ou carbonização da madeira. Utilizado como combustível para churrasqueiras, lareiras, fogões a lenha, em termoelétricas, na purificação de água e nas siderúrgicas, como agente termoreduzidor, substituto do carvão mineral, durante a produção do ferro-gusa (liga metálica que dá origem ao aço) (FUNDAÇÃO DE AMPARO À PESQUISA DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2010). Segundo dados do Balanço Energético Nacional (BRASIL, 2017b), em 2016, a produção total de lenha foi de 74,5 milhões de toneladas, sendo que 21,68 milhões de toneladas foram utilizadas na produção de carvão vegetal e 1,22 milhões de toneladas diretamente na geração elétrica. A geração de energia brasileira, proveniente do carvão vegetal, representa 0,026% da produção, sendo utilizado por 8 empreendimentos termelétricos, com uma potência instalada de 43.197 KW (Tabela 2) (ANEEL, 2018).

A qualidade da produção de carvão vegetal está diretamente relacionada as propriedades físicas e químicas da madeira, a temperatura de carbonização (pirólise), que interfere no peso e no teor de carbono que é fixado, além das características e técnicas dos processos adotados para conversão da madeira em carvão vegetal.

No Brasil, grande parte da produção é proveniente de fornos de alvenaria (carvoarias), com fonte interna de calor. Esses fornos apresentam baixo rendimento (de toda madeira inserida, apenas 30% é convertida em carvão), não possuem controle adequado dos processos de pirólise, como temperatura, qualidade do carvão e da lenha. Além da emissão de gases poluentes, como metano, etano, monóxido de carbono e dióxido de carbono, contribuindo para a poluição atmosférica. Ocasionalmente perda econômica e a necessidade de áreas maiores de florestas para atender a demanda (RODRIGUES, 2016).

Durante o processo de pirólise da madeira, que consiste na conversão de um combustível sólido em outro de melhor qualidade, além da produção de carvão vegetal, ocorre à formação de gases, que ao serem condensados dão origem ao alcatrão (óleo de cor escura) e do ácido pirolenhoso (líquido de cor amarela a marrom avermelhada). O alcatrão pode ser utilizado como óleo combustível e o ácido pirolenhoso, formado principalmente por compostos orgânicos, é utilizado para prevenir pragas e doenças, como repelente e contra agentes deteriorantes em cultivos agrícolas e na madeira. Esses subprodutos, no entanto, na maioria das vezes não são recuperados durante o processo de pirólise convencional, principalmente durante a produção do carvão vegetal nos fornos de alvenaria, sendo emitidos na atmosfera (RODRIGUES, 2016).

Com isso, várias tecnologias estão sendo desenvolvidas para aprimorar a eficiência da conversão da madeira em carvão vegetal, aumentando o rendimento e a qualidade do carvão e possibilitando o reaproveitamento dos subprodutos e a redução da emissão de gases poluentes.

Dentre essas tecnologias, a pirólise assistida por micro-ondas tem se mostrado uma alternativa promissora à pirólise convencional, devido à redução do tempo de residência, o que leva à economia de energia; aquecimento sem contato e quase instantâneo devido à geração volumétrica de calor; aquecimento seletivo; facilidade de operação por controle instantâneo de ligar/desligar; não há necessidade de moagem da biomassa; maior recuperação de energia dos resíduos de biomassa, melhorando o rendimento e a qualidade dos produtos; tratamento de materiais com elevado teor de umidade (HUANG; CHIUEH; LO, 2016; YIN, 2012). Além disso, é uma alternativa para mitigação de emissões de gases do efeito estufa.

Miura *et al.* (2004), utilizaram um bloco cilíndrico de madeira para investigar o efeito do tamanho da amostra no aquecimento por micro-ondas. Segundo eles, blocos maiores de madeira podem ser pirolisados com menos consumo de energia elétrica por unidade de peso do que blocos menores, reduzindo os custos do processamento, além da pirólise assistida por micro-ondas ser mais rápida do que a pirólise convencional, sendo necessário apenas 7 ou 8 min de aquecimento. Já o carvão obtido pelo aquecimento por micro-ondas, apresentou microporos com estruturas maiores do que o carvão obtido pelo método convencional, com

quantidades menores de carbono no interior dos poros. Característica importante no caso do carvão ser utilizado como material absorvente.

Segundo a pesquisa realizada por (LI *et al.*, 2016), temperaturas mais baixas durante o aquecimento por micro-ondas geraram um aquecimento mais homogêneo e seletivo, ocasionando um carvão vegetal de qualidade superior, quando comparado ao carvão vegetal obtido pelo método convencional. Mostraram também que a pirólise de micro-ondas de “pellets” de madeira mostrou ser eficiente na conversão da biomassa em outros produtos, como bio-óleo, que pode ser separado e utilizado como matéria-prima para combustíveis, pesticidas e produtos químicos, os produtos gasosos liberados durante a queima podem ser utilizados na síntese de combustíveis líquidos e o carvão vegetal que pode ser utilizado na geração de energia. Os pesquisadores também relataram que os absorvedores de micro-ondas utilizados durante a queima, permanecem no carvão e podem servir como fonte de nutrientes para as plantas e auxiliar na recuperação do solo contaminado por metais pesados.

O estudo realizado por Robinson *et al.* (2010), mostrou que a pirólise por micro-ondas pode ser alcançada sem a adição de absorvedores de micro-ondas. E que o rendimento dos biocombustíveis e do bio-gás é dependente da taxa de aquecimento e da densidade de potência fornecida durante o processo. Foi mostrado por Huang, Chiueh e Lo (2016), que o processo de pirólise assistida por micro-ondas, pode produzir mais produtos sólidos e gasosos do que os produtos líquidos, quando comparado a pirólise convencional. E que o bio-óleo obtido pelo aquecimento por micro-ondas apresenta maior teor de carbono e menos oxigênio do que o bio-óleo convencional. Também mostrou que a pirólise de micro-ondas produz mais hidrogênio e monóxido de carbono e menos metano e dióxido de carbono do que a pirólise convencional.

## **2.2. Bagaço de cana-de-açúcar**

A cana-de-açúcar, planta do gênero *Saccharum*, oriunda do sudeste asiático, é cultivada no Brasil desde 1532, trazida pelos colonizadores portugueses (BRASIL, 2008). É uma gramínea perene, da mesma família da aveia, do trigo e do milho. A parte aérea da cana é formada por colmos, onde se concentra a sacarose, pelas folhas e pontas. Normalmente as folhas e pontas são deixadas no local da colheita por apresentarem pouco teor de açúcar (TOLMASQUIM, 2016).

O Brasil é hoje o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, com estimativa para a safra 2017/2018, de 635,6 milhões de toneladas, em uma área de 8,74 milhões de hectares e

produtividade estimada de 72.734 kg/ha. A cana-de-açúcar é a matéria-prima mais importante na produção de açúcar, sendo destinado 47,3% da produção de cana para este fim (BRASIL, 2017a). Em média, para se produzir 100 Kg de açúcar é necessário 1 tonelada de cana-de-açúcar (BRASIL, 2008). A produção brasileira de açúcar deverá atingir 39,46 milhões de toneladas na safra 2017/2018 (BRASIL, 2017a), sendo o País o maior produtor e exportador de açúcar do mundo, respondendo por cerca de 20% da produção e 47% da comercialização de açúcar (USDA, 2017).

Segundo dados da Companhia Nacional de Abastecimento (BRASIL, 2017a), a chamada Região Centro-Sul sucroalcooleira, formada pelos estados de São Paulo, Minas Gerais, Goiás, Mato Grosso do Sul e Paraná, é responsável por 92% da cana-de-açúcar processada no País, sendo que, a estimativa, só para o estado de São Paulo, é de aproximadamente 54% de toda cana-de-açúcar colhida durante a safra 2017/2018, além de ser o maior produtor nacional de açúcar, representando mais de 62% da produção.

A cana-de-açúcar também é considerada uma alternativa para o setor de biocombustíveis. O etanol, ou álcool etílico, pode ser produzido a partir de qualquer biomassa, como milho, cana-de-açúcar, beterraba e trigo, normalmente biomassas com quantidades significativas de açúcares e amido. O etanol pode ser utilizado como combustível de duas maneiras, misturado à gasolina, nesse caso é utilizado o etanol anidro (com teor de água menor que 0,6%), ou o etanol hidratado puro (com teor de água entre 6,2% e 7,4%). Ambos são utilizados em motores de combustão interna com ignição por faísca, no entanto, para a utilização do etanol hidratado puro é necessário a adaptação dos motores (BNDES; CGEE, 2008). Atualmente, o índice de etanol na gasolina é de 27% (AMATO; MATOSO, 2015), possibilitando uma combustão mais limpa e contribuindo para a redução das emissões de gases poluentes (RODRIGUES, 2010).

No Brasil, o etanol é produzido basicamente por cana-de-açúcar, sendo que, do total da produção de cana-de-açúcar, 52% é destinado a produção de etanol. A expectativa brasileira para a produção de etanol para a safra 2017/2018, é de 27 bilhões de litros, sendo que, só a Região Centro-Sul deve produzir 25,4 bilhões de litros (BRASIL, 2017a). Com base nos dados da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2018), somente uma usina termelétrica no País utiliza o etanol como combustível, gerando uma potência de aproximadamente 320 KW, representando apenas 0,0002% da matriz energética brasileira.

Além da fabricação de açúcar e etanol, a partir do processo de prensagem da cana para extração do caldo, é produzido o bagaço de cana-de-açúcar. Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (TOLMASQUIM, 2016), a cada tonelada de cana processada, 270 Kg são de

bagaço, com 50% de umidade, representando, em média, 27% do peso da cana. Atualmente, durante o processo de fabricação do açúcar e do etanol, as usinas têm utilizado o bagaço como combustível, na combustão direta em caldeiras para geração de vapor e na geração de eletricidade, processo conhecido como cogeração.

Cerca de 70% da energia elétrica obtida pela queima do bagaço, é utilizada para atender as demandas energéticas das usinas sucroenergéticas na produção de açúcar e etanol, que as tornam, em sua maioria, autossuficientes em energia elétrica. Os outros 30% excedentes podem ser vendidos às distribuidoras de energia, complementando a energia proveniente das hidrelétricas, já que as usinas utilizam o bagaço somente nos meses de processamento da safra, período de menor oferta de energia hidrelétrica. Nos demais meses, a maior parte das usinas ou utiliza estoques próprios ou compra energia elétrica da rede.

Atualmente, segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2018), a potência instalada de biomassa em operação no País representa 9% da matriz elétrica brasileira, sendo que, dos 550 empreendimentos termelétricos que utilizam a biomassa como combustível no Brasil, 402 termelétricas utilizam o bagaço como biocombustível, com uma potência de aproximadamente 11 GW, representando aproximadamente, 75% da biomassa utilizada na geração de bioeletricidade e 6,72% da matriz energética brasileira (Tabela 2). O teor energético para cada tonelada de bagaço, com 50% de umidade, é de aproximadamente, 1,5 barril de petróleo ou 2,48 MWh (TOLMASQUIM, 2016).

Além disso, o bagaço pode ser utilizado na produção de ração animal, adubo e como matéria-prima na produção de etanol de 2ª geração, e com a celulose obtida do bagaço, é possível obter fibras têxteis, utilizadas na fabricação de tecidos (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2017)

Com a mecanização da colheita de cana-de-açúcar, as palhas e as pontas, que normalmente são queimadas durante a colheita, para facilitar o manuseio, também poderão ser utilizadas, juntamente com o bagaço, como combustível no processo de cogeração e uma porcentagem poderá ser deixada sobre o solo nas plantações, contribuindo para o aumento da fertilidade do solo e protegendo-o contra erosões (BRASIL, 2017a). Segundo (TOLMASQUIM, 2016), 155 Kg de palha e pontas, com 15% de umidade, são produzidos a cada tonelada de cana-de-açúcar, e para cada tonelada de palha e pontas, o teor calorífico seria 70% maior ao do bagaço. Com o emprego dos resíduos na geração de energia, as usinas minimizam as emissões de gases poluentes na atmosfera, uma vez que não haverá mais queima da colheita, e devido a redução do uso de combustíveis fósseis na geração de energia. Além de reduzir os custos com a compra de energia elétrica.

Uma das tecnologias que vem sendo desenvolvidas para aprimorar a eficiência da conversão dos resíduos da cana-de-açúcar em energia, é a pirólise assistida por micro-ondas. Por ser uma tecnologia promissora na produção de produtos de melhor qualidade e maior rendimento, quando comparado ao aquecimento convencional, devido ao seu aquecimento volumétrico, uniforme e seletivo.

Lin e Chen (2015), examinaram experimentalmente o comportamento do bagaço de cana-de-açúcar durante a pirólise assistida por micro-ondas e a pirólise convencional. Com base nos resultados, o rendimento dos produtos e a qualidade dependeram das propriedades da biomassa, dos parâmetros operacionais e do tipo de pirólise, como pirólise por micro-ondas ou pirólise convencional, lenta, rápida e ultrarrápida. No aquecimento convencional, por exemplo, o rendimento do bio-óleo representou 51-54% em peso, principal produto a ser gerado. Com o aumento da temperatura o rendimento dos produtos sólidos e líquidos diminuíram, enquanto o rendimento do gás aumentou. Já no aquecimento por micro-ondas o carvão vegetal é o principal produto, e seu rendimento é entorno de 61-84% em peso, sendo necessário mais energia para produzir produtos líquidos e gasosos.

Supramono, Fachrizal e Devina (2015), estudaram a produção de bio-óleo a partir do bagaço de cana-de-açúcar, utilizando a técnica de pirólise de micro-ondas. Segundo os autores, ao elevar a potência de entrada do forno de micro-ondas, a taxa de aquecimento e a temperatura média do processo de pirólise também aumentam. No entanto, o aquecimento da amostra está diretamente relacionado ao tipo de biomassa, devido as suas propriedades térmicas e dielétricas, mesmo que o processo seja realizado com a mesma potência. Assim, a qualidade e o rendimento do bio-óleo dependem das características da biomassa e dos parâmetros operacionais do processo de aquecimento por micro-ondas. Também estudaram o efeito da adição de carvão como absorvedor de micro-ondas. A presença de carvão durante o aquecimento proporcionou um aumento significativo na taxa de aquecimento e na temperatura, principalmente quando a potência do micro-ondas é baixa. Além de contribuir para um maior rendimento de bio-óleo. Por exemplo, para uma potência de 380 W e 20% de carvão, a produção de bio-óleo foi de 42,75%, enquanto que para uma potência de 850 W a produção foi de 42,40%.

O processo de pirólise assistida por micro-ondas das biomassas de bagaço e casca de cana-de-açúcar, palha e casca de arroz, farinha de milho, café e bambu, foram estudadas por Huang, Chiueh, Kuan e Lo (2016). Eles também investigaram a influência da potência de micro-ondas na taxa de aquecimento, na temperatura e no teor de biocombustível, encontrando resultado semelhante ao da pesquisa anterior, com o aumento da potência, a taxa de aquecimento, a temperatura e o teor de biocombustível também aumentaram. Também

mostraram que o desempenho no aquecimento por pirólise está diretamente relacionado ao tipo de biomassa. Ao comparar a pirólise convencional com a pirólise de micro-ondas, a taxa de aquecimento foi 42% maior no aquecimento por micro-ondas, levando menos tempo para atingir a temperatura desejada do que o aquecimento convencional, conseqüentemente, menos consumo de energia.

### **2.3. Casca da laranja**

O Brasil é o maior produtor mundial de laranja, com safra 2017/2018 estimada em 17,3 milhões de toneladas, aproximadamente 35% da produção mundial. A maior parte da produção brasileira de laranja destina-se à indústria do suco, sendo responsável por 64,47% de todo o suco de laranja consumido no mundo (USDA, 2018a). Segundo a Pesquisa de Estimativa de Safra (PES, 2018), o cinturão citrícola de São Paulo e Minas Gerais, é a região de maior produção de laranja no país, com estimativa para a safra 2017/18 de 397,27 milhões de caixas, de 40,2 Kg cada.

Um dos principais problemas encontrados pelas indústrias processadoras de suco de laranja é a produção de resíduos e o seu descarte. Segundo Dugo e Giacomo (2002), os resíduos sólidos, tais como sementes, cascas e bagaço, representam cerca de 40 a 60% do peso da laranja e são considerados altamente poluidores, quando descartados indevidamente, devido a decomposição e fermentação dos resíduos. Os resíduos líquidos, conhecidos como “água amarela”, são ricos em matéria orgânica, ácidos orgânicos, proteínas, pectinas e óleos essenciais, que também são poluentes quando liberados na natureza. Assim, o aproveitamento desses resíduos é de extrema importância, promovendo economia de recursos naturais e redução do volume de material descartado (ZANELLA, 2013), minimizando os impactos ambientais.

Vários subprodutos, de grande valor comercial, podem ser obtidos com os resíduos do processamento do suco de laranja, por exemplo, os resíduos sólidos podem ser utilizados na produção de ração animal, óleos essenciais (utilizados em indústrias de bebidas e alimentos), fertilizantes, como material absorvente (na substituição do carvão ativado), flavonoides, d-limoneno (utilizado como matéria prima na fabricação de adesivos e resinas), farelo de polpa cítrica (formado dos resíduos úmidos da laranja e utilizado como alimentação fibrosa para o gado) e na extração de pectina (ZANELLA, 2013; BENEVIDES, 2015).

As pectinas consistem em complexos de polissacarídeos estruturais e são encontradas nas paredes celulares de plantas angiospermas e gimnospermas. São amplamente utilizadas na

indústria de alimentos, essencialmente na forma de pó, como agente gelificante na elaboração de geleias, compotas, doces e sucos de frutas, produtos de confeitaria, substituto de gordura na produção de patê, manteiga e margarina e na preparação de molhos para saladas, além de serem utilizadas como agentes espessantes, flocculantes, emulsificantes, texturizantes e estabilizantes nos alimentos. Também é utilizada nas indústrias farmacêuticas e químicas, onde atua como um tipo de fibra alimentar, auxiliando na redução dos níveis de colesterol LDL no sangue (PECTINAS, 2014).

Mesmo a pectina sendo encontrada na maioria dos tecidos vegetais, como um agente “cimentante”, a quantidade de frutas que podem ser usadas para a extração comercial de pectina é muito limitada, isso porque as pectinas são divididas em função do grau de esterificação ou metoxilação, fatores diretamente relacionados à capacidade de gelificação e solubilidade da pectina. As principais fontes para a extração de pectina são a casca da laranja e o bagaço da maçã, por apresentarem alto teor de metoxilação (ZANELLA, 2013) (Tabela 3).

Tabela 3 - Teor de pectina de algumas frutas

<b>Fruta</b>	<b>Pectina (%)</b>
Maçã	0,5 – 1,6
Bagaço de maçã	1,5 – 2,5
Polpa de beterraba	1,0
Polpa de cítricos	2,5 – 4,0
Cascas de laranjas	3,5 – 5,5
Cenouras	0,2 – 0,5
Mamão papaia	0,7 – 1,0

Fonte: Modificado de (PECTINAS, 2014).

O processo de extração da pectina, que ocorre por meio de solventes aquecidos, deve ser realizado logo após a extração do suco, devido à rápida deterioração dos resíduos. No entanto, como não há matéria-prima disponível o ano todo, a secagem dos resíduos é uma alternativa para a conservação e armazenagem dos resíduos. Todavia, o processo de secagem pode interferir na qualidade final do produto, já que a temperatura interfere na funcionalidade da pectina (devido a sua natureza termolábil). Apesar disso, se a secagem for realizada em condições adequadas e controladas, sem destruir as características do material, é possível produzir pectinas de alta qualidade (THAKUR *et al.*, 1997).

O método de extração de pectina por solventes aquecidos, normalmente com solventes ácidos, pode levar a corrosão e desgastes dos equipamentos, bem como danos ao meio ambiente, além disso, o processo de extração leva um período relativamente longo de aquecimento, podendo ocasionar degradação térmica, modificação nas propriedades físico-químicas e funcionais da pectina, reduzindo seu rendimento e qualidade e alto consumo de energia (YU; SUN, 2012). Portanto, é necessário explorar novos métodos de extração, para maximizar a qualidade do produto e o rendimento e reduzir o tempo gasto na extração.

A extração assistida por micro-ondas é uma alternativa aos métodos de extração convencional. Dentre as vantagens desse método, as que se destacam são, menor tempo de processamento, menor consumo de solventes, equipamento mais barato, maior taxa de extração de pectina e produtos com menor custo de produção e de melhor qualidade (HOSSEINI; KHODAIYAN; YARMAND, 2016).

Yu e Sun (2012), estudaram a influência da extração de pectina, da casca da laranja, assistida por micro-ondas com a adição de enzimas complexas para extrair a pectina. Com a união dos dois métodos foi possível evitar danos causados pela alta temperatura, além de melhorar a pureza e o rendimento da pectina (22,12%), que foi 8,71% maior do que o método convencional, com solventes aquecidos. O rendimento de pectina aumentou à medida que a potência do forno micro-ondas aumentou e em relação a temperatura, o rendimento aumentou rapidamente até a amostra atingir 50 °C, depois começou a diminuir. Como também foi relatado por (PRAKASH MARAN *et al.*, 2013). A radiação de micro-ondas expande e rompe a matriz da parede celular, liberando o material intracelular, proporcionando uma maior interação entre o agente de extração e o material utilizado no processo de extração. Já, segundo (BOUKROUFA *et al.*, 2015), para uma potência de 500 W, foi obtido um rendimento máximo de 24,2% em apenas 3 min de extração, enquanto que em 2 horas de aquecimento o rendimento foi menor (18,32%), quando comparado a extração convencional de pectina da casca de laranja.

Assim, para que a extração de pectina assistida por micro-ondas seja eficiente, proporcionando melhorias no rendimento e na qualidade da extração, é necessário um estudo detalhado sobre as condições de operação do forno de micro-ondas, como potência, tempo de exposição à radiação e temperatura, além das características da própria biomassa e do solvente, como teor de umidade, propriedades dielétricas e tamanho da amostra.

## **2.4. Óleo de Palma**

A palma de óleo, popularmente conhecida como dendezeiro, é uma espécie de palmeira de origem africana (Golfo da Guiné), introduzida no Brasil pelos escravos no século XVII, especificadamente na Bahia, e depois se expandiu para a região Norte do Brasil. Cultivada em regiões de clima quente e úmido, a palma de óleo encontrou na região amazônica um clima favorável ao seu cultivo. Podendo chegar a mais de 15 m de altura e vida útil de 25 a 30 anos (NAZARENO; VIEIRA; OLIVEIRA, 2015). A partir dos frutos da palmeira é possível extrair dois tipos de óleo, o óleo de palma que é proveniente da polpa e o óleo de palmiste, derivado da amêndoa da palma (Figura 3), ambos com características diferentes. Para cada 100 toneladas de cachos de palma de óleo processados, são extraídos 22 toneladas de óleo de palma e 2 toneladas de óleo de palmiste (KALTNER *et al.*, 2004).



Figura 3 - Fruto da palma de óleo. Fonte: Modificado de (DOSSIÊ, 2014).

Aproximadamente 80% da produção de óleo de palma é utilizado na indústria alimentícia, incluindo sorvetes, chocolates, margarina, biscoitos, cremes, recheios e em confeitarias. Não apresenta gorduras Trans, contém conservantes naturais e não interfere no sabor dos alimentos. Também é muito indicado como óleo de cozinha, já que, não muda suas propriedades em altas temperaturas. Além disso, o óleo de palma é utilizado na indústria química e no setor de cosméticos, para a fabricação de produtos de limpeza, higiene e fármacos (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE ÓLEO DE PALMA, 2015b). O óleo de palma é utilizado em 50% dos produtos industrializados, vendidos em supermercados europeus (SUSTAINABILITY POLICY TRANSPARENCY TOOLKIT, 2016). Já o óleo de

palmiste, bastante semelhante ao óleo de coco, é de grande interesse para a indústria de cosméticos, como matéria prima para sabonetes e na substituição da manteiga de cacau, por possuir em sua composição quantidades significativas de antioxidantes (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE ÓLEO DE PALMA, 2015b).

A produção mundial de óleo de palma, estimada para a safra 2017/2018, é de 69,77 milhões de toneladas, 35,4% da produção mundial de óleo vegetal, enquanto a produção de óleo de soja, segundo óleo mais produzido no mundo, representou 28,4% da produção. Já o óleo de palmiste representa 4,12% da produção de óleo vegetal, sendo o 5º óleo mais produzido, com estimativa de produção de 8,12 milhões de toneladas para esse mesmo período (USDA, 2018b).

Os maiores produtores de óleo de palma são a Malásia e a Indonésia, que juntas são responsáveis por 84,56% da produção mundial. Enquanto o Brasil contribui com apenas 0,59% da produção mundial, ficando na 12ª posição, com produção de 410 mil toneladas de óleo de palma em 2017 (USDA, 2018b), mas é o país que apresenta maior área disponível e propícia para o cultivo dessa oleaginosa. O estado do Pará é o maior produtor de óleo de palma do país.

Uma das alternativas para a diversificação da matriz energética e a redução do uso de combustíveis fósseis é a utilização da biomassa para a produção de biodiesel. O biodiesel pode ser produzido a partir de gorduras de animais, óleos reciclados e óleos vegetais extraídos de plantas oleaginosas, como a soja, mamona, milho, colza, girassol e a palma de óleo. O biodiesel é um combustível biodegradável, renovável, com baixa emissão de gases poluentes e não tóxico, quando comparado ao diesel (SUMATHI *et al.*, 2008). Recentemente, início de março de 2018, o governo federal elevou para 10% o percentual de biodiesel ao óleo diesel vendido ao consumidor. A expectativa de consumo em 2018 é de 5,3 bilhões de litros de biodiesel, aumento de 1 bilhão de litros, em relação ao ano passado (BRASIL, 2018).

No Brasil, a oleaginosa mais utilizada na produção de biodiesel é o óleo de soja, representando 69,3% da produção em 2016, enquanto o óleo de palma representou neste mesmo período, apenas 0,55% (AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS, 2017). No entanto, a palma de óleo é a oleaginosa com maior produção de óleo por unidade de área cultivada, com produtividade média de 4 toneladas de óleo por hectare/ano, 10 vezes mais óleo do que a soja (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE ÓLEO DE PALMA, 2015a), produzindo cerca de 30,57% de óleo em apenas 7,52% da área destinada a plantação, enquanto que a soja em 63,48% da área destinada ao cultivo produz 35,85% de óleo (ÓLEO, 2010). Outras vantagens é que a palma de óleo é uma cultura perene, ou seja, produz o ano inteiro, não necessita de terrenos planos, apresenta baixo custo de produção e o óleo produzido apresenta propriedades físico-químicas semelhantes

ao óleo diesel convencional. Ressaltando que o óleo de palma é uma opção promissora na produção de biodiesel.

Além dos óleos de palma e palmiste, os resíduos produzidos a partir do processamento da palma de óleo, como os cachos vazios, as fibras prensadas, torta de palmiste, efluentes líquidos e a casca da palma, podem ser utilizados como fertilizantes orgânicos nas plantações de palmeira, reduzindo a produção de fertilizantes sintéticos. A torta de palmiste, produto resultante do processo de extração do óleo de palmiste, pode ser utilizado como ração animal e adubo orgânico. Os efluentes líquidos, representam quase 50% dos resíduos do processo de extração de óleo, e por serem ricos em matéria orgânica, podem ser destinados a lagoas anaeróbicas ou aos solos como adubação, após tratamento adequado. As fibras prensadas e os cachos vazios, que representam juntos mais de 30% dos resíduos (KALTNER *et al.*, 2004), têm sido amplamente utilizados pelos moinhos de óleo de palma como combustível para gerar vapor, que é utilizado em turbinas para gerar energia, os cachos vazios ainda podem ser usados na produção de biogás (TELES, 2014). A energia gerada por esses subprodutos é suficiente para tornar o moinho autossuficiente em energia. Como esses resíduos são queimados em caldeiras, essa prática acaba gerando problemas ambientais, como “fumaça branca”, formada por vapor d’água e cinzas, e devido a combustão incompleta desses subprodutos, a queima acaba liberando para o meio ambiente fuligem e cinzas, que são prejudiciais à saúde e a natureza (YUSOFF, 2006).

Como meio para mitigar os efeitos da poluição no meio ambiente causado pela queima desses resíduos e obter produtos de valor agregado, o processo de pirólise assistida por micro-ondas é uma técnica alternativa e eficiente no tratamento dos resíduos da palma de óleo. Vários estudos foram realizados sobre o processo de pirólise assistida por micro-ondas como fonte alternativa de aquecimento e geração de biocombustível a partir das cascas de frutas vazias e fibras da palma de óleo.

Omar *et al.* (2011), mostraram que a pirólise assistida por micro-ondas pode ser utilizada para tratar os resíduos de palma de óleo, obtendo produtos de valor agregado em uma abordagem sustentável, com redução no consumo de energia, tempo, moagem e custo, já que, normalmente esses resíduos são utilizados em usinas de óleo de palma como combustível para gerar vapor e energia de uma forma ineficiente, além de liberarem gases poluentes na atmosfera. Segundo eles, o teor de umidade, o tamanho da partícula, frequência, as propriedades térmicas e dielétricas influenciam na conversão dos resíduos da palma de óleo em combustível, já que são critérios importantes no aquecimento por micro-ondas. Além de que, o baixo valor das

propriedades dielétricas dos resíduos pode exigir a adição de absorvedores de micro-ondas para elevar a temperatura durante a queima.

Salema e Ani (2011), estudaram a pirólise induzida por micro-ondas das cascas e fibras da palma de óleo com o auxílio de absorvedores de micro-ondas. Nesse estudo verificou-se que o rápido aquecimento da biomassa, proporcionado pela pirólise de micro-ondas, reduz as indesejadas reações secundárias, que ocorrem durante o método convencional, e são responsáveis pela baixa qualidade dos produtos da pirólise. Os absorvedores de micro-ondas foram essenciais para elevar a temperatura em um curto período de tempo, reduzir a necessidade de fornos de micro-ondas de alta potência. Além de que, o rendimento dos produtos, como carvão, bio-óleo e gás, está diretamente relacionado com a quantidade de biomassa em relação a quantidade de absorvedores de micro-ondas. Além disso, o aquecimento por micro-ondas reduziu o consumo de energia, o tempo e o custo na produção do bio-óleo e na moagem e secagem da biomassa, já que partículas maiores podem ser utilizadas durante o aquecimento.

Salema e Afzal (2015), estudaram a pirólise de biomassa dos cachos vazios da palma de óleo. Segundo os autores, a distribuição desigual do campo elétrico, a potência do forno, a altura da biomassa, a variação das propriedades dielétricas, físicas e térmicas da biomassa com o tempo, a temperatura e a frequência durante o aquecimento podem contribuir para uma absorção irregular de energia de micro-ondas, formando pontos quentes na amostra, conseqüentemente, ocasionando um aquecimento não uniforme, gerando produtos de baixa qualidade. E relataram a importância da simulação numérica no processo de aquecimento da biomassa, já que com o modelo matemático é possível estimar o perfil térmico e eletromagnético dentro do material, além das principais características que podem influenciar no processo de aquecimento.

A fim de obter um estudo detalhado do aquecimento por micro-ondas para as biomassas em análise e visando adquirir condições operacionais adequadas e resultados satisfatórios ao longo do aquecimento, no próximo capítulo será apresentado o modelo matemático desenvolvido para descrever a interação do campo elétrico com a biomassa e todos os parâmetros que afetam o processo de aquecimento por micro-ondas.

### 3. Aquecimento por Micro-ondas

As micro-ondas são radiações eletromagnéticas com comprimentos de onda entre 0,01 m a 1 m e com frequências entre 300 MHz e 300 GHz (ver Figura 4). Devido à possibilidade de interferência das micro-ondas com os sistemas de comunicações, as frequências utilizadas para fins industriais, científicos e médicos são de 915 MHz e 2,45 GHz.

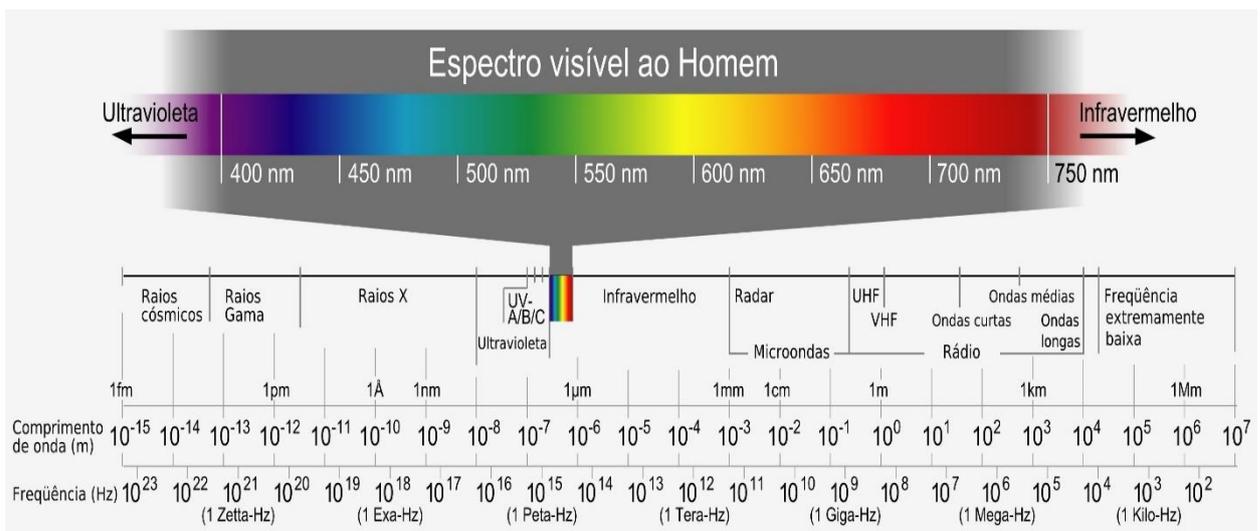


Figura 4 – Espectro eletromagnético (LIMA, 2016).

As ondas eletromagnéticas podem ser descritas pela sua frequência ( $f$ ), ou seu comprimento de onda ( $\lambda$ ), sendo relacionadas pela Equação (1):

$$c = \lambda \cdot f, \quad (1)$$

onde  $c$  é a velocidade da luz no vácuo.

As micro-ondas, em geral, são geradas por um dispositivo conhecido como magnetron. O magnetron consiste em um tubo de vácuo com um catodo no centro e um anodo circular oco ao seu redor (Figura 5). O catodo é um filamento emissor de elétrons, aquecido diretamente, com potencial negativo em relação ao anodo. O anodo é constituído por pequenas cavidades projetadas para oscilarem a uma frequência específica. À medida que o catodo é aquecido, os elétrons são emitidos e acelerados rapidamente em direção ao anodo. Mas, devido a uma tensão aplicada entre os eletrodos e um campo magnético aplicado paralelamente ao eixo, os elétrons

são desviados, descrevendo uma trajetória circular antes de alcançarem o anodo (SCHUBERT; REGIER, 2005; VOLLMER, 2004).

As cavidades ressonantes do anodo interagem com a nuvem de elétrons que foi criada ao redor do catodo, acelerando e desacelerando os elétrons. Essa interação produz oscilações, na faixa de frequência das micro-ondas, na nuvem de elétrons, que por sua vez, leva a oscilações autossustentadas nas cavidades ressonantes (SCHUBERT; REGIER, 2005; VOLLMER, 2004). Se as cavidades ressonantes do magnetron, forem ampliadas, a frequência emitida pelo magnetron será menor, já que a frequência de ressonância das cavidades diminuirá. (BLOOMFIELD, 1992).

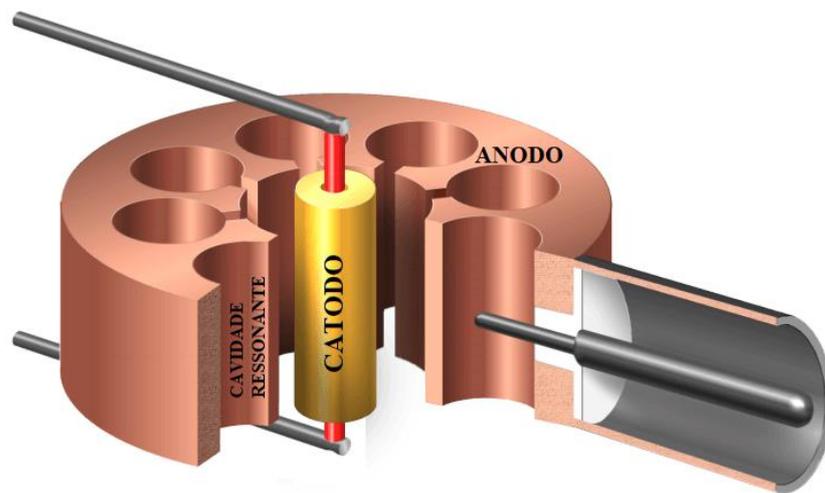


Figura 5 - Diagrama esquemático do magnetron. Fonte: modificado de (WOLFF, 2018).

O primeiro magnetron foi desenvolvido por Randall e Booth na Universidade de Birmingham, na Segunda Guerra Mundial, como parte da construção do primeiro RADAR de micro-ondas, com o objetivo da navegação aérea e da localização de aeronaves. E foi nesse mesmo período que alguns pesquisadores perceberam que as micro-ondas poderiam aquecer a água quando colocada próxima à fonte de emissão de micro-ondas. Os atuais fornos de micro-ondas surgiram na década de 1950 nos Estados Unidos e se popularizaram durante os anos de 1970 e 1980 (MINGOS; BAGHURST, 1991).

O aquecimento por micro-ondas no processamento (descongelamento, aquecimento e secagem) dos alimentos é determinado pelas propriedades dielétricas do material e pela transferência de calor durante a interação da radiação com o alimento. Essa interação das micro-ondas com os alimentos é baseada em dois mecanismos: condução iônica e rotação dipolar das

moléculas de água. Na condução iônica, o campo elétrico acelera os íons carregados positivamente na direção do campo elétrico e os íons de carga oposta na outra direção. À medida que o campo elétrico oscila, dependendo da frequência, os íons tentam se realinhar com o campo alternado, sendo que essa agitação ocasiona um aumento de temperatura no meio. O calor gerado durante esse realinhamento é transferido para as partículas vizinhas quando elas interagem umas com as outras devido a agitação (Figura 6a). Na rotação dipolar, moléculas como a água, que tem momento de dipolo permanente (intrínseco), na presença de um campo elétrico alternado, tentam se orientar na direção do campo. Durante essa orientação, as cargas negativas e positivas migram para diferentes extremidades das moléculas. Devido à agitação, as moléculas acabam colidindo e o atrito gerado converte a energia eletromagnética em calor (Figura 6b) (SAHIN; SUMNU, 2006).

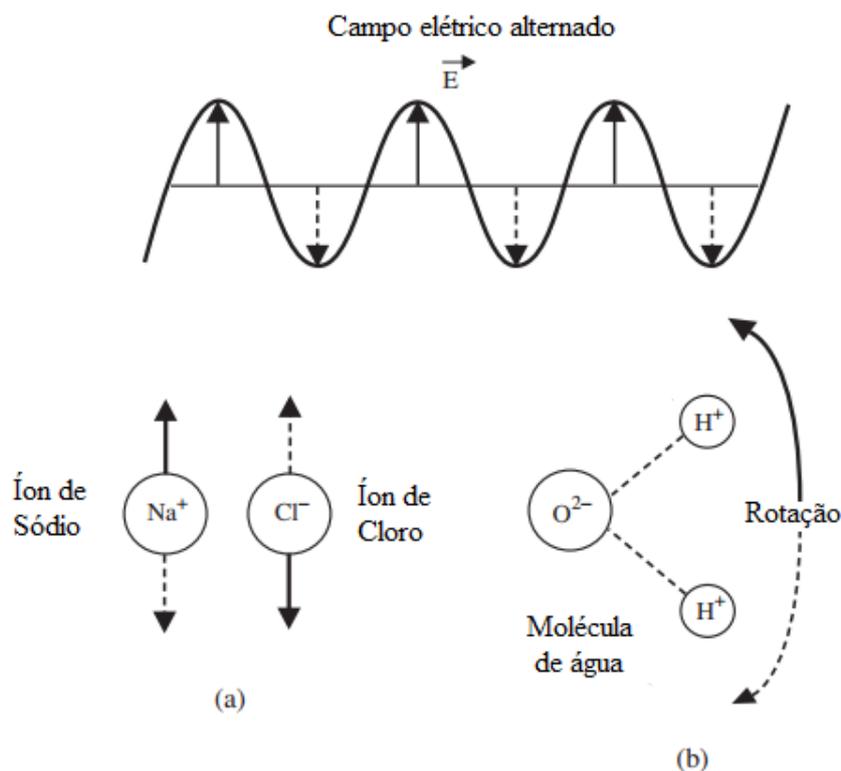


Figura 6 – Interação das micro-ondas com os alimentos. (a) iônica. (b) dipolar. Fonte: traduzido de (SAHIN; SUMNU, 2006).

### 3.1. Equações Eletromagnéticas

O aquecimento por micro-ondas envolve a conversão de energia eletromagnética em calor. A propagação das ondas eletromagnéticas em qualquer meio é descrita pelas equações de Maxwell (Equações 2-5):

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D}(\vec{r}, t) = \rho(\vec{r}, t), \quad (2)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B}(\vec{r}, t) = 0, \quad (3)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E}(\vec{r}, t) = -\frac{\partial}{\partial t} \vec{B}(\vec{r}, t), \quad (4)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H}(\vec{r}, t) = \vec{J}(\vec{r}, t) + \frac{\partial}{\partial t} \vec{D}(\vec{r}, t), \quad (5)$$

onde,

$\vec{E}$  = Intensidade do campo elétrico

$\vec{B}$  = Densidade de fluxo magnético

$\vec{H}$  = Intensidade do campo magnético

$\vec{D}$  = Densidade de fluxo elétrico

$\vec{J}$  = Densidade de corrente elétrica livre

$\rho$  = Densidade de carga elétrica

A interação do eletromagnetismo com a matéria é expressa pelas equações materiais ou relações constitutivas, descritas por:

$$\vec{D} = \epsilon \cdot \vec{E}, \quad (6)$$

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H}, \quad (7)$$

$$\vec{J} = \sigma \cdot \vec{E}, \quad (8)$$

sendo  $\epsilon$  a permissividade elétrica,  $\mu$  a permeabilidade magnética e  $\sigma$  a condutividade elétrica do meio. Além disso (AWUAH; RAMASWAMY; TANG, 2015),

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r = \epsilon_0 (\epsilon_r' - i\epsilon_r'') = \epsilon' - i\epsilon'', \quad (9)$$

$$\mu = \mu_0 \mu_r = \mu' - i\mu'' \quad (10)$$

onde  $\epsilon_r$  e  $\mu_r$  são as permissividade e permeabilidade relativas,  $\epsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12} F/m$  é a permissividade elétrica no vácuo e  $\mu_0 = 1,257 \times 10^{-6} H/m$  é a permeabilidade magnética no vácuo. Por sua vez,  $\epsilon'$  é a parte real conhecida como constante dielétrica e reflete a capacidade do material de armazenar energia elétrica, enquanto  $\epsilon''$  é a parte imaginária conhecida como fator de perda e influencia na conversão de energia eletromagnética em calor (KORMIN; ABDURAHMAN; YUNUS; RIVAI, 2013).

A relação  $\epsilon''/\epsilon'$  é chamada de tangente de perda (Equação (11)):

$$\tan \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad (11)$$

termo usado para descrever a capacidade do material em absorver energia da radiação eletromagnética e transmiti-la sob a forma de calor.

Na ausência de cargas ( $\rho = 0$ ) e correntes ( $J = 0$ ), i.e., no vácuo, onde,  $\epsilon_r = 1$  e  $\mu_r = 1$ , as Equações (6) e (7) reduzem-se a:

$$\vec{D} = \epsilon_0 \cdot \vec{E}, \quad (12)$$

$$\vec{B} = \mu_0 \cdot \vec{H}. \quad (13)$$

Reescrevendo as equações de Maxwell:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = 0, \quad (14)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0, \quad (15)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial}{\partial t} \vec{B}, \quad (16)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} \vec{E}. \quad (17)$$

Utilizando as Equações (16) e (17) podemos encontrar a expressão para a propagação das ondas eletromagnéticas no meio livre e homogêneo. Tomando o rotacional da Equação (16),

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

e utilizando a Equação (17), temos que:

$$\vec{\nabla} \times (\vec{\nabla} \times \vec{E}) = - \frac{\partial}{\partial t} \left( \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} \vec{E} \right).$$

Com base na identidade vetorial:

$$\vec{\nabla} \times (\vec{\nabla} \times \vec{E}) = \vec{\nabla}(\vec{\nabla} \cdot \vec{E}) - \nabla^2 \vec{E} \quad (18)$$

e sabendo que  $\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = 0$ , obtemos que:

$$\nabla^2 \vec{E} - \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2} \vec{E} = 0. \quad (19)$$

Analogamente, tomando o rotacional da Equação (17),

$$\vec{\nabla} \times (\vec{\nabla} \times \vec{B}) = \vec{\nabla} \times \left( \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} \vec{E} \right) = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} (\vec{\nabla} \times \vec{E}).$$

Utilizando a identidade vetorial (Equação (18)) e a Equação (16), temos:

$$\nabla^2 \vec{B} - \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2} \vec{B} = 0. \quad (20)$$

Ao compararmos as equações de onda (Equações (19) e (20)) percebemos o termo  $\mu_0 \varepsilon_0$  em ambas as equações. Fazendo (SCHUBERT; REGIER, 2005):

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}} \quad (21)$$

onde  $c$  é a velocidade da luz no vácuo, percebemos que elas satisfazem à equação da onda

$$\nabla^2 u - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} u = 0, \quad (22)$$

i.e., o campo elétrico e o campo magnético, no vácuo, se propagam como ondas no espaço, satisfazendo a equação da onda com velocidade  $v = c$ .

A solução para a equação da onda plana (Equação (22)) é dada por (GRIFFITHS, 2011):

$$u = e^{ikx - i\omega t}, \quad (23)$$

onde  $k$  aponta para a direção de propagação e  $\omega=2\pi f$  é a frequência, ambos estão relacionados por:

$$k = \frac{\omega}{v}. \quad (24)$$

Considerando que a onda se propaga em apenas uma direção, a solução é:

$$u(x, t) = Ae^{ikx-i\omega t} + Be^{-ikx-i\omega t}.$$

Assim, podemos descrever as soluções para os campos elétrico (Equação (19)) e magnético (Equação (20)) ao longo da posição  $x$  (ao longo do percurso da onda) e do tempo  $t$  (SCHUBERT; REGIER, 2005):

$$\vec{E}_1 = \vec{E}_0 \cos(\vec{k}\vec{x} - \omega t) \quad \vec{B}_1 = \vec{B}_0 \cos(\vec{k}\vec{x} - \omega t) \quad (25)$$

$$\vec{E}_2 = \vec{E}_0 \sin(\vec{k}\vec{x} - \omega t) \quad \vec{B}_2 = \vec{B}_0 \sin(\vec{k}\vec{x} - \omega t) \quad (26)$$

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 \quad \vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 \quad (27)$$

onde  $\vec{E}_0$  e  $\vec{B}_0$  são as amplitudes dos campos.

Supondo um meio condutor, onde  $\rho = 0$ , e a densidade de corrente seja proporcional ao campo elétrico,  $\vec{j} = \sigma \cdot \vec{E}$ , substituindo na Equação (5), temos:

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \sigma \vec{E} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} \vec{E}. \quad (28)$$

A Equação (28) difere da sua correspondente para meios não condutores apenas pelo termo relacionado a densidade de corrente. De forma análoga ao método utilizado para descrever a equação da onda eletromagnética no vácuo, a propagação das ondas eletromagnéticas em um meio condutor é representada por:

$$\nabla^2 \vec{E} - \mu_0 \sigma \frac{\partial}{\partial t} \vec{E} - \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2} \vec{E} = 0, \quad (29)$$

$$\nabla^2 \vec{B} - \mu_0 \sigma \frac{\partial}{\partial t} \vec{B} - \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2} \vec{B} = 0. \quad (30)$$

Comparando as Equações (29) e (30) com as Equações (19) e (20) no vácuo, percebemos um termo adicional que possui uma derivada de primeira ordem no tempo, que é proporcional a condutividade  $\sigma$  e age como um termo de amortecimento para as ondas em um meio condutor.

A solução geral para as equações de onda (29) e (30) ainda pode ser representada pela solução das ondas planas (GRIFFITHS, 2011),

$$\vec{E} = \vec{E}_0 e^{i(\tilde{k}z - \omega t)}, \quad \vec{B} = \vec{B}_0 e^{i(\tilde{k}z - \omega t)}, \quad (31)$$

onde  $\tilde{k}$  é um número complexo e representado por (ERREDE, 2015):

$$\tilde{k}^2 = \mu\epsilon\omega^2 + i\mu\sigma\omega, \quad (32)$$

assim, desde que  $\tilde{k} = k + i\kappa$ , temos:

$$\tilde{k}^2 = (k + i\kappa)^2 = k^2 + 2ik\kappa - \kappa^2 = \mu\epsilon\omega^2 + i\mu\sigma\omega. \quad (33)$$

Reescrevendo a expressão (33) com base no parâmetro  $\tilde{k} = k + i\kappa$ , temos:

$$[(k^2 - \kappa^2) - \mu\epsilon\omega^2] + i[2k\kappa - \mu\sigma\omega] = 0. \quad (34)$$

Para essa relação ser verdadeira (Equação (34)) para qualquer valor dos parâmetros envolvidos as expressões  $[(k^2 - \kappa^2) - \mu\epsilon\omega^2] = 0$  e  $[2k\kappa - \mu\sigma\omega] = 0$  tem que ser obedecidas, então:

$$k^2 - \kappa^2 = \mu\epsilon\omega^2, \quad (35)$$

$$2k\kappa = \mu\sigma\omega. \quad (36)$$

Da relação (36), temos que:  $\kappa = \mu\sigma\omega/2k$ , substituindo na relação (35) e multiplicando por  $k^2$ , obtemos:

$$k^4 - (\mu\epsilon\omega^2)k^2 - \left(\frac{\mu\sigma\omega}{2}\right)^2 = 0. \quad (37)$$

Resolvendo essa equação e substituindo na expressão  $\kappa = \mu\sigma\omega/2k$ , obtemos a parte imaginária e a parte real, da equação  $\tilde{k} = k + i\kappa$ .

$$k = \omega\sqrt{\frac{\epsilon\mu}{2}} \left[ \sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\epsilon\omega}\right)^2} - 1 \right]^{1/2}, \quad (38)$$

$$\kappa = \omega \sqrt{\frac{\varepsilon\mu}{2}} \left[ \sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\varepsilon\omega}\right)^2} + 1 \right]^{1/2}. \quad (39)$$

As duas relações mostram a dependência da frequência de ambos os componentes, real e imaginário, do número de onda complexo, e que a propagação da onda eletromagnética em um condutor é dispersiva e dependente da frequência (ERREDE, 2015).

Considerando um dielétrico sem perdas ( $\varepsilon_r = \varepsilon'$  e  $\mu_r = \mu'$ ) e a condutividade dielétrica como  $\sigma = \omega\varepsilon''$  (que resume todos os efeitos dissipativos) (VON HIPPEL, 1954), podemos reescrever as Equações (38) e (39) como:

$$k = \omega \sqrt{\frac{\varepsilon_0 \varepsilon' \mu_0 \mu'}{2}} \left[ \sqrt{1 + \left(\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}\right)^2} - 1 \right]^{1/2}, \quad (40)$$

$$\kappa = \omega \sqrt{\frac{\varepsilon_0 \varepsilon' \mu_0 \mu'}{2}} \left[ \sqrt{1 + \left(\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}\right)^2} + 1 \right]^{1/2}, \quad (41)$$

onde a parte real  $k$  é a constante de atenuação e representa a redução da amplitude da onda e a parte imaginária  $\kappa$  é o fator de fase, constante que descreve a propagação da onda. A atenuação produzida por um dielétrico é expressa por  $1/k$ . Isso significa que a profundidade de penetração ( $D_p$ ) da onda eletromagnética é reduzida para  $1/e = 0,369$  da sua amplitude inicial, ou seja, que a potência aplicada, comparada com o seu valor na superfície, decai para 37% (MUJUMDAR, 2006). A profundidade de penetração é definida pela Equação (42):

$$D_p = \frac{1}{k} = \frac{1}{\omega \sqrt{\frac{\varepsilon_0 \varepsilon' \mu_0 \mu'}{2}} \left[ \sqrt{1 + \left(\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}\right)^2} - 1 \right]^{1/2}}. \quad (42)$$

Com base na Equação (42) é possível concluir que a profundidade de penetração é dependente da frequência e das propriedades dielétricas do material, sendo que, materiais com altos valores de  $\varepsilon''/\varepsilon'$  terão menor profundidade de penetração do que valores menores.

### 3.2. Equações de transferência de calor

Como visto anteriormente, a energia eletromagnética é convertida em calor durante a interação do campo elétrico com o material dielétrico. Como a maioria dos materiais aquecidos por micro-ondas não são homogêneos, a absorção de energia por parte dos alimentos acaba sendo afetada, podendo causar temperaturas mais elevadas em determinados pontos. A quantidade de energia convertida é governada pela quantidade de potência absorvida pelo material. Considerando o vetor de Poynting ( $\vec{S}$ ),

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H} \quad (43)$$

e utilizando a forma senoidal do campo elétrico e magnético, podemos utilizar a notação fasorial para a solução da equação de onda. Empregando-se o conceito de igualdade fasorial nas Equações (4) e (5) de Maxwell, temos:

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -j\omega\mu\vec{H}, \quad (44)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \sigma\vec{E} + j\omega\varepsilon\vec{E}. \quad (45)$$

Tomando o divergente do vetor de Poynting médio ( $\vec{S} = \frac{1}{2}(\vec{E} \times \vec{H})$ ) e empregando as Equações (44) e (45), obtemos a relação entre potência dissipada por unidade de volume ( $P_{ab}$ ) e o campo elétrico aplicado (SALEMA; AFZAL, 2015):

$$P_{ab} = \frac{1}{2} \omega \varepsilon_0 \varepsilon'' |\vec{E}|^2. \quad (46)$$

E a equação da energia, utilizando a lei de Fourier de condução de calor ( $Q = -KA dt/dx$ ), pode ser expressa da seguinte forma (SCHUBERT; REGIER, 2005):

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \nabla^2 T + \frac{Q}{\rho C_p}, \quad (47)$$

onde  $\alpha = k/(\rho C_p)$  é a difusividade térmica do material,  $k$  a condutividade térmica,  $\rho$  a densidade,  $C_p$  é a capacidade térmica do material,  $T$  é temperatura,  $t$  o tempo e  $Q$  corresponde o calor gerado por unidade de volume no material durante o aquecimento e é caracterizado pela seguinte equação:

$$Q = 2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon'' E^2 \quad (48)$$

Da Equação (48), percebemos que  $Q$  é diretamente proporcional à frequência, ao campo elétrico ao quadrado, ambos dependentes das características do equipamento, e ao fator de perda ( $\varepsilon''$ ). Isso significa que quanto maior for o  $\varepsilon''$ , maior será a absorção das micro-ondas pelo material. E pela Equação (47), vemos que a variação da temperatura também depende de outros fatores, como, calor específico, condutividade térmica e a densidade. Assim, as propriedades térmicas e dielétricas são fatores determinantes no aquecimento por micro-ondas.

### 3.3. Fatores que influenciam nas propriedades dielétricas

Conforme visto anteriormente, as propriedades dielétricas dos materiais são descritas pela permissividade elétrica, na seguinte relação:

$$\varepsilon = \varepsilon' - i\varepsilon''$$

onde  $\varepsilon'$  é a parte real conhecida como constante dielétrica e reflete a capacidade do material de armazenar energia elétrica, enquanto  $\varepsilon''$  é a parte imaginária conhecida como fator de perda e está diretamente ligada na conversão de energia eletromagnética em calor. A palavra “perda” é usada para indicar a quantidade de energia das micro-ondas que é dissipada para o aquecimento do material. Com base na relação  $\varepsilon''/\varepsilon'$ , é possível classificar os materiais em absorvedores de micro-ondas ou não. No que diz respeito aos materiais transparentes às micro-ondas, o fator de dissipação apresenta valores abaixo de 0,1 ( $\tan \delta < 0,1$ ), enquanto para bons absorvedores de micro-ondas, os valores são maiores ou iguais a 0,1 ( $\tan \delta \geq 0,1$ ). Logo, tanto  $\varepsilon''$  como  $\tan \delta$  determinam a quantidade de calor gerada quando o material é submetido a radiação eletromagnética (SCHUBERT; REGIER, 2005).

Existem vários fatores que podem influenciar nas propriedades dielétricas das biomassas, nas quais se destacam a frequência, a temperatura, a porcentagem de umidade, a quantidade de sal, a composição do alimento e o calor específico (SCHUBERT; REGIER, 2005).

#### 3.3.1. Frequência

Como visto anteriormente, na polarização dipolar, as moléculas de água, na presença de um campo elétrico alternado, tendem a se orientar na direção do campo. Na presença de campos elétricos de baixa frequência, os dipolos se alinham facilmente a cada inversão de direção do campo elétrico, pois o tempo gasto pelo campo elétrico para mudar de sentido é maior do que o tempo gasto pelos dipolos para se reorientarem com o campo elétrico. Nesse caso, a transferência de energia é baixa, fazendo com que não ocorra aumento de temperatura. Em frequências mais altas, o campo elétrico muda de direção mais rápido do que o tempo necessário para os dipolos se realinharem. Como não há rotação dipolar, as moléculas não absorvem energia (MINGOS; BAGHURST, 1991). Já no intervalo de frequência das micro-ondas, o tempo de resposta dos dipolos é semelhante ao tempo necessário para a inversão da direção do campo elétrico. A agitação ocasionada pelo alinhamento dos dipolos com o campo provoca um aumento de temperatura no meio.

A Figura 7 mostra a variação das propriedades dielétricas ( $\epsilon'$  e  $\epsilon''$ ) da água em função da frequência (VOLLMER, 2004). Para a temperatura de 20 °C o fator de perda ( $\epsilon''$ ) atinge seu nível máximo em, aproximadamente 20 GHz, região de maior taxa de aquecimento. No caso da constante dielétrica ( $\epsilon'$ ), o nível máximo é alcançado em baixas frequências.

Se um material for várias vezes maior do que a profundidade de penetração, o aquecimento será semelhante ao aquecimento convencional, isto é, a energia é absorvida somente pelo exterior da amostra, deixando o interior mais frio. Se a profundidade de penetração for maior do que o material, haverá um superaquecimento no interior da amostra, podendo levar à queima, enquanto a superfície permanece mais fria (MUJUMDAR, 2006). Portanto, para um aquecimento homogêneo, a profundidade de penetração deve ser da ordem de tamanho dos materiais.

A escolha da frequência adequada resulta em um aquecimento mais homogêneo. Por exemplo, na faixa de maior aquecimento, 20 GHz ( $\lambda = 1,5$  cm), a profundidade de penetração é pequena, provocando o aquecimento só das partes externas do alimento. Já as frequências menores, como 915 MHz e 2,45 GHz, possuem profundidade de penetração maior. No entanto, a frequência de 915 MHz ( $\lambda = 33$  cm) possui uma profundidade de penetração aproximadamente 2,5 vezes maior do que a frequência de 2,45 GHz ( $\lambda = 12,2$  cm) (SCHUBERT; REGIER, 2005). Como os alimentos que são aquecidos nos fornos de micro-ondas tem dimensões da ordem de poucos cm, a frequência de 2,45 GHz possibilita aquecer de forma mais homogênea esses materiais, enquanto a frequência de 915 MHz é mais indicada para materiais maiores.

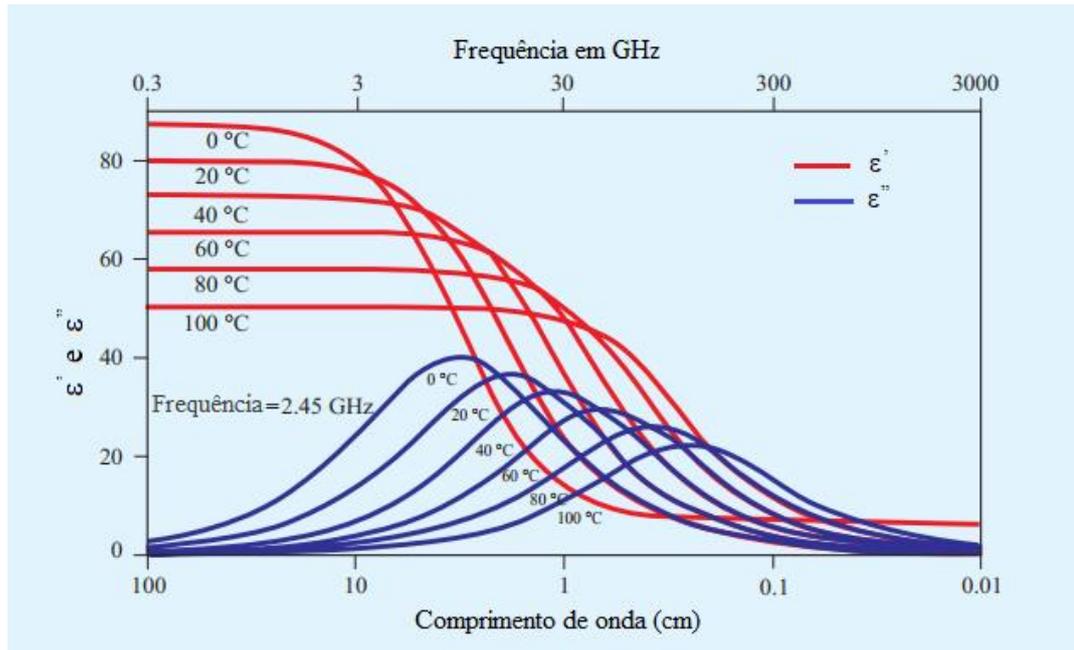


Figura 7 - Variação das propriedades dielétricas da água em função da frequência. Fonte: traduzido de (VOLLMER, 2004).

### 3.3.2. Umidade

Em materiais úmidos, com temperatura um pouco acima do congelamento, podemos encontrar moléculas de água com propriedades dielétricas semelhantes às da água no estado líquido e moléculas de água com propriedades dielétricas que se assemelham com as do gelo.

Com base na Figura 8, que mostra a variação de  $\epsilon'$  e  $\epsilon''$  em relação à porcentagem de umidade na amostra para o óleo de palma (OMAR *et al.*, 2011), percebemos que quanto maior o teor de umidade, maior é a constante dielétrica. Já o fator de perda aumentou até, aproximadamente 30%, do teor de umidade e depois permaneceu constante.

A umidade também está diretamente relacionada com a profundidade de penetração do material, como pode ser observado na Figura 8, para os níveis mais baixos de umidade, no qual as propriedades dielétricas são menores, a profundidade de penetração atingiu seu maior valor (3,5 cm), enquanto que para níveis maiores de umidade, onde  $\epsilon'$  e  $\epsilon''$  são mais elevados, a profundidade de penetração foi inferior a 1 cm.

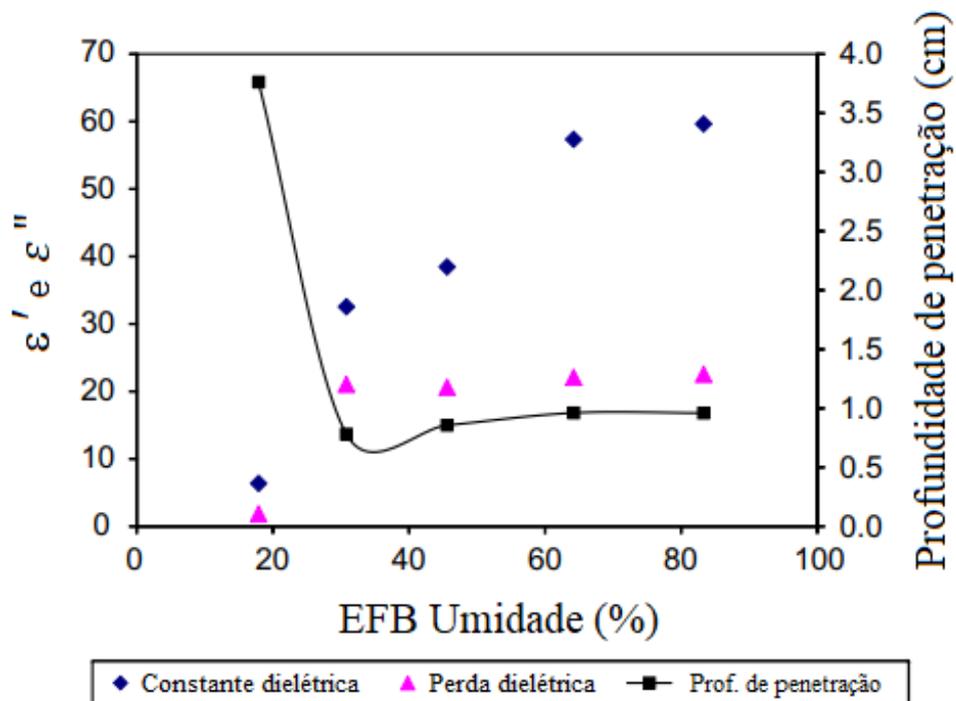


Figura 8 - Constante dielétrica, fator de perda e profundidade de penetração em função do teor de umidade em 2.45 GHz. Fonte: traduzido de (OMAR et al., 2011).

Durante o processo de secagem, as partes mais úmidas dos alimentos absorvem mais energia do que a parte seca, ocasionando um nivelamento na distribuição desigual de umidade. À medida que a umidade vai reduzindo, o fator de perda também diminui, ocasionando uma redução na capacidade do material de converter energia eletromagnética em calor. Se a umidade ficar abaixo do que é considerado como nível crítico, o fator de perda passa a não ter tanta influência no aquecimento. Nesse ponto, alguns materiais podem se tornar transparentes para as micro-ondas, outros, como a madeira, continuam aquecendo, levando à queima do material (MUJUMDAR, 2006; SCHUBERT; REGIER, 2005).

### 3.3.3. Temperatura

A Figura 9 mostra a influência da temperatura nas propriedades dielétricas ( $\epsilon'$  e  $\epsilon''$ ) para diferentes alimentos na frequência de 2800 MHz (BENGTSSON; OHLSSON, 1974).

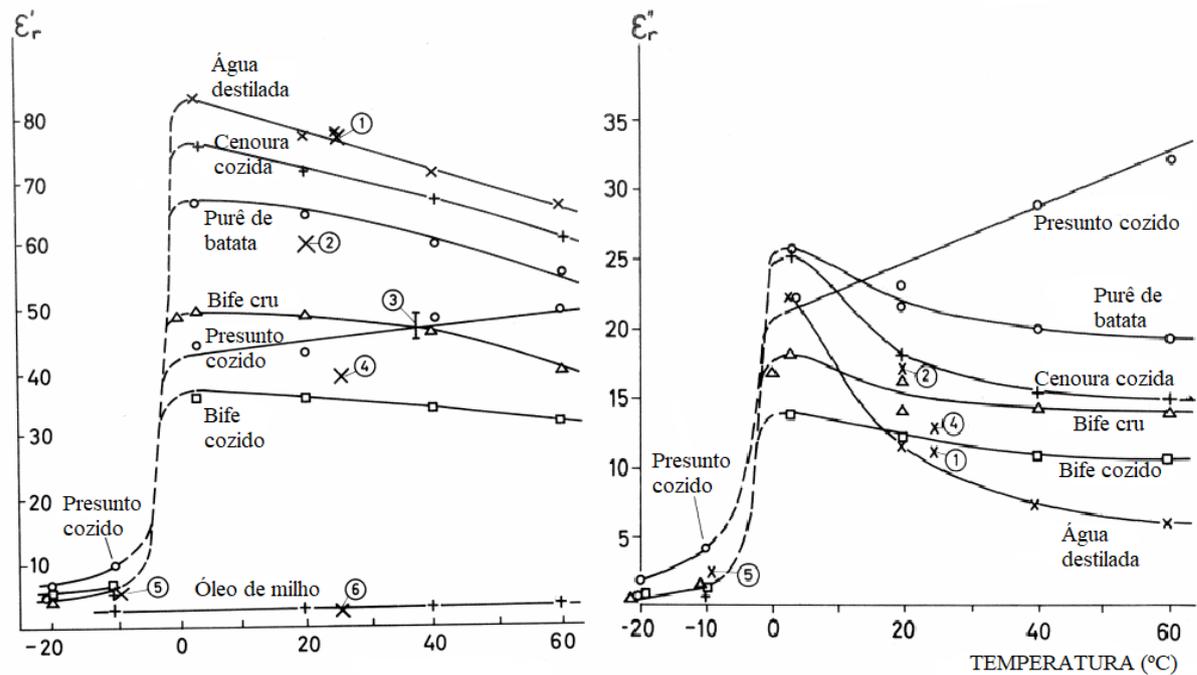


Figura 9 - Constante dielétrica e fator de perda para diferentes alimentos em função da temperatura. Fonte: traduzido de (BENGTSSON; OHLSSON, 1974).

Como pode ser observado na Figura 9, os alimentos congelados apresentam baixos valores de constante dielétrica e fator de perda, seus valores dependem, em média, da quantidade de água líquida presente na amostra. Nesses alimentos, os dipolos não têm a mesma facilidade de se alinharem com a direção do campo elétrico quanto a água no estado líquido. Como consequência, menos energia é absorvida, já que a profundidade de penetração é maior, ocasionando menos aquecimento.

Durante o processo de descongelamento, até 0 °C, observa-se um aumento acentuado de  $\epsilon'$  e  $\epsilon''$ . Ao descongelarmos um alimento, certas regiões podem acabar superaquecendo enquanto outras ainda estão congeladas, devido ao aquecimento desigual da amostra. O fator de perda da água líquida, consequência do processo de descongelamento, é mais elevado do que o fator de perda da parte congelada, o que resulta no aumento da absorção da energia eletromagnética nessa região, causando o aquecimento desigual (BENGTSSON; OHLSSON, 1974).

Se a temperatura continuar aumentando,  $\epsilon'$  e  $\epsilon''$ , diminuem gradualmente, devido a rotação dipolar da água. No entanto, as propriedades dielétricas dos alimentos com alto teor de sal, como o presunto cozido, aumentam com a temperatura. Essa variação contrária do fator de perda, para os alimentos salgados, ocorre devido à rotação dipolar e a condução iônica. O fator de perda na rotação dipolar diminui com o aumento da temperatura, em contraste com o fator

de perda da condução iônica, que aumenta. Esse aumento ocorre devido ao aumento de mobilidade dos íons e a redução da viscosidade do líquido (SAHIN; SUMNU, 2006).

## 4. Simulação numérica

A simulação numérica é uma ferramenta que possibilita resolver as equações de Maxwell com as equações de transferência de calor, descrevendo a interação da radiação eletromagnética com a biomassa durante o processo de aquecimento por micro-ondas. Com o modelo matemático é possível estimar o perfil térmico e eletromagnético dentro do material, além das principais características que podem influenciar no processo de aquecimento da biomassa, a saber, tempo de irradiação, frequência utilizada, tamanho da amostra, potência do equipamento, teor de umidade, as propriedades dielétricas e térmicas dos materiais, dentre outros parâmetros. Assim, a simulação pode fornecer as principais características em função das variáveis do processo de aquecimento por micro-ondas.

Rattanadecho (2006), utilizou um modelo tridimensional espacial com resolução de domínio de tempo empregando a técnica de diferenças finitas, na resolução das equações de Maxwell, para determinar os campos eletromagnéticos, a energia absorvida, obter os perfis de temperatura da madeira e ilustrar a influência dos tempos de irradiação, frequências de trabalho e tamanho da amostra na secagem da madeira em uma guia de onda. Os resultados da pesquisa mostraram que o modelo matemático pode ser usado com sucesso para descrever os fenômenos de aquecimento por micro-ondas sob várias condições, além de identificar os parâmetros fundamentais e fornecer orientação para a secagem de micro-ondas da madeira.

Salema e Afzal (2015), estudaram o comportamento do aquecimento por micro-ondas da biomassa de cachos vazios da palma de óleo (EFB) em forma de leito e “pellets” usando o software COMSOL Multiphysics, baseado em elementos finitos. Segundo os autores, o software utilizado tem a capacidade de estimar a distribuição da temperatura, a transferência de calor (formação de pontos quentes e frios na amostra), a intensidade do campo elétrico, a quantidade de potência absorvida pela biomassa durante o aquecimento e o efeito da altura da biomassa na distribuição da temperatura e do campo elétrico. Possibilitando projetar e otimizar aplicadores de micro-ondas para um aquecimento mais uniforme.

Dentre os métodos de resolução numérica das equações diferenciais parciais (EDPs), um dos métodos mais simples é o método das diferenças finitas, que consiste na discretização do domínio, que “[...] é a substituição das derivadas presentes na equação diferencial por aproximações envolvendo somente valores numéricos da função” (FRANCO, 2006, p.432), ou seja, é reduzir uma EDP a um problema com um número finito de variáveis, substituindo as

derivadas por aproximações de diferenças. Essas aproximações são determinadas pela expansão da série de Taylor.

Para a discretização do domínio, é necessário definir uma malha, que é um conjunto finito de pontos pertencentes ao domínio, e representado pelos pontos  $(x_i, y_j)$  (BURDEN; FAIRES, 2011), onde:

$$\begin{aligned} x_i &= a + ih, \quad i = 0, 1, \dots, n, \\ y_j &= c + jk, \quad j = 0, 1, \dots, m, \end{aligned} \quad (49)$$

$m$  e  $n$  são números inteiros e,  $h$  representa o comprimento do passo no eixo  $x$ , dado por  $h = (b - a)/n$ , e  $k$ , representado por  $k = (d - c)/m$ , é o comprimento do passo para o tempo. Ou seja, o intervalo  $[a, b]$  é dividido em  $n$  partes iguais de largura  $h$  enquanto o intervalo  $[c, d]$  é dividido em  $m$  partes iguais de largura  $k$ , onde o espaçamento da malha é igual para cada intervalo (BURDEN; FAIRES, 2011). Um exemplo de uma malha é mostrado na Figura 10.

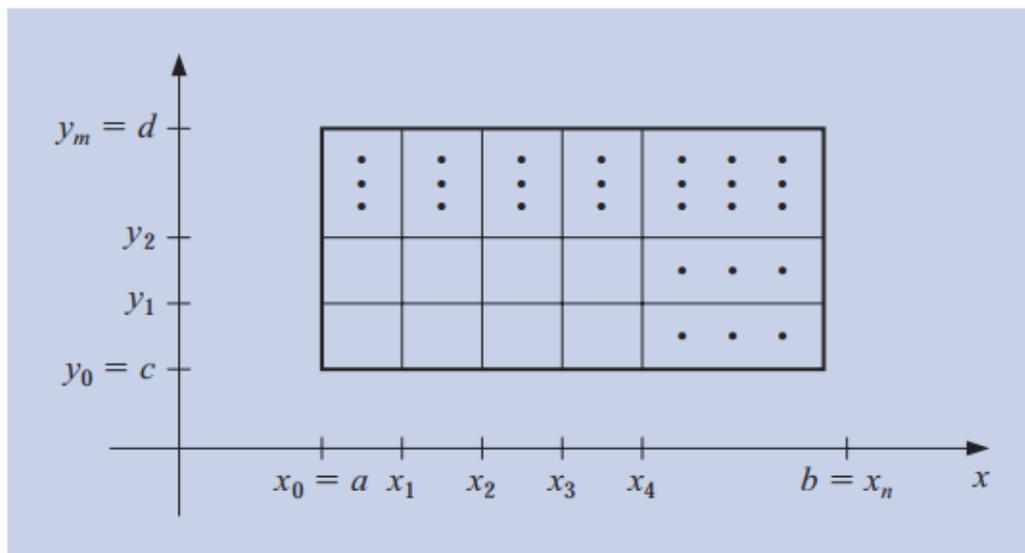


Figura 10 – Divisão da malha retangular (BURDEN; FAIRES, 2011).

Assim, dada uma função de  $f(x, y)$ , com derivadas contínuas, em torno do ponto  $(x_i, y_j)$ , a expansão da série de Taylor pode ser aplicada na variável  $x$  sobre  $x_i$ , sendo expressa por:

$$\begin{aligned} f(x_{i+1}, y_j) &= f(x_i + h, y_j) = \\ &f(x_i, y_j) + h \frac{\partial f}{\partial x}(x_i, y_j) + \frac{h^2}{2!} \frac{\partial^2 f}{\partial x^2}(x_i, y_j) + \dots + \frac{h^n}{n!} \frac{\partial^n f}{\partial x^n}(x_i, y_j). \end{aligned} \quad (50)$$

A Equação (50) pode ser aproximada para a derivada de primeira ordem (Equação (51)) e representa a forma progressiva da expansão da série de Taylor.

$$\frac{\partial f}{\partial x}(x_i, y_j) = \frac{f(x_i + h, y_j) - f(x_i, y_j)}{h}. \quad (51)$$

De modo semelhante, a forma regressiva da expansão da série de Taylor (Equação (52)) pode ser calculada tomando um ponto anterior a  $x$ , ou seja, utilizando  $-h$  na Equação (50),

$$\frac{\partial f}{\partial x}(x_i, y_j) = \frac{f(x_i, y_j) - f(x_i - h, y_j)}{h}. \quad (52)$$

Subtraindo as equações da expansão da série de Taylor em torno do ponto  $x_{i+1}$  e do ponto  $x_{i-1}$ , obtemos a expansão centrada da série de Taylor para as derivadas de primeira ordem (Equação (53)):

$$\begin{aligned} f(x_{i+1}, y_j) - f(x_{i-1}, y_j) &= f(x_i + h, y_j) - f(x_i - h, y_j) = 2h \frac{\partial f}{\partial x}(x_i, y_j), \\ \frac{\partial f}{\partial x}(x_i, y_j) &= \frac{f(x_i + h, y_j) - f(x_i - h, y_j)}{2h}. \end{aligned} \quad (53)$$

Uma aproximação das derivadas de segunda ordem pode ser obtida de forma semelhante. Escrevendo a expansão da série de Taylor em torno do ponto  $x_{i+1}$  e do ponto  $x_{i-1}$ , temos:

$$f(x_{i+1}, y_j) = f(x_i + h, y_j) = f(x_i, y_j) + h \frac{\partial f}{\partial x}(x_i, y_j) + \frac{h^2}{2!} \frac{\partial^2 f}{\partial x^2}(x_i, y_j), \quad (54)$$

$$f(x_{i-1}, y_j) = f(x_i - h, y_j) = f(x_i, y_j) - h \frac{\partial f}{\partial x}(x_i, y_j) + \frac{h^2}{2!} \frac{\partial^2 f}{\partial x^2}(x_i, y_j). \quad (55)$$

Somando as Equações (54) e (55), segue que:

$$\begin{aligned} f(x_{i+1}, y_j) + f(x_{i-1}, y_j) &= \\ f(x_i + h, y_j) + f(x_i - h, y_j) &= 2f(x_i, y_j) + h^2 \frac{\partial^2 f}{\partial x^2}(x_i, y_j), \end{aligned} \quad (56)$$

isolando o termo correspondente à derivada de segunda ordem na Equação (56), obtemos:

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x^2}(x_i, y_j) = \frac{f(x_i + h, y_j) - 2f(x_i, y_j) + f(x_i - h, y_j)}{h^2}. \quad (57)$$

A Equação (57) representa a expansão centrada da série de Taylor para a derivada de segunda ordem.

As expansões de série de Taylor mostradas acima, podem ser utilizadas em cada variável para gerar aproximações para as derivadas parciais de uma função de várias variáveis e descrever onde cada ponto  $(x_i, y_j)$  está localizado na malha (Figura 11).

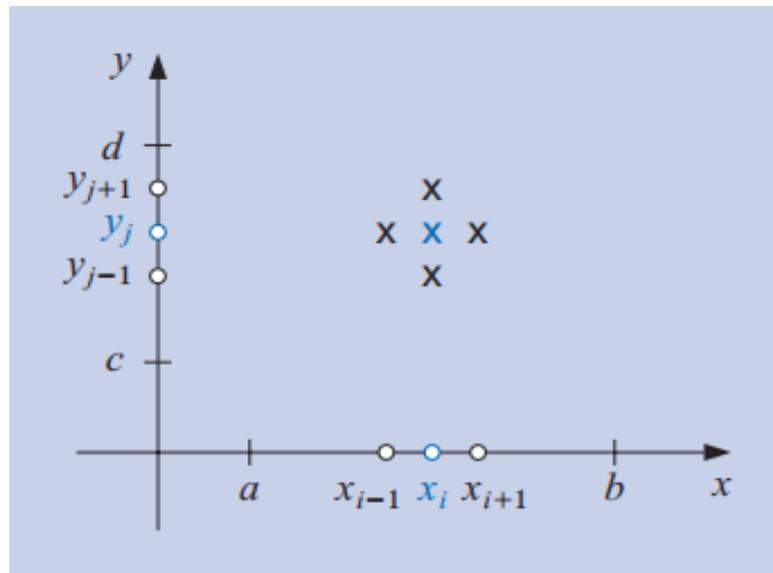


Figura 11 - Representação do ponto  $(x_i, y_j)$  e seus vizinhos na malha (BURDEN; FAIRES, 2011).

#### 4.1. Métodos de Diferenças Finitas

Utilizando a equação de condução de calor unidimensional, dada pela Equação (58) (BURDEN; FAIRES, 2011):

$$\frac{\partial u}{\partial t}(x, t) = \alpha^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}(x, t), \quad 0 < x < l, \quad 0 < t < T \quad (58)$$

sujeito as seguintes condições:

$$\begin{aligned} u(x, 0) &= f(x), \\ u(0, t) &= u(l, t) = 0. \end{aligned} \quad (59)$$

A primeira condição descreve a distribuição inicial de calor, enquanto a segunda condição descreve a distribuição de calor nas extremidades, sendo que, nesse caso, o calor não flui pelas extremidades.

#### 4.1.1. Método de Diferenças Progressivas (Forward-Difference)

Utilizando a expansão em série de Taylor progressiva de primeira ordem (Equação (51)) em  $t$ , temos:

$$\frac{\partial u}{\partial t}(x_i, t_j) = \frac{u(x_i, t_j + k) - u(x_i, t_j)}{k}. \quad (60)$$

Aplicando a expansão centrada da expansão da série de Taylor para a derivada de segunda ordem (Equação (57)) em  $x$ , obtemos:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}(x_i, t_j) = \frac{u(x_i + h, t_j) - 2u(x_i, t_j) + u(x_i - h, t_j)}{h^2}, \quad (61)$$

fazendo  $u(x_i, t_j) = \omega_{ij}$  e substituindo as Equações (60) e (61) na Equação (58), obtemos

$$\frac{\omega_{i,j+1} - \omega_{ij}}{k} - \alpha^2 \frac{\omega_{i+1,j} - 2\omega_{ij} + \omega_{i-1,j}}{h^2} = 0. \quad (62)$$

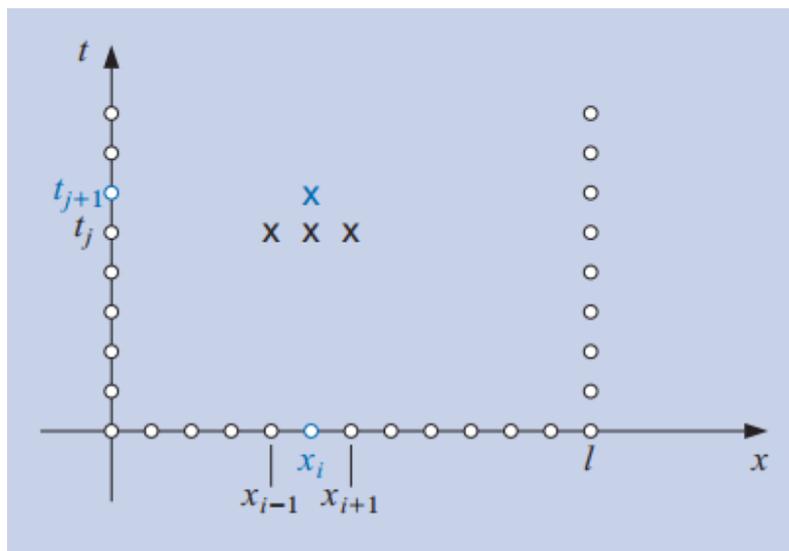


Figura 12 - Representação do método de diferenças progressivas. O x em azul pode ser obtido a partir dos valores de  $\omega$  no tempo anterior  $t_j$  (BURDEN; FAIRES, 2011).

O método de diferenças progressivas (Equação (62)) fornece um meio para calcular os valores de cada ponto da malha em um instante futuro e nos pontos vizinhos de  $x$  (Figura 12).

#### 4.1.2. Método de Diferenças Regressivas (Backward-Difference)

Utilizando o mesmo princípio do método de diferenças progressivas, aplicamos a expansão em séries de Taylor regressiva em  $t$  e centrada em  $x$ , para calcularmos os pontos  $(x_i, t_{j-1})$ ,  $(x_{i-1}, t_j)$ ,  $(x_{i+1}, t_j)$ . Assim, as derivadas de primeira e segunda ordem utilizando o método de diferenças regressivas são representadas pelas Equações (63) e (64) respectivamente.

$$\frac{\partial u}{\partial t}(x_i, t_j) = \frac{u(x_i, t_j) - u(x_i, t_{j-1})}{k}, \quad (63)$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}(x_i, t_j) = \frac{u(x_i + h, t_j) - 2u(x_i, t_j) + u(x_i - h, t_j)}{h^2}. \quad (64)$$

fazendo  $u(x_i, t_j) = \omega_{ij}$  e substituindo as Equações (63) e (64) na equação de transferência de calor (Equação (58)), obtemos:

$$\frac{\omega_{ij} - \omega_{i,j-1}}{k} - \alpha^2 \frac{\omega_{i+1,j} - 2\omega_{ij} + \omega_{i-1,j}}{h^2} = 0. \quad (65)$$

Assim, o método de diferenças regressivas (Equação (65)) fornece um meio para calcular os valores de cada ponto da malha em um instante anterior e nos pontos vizinhos de  $x$ , como ilustrado na Figura 13.



Substituindo as derivadas de primeira ordem na equação de transferência de calor (Equação (58)) e tomando a média entre as Equações (67) e (61), obtemos o método de Crank-Nicolson (Equação (68)):

$$\frac{\omega_{i,j+1} - \omega_{i,j}}{k} - \frac{\alpha^2}{2} \left( \frac{\omega_{i+1,j} - 2\omega_{i,j} + \omega_{i-1,j}}{h^2} + \frac{\omega_{i+1,j+1} - 2\omega_{i,j+1} + \omega_{i-1,j+1}}{h^2} \right) = 0. \quad (68)$$

A representação da malha do método de Crank-Nicolson é mostrada na Figura 14.

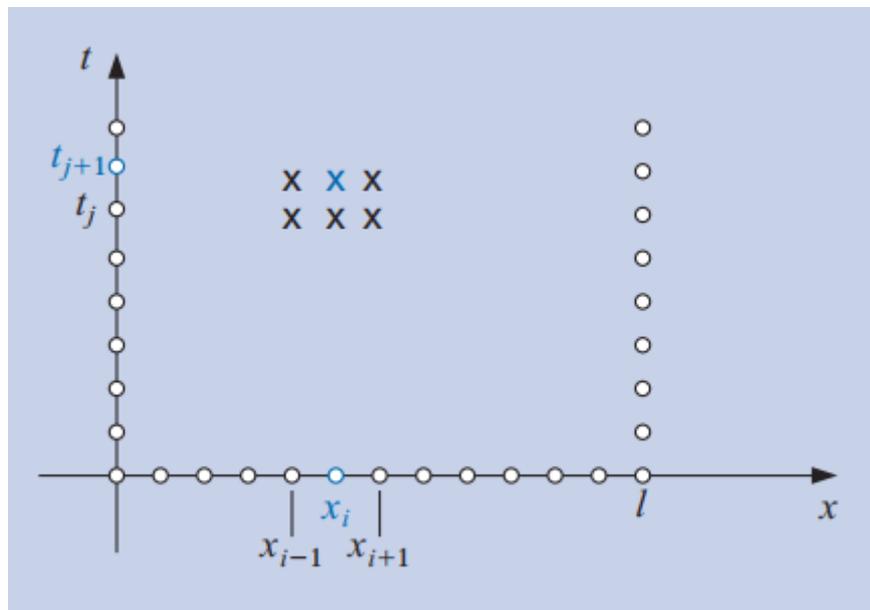


Figura 14 - Representação do método Crank-Nicolson. O x em azul pode ser obtido a partir dos valores de  $\omega$  no tempo anterior  $t_j$  (BURDEN; FAIRES, 2011).

## 4.2. Modelo Térmico e Elétrico

Neste estudo, a equação diferencial parcial, derivada do acoplamento entre o campo elétrico com os processos de transferência de calor, que descreve o aquecimento por micro-ondas, é dada por (RATTANADECHO, 2006):

$$\frac{\partial T}{\partial t}(x, t) - \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}(x, t) = \frac{Q}{\rho C_p}, \quad 0 < x < l, \quad (69)$$

sujeito as seguintes condições de contorno:

$$T(0, t) = u(l, t) = 0, \quad (70)$$

e condição inicial:

$$T(x, 0) = f(x) \quad (71)$$

Dado que:

$$Q = 2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon_r (\tan \delta) E_y^2, \quad (72)$$

$$E_y = E_{yin} \operatorname{sen}\left(\frac{\pi x}{l}\right) \operatorname{sen}(2\pi f t). \quad (73)$$

onde  $T$  é a temperatura,  $\alpha$  a difusividade térmica,  $\rho$  é a densidade,  $C_p$  a capacidade térmica,  $Q$  é o termo relacionado à geração de calor,  $E_y$  é a intensidade do campo elétrico,  $E_{yin}$  valor de entrada da intensidade do campo elétrico,  $l$  é o comprimento da malha e  $x$  é a direção. A configuração do modelo físico do aquecimento por micro-ondas adotado neste estudo é representado pela Figura 15.

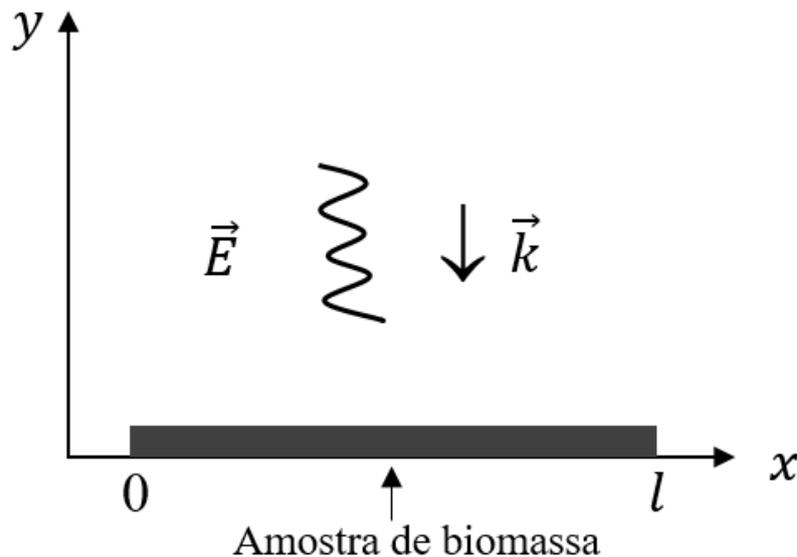


Figura 15 - Configuração do sistema físico adotado, onde o campo elétrico ( $\vec{E}$ ) incide na direção  $y$  e a amostra de biomassa está ao longo de  $x$ .

Para a resolução numérica da Equação (69) foi utilizado o método Crank-Nicolson. Primeiro selecionamos os valores de  $m = n = 100$  e definimos o comprimento do passo no

eixo  $x$  como  $h = l/m$  e no eixo  $t$  é representado por  $k = T/n$ . Os pontos da grade são  $(x_i, t_j)$ , onde  $x_i = ih$ , para  $i = 1, \dots, m$  e  $t_j = jk$ , para  $j = 1, \dots, n$ .

Aplicando o método de diferenças progressivas, podemos utilizar a expansão em série de Taylor progressiva de primeira ordem em  $t$ , obtendo:

$$T(x_i, t_{j+1}) = T(x_i, t_j + k) = T(x_i, t_j) + k \frac{\partial T}{\partial t}(x_i, t_j). \quad (74)$$

Isolando o termo correspondente à derivada de primeira ordem, temos:

$$\frac{\partial T}{\partial t}(x_i, t_j) = \frac{T(x_i, t_j + k) - T(x_i, t_j)}{k}. \quad (75)$$

Uma aproximação para a derivada de segunda ordem pode ser obtida de forma semelhante. Escrevendo a expansão da série de Taylor em torno do ponto  $x_{i+1}$ , obtemos:

$$T(x_{i+1}, t_j) = T(x_i + h, t_j) = T(x_i, t_j) + h \frac{\partial T}{\partial x}(x_i, t_j) + \frac{h^2}{2!} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}(x_i, t_j). \quad (76)$$

Como na aproximação aparece um termo que envolve a derivada primeira de  $T(x_i, t_j)$  em relação a  $x$ , podemos utilizar a expansão em série de Taylor regressiva em  $x_i$  para eliminarmos a derivada primeira, assim:

$$T(x_{i-1}, t_j) = T(x_i - h, t_j) = T(x_i, t_j) - h \frac{\partial T}{\partial x}(x_i, t_j) + \frac{h^2}{2!} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}(x_i, t_j). \quad (77)$$

Somando as Equações (76) e (77), temos:

$$T(x_{i+1}, t_j) + T(x_{i-1}, t_j) = 2T(x_i, t_j) + h^2 \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}(x_i, t_j). \quad (78)$$

Isolando o termo correspondente à derivada de segunda ordem, temos:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}(x_i, t_j) = \frac{T(x_{i+1}, t_j) - 2T(x_i, t_j) + T(x_{i-1}, t_j)}{h^2}. \quad (79)$$

Aplicando o método de diferenças regressivas no passo  $t_{j+1}$  na derivada de segunda ordem, obtemos:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}(x_i, t_j) = \frac{T(x_{i+1}, t_{j+1}) - 2T(x_i, t_{j+1}) + T(x_{i-1}, t_{j+1})}{h^2}. \quad (80)$$

Substituindo as Equações (75), (79) e (80) na Equação de transferência de calor (Equação (69)) e tomando a média entre as derivadas de segunda ordem (Equações (79) e (80)), obtemos a relação do método de Crank-Nicolson para a relação em estudo:

$$\frac{\omega_{i,j+1} - \omega_{i,j}}{k} - \frac{\alpha}{2} \left( \frac{\omega_{i+1,j} - 2\omega_{i,j} + \omega_{i-1,j}}{h^2} + \frac{\omega_{i+1,j+1} - 2\omega_{i,j+1} + \omega_{i-1,j+1}}{h^2} \right) = \frac{Q}{\rho C_p}, \quad (81)$$

onde  $T(x_i, t_j) = \omega_{ij}$ .

Definindo  $\lambda = \alpha k/h^2$ , podemos escrever:

$$\omega_{i,j+1} = \omega_{i,j} + \frac{\lambda}{2} (\omega_{i+1,j} + \omega_{i-1,j} + \omega_{i+1,j+1} + \omega_{i-1,j+1} - 2(\omega_{i,j} + \omega_{i,j+1})) + k \frac{Q}{\rho C_p}. \quad (82)$$

A Equação (82) estabelece a dependência entre o valor do ponto  $(i, j + 1)$  e seus vizinhos e representa um sistema linear tridiagonal de equações.

O modelo matemático unidimensional, que descreve o processo de aquecimento por micro-ondas, foi elaborado com o auxílio do software Microsoft Developer Studio (Fortran 90). O algoritmo desenvolvido neste trabalho foi baseado no livro Numerical Analysis (BURDEN; FAIRES, 2011). Para simplificar o problema, as propriedades dielétricas e térmicas das biomassas foram assumidas como constantes, ou seja, independentes da temperatura. As frequências de trabalho utilizadas foram de 2,45 GHz e 915 MHz e amostras com comprimento de 2 cm. A Figura 16 apresenta o fluxograma do modelo matemático usado para analisar o processo de aquecimento por micro-ondas nas biomassas.

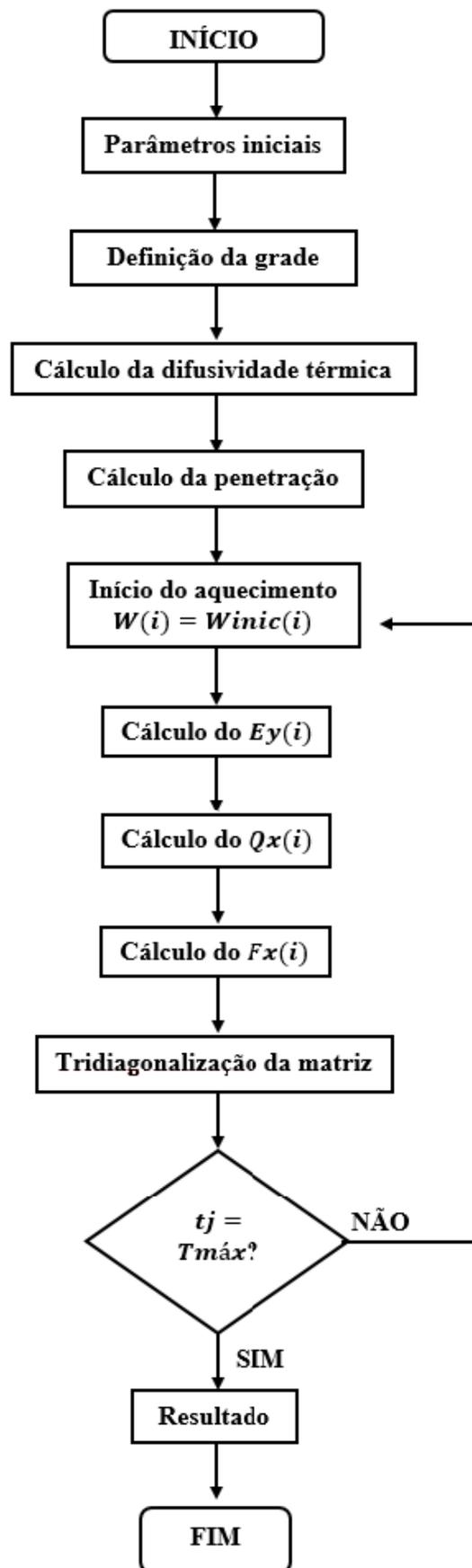


Figura 16 - Fluxograma do modelo matemático.

Inicialmente foi definido os parâmetros de entrada da simulação, como campo elétrico de entrada ( $E_{yin}$ ), propriedades dielétricas e térmicas das biomassas em análise, tempo máximo de exposição à radiação, frequência e o tamanho da grade. Em seguida foi calculado a difusividade térmica e a profundidade de penetração da biomassa, baseado nas propriedades dielétricas e térmicas do material. Com o início do aquecimento ( $W(i) = Winic(i)$ , onde  $W$  é a temperatura em um dado instante e  $Winic$  é a temperatura inicial) é calculado a intensidade do campo elétrico ( $E_y$ ), a fonte de calor ( $Q$ ) e  $F(x) = Q/\rho C_p$ . O próximo passo no desenvolvimento do modelo é a solução da Equação (82), por meio da tridiagonalização da matriz. Com a solução da Equação (82), a absorção de energia de micro-ondas em cada ponto é armazenada e usada para resolver o campo de temperatura dependente do tempo. Os novos valores da temperatura são utilizados para recalculer o campo elétrico e o termo da fonte de calor e, em seguida, a absorção de energia. Este processo cíclico continua até que o tempo de aquecimento máximo ( $T_{máx}$ ) seja atingido.

A modelagem apresentada tem o intuito de investigar a influência dos tempos de irradiação, valor do campo elétrico de entrada, teor de umidade, frequências de trabalho e propriedades dielétricas e térmicas no perfil de aquecimento das biomassas, além de descrever a influência das propriedades dielétricas na profundidade de penetração ( $D_p$ ) do campo elétrico na amostra, fornecendo assim, uma orientação para o aquecimento por micro-ondas. Os parâmetros utilizados na simulação e os resultados obtidos são discutidos no próximo capítulo.

## 5. Resultados e Discussão

Neste capítulo serão apresentados os resultados das simulações realizadas para as quatro biomassas em análise (bagaço de cana-de-açúcar, casca de laranja, cachos vazios da palma de óleo e madeira). Serão também apresentadas as análises dos efeitos de vários parâmetros no processo de aquecimento por micro-ondas, como temperatura, frequência, teor de umidade e profundidade de penetração. Os parâmetros utilizados na simulação e as propriedades dielétricas e térmicas das biomassas envolvidas neste estudo estão listadas na Tabela 4. As biomassas foram expostas à radiação de micro-ondas por 3 s, 5 s, 10 s, 15 s e 20 s, com temperatura inicial de 298 K, campo elétrico de entrada de  $E_{yin} = 1 \times 10^4$  V/m (valor baseado em Salema e Afzal (2015)) e frequências de 2,45 GHz e 915 MHz. As amostras tinham 2 cm de comprimento.

Tabela 4 - Propriedades das biomassas em análise

PROPRIEDADES DAS BIOMASSAS	BIOMASSAS (continua)		
	Palma de óleo 15% umidade <sup>a</sup>	Palma de óleo 45% umidade	Palma de óleo 64% umidade
Constante dielétrica ( $\epsilon'$ )	6,5	38,5 <sup>b</sup>	57,4 <sup>b</sup>
Fator de perda ( $\epsilon''$ )	1,9	20,6 <sup>b</sup>	18,6 <sup>b</sup>
Condutividade Térmica (W/mK)	0,03	0,03 <sup>a</sup>	0,03 <sup>a</sup>
Densidade (Kg/m <sup>3</sup> )	800	800 <sup>a</sup>	800 <sup>a</sup>
Calor específico (J/KgK)	1150	1150 <sup>a</sup>	1150 <sup>a</sup>
Difusividade Térmica (m <sup>2</sup> /s) <sup>i</sup>	3,26x10 <sup>-8</sup>	3,26x10 <sup>-8</sup>	3,26x10 <sup>-8</sup>
tan $\delta$ <sup>i</sup>	0,29	0,53	0,32

PROPRIEDADES DAS BIOMASSAS	BIOMASSAS (conclusão)		
	Madeira	Casca de laranja <sup>e</sup>	Bagaço de cana-de-açúcar
Constante dielétrica ( $\epsilon'$ )	1,591 <sup>c</sup>	35,82	2,00 <sup>f</sup>
Fator de perda ( $\epsilon''$ )	0,033 <sup>c</sup>	8,78	0,30 <sup>f</sup>
Condutividade Térmica (W/mK)	0,259 <sup>d</sup>	0,4	0,059 <sup>g</sup>

Densidade (Kg/m <sup>3</sup> )	721 <sup>c</sup>	800	80 <sup>h</sup>
Calor específico (J/KgK)	1126,8 <sup>c</sup>	3300	3648,9 <sup>f</sup>
Difusividade Térmica (m <sup>2</sup> /s) <sup>i</sup>	3,19x10 <sup>-7</sup>	1,51x10 <sup>-7</sup>	2,02x10 <sup>-7</sup>
tan $\delta$ <sup>i</sup>	0,02	0,24	0,15

<sup>a</sup> Extraído de (SALEMA; AFZAL, 2015); <sup>b</sup> extraído de (OMAR *et al.*, 2011); <sup>c</sup> extraído de (RATTANADECHO, 2006); <sup>d</sup> extraído de (CIACCI; GALGANO; DI BLASI, 2010); <sup>e</sup> extraído de (BIRLA *et al.*, 2008); <sup>f</sup> extraído de (LIYANA *et al.*, 2016); <sup>g</sup> extraído de (CASCIATORI *et al.*, 2013); <sup>h</sup> extraído de (BRITTON; TEH; CLOSE, 2005); <sup>i</sup> desse estudo.

### 5.1. Distribuição da temperatura ao longo da amostra

Como pode ser observado na Figura 17, resultado encontrado por Rattanadecho (2006) para a amostra de madeira, a temperatura mais elevada se encontra no centro da amostra e decresce em direção às laterais da amostra, além da temperatura aumentar proporcionalmente com o tempo.

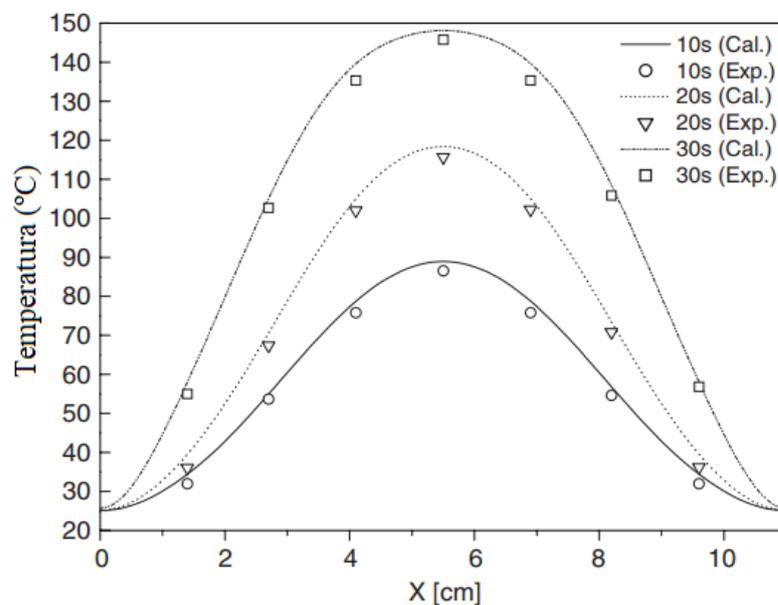


Figura 17 – Distribuição da temperatura para a madeira (dimensão 11 cm (x) x 5 cm (z)) na frequência de 2,45 GHz. Fonte: traduzido de (RATTANADECHO, 2006).

A Figura 18 mostra os resultados da distribuição superficial da temperatura nas amostras com 2 cm de comprimento, das biomassas em análise (bagaço de cana-de-açúcar, casca de

laranja, madeira e cachos vazios de palma de óleo), para vários tempos de exposição à radiação (3 s, 5 s, 10 s, 15 s e 20 s), com temperatura inicial de 298 K, campo elétrico de entrada de  $1 \times 10^4$  V/m e frequência de 2,45 GHz.

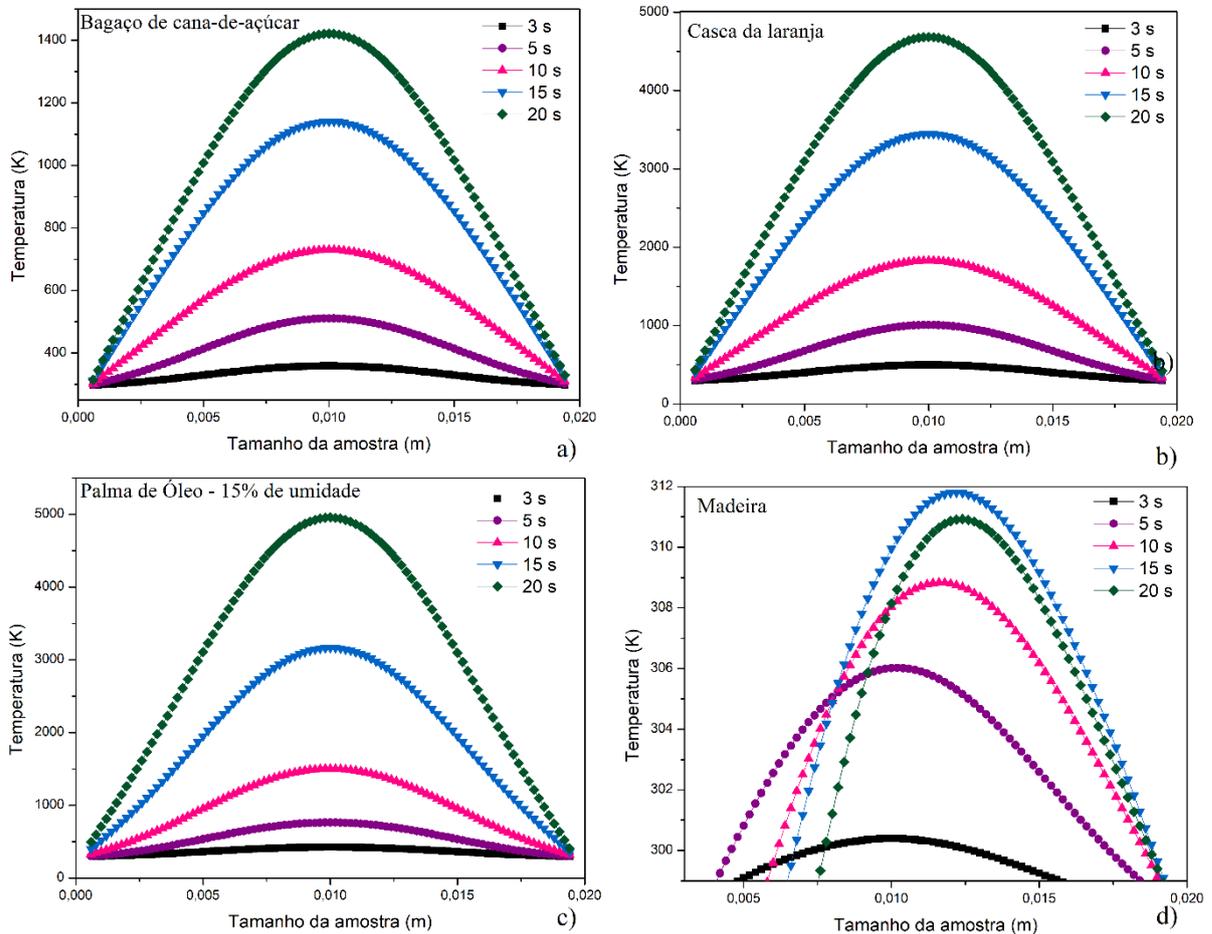


Figura 18 - Distribuição da temperatura dentro das amostras de biomassa. (a) Bagaço de cana-de-açúcar. (b) Casca de laranja. (c) Palma de óleo – 15% de umidade. (d) Madeira.

Ao compararmos os resultados obtidos na Figura 18 com a distribuição da temperatura da Figura 17, percebemos que, com exceção da amostra de madeira, os resultados são condicentes com o resultado encontrado por Rattanadecho (2006), a temperatura mais elevada se encontra no centro da amostra e decresce em direção às laterais.

Já em relação ao perfil de aquecimento não uniforme da madeira (Figura 18d), um dos fatores que podem ter influenciado, é o valor do campo elétrico de entrada. De acordo com a Equação (46), a quantidade de potência absorvida pela amostra é proporcional à intensidade do campo elétrico, fornecida durante o processo de aquecimento por micro-ondas. No entanto, a distribuição do campo elétrico ao longo da amostra é definida pelas propriedades dielétricas do material, que variam significativamente com o aumento da temperatura (SALEMA; AFZAL,

2015). Desta forma, a quantidade de energia absorvida pela amostra está diretamente ligada a intensidade do campo elétrico e as propriedades dielétricas do material.

Ao elevarmos o valor do campo elétrico de entrada para  $3,55 \times 10^4$  V/m (Figura 19), proporcionamos uma maior taxa de geração de calor dentro da amostra, elevando a temperatura. O perfil de temperatura demonstrado na Figura 19, para o caso do campo elétrico mais elevado, foi condizente com o resultado encontrado para as outras biomassas. Verificando que o valor do campo elétrico influencia significativamente na taxa de aquecimento e que é de extrema importância que as propriedades dielétricas dos materiais sejam muito bem compreendidas, já que, qualquer alteração nessas propriedades afeta significativamente o processo de aquecimento.

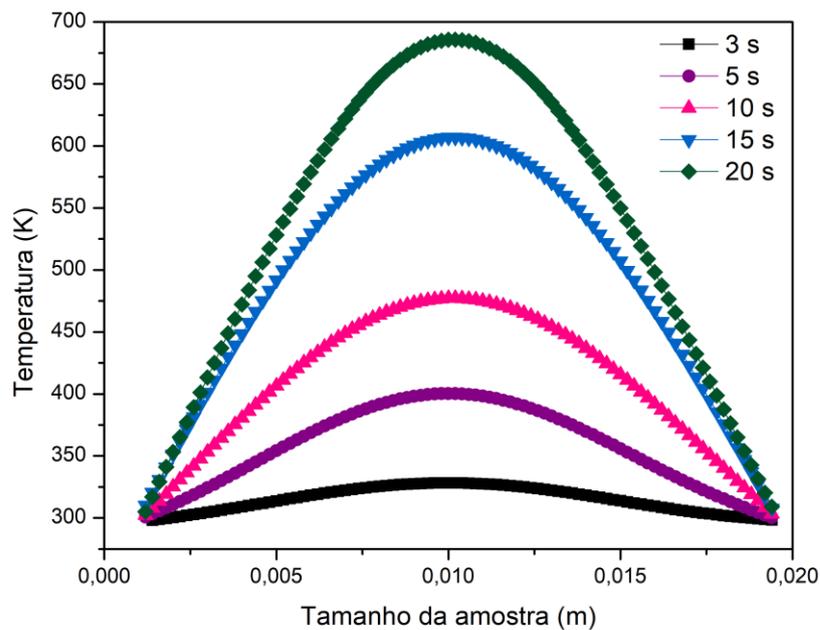


Figura 19 - Perfil de temperatura para a madeira, onde  $E_{yin} = 3,55 \times 10^4$  V/m.

## 5.2. Perfil da temperatura

Independente da fonte de aquecimento, o mecanismo de transferência de calor dentro das amostras é regido pelas propriedades térmicas do material. Com base no aquecimento por micro-ondas, o processamento das biomassas é determinado pelas propriedades dielétricas e pela transferência de calor durante a interação da radiação com a biomassa.

O perfil de temperatura durante a exposição à radiação eletromagnética é influenciado pela taxa de absorção de energia de micro-ondas, pelas propriedades dielétricas, tamanho, forma e temperatura inicial da biomassa, bem como as propriedades térmicas (condutividade térmica e calor específico).

O calor específico ( $C_p$ ) é um fator importante no comportamento térmico da biomassa submetida ao aquecimento por micro-ondas. A variação da temperatura em relação ao tempo de radiação, descrita pela Equação (83) extraída de OMAR *et al.* (2011), é inversamente proporcional ao calor específico do material:

$$C_p = 0,0341 + 0,0015 * T^2 + 2 * 10^{-5} * T^3. \quad (83)$$

O calor específico também influencia na difusividade térmica da amostra ( $\alpha$ ). A difusividade térmica é responsável por medir a capacidade de um material de armazenar energia térmica em relação a capacidade de conduzir energia térmica, sendo um dos fatores determinantes do aquecimento volumétrico. Durante esse processo, os gradientes de temperatura fazem com que o calor flua das áreas mais quentes para as áreas mais frias dentro da amostra. Esse processo continua até toda a amostra atingir uma temperatura de equilíbrio (OMAR *et al.*, 2011).

Produtos com grande difusividade térmica, consequentemente baixo calor específico, respondem rapidamente às mudanças de temperatura, resultando em uma alta taxa no aumento da temperatura, enquanto que, em materiais com baixa difusividade térmica o calor se propaga de forma mais lenta, levando mais tempo para atingir a temperatura de equilíbrio.

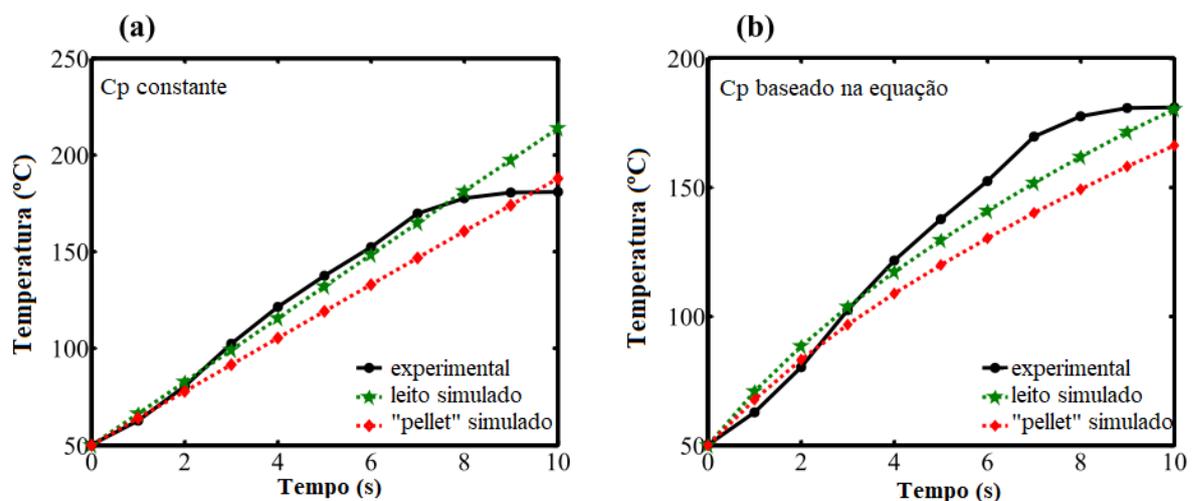


Figura 20 - Perfil da temperatura em função do tempo de exposição à radiação. (a)  $C_p$  constante. (b)  $C_p$  em função da temperatura. Fonte: traduzido de (SALEMA; AFZAL, 2015).

De acordo com Salema e Afzal (2015), ao definirmos o calor específico como constante, a temperatura do material terá um aumento linear e uniforme em relação ao tempo de exposição à radiação (Figura 20a) e valores mais elevados de temperatura, ao contrário de quando se define o calor específico como função da temperatura, que resulta em um perfil de temperatura mais próximo do experimental (Figura 20b).

A Figura 21, foi feita para investigar a relação entre o aumento da temperatura em função do tempo de exposição à radiação de micro-ondas (3 s, 5 s, 10 s, 15 s e 20 s), para os quatro tipos de biomassa (bagaço de cana-de-açúcar, casca de laranja, madeira e cachos vazios de palma de óleo), com temperatura inicial de 298 K, campo elétrico de entrada de  $1 \times 10^4$  V/m, frequência de 2,45 GHz e calor específico constante. A Figura 21 é a temperatura máxima para cada tempo de exposição à radiação obtida a partir da Figura 18.

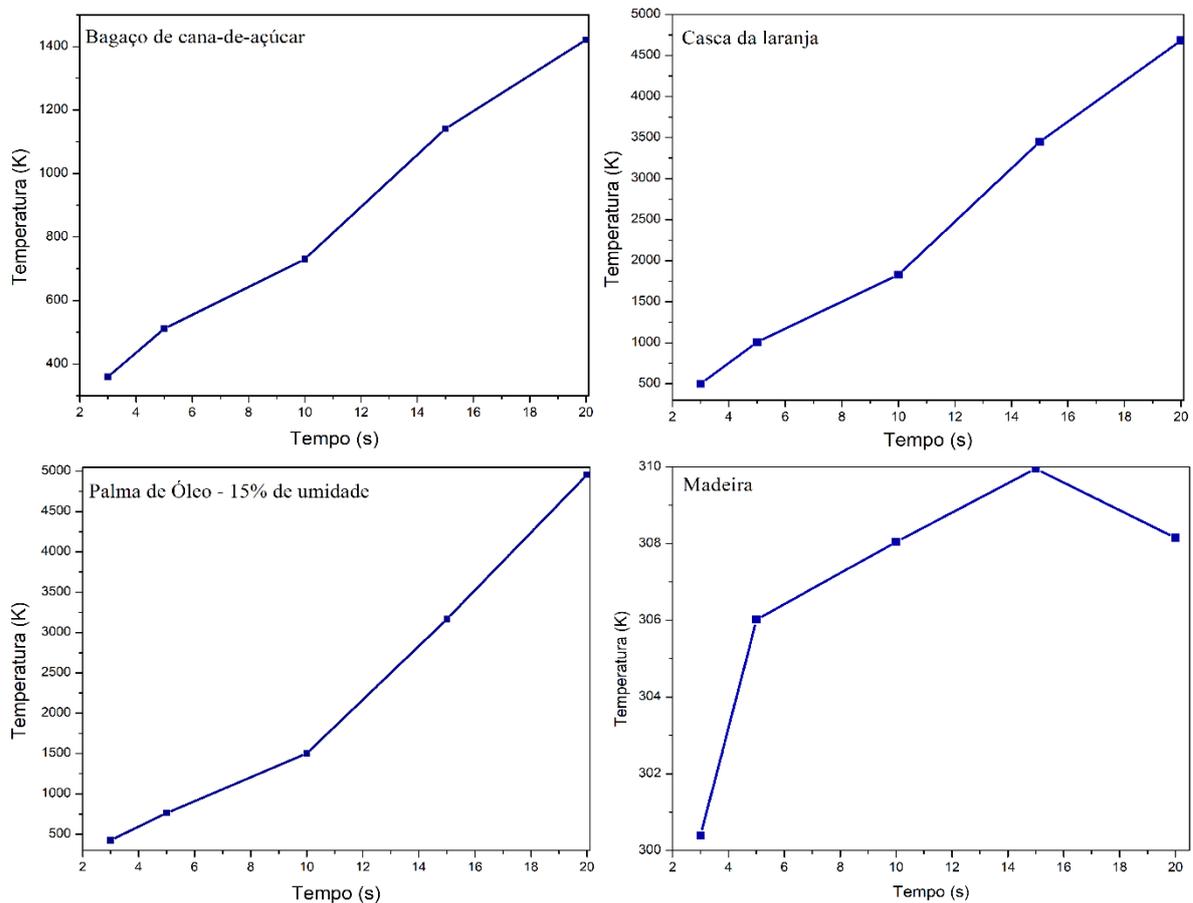


Figura 21 - Perfil da temperatura máxima em função do tempo de exposição à radiação, com campo elétrico de entrada de  $1 \times 10^4$  V/m e frequência de 2,45 GHz. (a) Bagaço de cana-de-açúcar. (b) Casca de laranja. (c) Palma de óleo – 15% de umidade. (d) Madeira.

Como pode ser observado na Figura 21, no geral, as biomassas obtiveram um comportamento semelhante ao descrito por Salema e Afzal (2015), o perfil de temperatura

simulado mostrou um aumento linear em relação ao tempo de exposição à radiação devido ao valor constante do calor específico. Assim, como qualquer alteração no valor do calor específico pode afetar a distribuição da temperatura, é recomendável utilizar o calor específico como função da temperatura, para que a simulação resulte em um perfil de temperatura mais preciso, quando comparado aos resultados experimentais.

Enquanto a casca de laranja (Figura 21b) e a palma de óleo (Figura 21c) atingiram elevadas temperaturas (4683 K e 4955 K respectivamente) após 20 s de exposição à radiação, o bagaço atingiu uma temperatura de 1421 K (Figura 21a) e a madeira praticamente não aqueceu (Figura 21d). Essa diferença no perfil de aquecimento entre as biomassas é explicada pelas características dielétricas de cada um desses materiais, onde, tanto a casca de laranja como a palma de óleo, apresentam elevados valores de tangente de perda em relação ao bagaço e a madeira (Tabela 4).

A Figura 21d apresenta o resultado da simulação da temperatura em função do tempo de exposição à radiação, para a madeira. Como pode ser analisado, a temperatura dentro da amostra aumentou até os 15 s de exposição à radiação e depois diminuiu. Uma das possíveis causas para esse efeito é o valor do campo elétrico de entrada, como relatado anteriormente. Ao elevarmos o valor do campo elétrico para  $3,55 \times 10^4$  V/m (Figura 22), a amostra de madeira atingiu temperaturas mais elevadas em um curto período de tempo e obteve um perfil de temperatura mais linear, resultado semelhante ao encontrado para as outras biomassas.

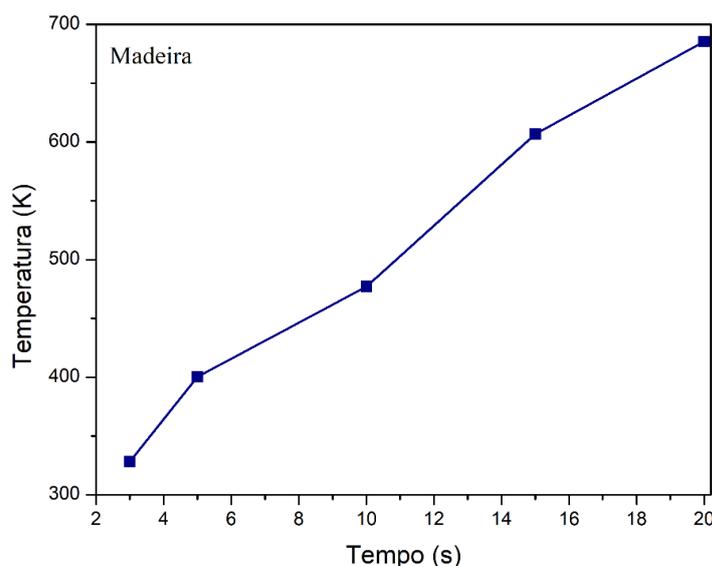


Figura 22 - Perfil da temperatura máxima em função do tempo de exposição à radiação para a madeira em um campo elétrico de  $3,55 \times 10^4$  V/m e frequência de 2,45 GHz.

Como a capacidade do material em absorver energia da radiação eletromagnética e transmiti-la sob a forma de calor é descrita pela tangente de perda ( $\tan \delta = \varepsilon''/\varepsilon'$ ), temos que, quanto maior for o valor de  $\tan \delta$ , maior será a temperatura alcançada pela amostra. As tangentes de perda para as respectivas biomassas estão listadas na

Tabela 5.

Tabela 5 - Tangente de perda e temperatura máxima das biomassas selecionadas

Biomassa	Temperatura máxima (K)	$\tan \delta$
Bagaço de cana-de-açúcar	1421,12	0,15
Casca de laranja	4683,15	0,25
Palma de óleo – 15% umidade	4955,62	0,29
Madeira	309,95	0,02

A comparação entre os perfis de temperatura, durante 20 s de exposição à radiação, para as quatro biomassas em estudo é apresentado na Figura 23.

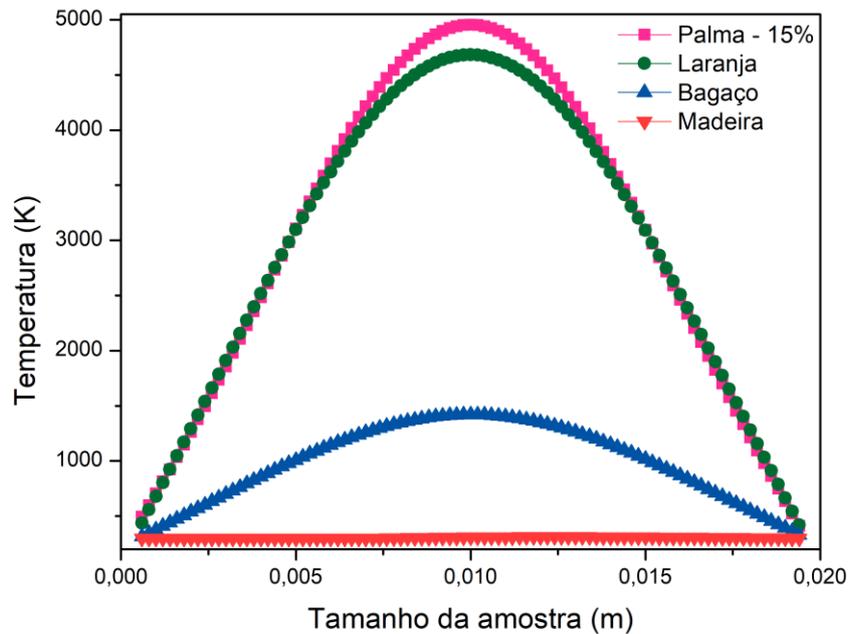


Figura 23 - Distribuição da temperatura dentro das amostras de biomassa durante 20 s de exposição à radiação. Campo elétrico de  $1 \times 10^4$  V/m e frequência de 2,45 GHz.

Ao compararmos os perfis de temperatura das quatro biomassas, percebemos que, mesmo utilizando um único valor de campo elétrico, a mesma frequência e o mesmo tempo de exposição à radiação (20 s), as biomassas apresentaram perfis de temperatura diferentes. Como pode ser observado na

Tabela 5 e na Figura 23, a palma de óleo obteve a temperatura mais elevada (4955,62 K), conseqüentemente maior tangente de perda (0,29), seguida pela casca de laranja e bagaço de cana-de-açúcar. Por último a madeira, que possui o menor valor de tangente de perda (0,02) e obteve a menor temperatura (309,95 K). Esse comportamento pode ser explicado pela diferença nas propriedades dielétricas entre as biomassas, onde as biomassas com maior fator  $\epsilon''/\epsilon'$ , ou seja, maior tangente de perda, alcançaram as temperaturas mais elevadas.

Outro fator interessante da influência das propriedades dielétricas e da tangente de perda no perfil de temperatura pode ser observado na Figura 24, que apresenta o resultado da distribuição da temperatura ao longo da amostra para a casca de laranja e a palma de óleo, durante 10 s e 20 s de exposição à radiação. Utilizando o mesmo campo elétrico e a mesma frequência.

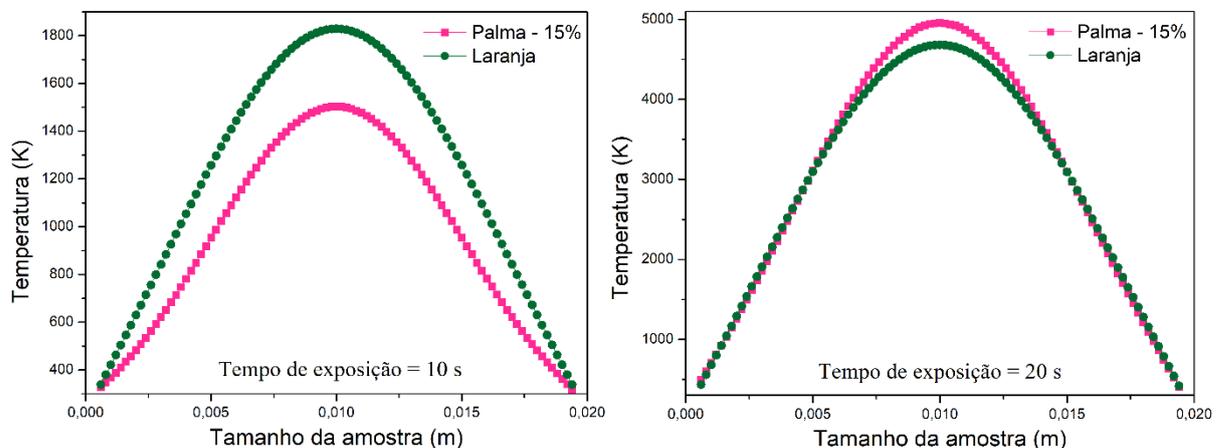


Figura 24 - Distribuição da temperatura ao longo da amostra para a casca de laranja e a palma de óleo. a) 10 s de exposição à radiação. b) 20 s de exposição à radiação. Campo elétrico de  $1 \times 10^4$  V/m e frequência de 2,45 GHz.

Como pode ser observado na Figura 24a, após 10 s de exposição, a casca de laranja obteve a temperatura mais elevada do que a palma de óleo, o que não era esperado, já que, como foi observado anteriormente, durante 20 s de exposição, a palma de óleo que atingiu a maior temperatura (Figura 24b). A tangente de perda da palma de óleo é maior do que a da casca de

laranja, como pode ser observado na Tabela 6, e foi esse fator que ocasionou a temperatura mais elevada para a palma de óleo, após 20 s de exposição. No entanto, as propriedades dielétricas da laranja são maiores do que as propriedades dielétricas da palma de óleo, e como o fator de perda é o responsável pela conversão de energia eletromagnética em calor, o maior fator de perda da casca da laranja, fez com que a absorção de energia fosse mais eficiente do que na palma de óleo, proporcionando à casca de laranja, atingir temperaturas mais elevadas até os 16s de aquecimento (Figura 25).

Tabela 6 - Propriedades dielétricas e tangente de perda

<b>Biomassa</b>	$\epsilon'$	$\epsilon''$	$\tan \delta$
Casca de laranja	35,82	8,78	0,25
Palma de óleo – 15%	6,50	1,90	0,29

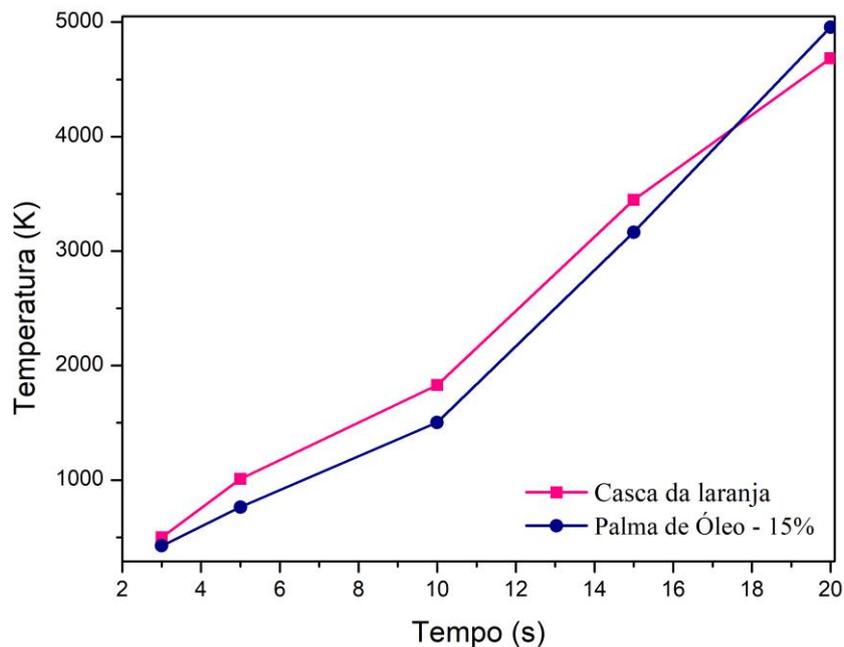


Figura 25 - Perfil da temperatura máxima em função do tempo de exposição à radiação, com campo elétrico de entrada de  $1 \times 10^4$  V/m e frequência de 2,45 GHz para a casca de laranja e a palma de óleo.

### 5.3. Profundidade de Penetração

A profundidade de penetração ( $D_p$ ), é de extrema importância para o aquecimento por micro-ondas, já que descreve o quanto as micro-ondas irão penetrar na amostra, dando uma indicação de como o calor será distribuído. Para que o aquecimento seja homogêneo, a profundidade de penetração deve ser da ordem de espessura dos materiais, uma vez que, se um material for várias vezes maior do que a profundidade de penetração, a energia será absorvida somente pela superfície, enquanto que, se a profundidade de penetração for maior do que o material, haverá um superaquecimento no interior da amostra.

A profundidade de penetração é dependente das propriedades dielétricas do material, sendo que, materiais com altos valores de  $\varepsilon''/\varepsilon'$  terão menor profundidade de penetração do que materiais com valores menores de  $\tan \delta$ . E é inversamente proporcional à frequência, ou seja, quanto maior a frequência, menor será a profundidade de penetração.

A Tabela 7, lista as propriedades dielétricas das biomassas em estudo para demonstrar a influência da constante dielétrica e do fator de perda na profundidade de penetração das micro-ondas nos alimentos, nas frequências de 915 MHz e 2,45 GHz. A profundidade de penetração foi calculada com base nas propriedades dielétricas das biomassas listadas e na Equação (42).

Tabela 7 - Propriedades dielétricas e profundidade de penetração das biomassas selecionadas

Biomassa	$\varepsilon'$	$\varepsilon''$	$\tan \delta$	$D_p$ (cm)	
				$f = 2,45$ GHz	$f = 915$ MHz
Bagaço de cana-de-açúcar	2,00	0,30	0,15	2,73	7,30
Casca de laranja	35,82	8,78	0,25	0,46	1,23
Madeira	1,59	0,03	0,02	3,58	9,60
Palma de óleo – 15%	6,50	1,90	0,29	1,15	3,07

A Figura 26, mostra os resultados da influência da constante dielétrica, das biomassas em análise (bagaço de cana-de-açúcar, casca de laranja, madeira e cachos vazios de palma de óleo), na profundidade de penetração ( $D_p$ ), temperatura inicial de 298 K, campo elétrico de entrada de  $1 \times 10^4$  V/m e frequências de 2,45 GHz e 915 MHz.

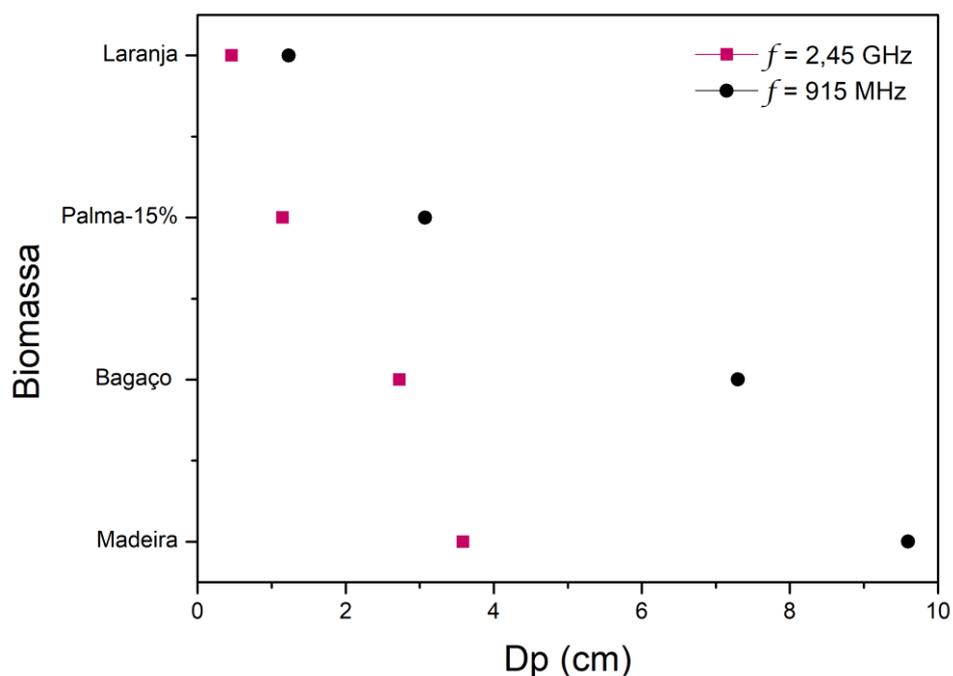


Figura 26 - Influência da constante dielétrica na profundidade de penetração (Dp) para as frequências de 2,45 GHz e 915 MHz.

Com base na Tabela 7 e na Figura 26, observamos que as biomassas com altos valores de constante dielétrica apresentaram profundidades de penetração menores do que aquelas com valores mais baixos. Também é evidente que, a profundidade de penetração foi muito afetada pela frequência aplicada, como relatado anteriormente. Com base nesses dados, a frequência de 915 MHz obteve uma profundidade de penetração aproximadamente 2,7 vezes maior do que a frequência de 2,45 GHz, valor aproximado ao relatado por Schubert e Regier (2005), no qual a frequência de 915 MHz possui uma profundidade de penetração 2,5 vezes maior do que a frequência de 2,45 GHz. Esses resultados foram consistentes para todas as biomassas em estudo.

Assim, a escolha da frequência, adequada ao tamanho da amostra, resulta em um aquecimento mais homogêneo. Por exemplo, com base na Figura 27, que mostra os resultados da distribuição da temperatura ao longo das amostras das biomassas em análise, para as frequências de 2,45 GHz e 915 MHz, durante 10 s de exposição à radiação, a frequência de 2,45 GHz atingiu temperaturas mais elevadas do que a frequência de 915 MHz, como era esperado, já que, como o calor gerado por unidade de volume (Q) no material durante o aquecimento é diretamente proporcional à frequência (Equação (48)), percebemos que, quanto maior a

frequência aplicada, maior será a taxa de transferência de calor e, conseqüentemente, maior a temperatura.

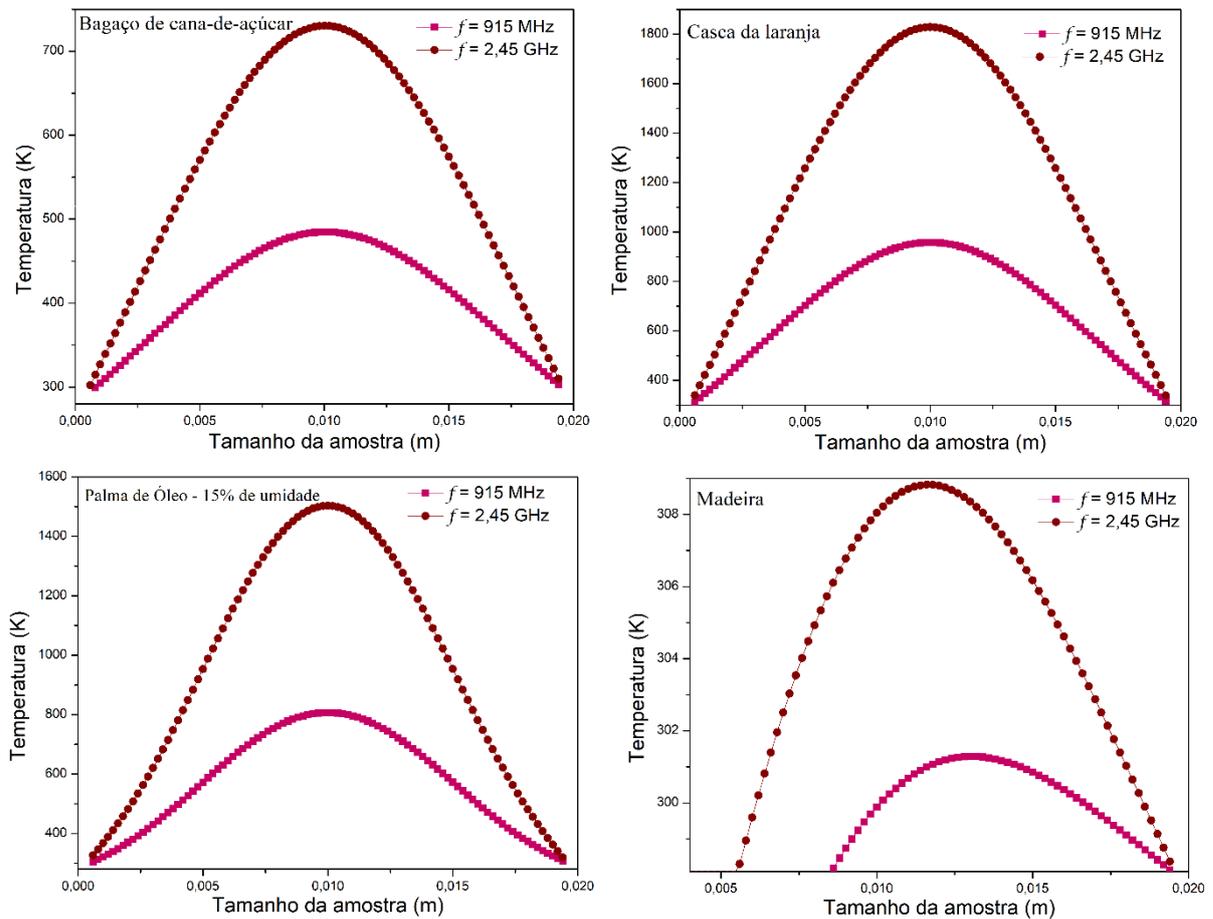


Figura 27 - Distribuição da temperatura ao longo das amostras, das biomassa em análise, para as frequências de 2,45 GHz e 915 MHz.

#### 5.4. Dependência das propriedades dielétricas sobre o teor de umidade

A água é um bom absorvedor de micro-ondas, possuindo em temperatura ambiente, uma constante dielétrica de 78, enquanto que para outros materiais a constante dielétrica é da ordem de 2 (MUJUMDAR, 2006). Certamente, a quantidade de água presente em um alimento afeta diretamente suas propriedades dielétricas. Como pode ser visto na Figura 8 do Capítulo 3, à medida que o teor de umidade aumenta, maior é o valor da constante dielétrica do material. Já o fator de perda, segundo Mujumdar (2006), aumenta até 20-30% do teor de umidade e pode vir a diminuir ou nivelar para valores maiores de umidade. Assim, se o teor de umidade for

reduzido, o fator de perda também diminui, ocasionando uma redução na capacidade do material de converter energia eletromagnética em calor.

Devido à escassez de trabalhos encontrados na literatura referente às propriedades dielétricas em função do teor de umidade para as biomassas em estudo, neste tópico só será analisado a influência da umidade no aquecimento dos cachos vazios de palma de óleo. As propriedades dielétricas em função do teor de umidade utilizadas nesse estudo se encontram na Tabela 8.

Tabela 8 - Propriedades dielétricas da Palma de óleo em função do teor de umidade

Porcentagem de umidade	$\epsilon'$	$\epsilon''$	$\tan \delta$	$D_p (10^{-2} m)$	
				$f = 2,45 \text{ GHz}$	$f = 915 \text{ MHz}$
Palma de óleo – 15%	6,5	1,9	0,29	1,15	3,07
Palma de óleo – 45%	38,5	20,6	0,54	0,42	1,13
Palma de óleo – 64%	57,4	18,6	0,32	0,36	0,96

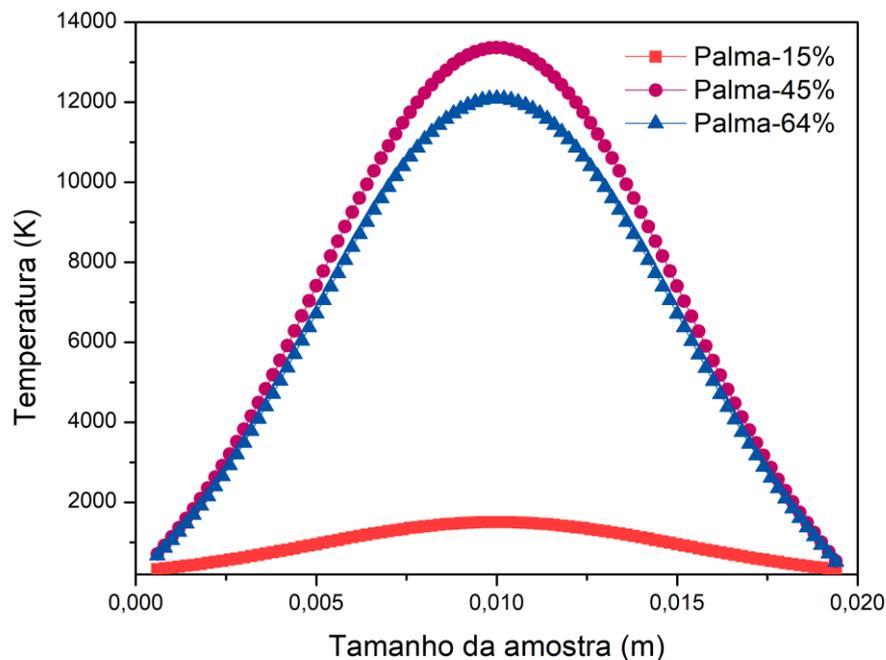


Figura 28 - Efeito do teor de umidade na distribuição da temperatura durante 10 s de exposição à radiação.

Como pode ser observado na Tabela 8, e na Figura 28, que mostra o efeito do teor de umidade na distribuição da temperatura dentro das amostras de cachos vazios de palma de óleo, a constante dielétrica aumentou com o aumento da umidade, enquanto o fator de perda, com 64% de umidade, é menor do que o fator de perda com 45% de umidade, como foi relatado por (MUJUMDAR, 2006). Como a absorção de energia de micro-ondas pelo material é proporcional à perda dielétrica, o alto valor de perda dielétrica para a biomassa com 45% de umidade, faz com que o material aqueça mais do que a biomassa com maior teor de umidade.

A Figura 29, foi feita para investigar a relação entre o aumento da temperatura em função do tempo de exposição à radiação de micro-ondas (3 s, 5 s, 10 s, 15 s e 20 s), para os cachos vazios de palma de óleo com 15, 45 e 64% de umidade, com temperatura inicial de 298 K, campo elétrico de entrada de  $1 \times 10^4$  V/m, frequência de 2,45 GHz e calor específico constante.

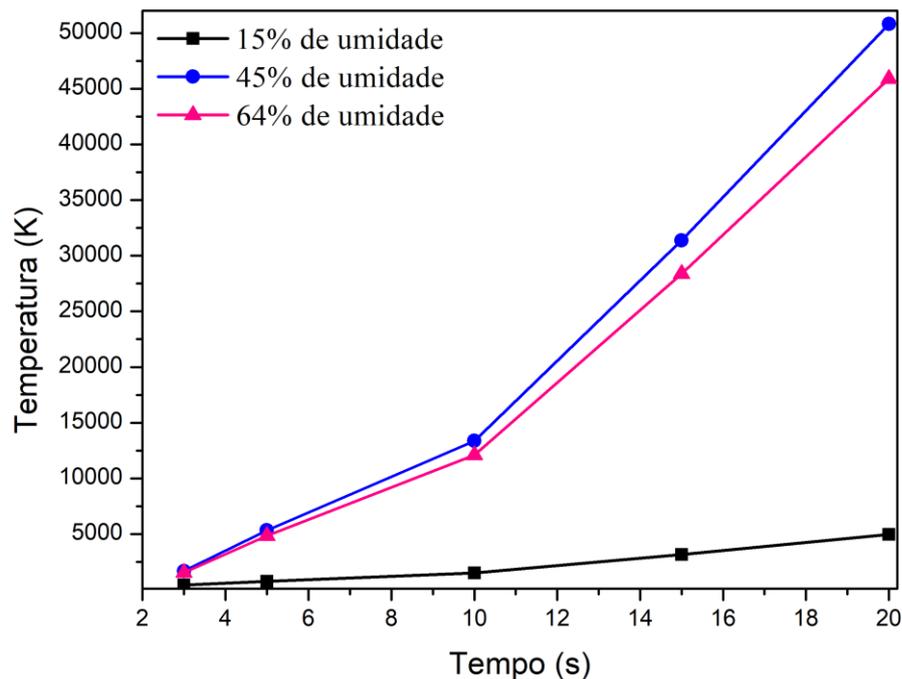


Figura 29 - Perfil da temperatura máxima em função do tempo de exposição à radiação, com campo elétrico de entrada de  $1 \times 10^4$  V/m e frequência de 2,45 GHz para a palma de óleo com 15% de umidade, 45% de umidade e 64% de umidade.

Como pode ser observado na Figura 29, independente do teor de umidade, os cachos vazios de palma de óleo obtiveram um comportamento semelhante ao descrito por Salema e

Afzal (2015), o perfil de temperatura simulado mostrou um aumento linear em relação ao tempo de exposição à radiação devido ao valor constante do calor específico.

A umidade também está diretamente relacionada com a profundidade de penetração do material, como pode ser observado na Figura 30. Para os níveis mais baixos de umidade, no qual as propriedades dielétricas são menores, a profundidade de penetração foi maior, chegando à aproximadamente 1,1 cm, enquanto que para altos níveis de umidade e consequentemente elevadas temperaturas, a profundidade de penetração foi inferior a 0,5 cm. Resultado semelhante ao que foi relatado por Omar *et al* (2011), para a palma de óleo em diferentes teores de umidade.

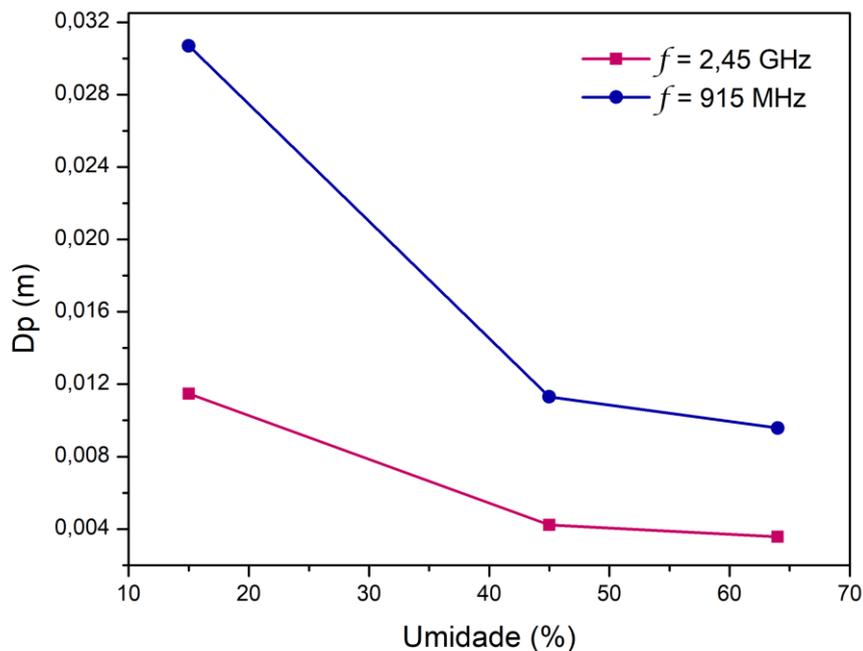


Figura 30 - Relação do teor de umidade com a profundidade de penetração nas frequências de 2,45 GHz e 915 MHz.

No entanto, durante o processo de secagem, que diz respeito à remoção de água da biomassa, as propriedades dielétricas diminuem com a redução da umidade, reduzindo a capacidade do material de converter a energia de micro-ondas em calor, fazendo com que a amostra aqueça menos. Se a umidade for extremamente baixa, a amostra pode se tornar transparente às micro-ondas, sendo necessário a adição de absorvedores de micro-ondas para auxiliar no aquecimento do material (MUJUMDAR, 2006; OMAR *et al.*, 2011). Por outro lado, devido ao maior valor das constantes dielétricas, as partes mais úmidas dos alimentos tendem

a secar mais rapidamente do que as partes com menor teor de água, já que absorvem mais energia do que a parte seca. O que acaba ocasionando, durante o processo de secagem, um nivelamento na distribuição desigual de umidade (FENG; TANG; CAVALIERI, 2002).

Como discutido anteriormente, a profundidade de penetração diminui com o aumento das frequências de micro-ondas e, como pode ser observado na Tabela 8 e na Figura 30, isso ocorre independentemente do teor de umidade na amostra.

## 6. Conclusão

Neste trabalho, foi realizado um estudo numérico do aquecimento por micro-ondas para as biomassas de bagaço de cana-de-açúcar, casca de laranja, cachos vazios da palma de óleo e madeira. Essa análise foi realizada através do desenvolvimento de um modelo matemático unidimensional baseado no método de diferenças finitas implementada em linguagem FORTRAN. Com o modelo matemático foi possível resolver com sucesso as equações diferenciais parciais derivadas do acoplamento entre o campo elétrico com os processos de transferência de calor e, por meio dos resultados obtidos com o modelo matemático, conseguiu-se identificar vários parâmetros que influenciaram no aquecimento por micro-ondas, dentre os quais, podemos citar as propriedades dielétricas e térmicas das biomassas, o tempo de irradiação, o valor do campo elétrico de entrada, o teor de umidade e a frequência de trabalho.

A adoção do valor constante do calor específico foi responsável pelo perfil de temperatura simulado apresentar um aumento linear em relação ao tempo de exposição à radiação, comportamento contrário ao esperado, já que, em resultados experimentais, a temperatura se torna constante depois de um certo tempo de exposição à radiação. Desta forma, evidencia-se a necessidade de se utilizar o calor específico como função da temperatura, para que a simulação resulte em um perfil de temperatura mais preciso, quando comparado aos resultados experimentais.

Para que o aquecimento por micro-ondas seja o mais homogêneo possível, a profundidade de penetração, que é influenciada diretamente pelas propriedades dielétricas e pela frequência de trabalho, deve ser da ordem de tamanho das amostras de biomassa. Com base nos resultados obtidos e sabendo que as amostras em análise eram de 2 cm de comprimento, concluiu-se que a frequência de 2,45 GHz é a mais indicada para o aquecimento por micro-ondas, já que a profundidade de penetração foi da ordem de tamanho das biomassas, enquanto que a frequência de 915 MHz obteve uma profundidade de penetração aproximadamente 2,7 vezes maior do que a frequência de 2,45 GHz, resultando em um menor aquecimento.

Outro fator que influencia na profundidade de penetração é o teor de umidade presente nas amostras, uma vez que a água é um bom absorvedor de micro-ondas. Para os níveis mais baixos de umidade, no qual as propriedades dielétricas são menores, a profundidade de

penetração foi maior, chegando à aproximadamente 1,1 cm, enquanto que para altos níveis de umidade a profundidade de penetração foi inferior a 0,5 cm.

A quantidade de potência absorvida pela amostra é proporcional ao quadrado da intensidade do campo elétrico, no entanto, a distribuição do campo elétrico ao longo da amostra é definida pelas propriedades dielétricas do material. Com a análise da amostra de madeira foi possível identificar a importância do valor de entrada do campo elétrico no aquecimento por micro-ondas. Para as outras biomassas, com exceção da madeira, o campo elétrico de  $1 \times 10^4$  V/m foi suficiente para aquecer as amostras e obter um perfil de aquecimento linear e uniforme, enquanto que, para a madeira foi necessário um campo elétrico maior, de  $3,55 \times 10^4$  V/m. Isso ocorreu porque a madeira apresenta um baixo valor de tangente de perda (0,02), que é o fator que descreve a capacidade do material de absorver energia da radiação eletromagnética e transmiti-la sob a forma de calor.

Portanto, como as propriedades dielétricas definem a interação das micro-ondas com a biomassa, e por serem modificadas significativamente com a variação da temperatura, da frequência, do teor de umidade e das características da biomassa em análise, é de extrema importância que esses parâmetros sejam compreendidos, a fim de determinar uma configuração experimental mais efetiva e fiel aos resultados experimentais, já que a variação das propriedades dielétricas ao longo do aquecimento afetará o resultado final do produto, podendo até resultar em um produto de baixa qualidade e um consumo maior de energia.

## Referências

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Banco de Informação sobre Geração (BIG)**. Brasília, DF, [2018?]. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.cf>>. Acesso em: 14 fev. 2018.
- AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Boletim mensal do biodiesel**. Brasília, DF, 2017. Disponível em: <[http://www.anp.gov.br/wwwanp/images/publicacoes/boletins-anp/Boletim\\_Mensal\\_do\\_Biodiesel/2017/Boletim\\_Biodiesel\\_JANEIRO\\_2017.pdf](http://www.anp.gov.br/wwwanp/images/publicacoes/boletins-anp/Boletim_Mensal_do_Biodiesel/2017/Boletim_Biodiesel_JANEIRO_2017.pdf)>. Acesso em: 20 fev. 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE ÓLEO DE PALMA. **A palma no Brasil e no mundo**. [S.l.], 2015a. Disponível em: <<http://www.abrapalma.org/pt/a-palma-no-brasil-e-no-mundo/>>. Acesso em: 27 fev. 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE ÓLEO DE PALMA. **Óleo da palma no dia a dia**. [S.l.], 2015b. Disponível em: <<http://www.abrapalma.org/pt/oleo-da-palma-no-dia-a-dia/>>. Acesso em: 27 fev. 2018.
- AMATO, Fábio; MATOSO, Filipe. Mistura de etanol na gasolina sobe para 27% a partir de 16 de março. **G1**, 04 mar. 2015. Disponível em: <<http://g1.globo.com/economia/noticia/2015/03/mistura-de-etanol-na-gasolina-sobe-para-27-partir-de-16-de-marco.html>>. Acesso em: 12 mar. 2018.
- AWUAH, George B.; RAMASWAMY, Hosahalli S.; TANG, Juming. **Radio-frequency heating in food processing: principles and applications**. New York: Taylor & Francis, 2015. 442 p.
- BENEVIDES, Lorena Coelho. **Pirólise do bagaço de laranja: análise cinética dos estágios de secagem e devolatização**. 2015, 80 f. Dissertação (Mestrado em Energia) – Universidade Federal do Espírito Santo, São Mateus.
- BENGTSSON, Nils E.; OHLSSON, Thomas. Microwave heating in the food industry. **Proceedings of the IEEE**, v. 62, n. 1, p. 44-55, 1974.
- BIRLA, S. L. et al. Characterization of radio frequency heating of fresh fruits influenced by dielectric properties. **Journal of Food Engineering**, v. 89, n. 4, p. 390–398, Dec. 2008.
- BLOOMFIELD, L. A. How things work. **The Physics Teacher**, v. 30, n. 9, p. 540–541, Dec. 1992.
- BOUKROUFA, Meryem et al. Bio-refinery of orange peels waste: a new concept based on integrated green and solvent free extraction processes using ultrasound and microwave techniques to obtain essential oil, polyphenols and pectin. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 24, p. 72–79, May 2015.

BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. 2. ed. Brasília, DF: ANEEL, 2005.

BRASIL. Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social. **Bioetanol de cana-de-açúcar: energia para o desenvolvimento sustentável**. Rio de Janeiro: CGEE, 2008.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**. Brasília, DF, 2017a. Disponível em: <[http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/17\\_04\\_20\\_14\\_04\\_31\\_boletim\\_cana\\_portugues\\_-\\_1o\\_lev\\_-\\_17-18.pdf](http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/17_04_20_14_04_31_boletim_cana_portugues_-_1o_lev_-_17-18.pdf)>. Acesso em: 08 mar. 2018.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional 2017**. Rio de Janeiro, 2017b.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Percentual obrigatório de biodiesel passa para 10%**. Brasília, DF, 2018. Disponível em: <[http://www.mme.gov.br/web/guest/pagina-inicial/outras-noticias/-/asset\\_publisher/32hLrOzMKwWb/content/percentual-obrigatorio-de-biodiesel-passa-para-10-;jsessionid=ED1476C157C5E5C177AE5E1AE3B7065C.srv155?redirect=http%3A%2F%2Fwww.mme.gov.br%2Fweb%2Fguest%2Fpagina-inicial%2Foutras-noticias%3Bjsessionid%3DED1476C157C5E5C177AE5E1AE3B7065C.srv155%3Fp\\_p\\_id%3D101\\_INSTANCE\\_32hLrOzMKwWb%26p\\_p\\_lifecycle%3D0%26p\\_p\\_state%3Dnormal%26p\\_p\\_mode%3Dview%26p\\_p\\_col\\_id%3Dcolumn-1%26p\\_p\\_col\\_pos%3D1%26p\\_p\\_col\\_count%3D3](http://www.mme.gov.br/web/guest/pagina-inicial/outras-noticias/-/asset_publisher/32hLrOzMKwWb/content/percentual-obrigatorio-de-biodiesel-passa-para-10-;jsessionid=ED1476C157C5E5C177AE5E1AE3B7065C.srv155?redirect=http%3A%2F%2Fwww.mme.gov.br%2Fweb%2Fguest%2Fpagina-inicial%2Foutras-noticias%3Bjsessionid%3DED1476C157C5E5C177AE5E1AE3B7065C.srv155%3Fp_p_id%3D101_INSTANCE_32hLrOzMKwWb%26p_p_lifecycle%3D0%26p_p_state%3Dnormal%26p_p_mode%3Dview%26p_p_col_id%3Dcolumn-1%26p_p_col_pos%3D1%26p_p_col_count%3D3)>. Acesso em: 05 mar. 2018.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético. **Resenha energética brasileira**. Brasília, DF, 2017c.

BRIDGWATER, A. V. Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. **Biomass and Bioenergy**, v. 38, p. 68–94, 2012.

BRITTON, P.; THE, E.; CLOSE, D. Investigation of the efficiency of bagasse as a thermal insulator. **Proceedings of Australian Society of Sugar Cane Technology**, v. 27, p. 462-471, 2005.

BURDEN, Richard L.; FAIRES, J. Douglas. **Numerical analysis**. Boston: Cengage Learning, 2011.

CARDOSO, B. M. **Uso da biomassa como alternativa energética**. 2012. 112 f. Projeto de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

CASCIATORI, F. P. et al. Stagnant Effective Thermal Conductivity of Agro-Industrial Residues for Solid-State Fermentation. **International Journal of Food Properties**, v. 16, n. 7, p. 1578-1593, Jan 2013.

CIACCI, Tommaso; GALGANO, Antonio; DI BLASI, Colomba. Numerical simulation of the electromagnetic field and the heat and mass transfer processes during microwave-induced pyrolysis of a wood block. **Chemical Engineering Science**, v. 65, n. 14, p. 4117–4133, 2010.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. **Florestas plantadas: oportunidades e desafios da indústria brasileira de base florestal plantada no caminho da sustentabilidade**. Brasília, DF: IBÁ, 2017. Disponível em: <<http://acr.org.br/download/biblioteca/iba.pdf>>. Acesso em: 06 fev. 2018.

CORTEZ, Luís Augusto Barbosa; LORA, Electo Eduardo Silva; GÓMEZ, Edgardo Oliveira. **Biomassa para energia**. São Paulo: Editora Unicamp, 2008.

DINKELBACH, L. et al. **Thermochemical conversion of willow from short rotation forestry**. Petten: Netherlands Energy Research Foundation, 2000. (ECN-C--00-028).

DOSSIÊ Óleos. **Food Ingredients Brasil**, n. 31, p. 38-55, 2014. Disponível em: <<http://www.revista-fi.com/materias/416.pdf>>. Acesso em: 20 fev. 2018.

DUGO, Giovanni; GIACOMO, Angelo Di. **Citrus**. London: Taylor & Francis, 2002. 657 p.

ERREDE, Steven. **EM wave propagation in conductors**. Illinois: University of Illinois at Urbana-Champaign, 2015. (Lecture notes, v. 7). Disponível em: <[http://web.hep.uiuc.edu/home/serrede/P436/Lecture\\_Notes/P436\\_Lect\\_07.pdf](http://web.hep.uiuc.edu/home/serrede/P436/Lecture_Notes/P436_Lect_07.pdf)>. Acesso em: 5 jan. 2018.

FENG, H.; TANG, Juming; CAVALIERI, R. P. Dielectric properties of dehydrated apples as affected by moisture and temperature. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, v. 45, n. 1, p. 129–135, 2002.

FRANCO, Neide Bertoldi. **Cálculo numérico**. São Paulo: Pearson Education, 2006.

FUNDAÇÃO DE AMPARO À PESQUISA DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Um futuro com energia sustentável: iluminando o caminho**. Amsterdam: InterAcademy Council; Rio de Janeiro: Academia Brasileira de Ciências, 2010. Disponível em: <<http://www.fapesp.br/publicacoes/energia.pdf>>. Acesso em: 06 out. 2017.

GRIFFITHS, David J. **Eletrodinâmica**. 3. ed. São Paulo: Pearson Education, 2011. p. 424.

HOSSEINI, Seyed Saeid; KHODAIYAN, Faramarz; YARMAND, Mohammad Saeid. Optimization of microwave assisted extraction of pectin from sour orange peel and its physicochemical properties. **Carbohydrate Polymers**, v. 140, p. 59–65, Apr. 2016.

HUANG, Yu-Fong; CHIUEH, Pei-Te; LO, Shang-Lien. A review on microwave pyrolysis of lignocellulosic biomass. **Sustainable Environment Research**, v. 26, n. 3, p. 103–109, 2016.

HUANG, Yu-Fong et al. Microwave pyrolysis of lignocellulosic biomass: heating performance and reaction kinetics. **Energy**, v. 100, p. 137–144, Apr. 2016.

INDEX MUNDI. **Palm oil production by country in 1000 MT**. [S.l.], 2017. Disponível em: <<http://www.indexmundi.com/agriculture/?commodity=palm-oil&graph=production>>.

Acesso em: 18 dez. 2017.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório 2017**. Brasília, DF, 2017. Disponível em: <[http://iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA\\_RelatorioAnual2017.pdf](http://iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA_RelatorioAnual2017.pdf)>. Acesso em: 06 fev. 2018.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **A geografia da cana-de-açúcar: dinâmica territorial da produção agropecuária**. Rio de Janeiro, 2017. Disponível em: <[https://www.ibge.gov.br/apps/dinamica\\_agropecuaria/](https://www.ibge.gov.br/apps/dinamica_agropecuaria/)>. Acesso em: 15 jan. 2018.

KALTNER, F. J.; FURLAN JÚNIOR, J.; SILVA, E. B. da; VEIGA, A. S.; VAZ, J. B. da C. **Viabilidade técnica e econômica de produção de ésteres de óleo de palma, para utilização como substituto de óleo diesel, na Amazônia**. Brasília, DF: Embrapa, 2004. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/408467/viabilidade-tecnica-e-economica-de-producao-de-esteres-de-oleo-de-palma-para-utilizacao-como-substituto-de-oleo-diesel-na-amazonia>>. Acesso em: 14 fev. 2018.

KORMIN, F.; ABDURAHMAN, N. H.; YUNUS, R. M.; RIVAI, M. Study the Heating Mechanisms of Temperature Controlled Microwave Closed System (TCMCS ). **International Journal of Engineering Science and Innovative Technology**, v. 2, n. 5, p. 417–429, 2013.

KUMMAMURU, B. **WBA Global Bioenergy Statistics 2017**. Stockholm: World Bioenergy Association, 2017. Disponível em: <[http://www.worldbioenergy.org/uploads/WBA%20GBS%202017\\_lq.pdf](http://www.worldbioenergy.org/uploads/WBA%20GBS%202017_lq.pdf)>. Acesso em: 16 nov. 2017.

LI, Jing et al. Biochar from microwave pyrolysis of biomass: a review. **Biomass and Bioenergy**, v. 94, p. 228–244, Nov. 2016.

LIMA, Antonio Guilherme Garcia. **Cursos de Engenharia Elétrica 2016**. [S.l.], 2016. Disponível em: <<http://www.antonioguilherme.web.br.com/blog/materiais/particulas-materiais/espectro-eletromagnetico/>>. Acesso em: 30 nov. 2017.

LIN, Bo-Jhih; CHEN, Wei-Hsin. Sugarcane bagasse pyrolysis in a carbon dioxide atmosphere with conventional and microwave-assisted heating. **Frontiers in Energy Research**, v. 3, p. 1–9, Feb. 2015.

LIYANA, Z. et al. Measurement of dielectric properties of sugarcane bagasse and rubber tire dust for microwave absorber performance. **Journal of Engineering and Applied Sciences**, v.11, n.18, p. 10877-10881, Sep. 2016.

MINGOS, D. Michael P.; BAGHURST, David R. Tilden Lecture. Applications of microwave dielectric heating effects to synthetic problems in chemistry. **Chemical Society Reviews**, v. 20, n. 1, Jan. 1991.

MIURA, Masakatsu et al. Rapid pyrolysis of wood block by microwave heating. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 71, n. 1, p. 187–199, 2004.

MOTASEMI, F.; AFZAL, M. T. A review on the microwave-assisted pyrolysis technique. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 28, p. 317-330, Aug. 2013.

MUJUMDAR, Arun S. **Handbook of industrial drying**. 3<sup>rd</sup> ed. New York: Taylor & Francis, 2006. 1280 p.

NAZARENO, Julianne Cutrim; VIEIRA, Gláucia Eliza Gama; OLIVEIRA, Guilherme Goulart. Aproveitamento do dendê para produção de Biodiesel na região Amazônica Brasileira. **Bioenergia em Revista: Diálogos**, v. 5, n. 2, p. 8–17, 2015.

ÓLEO de palma para biocombustível. **Jornal de Santa Catarina**, 20 dez. 2010. Coluna Em Foco. Disponível em: <<https://www.biodieselbr.com/noticias/em-foco/oleo-palma-biocombustivel-201210.htm>>. Acesso em: 02 mar. 2018.

OLIVEIRA, Y. M. M. de; OLIVEIRA, E. B. de. **Plantações florestais: geração de benefícios com baixo impacto ambiental**. Brasília, DF: Embrapa, 2017. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1076130/plantacoes-florestais-geracao-de-beneficios-com-baixo-impacto-ambiental>>. Acesso em: 02 mar. 2018.

OMAR, Rozita et al. Characterization of empty fruit bunch for microwave-assisted pyrolysis. **Fuel**, v. 90, n. 4, p. 1536–1544, 2011.

PECTINAS propriedades e aplicações. **Food Ingredients Brasil**, n. 29, p. 46-53, 2014. Disponível em: <<http://www.revista-fi.com/materias/380.pdf>>. Acesso em: 30 jan. 2018.

PESQUISA DE ESTIMATIVA DE SAFRA. **Reestimativa da safra de laranja 2017/18 do cinturão citrícola de São Paulo e triângulo/sudoeste mineiro: cenário em fevereiro/2018**. Araraquara, SP, 2018. Disponível em: <[http://www.fundecitrus.com.br/pdf/pes\\_relatorios/Reestimativa\\_da\\_safra\\_de\\_laranja\\_201718\\_dezembro.pdf](http://www.fundecitrus.com.br/pdf/pes_relatorios/Reestimativa_da_safra_de_laranja_201718_dezembro.pdf)>. Acesso em: 14 mar. 2018.

PRAKASH MARAN, J. et al. Optimization of microwave assisted extraction of pectin from orange peel. **Carbohydrate Polymers**, v. 97, n. 2, p. 703–709, Sept. 2013.

RATTANADECHO, P.; AOKI, K.; AKAHORI, M. A numerical and experimental study of microwave drying using a rectangular wave guide. **Drying Technology**, v. 19, n. 9, p. 2209–2234, 2001.

RATTANADECHO, P. The simulation of microwave heating of wood using a rectangular wave guide: influence of frequency and sample size. **Chemical Engineering Science**, v. 61, n. 14, p. 4798–4811, 2006.

REIS, H. F. A. F.; LIMA, L. P. de; PEREZ, R. Palma no Brasil viabilidade da produção de óleo ou biodiesel? **Revista de Política Agrícola**. Brasília, DF, v. 26, n. 2, p. 20-30, 2017.

ROBINSON, J. P. et al. Microwave Pyrolysis of Wood Pellets. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 49, n. 2, p. 459–463, Jan. 2010.

RODRIGUES, Luciana Deotti. **A cana-de-açúcar como matéria-prima para a produção de biocombustíveis: impactos ambientais e o zoneamento agroecológico como ferramenta para**

mitigação. 2010. 64 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Análise Ambiental) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora.

RODRIGUES, Thaís Isabel. **Diagnóstico ambiental da produção de carvão vegetal no município de Tabai –RS**. 2016. 88 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) – Centro Universitário Univates, Lajeado.

SAHIN, Serpil; SUMNU, Servit Gulum. **Physical properties of foods**. New York: Springer, 2006. 257 p.

SALEMA, A. A; AFZAL, M. T. Numerical simulation of heating behaviour in biomass bed and pellets under multimode microwave system. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 91, p. 12-24, Feb. 2015.

SALEMA, Arshad Adam; ANI, Farid Nasir. Microwave induced pyrolysis of oil palm biomass. **Bioresource Technology**, v. 102, n. 3, p. 3388–3395, Feb. 2011.

SCHUBERT, Helmar; REGIER, Marc. **The microwave processing of foods**. Cambridge: Woodhead, 2005. 345 p.

SUMATHI, S. et al. Utilization of oil palm as a source of renewable energy in Malaysia. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 12, n. 9, p. 2404–2421, Dec. 2008.

SUPRAMONO, D.; FACHRIZAL, N.; DEVINA, Y. M. Microwave pyrolysis of sugarcane bagasse for bio-oil production. In: SEMINAR NASIONAL TEKNIK KIMIA INDONESIA, 2015, Yogyakarta. **Proceedings...** [S.l.: s.n], 2015.

SUSTAINABILITY POLICY TRANSPARENCY TOOLKIT. **O que é óleo de palma?** [S.l.], 2016. Disponível em: <<https://www.spott.org/palm-oil-resource-archive/what-is-palm-oil/>>. Acesso em: 14 fev. 2018.

TELES, Daniel Aparecida do Amaral. **Características físicas e rendimento mensal em óleo de cachos de duas cultivares de dendezeiro cultivadas, sob irrigação, no cerrado do Distrito Federal**. 2014. 92f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade de Brasília, Brasília, DF.

THAKUR, Beli R et al. Chemistry and uses of pectin: a review. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 37, n. 1, p. 47–73, Feb. 1997.

TOLMASQUIM, Mauricio Tiomno (Coord.). **Energia renovável: hidráulica, biomassa, eólica, solar, oceânica**. Rio de Janeiro: EPE, 2016.

UCZAI, P. et al. **Energias renováveis riqueza sustentável ao alcance da sociedade**. Brasília, DF: Câmara dos Deputados, Edições Câmara, 2012.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. Foreign Agricultural Service. **Citrus: world markets and trade**. Washington, DC, 2018a. Disponível em: <<https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/citrus.pdf>>. Acesso em: 8 mar. 2018.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. Foreign Agricultural Service. **Oilseeds: world market and trade 2017**. Washington, DC, 2018b. Disponível em: <<http://usda.mannlib.cornell.edu/usda/fas/oilseed-trade//2010s/2018/oilseed-trade-02-08-2018.pdf>>. Acesso em: 25 fev. 2018.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. Foreign Agricultural Service. **Sugar: world markets and trade**. Washington, DC, 2017. Disponível em: <<https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/Sugar.pdf>>. Acesso em: 8 mar. 2018.

VOLLMER, Michael. Physics of the microwave oven. **Physics Education**, v. 39, n. 1, p. 74–81, Jan. 2004.

VON HIPPEL, Arthur R. **Dielectric materials and applications**. 2<sup>nd</sup> ed. New York: M.I.T Press, 1954.

WOLFF, Christian. **Radar Basics**. [S.l.], 2018. Disponível em: <<http://www.radartutorial.eu/08.transmitters/Magnetron.en.html>>. Acesso em: 20 jan. 2018.

YIN, Chungem. Microwave-assisted pyrolysis of biomass for liquid biofuels production. **Bioresource Technology**, v. 120, p. 273–284, 2012.

YU, Xian-Chun; SUN, De-Lin. Microwave and enzymatic extraction of orange peel pectin. **Asian Journal of Chemistry**, v. 25, n. 10, p. 5333–5336, 2013.

YUSOFF, Sumiani. Renewable energy from palm oil: innovation on effective utilization of waste. **Journal of Cleaner Production**, v. 14, n. 1, p. 87–93, Jan. 2006.

ZANELLA, Karine. **Extração da pectina da casca da laranja-pera (*Citrus sinensis* L. Osbeck) com solução diluída de ácido cítrico**. 2013. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

## FOLHA DE REGISTRO DO DOCUMENTO

<sup>1</sup> CLASSIFICAÇÃO/TIPO  <p style="text-align: center;">DM</p>	<sup>2</sup> DATA  <p style="text-align: center;">18 de junho de 2018</p>	<sup>3</sup> REGISTRO N°  <p style="text-align: center;">DCTA/ITA/DM-035/2018</p>	<sup>4</sup> N° DE PÁGINAS  <p style="text-align: center;">91</p>			
<sup>5</sup> TÍTULO E SUBTÍTULO:  Interação de micro-ondas com biomassas.						
<sup>6</sup> AUTOR(ES):  <b>Angélica Zaneze Fia</b>						
<sup>7</sup> INSTITUIÇÃO(ÕES)/ÓRGÃO(S) INTERNO(S)/DIVISÃO(ÕES):  Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA						
<sup>8</sup> PALAVRAS-CHAVE SUGERIDAS PELO AUTOR:  Micro-ondas; Biomassa; Simulação.						
<sup>9</sup> PALAVRAS-CHAVE RESULTANTES DE INDEXAÇÃO:  Micro-ondas; Biomassa; Simulação; Conversão de energia; Física.						
<sup>10</sup> APRESENTAÇÃO: <table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 50%;"></td> <td style="width: 25%; text-align: center;"><input checked="" type="checkbox"/> Nacional</td> <td style="width: 25%; text-align: center;"><input type="checkbox"/> Internacional</td> </tr> </table> ITA, São José dos Campos. Curso de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Física. Área de Física Atômica e Molecular. Orientador: Prof. Dr. Jayr de Amorim Filho. Defesa em 12/06/2018. Publicada em 2018.					<input checked="" type="checkbox"/> Nacional	<input type="checkbox"/> Internacional
	<input checked="" type="checkbox"/> Nacional	<input type="checkbox"/> Internacional				
<sup>11</sup> RESUMO:  Na busca por maior autonomia e diversificação da matriz energética brasileira, a biomassa, proveniente de resíduos florestais, resíduos orgânicos, atividades agrícolas, algas marinhas e alimentos, tem se destacado como uma das fontes renováveis mais promissoras na redução da dependência dos combustíveis fósseis, como petróleo e gás natural. Neste trabalho apresentamos um estudo do aquecimento por micro-ondas de biomassas, visto que, tem se mostrado como uma ferramenta com grande potencial na conversão da biomassa em produtos energéticos úteis, além de apresentar vantagens consideráveis em relação ao aquecimento convencional. No intuito de investigar a influência dos tempos de irradiação, valor do campo elétrico de entrada, teor de umidade, frequências de trabalho e as propriedades dielétricas e térmicas no processo de aquecimento por micro-ondas, foi desenvolvido um modelo matemático unidimensional para a resolução numérica das equações diferenciais parciais derivadas do acoplamento entre o campo elétrico com os processos de transferência de calor, utilizando o método de diferenças finitas e implementado em quatro biomassas diferentes: bagaço de cana-de-açúcar, casca de laranja, cachos vazios da palma de óleo e madeira. Por meio dos resultados obtidos com o modelo matemático, foi possível descrever a influência do valor constante do calor específico, das propriedades dielétricas, do tempo de exposição à radiação e o valor do campo elétrico de entrada no perfil de temperatura simulado. Também se observou que para um aquecimento mais uniforme, a frequência de 2,45 GHz é a mais indicada, principalmente por apresentar a profundidade de penetração da ordem de tamanho das amostras. O teor de umidade foi outro fator importante no aquecimento por micro-ondas, já que está diretamente relacionado à profundidade de penetração e por afetar significativamente as propriedades dielétricas. A concordância entre os resultados numéricos e os encontrados na literatura, destacou que o modelo numérico pode ser empregado com sucesso no estudo do aquecimento por micro-ondas em biomassas.						

<sup>12</sup>. GRAU DE SIGILO:

**OSTENSIVO**     **RESERVADO**     **SECRETO**