

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

**Angélica Zaneze Fia**

**PRÉ-TRATAMENTO DE BIOMASSA EM FORNO DE MICRO-  
ONDAS DOMÉSTICO PARA PRODUÇÃO DE  
BIOCOMBUSTÍVEIS – UM ESTUDO NUMÉRICO**

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

  
Prof. Dr. Jayr de Amorim Filho  
Orientador

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Emília Villani  
Pró-Reitora de Pós-Graduação

Campo Montenegro  
São José dos Campos, SP – Brasil  
2023

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

**Divisão de Informação e Documentação**

<p>Fia, Angélica Zaneze Pré-tratamento de biomassa em forno de micro-ondas doméstico para produção de biocombustíveis – um estudo numérico / Angélica Zaneze Fia. São José dos Campos, 2023. 121f.</p> <p>Tese de doutorado – Curso de Física, Área de Física Atômica e Molecular – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2023. Orientador: Prof. Dr. Jayr de Amorim Filho</p> <p>1. Micro-ondas. 2. Biomassa. 3. Simulação. I. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. II. Título</p>
--

**REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA**

FIA, Angélica Zaneze. **Pré-tratamento de biomassa em forno de micro-ondas doméstico para produção de biocombustíveis – um estudo numérico.** 2023. 121f. Dissertação de doutorado em Física – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2023.

**CESSÃO DE DIREITOS**

NOME DO AUTOR: ANGÉLICA ZANEZE FIA

TÍTULO DO TRABALHO: Pré-tratamento de biomassa em forno de micro-ondas doméstico para produção de biocombustíveis – um estudo numérico

TIPO DO TRABALHO/ANO: Tese / 2023

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



Angélica Zaneze Fia

Rua dos Aliados, Vila São Pedro, 104 – Apt 13

CEP: 09210-210, Santo André - SP

**PRÉ-TRATAMENTO DE BIOMASSA EM FORNO DE  
MICRO-ONDAS DOMÉSTICO PARA PRODUÇÃO DE  
BIOCOMBUSTÍVEIS – UM ESTUDO NUMÉRICO**

**Angélica Zaneze Fia**

Composição da Banca Examinadora:

Prof. Dr. André Jorge Carvalho Chaves	Presidente	- ITA
Prof. Dr. Jayr de Amorim Filho	Orientador	- ITA
Prof. Dr. Brett Vern Carlson	Membro Interno	- ITA
Prof. Dr. Marcio Henrique Franco Bettega	Membro Externo	- UFPR
Prof. Dr. Marco Aurélio Pinheiro Lima	Membro Externo	- UNICAMP
Prof. Dr. Manuel Malheiro	Substituto Interno	- ITA
Prof. Dr. José Rachid Mohallem	Substituto Externo	- UFMG

**ITA**

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 doutorado. Agradeço muito a todos os meus amigos que participaram da minha formação, as colegas de república e aos amigos do ITA.

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.

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, 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 numérico do aquecimento da madeira, bagaço de cana-de-açúcar, casca de laranja, óleo de palma e algas verdes em um forno de micro-ondas doméstico, visto que, o aquecimento por micro-ondas de biomassas 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. O estudo se concentrou na avaliação da capacidade de absorção de energia das biomassas em formato cilíndrico e esférico. As equações de Maxwell foram utilizadas para calcular a distribuição do campo electromagnético de micro-ondas no interior da cavidade do forno de micro-ondas e nas amostras, juntamente com a equação de calor. Quantitativamente, a capacidade de absorção de potência e uniformidade da distribuição de temperatura foram, respectivamente, descritas pela eficiência de absorção de potência (PAE) e o coeficiente de variação (COV). Gráficos bidimensionais da evolução da temperatura e do campo elétrico em função do tempo foram usados para determinar as localizações dos picos ressonantes em função do número do pico. A taxa de eficiência de aquecimento foi avaliada através do grau de fuga térmica  $\Delta T$  e evolução da temperatura média  $\bar{T}$  e sua relação com a energia absorvida pelas amostras e COV, respectivamente. O coeficiente de avaliação abrangente (CEC), que descreve a usabilidade de uma amostra específica na indústria foi calculado para as formas e tamanhos das biomassas em função da potência e da umidade. As amostras foram classificadas de acordo com o comprimento de onda em cada amostra e os números de penetração em diferentes grupos.

# Abstract

In the search for greater autonomy and diversification of the energy matrix, biomass, from forest residues, active residues, agricultural activities, seaweed and food, has stood out as one of the most promising renewable sources in reducing dependence on fossil fuels, like oil and natural gas. In this work we present a numerical study of the heat of wood, sugarcane bagasse, orange peel, palm oil and green algae in a domestic microwave oven, since the heating by biomass microwaves has been seen as an important tool for the pretreatment in the conversion of biomass into useful energy products, in addition to presenting considerable advantages over conventional heating. The study focuses on evaluating the energy absorption capacity of biomass in cylindrical and spherical geometries. Maxwell's equations are used to calculate the distribution of the microwave electromagnetic field inside the microwave oven cavity and in the integrated ones, together with a heat equation. Quantitatively, the power absorption capacity and temperature distribution uniformity were, respectively, due to the power absorption efficiency (PAE) and the coefficient of variation (COV). Two-dimensional plots of the evolution of temperature and electric field as a function of time were used to determine the locations of resonant peaks as a function of peak number. The heating efficiency rate was evaluated through the degree of thermal leakage  $\Delta T$  and evolution of the average temperature  $\bar{T}$  and its relation to the energy absorbed by, and COV, respectively. The comprehensive evaluation coefficient (CEC), which describes the usability of a specific sample in industry, was calculated for the shapes and sizes of biomasses as a function of potency and humidity. They were classified according to the wavelength in each sample and the depth of penetration in different groups.

## Lista de Figuras

1.1	Diferença entre o aquecimento convencional e o aquecimento por micro-ondas.	18
2.1	Representação esquemática das principais tecnologias de aproveitamento energético da biomassa [50]. . . . .	25
2.2	Cana-de-açúcar (A). Fonte: extraído de [54]. Bagaço de cana-de-açúcar (B). Fonte: extraído de [55]. . . . .	27
2.3	Fruto do óleo de palma. Fonte: Modificado de [67]. . . . .	31
2.4	Madeira. Fonte: extraído de [79]. . . . .	35
2.5	Laranja. Fonte: extraído de [90]. . . . .	39
2.6	Algas verdes. Fonte: Extraído de [102]. . . . .	42
2.7	Gerações de biocombustíveis. . . . .	45
3.1	Espectro eletromagnético [117]. . . . .	48
3.2	Interação das micro-ondas com os alimentos. (a) iônica. (b) dipolar. Fonte: traduzido de [118]. . . . .	49
3.3	Variação das propriedades dielétricas da água em função da frequência. Fonte: traduzido de [126]. . . . .	59
3.4	Constante dielétrica, fator de perda e profundidade de penetração em função do teor de umidade em 2.45 GHz. Fonte: traduzido de [74]. . . . .	60
3.5	Constante dielétrica e fator de perda para diferentes alimentos em função da temperatura. Fonte: traduzido de [127]. . . . .	61
3.6	Diagrama esquemático do magnetron. Fonte: modificado de [128]. . . . .	62
3.7	Processo de construção do modelo numérico no COMSOL Multiphysics. . . . .	65
3.8	Esquema do forno de micro-ondas utilizado no modelo físico. . . . .	67
3.9	Avaliação da qualidade da malha para casca de laranja, cilindro 2, volume 2. . . . .	67
4.1	Tempo para atingir a temperatura de $373K$ em função da potência de entrada para diferentes biomassas. Madeira ( $\diamond$ ), bagaço ( $\square$ ), casca de laranja ( $\circ$ ), óleo de palma 18% ( $\triangle$ ), óleo de palma 45% ( $\nabla$ ) e óleo de palma 64% ( $\diamond$ ). Regiões I, II e III ver no texto. Cálculos para o cilindro 1 e o volume 1. . . . .	73
4.2	Distribuição do campo elétrico para o bagaço de cana-de-açúcar, casca de laranja, madeira e óleo de palma. Volume de $6,25 \times 10^{-5} m^3$ ; esfera e cilindro 2. Potência de 180 W. . . . .	74

4.3	Evolução da temperatura em função do tempo para o bagaço de cana-de-açúcar, casca de laranja, madeira e óleo de palma. Volume de $6,25 \times 10^{-5} m^3$ ; esfera e cilindro 2. Potência de 180 W. . . . .	76
4.4	Localizações dos picos ressonantes em função do número de picos, para o cilindro 2, volume 2 e potência de 180 W. Casca de laranja ( $\circ$ ), óleo de palma 18% ( $\Delta$ ), óleo de palma 45% ( $\nabla$ ) e óleo de palma 64% ( $\diamond$ ). . . . .	81
4.5	Grau de fuga térmica ( $\Delta T = T_{max} - T_{min}$ ) (a), e a evolução da temperatura média ( $\bar{T}$ ) (b), em função do tempo, para o cilindro 2, volume 2 e potência de 180 W. Madeira ( $\diamond$ ), bagaço ( $\square$ ), casca de laranja ( $\circ$ ), óleo de palma 18% ( $\Delta$ ), óleo de palma 45% ( $\nabla$ ) e óleo de palma 64% ( $\diamond$ ). . . . .	82
4.6	Energia absorvida em função da potência, para o cilindro 2 (a) e esfera (b), considerando o volume 2. Madeira ( $\diamond$ ), bagaço ( $\square$ ), casca de laranja ( $\circ$ ) e óleo de palma 18% ( $\Delta$ ). . . . .	83
4.7	Evolução da temperatura média ( $\bar{T}$ ) (linhas contínuas) e energia absorvida (linhas tracejadas) em função da potência para o cilindro 2 e volume 2. Madeira ( $\diamond$ ), bagaço ( $\square$ ), casca de laranja ( $\circ$ ) e óleo de palma 18% ( $\Delta$ ). . . . .	84
4.8	Eficiência de absorção de potência (PAE) em função da potência, para o cilindro 2 e esfera no volume 2. Madeira ( $\diamond$ ), bagaço ( $\square$ ), casca de laranja ( $\circ$ ) e óleo de palma 18% ( $\Delta$ ). (a) cilindro e (b) esfera. . . . .	84
4.9	Coefficiente de variação (COV) em função da potência, para o cilindro 2, esfera, volume 2 e potência de 180 W. Madeira ( $\diamond$ ), bagaço ( $\square$ ), casca de laranja ( $\circ$ ) e óleo de palma 18% ( $\Delta$ ). (a) cilindro e (b) esfera. . . . .	85
4.10	Grau de fuga térmica ( $\Delta T$ ) (linhas contínuas) e COV (linhas tracejadas) em função da potência, para o cilindro 2 e volume 2. Madeira ( $\diamond$ ), bagaço ( $\square$ ), casca de laranja ( $\circ$ ) e óleo de palma 18% ( $\Delta$ ). . . . .	86
4.11	Coefficiente de avaliação abrangente (CEC) em função da potência, para o cilindro 2 (a), esfera (b), volume 2 e potência de 180 W. Madeira ( $\diamond$ ), bagaço ( $\square$ ), casca de laranja ( $\circ$ ) e óleo de palma 18% ( $\Delta$ ). . . . .	87
4.12	Permissividade relativa $\varepsilon'$ (A) e o fator de perda relativa $\varepsilon''$ (B) em função da umidade na amostra. Bagaço de cana-de-açúcar ( $\Delta$ ), óleo de palma ( $\circ$ ) e algas verdes ( $\triangleleft$ ). . . . .	90
4.13	Profundidade de penetração ( $Dp$ , linhas contínuas) e $\tan\delta$ (linhas tracejadas) em função da umidade nas amostras. Bagaço ( $\square$ ), óleo de palma ( $\circ$ ) e algas verdes ( $\Delta$ ). . . . .	92

4.14	Distribuição do campo elétrico para algas verdes, óleo de palma e bagaço de cana-de-açúcar. Cilindro e esfera, volume de $100 \times 10^{-5} m^3$ com umidade de 30% e 65%. . . . .	93
4.15	Distribuição da temperatura para algas verdes, óleo de palma e bagaço de cana-de-açúcar. Cilindro e esfera, volume de $100 \times 10^{-5} m^3$ com umidade de 30% e 65%. . . . .	94
4.16	Tempo necessário para atingir 373 K em função da potência. Cilindro e esfera para o volume de $40,77 \times 10^{-5} m^3$ e umidade de 65%. Bagaço (cilindro $\square$ , esfera $\nabla$ ), óleo de palma (cilindro $\circ$ , esfera $\diamond$ ) e algas verdes (cilindro $\triangle$ , esfera $\triangleleft$ ). . . . .	95
4.17	Temperatura média ( $\bar{T}$ ) (curvas contínuas) e energia absorvida (curvas tracejadas) em função da potência para o cilindro (A) e a esfera (B). Volume de $40,77 \times 10^{-5} m^3$ e umidade de 65%. Bagaço ( $\square$ ), óleo de palma ( $\circ$ ) e algas verdes ( $\triangle$ ). . . . .	97
4.18	Grau de fuga térmica ( $\Delta T$ ) (curvas contínuas) e COV (curvas tracejadas) em função da potência para o cilindro (A) e a esfera (B). Volume de $40,77 \times 10^{-5} m^3$ e umidade de 65%. Bagaço ( $\square$ ), óleo de palma ( $\circ$ ) e algas verdes ( $\triangle$ ). . . . .	98
4.19	Coefficiente de avaliação abrangente (CEC) em função do volume, para o cilindro e a esfera. Umidade de 65% e potência de 400 W. Bagaço (cilindro $\square$ , esfera $\square$ ), óleo de palma (cilindro $\square$ , esfera $\square$ ) e algas verdes (cilindro $\square$ , esfera $\square$ ). . . . .	99
4.20	Energia absorvida (linhas contínuas) e coeficiente de variação (linhas tracejadas) em função da umidade para o cilindro (A) e a esfera (B). Volume de $40,77 \times 10^{-5} m^3$ e potência de 400 W. Bagaço ( $\square$ ), óleo de palma ( $\circ$ ) e algas verdes ( $\triangle$ ). . . . .	100
4.21	Energia absorvida em função da potência para cilindros (A) e esferas (B). Volumes de $2 \times 10^{-5} m^3$ (1), $13,11 \times 10^{-5} m^3$ (3) e $40,77 \times 10^{-5} m^3$ (4). Umidade de 65%. Bagaço volume 1 ( $\square$ ), volume 3 ( $\circ$ ) e volume 4 ( $\triangle$ ); óleo de palma volume 1 ( $\nabla$ ), volume 3 ( $\diamond$ ) e volume 4 ( $\triangleleft$ ); algas verdes volume 1 ( $\triangleright$ ), volume 3 ( $\circ$ ) e volume 4 ( $\star$ ). . . . .	101
4.22	Potência absorvida em função do volume (A) e relação superfície sobre volume (B). Bagaço ( $\square$ ), óleo de palma ( $\circ$ ) e algas verdes ( $\triangle$ ). . . . .	103

## Lista de Tabelas

2.1	Classificação das fontes de biomassa . . . . .	23
2.2	Teor de pectina de algumas frutas . . . . .	40
4.1	Propriedades das biomassas utilizadas nas simulações . . . . .	70
4.2	Formas e tamanhos das amostras utilizadas nas simulações. . . . .	71
4.3	$\lambda_m, D_p, N_w, N_p, f_w$ e $f_p$ calculado para as biomassas . . . . .	78
4.4	Propriedades das biomassas utilizadas nas simulações . . . . .	88
4.5	Formas e tamanhos das amostras utilizadas nas simulações. . . . .	89
4.6	$\lambda_m, D_p, N_w, N_p, f_w$ e $f_p$ calculado para as biomassas. Raio da esfera $R1 = 0,017$ m, $R2 = 0,031$ m. Raio do cilindro $R1 = 0,0146$ m, $H = 0,031$ m; $R2 = 0,0373$ m, $H = 0,031$ m. Umidade de 20% e 80%. . . . .	91



# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>Biomassas</b>	<b>23</b>
2.1	Bagaço de Cana-de-açúcar . . . . .	27
2.2	Óleo de Palma . . . . .	31
2.3	Madeira . . . . .	34
2.4	Casca de Laranja . . . . .	38
2.5	Algas Marinhas . . . . .	41
2.6	Biocombustíveis . . . . .	44
<b>3</b>	<b>Aquecimento por Micro-ondas</b>	<b>48</b>
3.1	Equações Eletromagnéticas . . . . .	49
3.2	Equações de Transferência de Calor . . . . .	54
3.3	Fatores que influenciam nas propriedades dielétricas . . . . .	56
3.3.1	<b>Frequência</b> . . . . .	58
3.3.2	<b>Umidade</b> . . . . .	59
3.3.3	<b>Temperatura</b> . . . . .	61
3.4	Equipamento de Aquecimento de Micro-ondas . . . . .	62
3.4.1	<b>Magnetron</b> . . . . .	62
3.4.2	<b>Guia de ondas</b> . . . . .	63
3.4.3	<b>Aplicadores de micro-ondas</b> . . . . .	64
3.5	Modelo Físico . . . . .	64
3.5.1	<b>Condições de contorno</b> . . . . .	68
<b>4</b>	<b>Resultados</b>	<b>69</b>
4.1	Variação da Geometria . . . . .	70
4.2	Efeito da Umidade . . . . .	87
<b>5</b>	<b>Conclusão</b>	<b>104</b>
	<b>Referências</b> . . . . .	<b>107</b>

# 1 Introdução

O consumo de energia primária no mundo aumentou cerca de 38% desde a década de 1990 [1]. As reservas são finitas e num futuro próximo a ausência de energia será uma realidade se novas ações para reduzir o consumo de combustíveis fósseis não forem feitas. Segundo o "Our World in Data" [2], a queima de combustíveis fósseis e de biomassa tradicional (madeira, esterco e carvão) são responsáveis por cerca de 5 milhões de mortes prematuras a cada ano, além de contribuírem na liberação de metais pesados, como mercúrio e chumbo, e na degradação do solo. Além de que, a alta demanda de combustíveis fósseis provoca o aumento dos gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera. A queima de combustíveis fósseis para a geração de energia é responsável por três quartos das emissões globais de gases de efeito estufa [2]. O dióxido de carbono é o foco principal do debate internacional para reduzir os GEEs, já que, o dióxido de carbono representa 80% das emissões totais de GEEs, sem incluir a mudança do uso da terra e florestas, dos países desenvolvidos, de acordo com o Protocolo de Kyoto [3].

O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) alerta que o aquecimento global já está acontecendo e temos cerca de três décadas para reduzir drasticamente nossas emissões de gases de efeito estufa e permanecer no cenário-alvo de 1,5°C acima dos níveis pré-industriais, conforme o Acordo de Paris [4]. Para atingir este objetivo, medidas para aumentar a eficiência energética devem ser feitas com estratégias que removam o dióxido de carbono da atmosfera, reduzindo o consumo de combustíveis fósseis e promovendo fontes de energia renováveis, como hidrelétrica, biomassa, eólica, solar, geotérmica e oceânica.

Veículos pessoais são as principais causas do aquecimento global. Carros e caminhões respondem por quase um quinto de todas as emissões dos EUA. Cerca de 10,89 kg de CO<sub>2</sub> e outros gases do aquecimento global são emitidos para cada galão de gás usado. Cerca de 2,27 kg vêm da extração, produção e entrega do combustível, enquanto a maior parte dos gases causadores do efeito estufa, mais de 8,6 kg por galão, vem direto do escapamento de um carro [5]. Na União Europeia (UE), o transporte é responsável por cerca de 30% das emissões totais de CO<sub>2</sub>, das quais 72% provêm do transporte rodoviário. Como parte dos esforços para reduzir as emissões de CO<sub>2</sub>, a UE estabeleceu uma meta de reduzir as emissões dos transportes em 60% até 2050 em comparação com os níveis de 1990. Somente no setor de transportes, as emissões de CO<sub>2</sub> dos automóveis somam 60,7%, caminhões pesados 26,2%, caminhões leves 11,9% e motocicletas 1,2% [6].

Em 2021, aproximadamente 83% do consumo de energia mundial foi proveniente de fontes não renováveis de energia, como carvão (27,17%), óleo (31,26%) e gás natural (24,66%), enquanto as energias renováveis (energia solar, eólica, hídrica, biomassa, geotérmica etc.) tiveram uma participação de 12,63% [2].

A substituição dos combustíveis fósseis é uma questão urgente, como dito acima. Os aumentos de preços e interrupções no fornecimento, resultantes da pandemia de COVID-19 e pela invasão da Ucrânia pela Rússia, combinadas com o rápido crescimento da demanda e pelos danos ambientais, motivaram a busca por alternativas aos combustíveis fósseis que sejam econômicas e ecologicamente benignas. Uma das opções estratégicas para enfrentar as preocupações das mudanças climáticas é substituir os combustíveis fósseis por fontes de energia de baixo carbono, investindo, em larga escala, em alternativas energéticas seguras, eficientes, acessíveis e baratas.

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. Além disso, são alternativas econômicas para a diversificação da matriz energética, por reduzirem a dependência dos combustíveis fósseis, a poluição e conseqüentemente o aquecimento global. Dentre elas, a biomassa é uma das fontes alternativas para produção de energia com maior potencial de crescimento nos próximos anos, principalmente por emitir baixíssimas quantidades de carbono.

Os combustíveis à base de biomassa são uma possível solução amigável, uma vez que o dióxido de carbono liberado durante a combustão é sequestrado de volta ao material vegetal pela fotossíntese. Por outro lado, a energia necessária para cultivar, colher e processar a biomassa e associada a sua emissão de CO<sub>2</sub>, deve ser considerada como tendo saldo líquido zero, em um contexto de biorrefinaria [7].

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 [8]. Mais de 35% da bioenergia utilizada em 2021 foi de biomassa para métodos tradicionais de cozimento [9].

Na Europa, a biomassa representa mais de 62% de toda a energia renovável, na qual a madeira tem aproximadamente 80% da biomassa para a energia renovável [10]. No setor de transportes, os biocombustíveis já são largamente empregados em escala comercial em muitos países, como o bioetanol de primeira geração da cana-de-açúcar no Brasil [11] e do milho nos

Estados Unidos [12].

A biomassa é atualmente convertida em combustíveis líquidos pela fermentação de carboidratos em etanol ou pela extração e refino de óleos vegetais. Desafios significativos permanecem na conversão de biomassa em combustíveis líquidos, uma vez que, apenas uma fração da planta é usada nas tecnologias atuais e uma quantidade significativa de energia é consumida na produção e processamento de combustíveis de origem biológica. Superar esses desafios pode melhorar a eficiência geral de um sistema de energia de biomassa e reduzir o custo dos combustíveis de biomassa. O desafio do uso da terra continua sendo uma questão importante se os biocombustíveis tiverem que ser produzidos em uma escala comparável à atual produção de combustíveis fósseis.

A produção de biomassa requer luz solar, água, nutrientes e terra. A luz solar que atinge a superfície da Terra tem uma densidade média de energia de aproximadamente  $180 \text{ Wm}^{-2}$ , calculada anualmente em toda a superfície da Terra [13]. A conversão máxima da fotossíntese da luz solar em energia química é de cerca de 6,7%, e apenas 0,3% da energia da luz solar é armazenada como compostos de carbono nas plantas terrestres. Há oportunidades na ciência para melhorar o uso da luz solar para maximizar a absorção de energia pelas plantas, talvez fazendo uso da engenharia genética ou estudando a reprodução intensiva. O potencial para expandir o uso da energia da biomassa, seja para eletricidade ou combustíveis líquidos, depende da demanda de energia, da viabilidade econômica, da tecnologia de conversão, da disponibilidade de terras e de fatores de políticas públicas [14].

Os biocombustíveis, como o nome sugere, são os combustíveis derivados de fontes biológicas como plantas, animais, micróbios, que são biodegradáveis, não tóxicos e ambientalmente seguros. Os recursos de biomassa podem ser considerados como a matéria orgânica, incluindo algas, árvores e culturas, nas quais a energia solar é armazenada durante a fotossíntese nas ligações químicas de carbono, oxigênio e hidrogênio das moléculas na matéria-prima. Quando as ligações entre essas moléculas são quebradas, a energia armazenada é liberada. E, de acordo com a matéria-prima, os biocombustíveis são classificados em quatro grupos: biocombustíveis de primeira (1G), segunda (2G), terceira (3G) e quarta geração (4G) [15].

Os biocombustíveis são uma excelente opção à substituição dos combustíveis fósseis derivados do petróleo, além do biocombustível à base de biomassa de celulose apresentar um ótimo rendimento de combustível, observou-se que o biocombustível à base de biomassa de celulose produz menos gases causadores do efeito estufa, em comparação com os combustíveis convencionais à base de petróleo. O combustível lignocelulósico tem a capacidade de minimizar a emissão de GEE em até 88%, e a emissão de dióxido de carbono quase a zero, enquanto

outros biocombustíveis, que não os lignocelulósicos, é de cerca de 13% [14].

Em razão as características químicas e morfológicas da biomassa lignocelulósica, que são constituídas de fibras de celulose envolvidas em uma matriz amorfa de polioses e lignina, a celulose apresenta estrutura bastante recalcitrante, difícil de ser desestruturada e convertida em monossacarídeos e em insumos químicos. A quebra da complexa estrutura da parede celular da biomassa lignocelulósica é uma etapa crucial e devido a essa dificuldade na estrutura da biomassa, muitos processos de produção têm sido desenvolvidos no intuito de converter os carboidratos presentes na biomassa em açúcares fermentáveis e buscando por melhores rendimentos e menores custos de processamento [16].

Devido à difícil degradação da biomassa, etapas de pré-tratamento, hidrólise e fermentação são necessárias para expor o conteúdo de celulose e hemicelulose à hidrólise enzimática ou química, para produzir açúcares simples que são fermentados para produzir biocombustíveis, uma vez que a estrutura cristalina da celulose é modificada, a hemicelulose é despolimerizada e a lignina pode ser removida [17]. O pré-tratamento é uma das etapas mais caras da produção do bioetanol 2G, e o consumo de energia é alto, chegando a representar 48% do custo total da operação [18]. E também é uma etapa necessária na síntese de biocombustíveis 3G para o rompimento de células de algas [19], para extração ou para conversão química de compostos intracelulares como proteínas, carboidratos, lipídios, oligossacarídeos, pigmentos etc [20].

Os pré-tratamentos podem ser classificados como físicos, químicos e biológicos. Os pré-tratamentos físicos são moagem [21], extrusão [21], plasmas [22] e micro-ondas [21]. Os pré-tratamentos químicos são ácidos diluído alcalino [21], líquidos iônicos [21], organosolv [21] e ozonólise [23, 24]. Como pré-tratamentos biológicos temos, por exemplo, fungos [21]. Em alguns casos, a combinação dos pré-tratamentos acima é necessária.

O pré-tratamento por micro-ondas tem atraído a atenção de pesquisadores nos últimos anos como uma alternativa físico-química verde. 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 (Figura 1.1), 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 (Figura 1.1). 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.

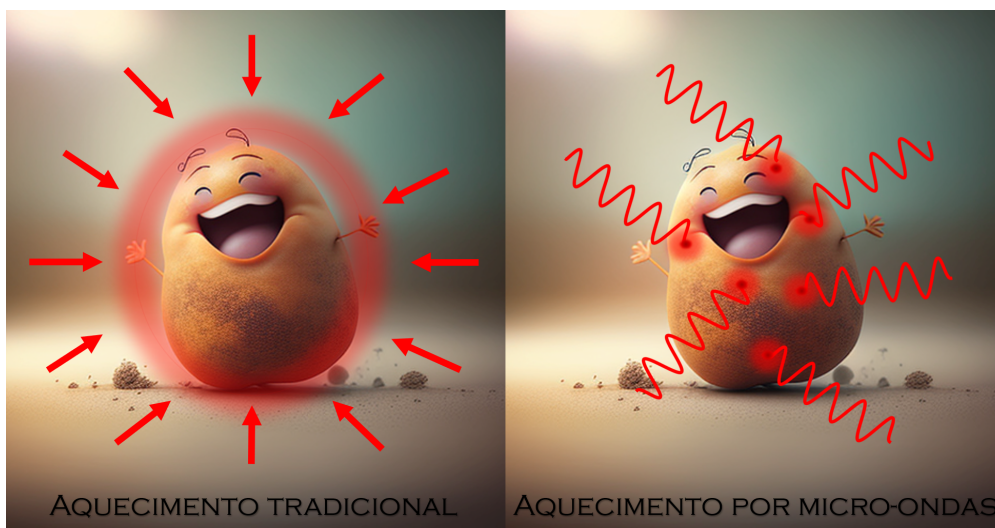


Figura 1.1: Diferença entre o aquecimento convencional e o aquecimento por micro-ondas.

Como parte da construção do primeiro RADAR de micro-ondas, o primeiro magnetron foi desenvolvido por Randall e Booth na Universidade de Birmingham, na Segunda Guerra Mundial. Desde então, o uso do micro-ondas experimentou uma grande disseminação em muitos outros campos, como medicina, análise elementar, síntese orgânica, secagem de alimentos, esterilização, nanotecnologia e na cozinha, 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 [25,26]. Além de melhorar a qualidade e o rendimento dos produtos finais.

Durante o aquecimento por micro-ondas, também conhecido como aquecimento dielétrico, dois mecanismos são responsáveis por transformar a energia eletromagnética em calor. O primeiro, é o acoplamento do campo elétrico aplicado com os dipolos permanentes das moléculas de água da amostra a ser aquecida. No segundo mecanismo, a interação do campo elétrico se dá com os íons presentes na solução, promovendo sua condução e gerando calor pelo atrito dos íons durante seu movimento. Essa condução de íons depende do tamanho, carga e condutividade dos íons dissolvidos e da interação com o solvente.

Quando a biomassa lignocelulósica é aquecida por micro-ondas, a quebra da estrutura lignocelulósica é assegurada por colisões moleculares devido à polarização dielétrica. O movimento das partículas polarizáveis induz um aquecimento rápido das amostras e, portanto,

a temperatura e os tempos de processamento são reduzidos [21].

Vários trabalhos sobre pré-tratamento baseado em micro-ondas para conversão de biomassa foram realizados recentemente. A maioria das revisões disponíveis não analisa exaustivamente as técnicas de pré-tratamento físico-químico por micro-ondas para conversão de biomassa [27], que são cruciais para a geração sustentável de biocombustíveis. Este tipo de aquecimento de material não utiliza solventes nem produtos de separação [28].

Já no processo de secagem de alimentos, uma grande quantidade de energia é necessária para o aquecimento sensível e a mudança de fase para a remoção de água durante o período de queda da taxa de secagem. O processo de secagem por micro-ondas promove aquecimento volumétrico e geração interna de vapor. O calor da parte interna do alimento leva ao acúmulo de pressão de vapor interno, transportando a umidade para fora do alimento. Isso resulta em uma melhora significativa da qualidade do produto devido a uma notável redução do tempo de secagem. Foi observada redução no tempo de secagem de até 25–90% e aumento na taxa de secagem de 4–8 vezes em comparação com a secagem por convecção [29].

O forno de micro-ondas doméstico aquece alimentos de forma rápida e eficiente porque a excitação é uniforme nos 25–38 mm externos de um alimento homogêneo com alto teor de água. O alimento é aquecido de maneira mais uniforme, exceto em objetos densos e heterogêneos, do que geralmente ocorre em outras técnicas de cozimento [30].

Os fornos de micro-ondas domésticos são utilizados em escala laboratorial devido à sua fácil acessibilidade ao mercado; baixa manutenção e pelo sistema poder ser configurado de forma rápida e fácil [31]. Além disso, a maioria dos pesquisadores [31–33] modificaram o forno de micro-ondas doméstico para provar o conceito de aquecimento de biomassa sob micro-ondas, como: mostrar que recursos seletivos de aquecimento em escala de laboratório podem ser facilmente implementados para investigar a redução no tempo de processamento [34].

Uma desvantagem do forno de micro-ondas doméstico são os gradientes de temperatura substanciais dentro do forno, devido à cavidade multimodo, ou seja, distribuição não homogênea do campo elétrico [31]. A decomposição completa de uma dada biomassa no interior do forno é importante para a obtenção de produtos com boa qualidade e uniformidade. Caso contrário, a biomassa parcialmente decomposta compromete a qualidade do produto, além de aumentar o consumo de energia. Assim, a uniformidade na distribuição da temperatura dentro da cavidade é um ponto chave para estabelecer uma boa qualidade do produto, reduzir o consumo de material e economizar energia.

O efeito da distribuição não uniforme da temperatura em forno de micro-ondas doméstico multimodo foi estudado por Bradshaw et al. e Vadivambal et al. [35,36]. No reator vazio, a

distribuição do campo elétrico é mais uniforme, mas com alimentos, isto é, material dielétrico colocado dentro da cavidade, o campo elétrico é distorcido. O campo elétrico é altamente dependente do material dielétrico e de suas características térmicas e geométricas. A região de alto campo elétrico absorverá uma quantidade consideravelmente alta de energia de micro-ondas do que a amostra na região de densidade de energia elétrica baixa ou amortecida. A principal desvantagem associada à distribuição não uniforme da temperatura durante o aquecimento por micro-ondas são as regiões quentes e frias. Afeta não só a qualidade dos alimentos, mas também a segurança alimentar, quando os microrganismos podem não ser destruídos em locais frios.

Outra desvantagem da distribuição não uniforme de temperatura é a contribuição para a distribuição desigual de umidade durante o processo de secagem de biomassa, que resulta em complexidades no controle do processo e dificuldade em obter produtos finais de qualidade. Além disso, o alto poder de penetração das micro-ondas afeta o comportamento de transferência de calor e pode causar superaquecimento dos produtos, levando à queima, dependendo da natureza e geometria do material, propriedades dielétricas e design externo [37].

A fim de superar esses desafios, especialmente o aquecimento não uniforme, várias soluções vêm sendo propostas, como o uso de mesas giratórias, agitadores mecânicos, modificações no design do forno, na seleção adequada de materiais de embalagem, na adição de catalizadores, que podem atuar como absorvedores de micro-ondas, acelerando a taxa de aquecimento e aumentando a eficiência de absorção. Outros métodos de aquecimento que vem sendo estudados são o aquecimento com controle de fase, fornos de frequência variável e combinação de micro-ondas com outros métodos de aquecimento [38, 39].

A solução analítica das equações de Maxwell que descrevem o campo eletromagnético e a distribuição da temperatura em um forno de micro-ondas doméstico não está disponível. Para encontrar o campo elétrico e a distribuição de temperatura no forno de micro-ondas, é necessária uma simulação numérica, para encontrar, por exemplo, os pontos quentes e frios quando a cavidade é preenchida com um material dielétrico. Os parâmetros que caracterizam os materiais dielétricos são: a permissividade relativa  $\epsilon'$  (ou constante dielétrica), representando a capacidade do material de armazenar a energia absorvida do campo elétrico e o fator de perda relativa  $\epsilon''$ , indicando a capacidade do material de converter a energia armazenada em calor [40].

Simulações numéricas e modelagem computacional são ferramentas muito poderosas para auxiliar no cálculo das complexas equações eletromagnéticas de Maxwell acopladas a transferência de calor, transferência de massa ou mecânica dos fluidos. Neste trabalho, a



plataforma COMSOL Multiphysics (COMSOL Inc., Burlington, MA, EUA) foi usada para resolver as equações eletromagnéticas e de transferência de calor simultaneamente. O COMSOL já foi implementado com sucesso para modelar o aquecimento por micro-ondas e compará-lo com resultados experimentais por vários pesquisadores [41, 42]. Os limitados trabalhos de simulação publicados na literatura sobre aquecimento de biomassa por micro-ondas, os efeitos do tamanho de carregamento da amostra e a capacidade de calor específica não são totalmente compreendidos.

Neste trabalho, estudamos o uso de micro-ondas como método de pré-tratamento para aquecer amostras de madeira, bagaço de cana-de-açúcar, casca de laranja, óleo de palma e algas verdes, quando são colocadas em um forno de micro-ondas doméstico. O objetivo é otimizar o tratamento para evitar a formação de pontos quentes.

Determinamos a evolução do campo elétrico e da temperatura em função do tempo em amostras com diferentes formas, tamanhos e umidade, utilizando um forno de micro-ondas doméstico com frequência de 2,45 GHz no modo  $TE_{10}$  alimentado por um guia de ondas retangular. O modelo físico empregado é o "Forno Micro-ondas" incluído nos exemplos do software COMSOL Multiphysics, mas a forma e o tamanho das amostras de biomassa variam amplamente. Este estudo é importante não apenas para facilitar o processamento eficiente de material auxiliado por micro-ondas por meio da previsão das características de aquecimento esperadas, mas também para permitir a seleção dos parâmetros operacionais apropriados, por exemplo, o tamanho da amostra, a fim de maximizar o uso da energia de micro-ondas como pré-tratamento de biomassas.

A distribuição da temperatura e do campo elétrico, em várias amostras em momentos diferentes, foram desenhadas intuitivamente do ponto de vista qualitativo com o auxílio de imagens obtidas. Devido à composição não homogênea do material e da geometria, a reflexão das ondas eletromagnéticas resulta na formação de ondas estacionárias. Esse fenômeno de ressonância leva a um superaquecimento local, também conhecido como ponto quente. Pontos quentes em materiais podem ser controlados com a distribuição da incidência de micro-ondas em um sistema fechado, além de controlar a espessura adequada das amostras. Devem ser evitadas condições de formação de pontos quentes para evitar a queima da amostra, que pode influenciar na absorção de micro-ondas.

Para inferir quantitativamente a capacidade de uma determinada amostra de absorver a energia de micro-ondas, foi utilizada a razão entre a potência absorvida e a potência de entrada, denominada eficiência de absorção de potência (PAE). A razão do desvio padrão da temperatura interna e seu valor médio, ou seja, coeficiente de variação (COV) [43–45],

mede a uniformidade de distribuição da temperatura de uma amostra em um determinado momento. Quanto mais baixo for o coeficiente de variação (COV), melhor será a uniformidade da temperatura interna. Outro parâmetro importante é o coeficiente de avaliação abrangente (CEC) [46], que é a razão entre PAE e COV. O valor CEC pode medir a usabilidade das amostras em uma determinada condição. Amostras com maior valor de CEC, ou seja, alto PAE e/ou baixo COV, deve ser escolhida de acordo com as necessidades específicas do processo de micro-ondas [42, 46].

O presente trabalho foi estruturado em cinco capítulos, sendo o primeiro uma introdução ao tema, expondo a relevância, as motivações e os objetivos do trabalho. O capítulo 2 será destinado a caracterização das biomassas que foram estudadas no decorrer do trabalho, com o intuito de demonstrar a importância de cada uma no setor energético e na produção de biocombustíveis. O capítulo 3 apresentará uma revisão bibliográfica, onde serão apresentados os fundamentos do aquecimento por micro-ondas, bem como as equações governantes e todos os parâmetros que afetam o processo de aquecimento por micro-ondas, além de apresentar o modelo matemático desenvolvido para descrever a interação do campo eletromagnético com as biomassas. Os parâmetros utilizados na simulação e os resultados obtidos referente à cada biomassa serão discutidos no capítulo 4. O capítulo 5 apresentará as principais conclusões pertinente à pesquisa realizada.

## 2 Biomassas

A biomassa é uma fonte primária de energia, não fóssil, proveniente de resíduos florestais, resíduos orgânicos, atividades agrícolas, resíduos urbanos, matéria orgânica, algas marinhas e alimentos. É uma matéria prima de baixo custo e rápido acesso que armazena grande quantidade de energia, nas ligações químicas entre os átomos de carbono, oxigênio e hidrogênio. Sendo composta principalmente por celulose, hemicelulose e lignina, componentes constituintes da parede celular das plantas [47], visto que, suas quantidades variam de acordo com a espécie vegetal, a idade das plantas, a região de cultivo e o período de coleta. A Tabela 2.1 apresenta as principais fontes de biomassa segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) [48].

Tabela 2.1: Classificação das fontes de biomassa

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

Fonte: Extraído de ANEEL [48].

A biomassa é um recurso energético versátil, podendo ser utilizada como insumo alimentício para a produção de alimentos ou ração animal, na produção de bioprodutos como plásticos, lubrificantes, produtos químicos industriais e muitos outros produtos derivados do petróleo ou gás natural, além do seu aproveitamento como fonte de energia, como os biocombustíveis sólidos para geração de energia térmica, biocombustíveis líquidos utilizados em motores a combustão e geração de energia elétrica [7, 47, 49]. Sendo que, os resíduos de origem vegetal são as principais fontes para geração de energia.

Embora grande parte da biomassa seja de difícil contabilização, devido ao uso não-

comercial, estima-se que, atualmente, ela possa representar até cerca de 14% de todo o consumo mundial de energia primária. 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 [8].

Globalmente, a maior parte da energia consumida é proveniente dos combustíveis fósseis, em 2021, aproximadamente 83% do consumo de energia foi proveniente do carvão (27,17%), óleo (31,26%) e gás natural (24,66%), enquanto as energias renováveis (energia solar, eólica, hídrica, biomassa, geotérmica etc.) tiveram uma participação de 12,63% [2].

No cenário brasileiro, os combustíveis fósseis corresponderam, em 2021, à 54,6% do consumo de energia, enquanto as fontes renováveis foram de 44,29%, dando destaque a energia proveniente das hidrelétricas, que corresponderam à 28,17%, e os biocombustíveis que tiveram uma participação de 7,58% [2].

Já a matriz elétrica brasileira é composta principalmente por fontes renováveis de energia, representando, em 2021, 83,28% da geração de energia elétrica. A biomassa representa 8,75% de toda a matriz energética brasileira, com 615 empreendimentos, somando uma potência instalada de 16,2 GW, com destaque para o bagaço da cana-de-açúcar (71,91%), licor negro (19,59%) e resíduos florestais e lenha (5,32%). O potencial hidráulico, que domina esse setor, representou 59,15%, seguida pela eólica 12,08% e a solar 3,30%. Os combustíveis fósseis foram responsáveis por 16,72% da geração de energia elétrica [48].

A geração de eletricidade a partir de biomassa ocorre principalmente nos setores sucroalcooleiro, de papel e celulose, tendo como fonte a lixívia, arroseiro e nas agroindústrias que utilizam os resíduos correspondentes (bagaço de cana-de-açúcar, resíduos de madeira, licor negro e casca de arroz) [47]. Esses combustíveis, em sua maioria, são queimados e o calor é usado para acionar turbinas a vapor para produzir eletricidade. Dependendo do nível de eficiência energética das usinas, pode haver geração excedente de bioeletricidade, passível de ser comercializada. No entanto, uma parcela significativa, especialmente do setor sucroenergético, utiliza a biomassa com o objetivo de atender as demandas energéticas (calor e eletricidade) da unidade, com pouco ou nenhum excedente [50].

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. A escolha das rotas de extração e conversão é dependente da natureza física e composição química da matéria-prima

e do serviço energético requerido (aquecimento, eletricidade ou combustível). As principais tecnologias de aproveitamento energético da biomassa são representadas na Figura 2.1.

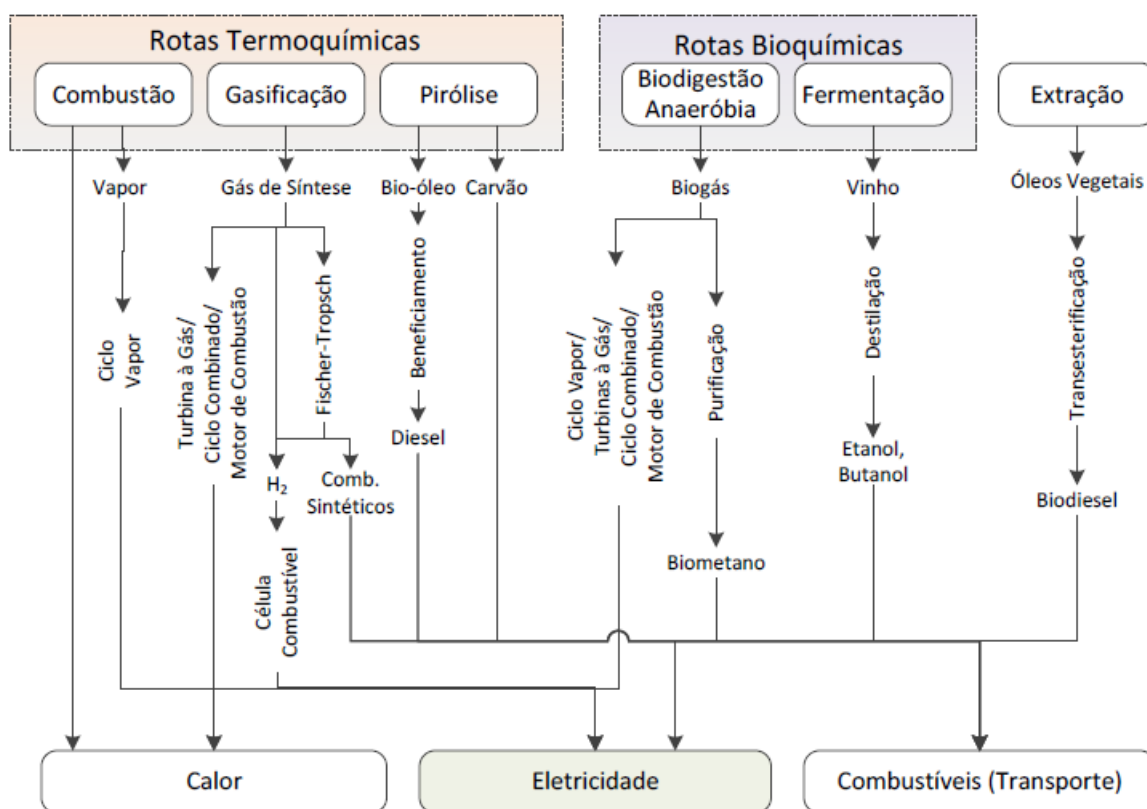


Figura 2.1: Representação esquemática das principais tecnologias de aproveitamento energético da biomassa [50].

Dentre as principais técnicas de conversão de biomassa para geração de calor e energia elétrica, os processos termoquímicos são os mais adequados. A rota termoquímica chama muito a atenção pela possibilidade de transformar materiais considerados de baixo valor agregado, como os resíduos agroindustriais e/ou sólidos urbanos, em produtos de maior valor comercial. Dentro dos processos termoquímicos, 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 (geração de vapor). Além de ser um processo muito ineficiente, a alta umidade e a baixa densidade energética do combustível dificulta o armazenamento e transporte [51].

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 [51]. O carvão, que é o principal produto da pirólise, tem uma densidade energética

duas vezes maior que o material de origem e queima em temperaturas muito mais elevadas [51]. 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 [52].

A gaseificação é o processo em que a biomassa é transformada em gás combustível, envolvendo vapor quente e ar, ou oxigênio, em quantidades inferiores à combustão. O gás combustível pode ser queimado diretamente em motores de combustão interna ou turbinas a gás para mover um gerador elétrico [51].

A rota bioquímica é voltada para a produção de biocombustíveis líquidos e gasosos. As principais tecnologias de conversão bioquímica são a digestão anaeróbia, fermentação, a hidrólise e o hidrotreatamento. Há ainda a transesterificação direcionada para a produção do biodiesel.

A fermentação/destilação e a hidrólise são rotas que apresentam as mais adequadas condições para produção de combustíveis líquidos derivados da biomassa, sendo a primeira, já tradicionalmente empregada no mundo todo para a produção de etanol e, em menor proporção, metanol, que pode ser usado como combustível (puro ou adicionado à gasolina) em motores de combustão interna [51].

Na digestão anaeróbia, o processo consiste na decomposição do material pela ação de bactérias na ausência de ar, como na pirólise. Em termos energéticos, o produto final é o biogás, composto essencialmente por metano (50% a 75%) e dióxido de carbono [51]. Há ainda os processos físicos, como a extração mecânica, que não são processos de conversão, embora sejam utilizados na produção de biocombustíveis.

A biomassa trata-se de uma das poucas fontes que pode facilitar, em curto prazo, a produção de energia em grande escala, de forma sustentável e tem o potencial de ser carbono-neutra (desde que tecnologias apropriadas de extração e conversão sejam utilizadas de forma sustentável). No entanto, a oferta de bioenergia depende primordialmente da matéria-prima que é utilizada, das propriedades do local, clima, sistema de gestão, intensidades de entrada e dos métodos específicos de extração ou conversão que sejam empregados.

O Brasil reúne, como nenhum outro país, condições plenas para viabilizar a produção e o uso sustentável de biomassa, tendo em vista suas condições climáticas favoráveis, ampla área agricultável com possibilidade de expansão de áreas com plantios energéticos sem competição com a agricultura de alimentos e grande disponibilidade de água. Essas vantagens, somadas a aperfeiçoamentos tecnológicos, projetam um cenário de potencial redução de custos e expansão da produção de bioenergia.

Dentre as principais fontes de biomassa que possuem potencial econômico para exploração industrial e geração de bioenergia, foram selecionadas, neste trabalho, as seguintes biomassas: bagaço de cana-de-açúcar, casca de laranja, óleo de palma, madeira e algas verdes, com o intuito de demonstrar a importância de cada uma no setor energético e industrial brasileiro.

## 2.1 Bagaço de Cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar (Figura 2.2), planta do gênero *Saccharum*, oriunda do sudeste asiático, é cultivada no Brasil desde 1532, trazida pelos colonizadores portugueses [53]. 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 [50].



Figura 2.2: Cana-de-açúcar (A). Fonte: extraído de [54]. Bagaço de cana-de-açúcar (B). Fonte: extraído de [55].

O Brasil é o maior produtor e exportador mundial de cana-de-açúcar [54], com estimativa para a safra 2022/2023, de 572,9 milhões de toneladas, em uma área de 8,17 milhões de hectares e produtividade média estimada de 70,484 kg/ha, 1,6% superior à obtida em 2021/22. A cana-de-açúcar é a matéria-prima mais importante na produção de açúcar. Em média, para se produzir 100 Kg de açúcar é necessária 1 tonelada de cana-de-açúcar [53]. A produção brasileira de açúcar deverá atingir 33,89 milhões de toneladas na safra 2022/23, sendo destinado 270 milhões de toneladas de cana-de-açúcar, cerca de 48,4% da produção total, para a produção de açúcar [55].

Segundo dados da Companhia Nacional de Abastecimento - Conab [55], a chamada Região Centro-Sul sucroalcooleira, formada pelos estados de São Paulo, Minas Gerais, Goiás, Mato Grosso do Sul e Paraná, é responsável por 90% da cana-de-açúcar processada no País, sendo que, a estimativa, só para o estado de São Paulo, é de aproximadamente 51% de toda

cana-de-açúcar colhida durante a safra 2022/23, 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. No Brasil, o etanol é produzido basicamente por cana-de-açúcar, sendo que, do total da produção de cana-de-açúcar, 49,3% é destinado a produção de etanol. A expectativa brasileira para a produção de etanol para a safra 2022/23, é de 25,83 bilhões de litros, uma redução de 2,2% em relação à safra anterior. O déficit na produção de etanol proveniente da cana será suprido pelo aumento na produção de etanol de milho [55].

Mesmo sendo a biomassa mais utilizada no país para a produção de etanol, a cana-de-açúcar produz muito menos etanol que o milho por peso. A cana tem cerca de 54% menos açúcares do que o milho e uma tonelada da "commodity" brasileira produz entre 85 e 90 litros de etanol [56]. Já uma tonelada de milho pode render mais de 400 litros de etanol. As principais diferenças entre o etanol de cana e de milho estão na forma de produção. O amido, um polissacarídeo de cadeia longa, presente no milho, precisa ser hidrolisado previamente para ser transformado em açúcar. Por isso, o processo de fermentação pode levar de 40 a 70 horas. O etanol da cana é mais fácil de ser extraído, já que a cana-de-açúcar é constituída, em sua maioria, por sacarose. Deste modo, o etanol da cana é produzido como subproduto da fermentação. Em média, a fermentação do açúcar da cana, para se transformar em etanol, leva de 10 a 12 horas [57].

Outra vantagem da cana-de-açúcar é a produtividade. Um hectare produz em média até 90 toneladas de cana, suficientes para produzir até 8 mil litros de etanol. Enquanto a mesma área de plantação de milho produz entre 15 e 20 toneladas, que podem se transformar em 3.500 litros de etanol [56]. Deste modo, a produção do etanol de milho ainda é ligeiramente mais cara. No entanto, o etanol produzido tanto pela cana quanto pelo milho não apresenta nenhuma diferença, isto porque independe da fonte, visto que as propriedades físico-químicas do etanol se mantêm as mesmas [58].

Com base nos dados da Agência Nacional de Energia Elétrica [48], 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, com a cana-de-açúcar é possível produzir vários tipos de produtos. A vinhaça, resíduo pastoso derivado da destilação, pode ser utilizada como adubo ou fertilizante e com a fermentação anaeróbica da vinhaça pode-se produzir o biogás [59]. Enquanto que o gás carbônico liberado durante o processo de fermentação é utilizado na fabricação de refrigerantes. A partir do processo de prensagem da cana para extração do caldo



é produzido o bagaço de cana-de-açúcar [57].

Segundo a Empresa de Pesquisa Energética [50], 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 [48], a potência instalada de biomassa em operação no País representa 9% da matriz elétrica brasileira, sendo que, dos 621 empreendimentos termelétricos que utilizam a biomassa como combustível no Brasil, 419 termelétricas utilizam o bagaço como biocombustível, representando aproximadamente, 71,97% da biomassa utilizada na geração de bioeletricidade e 6,48% da matriz energética brasileira, com uma potência outorgada de aproximadamente 12 GW, sendo superior à potência outorgada produzida pela usina de Belo Monte, que a média anual é cerca de 11 GW [48]. O teor energético para cada tonelada de bagaço, com 50% de umidade, é de aproximadamente 1,5 barril de petróleo ou 2,48 MWh [50].

Além disso, o bagaço pode ser utilizado na produção de ração animal, adubo e como matéria-prima na produção de etanol de 2<sup>a</sup> geração, e com a celulose obtida do bagaço é possível obter fibras têxteis, utilizadas na fabricação de tecidos.

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. Segundo a Empresa de Pesquisa Energética [50], 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

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. Pode 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 [60], 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 menos energia para produzir produtos líquidos e gasosos.

Supramono, Fachrizal e Devina [61], 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 [62]. 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.

## 2.2 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 [63]. 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 2.3), ambos com características diferentes. Para cada 100 toneladas de cachos de palma de óleo processados, são extraídas 22 toneladas de óleo de palma e 2 toneladas de óleo de palmiste [64].



Figura 2.3: Fruto do óleo de palma. Fonte: Modificado de [67].

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 [65]. O óleo de palma é utilizado em 50% dos produtos industrializados vendidos em supermercados europeus [66]. 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 [65].

A produção mundial de óleo de palma, até outubro de 2022, foi de 76,16 milhões de toneladas, 36% da produção mundial dentre os principais óleos vegetais, enquanto a produção de óleo de soja, segundo óleo mais produzido no mundo, representou 28% da produção. Já o óleo de palmiste representa 4,14% da produção de óleo vegetal, sendo o 5º óleo mais produzido, com estimativa de produção de 9,08 milhões de toneladas para esse mesmo período [67].

Os maiores produtores de óleo de palma são a Indonésia (59%) e Malásia (25%), que juntas são responsáveis por 84% da produção mundial. Enquanto o Brasil contribui com apenas 1% da produção mundial, ficando na 10ª posição, com produção de 570 mil toneladas de óleo de palma em 2022, 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, sendo responsável por 82% da produção, seguido pela Bahia, com 16% [68].

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. No Brasil, a oleaginosa mais utilizada na produção de biodiesel (B100) é o óleo de soja, representando 72,1% da produção em 2021, enquanto o óleo de palma juntamente com outros óleos vegetais, representaram neste mesmo período, apenas 4,1% [69].

O óleo de palma 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 [70]. Em 2020, cerca de 327 milhões de hectares de terra foram destinados para a produção de oleaginosas em todo o mundo. O óleo de palma produziu cerca de 36% de óleo em apenas 8,78% da área destinada a plantação. Só a Indonésia e a Malásia responderam por aproximadamente 63% do uso. Enquanto que a soja em aproximadamente 38,80% da área destinada ao cultivo de oleaginosas produziu cerca de 28% de óleo [71]. 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 [64], 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 [72].

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 à natureza [73].

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. [74], 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 [75], 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, reduzindo 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 [31], 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, ocasionando, conseqüentemente, um aquecimento não uniforme, gerando produtos de baixa qualidade. Os autores 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.

## 2.3 Madeira

A lenha (Figura 2.4) 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 cobrem aproximadamente  $1/3$  da superfície terrestre global, equivalente a 4,06 bilhões de hectares. Sendo a Ásia, o continente com a maior área de florestas plantadas [76]. Já as florestas naturais ocupam 3,75 bilhões de hectares, cerca de 31% das terras e representam 93% da área ocupada por florestas no mundo. Neste cenário, a Rússia (20,1%), o Brasil (12,2%), o Canadá (8,5%), os Estados Unidos (7,6%) e a China (5,4%) responsáveis por 54% de toda área de florestas



naturais, enquanto que as florestas plantadas totalizam 294 milhões de hectares, representando 7% de toda área plantada do mundo.



Figura 2.4: Madeira. Fonte: extraído de [79].

O Brasil é o país com a maior área de florestas tropicais do mundo, cerca de 59% do território nacional. Já as áreas para plantios agrícolas ocupam em torno de 8% das terras, enquanto as florestas plantadas representam cerca de 1,17% do território brasileiro. Em 2020, a área plantada de florestas energéticas foi de 9,98 milhões de hectares, representando 90% de toda madeira em tora produzida para fins industriais, 81,5% do carvão vegetal e 62,3% de lenha [76]. Dos quais, 34% das florestas plantadas pertence às empresas de celulose e papel, enquanto 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, 9,55 milhões de hectares de áreas plantadas foram de uso industrial, cerca de 216,6 milhões de m<sup>3</sup> [77].

As principais espécies de madeira cultivadas no Brasil, para suprir as necessidades das indústrias madeireiras, em 2020, são o eucalipto (78%) e o pinus (20%). Os plantios de eucalipto ocupam 7,47 milhões de hectares de área plantada, com produtividade média anual em torno de 36,8 m<sup>3</sup>/ha ao ano, sendo o estado de Minas Gerais responsável por 27,6% de toda área plantada de eucalipto do País. Já os plantios de pinus ocupam 1,7 milhões de hectares, com produtividade 30,4 m<sup>3</sup>/ha ao ano, sendo o estado do Paraná responsável por 43% da plantação. Além desses cultivos, 382 mil hectares são destinados as plantações de outras espécies, entre elas a seringueira, acácia, teca e paricá [77].

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 [78]. Em 2021, a produção total de lixívia foi de 35,4 milhões de toneladas, sendo que, só as indústrias de papel e celulose utilizaram 25,5 milhões de toneladas para cogeração [79].

Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica [48], a potência instalada de biomassa florestal em operação no País representa, aproximadamente, 2,33% da matriz elétrica brasileira, sendo que, dos 124 empreendimentos termelétricos que utilizam a biomassa florestal como combustível, 21 termelétricas são movidas a licor negro, com a capacidade instalada de 3,3 GW de potência, representando 19,39% da capacidade instalada em biomassa e 1,74% do parque gerador de energia elétrica, ficando atrás só da biomassa oriunda do bagaço de cana-de-açúcar. Cerca de 73 termelétricas utilizam os resíduos florestais como energia (na forma de cavacos ou serragem), totalizando uma potência instalada de 717.690 KW, representando 0,38% da matriz energética, enquanto a lenha representa apenas 0,12% da geração de energia, com potência instalada de 229.450 KW.

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 termo redutor, substituto do carvão mineral, durante a produção do ferro-gusa (liga metálica que dá origem ao aço) [8]. Segundo dados do Balanço Energético Nacional [79], em 2021, a produção total de lenha foi de 84,14 milhões de toneladas, sendo que 23,76 milhões de toneladas foram utilizadas na produção de carvão vegetal e 1,39 milhões de toneladas diretamente na geração elétrica. A geração de energia brasileira, proveniente do carvão vegetal, representa 0,02% da produção, sendo utilizado por 7 empreendimentos termelétricos, com uma potência instalada de 38.197 KW [48].

A qualidade da produção de carvão vegetal está diretamente relacionada às 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 e emite gases poluentes, como metano, etano, monóxido de carbono e dióxido de carbono, contribuindo para a poluição atmosférica [80].

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 [80].

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 [26,81]. Além disso, é uma alternativa para mitigação de emissões de gases do efeito estufa.

Miura et al. [82], 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 de o carvão ser utilizado como material absorvente.

Segundo a pesquisa realizada por LI et al. [83], 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. [33], mostrou que a pirólise por micro-ondas pode ser alcançada sem a adição de absorvedores de micro-ondas e 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 [26], que o processo de pirólise assistida por micro-ondas pode produzir mais produtos sólidos e gasosos do que os produtos líquidos, quando comparado à 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. Os autores 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.

## 2.4 Casca de Laranja

O Brasil é o maior produtor mundial de laranja (Figura 2.5), com safra 2021/2022 estimada em 16,9 milhões de toneladas, aproximadamente 34,5% da produção mundial. A maior parte da produção brasileira de laranja destina-se à indústria do suco, sendo responsável por 69,26% de todo o suco de laranja consumido no mundo [84]. Segundo a Pesquisa de Estimativa de Safra [85], o cinturão citrícola de São Paulo e Minas Gerais, é a região de maior produção de laranja no país, com estimativa para a safra 2022/2023 de 316,95 milhões de caixas, de 40,8 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 [86], 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 [87], minimizando os impactos ambientais.



Figura 2.5: Laranja. Fonte: extraído de [90].

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 [87, 88].

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, floculantes, 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 [89].

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 [87] (Tabela 2.2).

Tabela 2.2: Teor de pectina de algumas frutas

<b>Fruta</b>	<b>Pectina (%)</b>
Maçã	0,5 – 1,6
Biocombustíveis líquidos	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 [89].

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 [90].

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 [91]. 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 [92].

Yu e Sun [91], 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. [93]. 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. [94], 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.

## 2.5 Algas Marinhas

As algas (Figura 2.6) são organismos fotossintéticos, predominantemente aquáticos, que usam a energia da luz solar para sequestrar dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e água da atmosfera e converter em biomassa (energia química) através do processo de fotossíntese. Além de produzir moléculas orgânicas, as algas produzem oxigênio como subproduto da fotossíntese, cerca de 30 a 50% do oxigênio líquido do planeta [95].

Existem aproximadamente 100.000 espécies de algas, cada uma com seu próprio conjunto distinto de propriedades. As algas têm muitos tipos de ciclos de vida e variam em tamanho de espécies microscópicas (o picoplâncton tem entre 0,2 a 2 micrômetros de diâmetro) até algas gigantes que podem atingir 60 metros de comprimento. A grande maioria das espécies é unicelular podendo formar colônias filamentosas, ou colônias sem forma definida, mas também podem ser encontradas espécies multicelulares. O termo geral “algas” abrange organismos procarióticos (sem núcleo), conhecidas como cianobactérias ou algas verde-azuladas, bem como organismos eucarióticos (portadores de núcleos) que englobam todas as outras espécies de algas [95,96]. O termo “microalgas” é geralmente usado tanto para cianobactérias quanto para organismos fotossintéticos unicelulares, com um diâmetro de tamanho de célula na faixa de 1 a 100 microns.

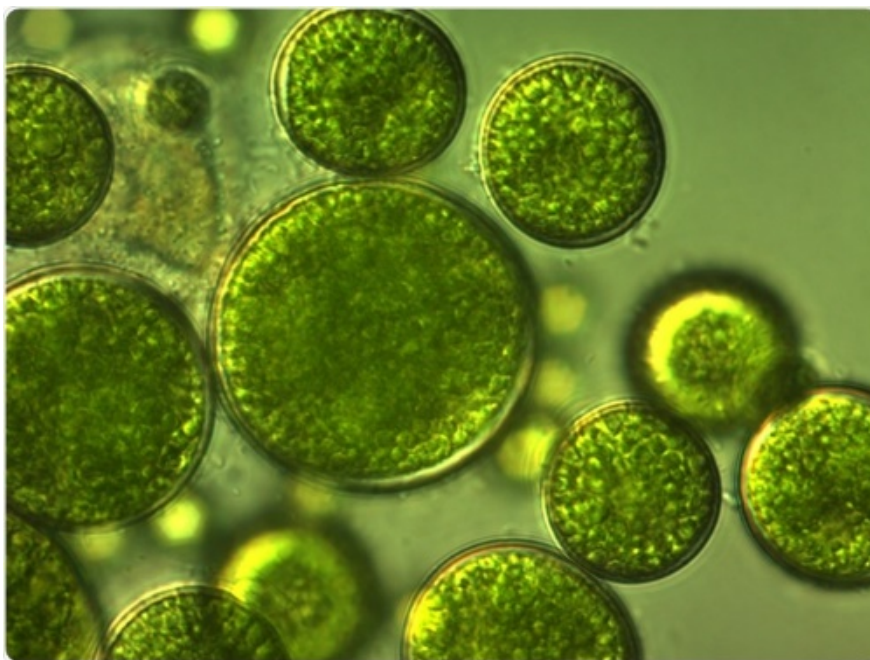


Figura 2.6: Algas verdes. Fonte: Extraído de [102].

A composição bioquímica das microalgas está relacionada à natureza de cada espécie, bem como aos fatores ambientais relacionados à região e o meio de cultura empregado. Desta forma, as microalgas podem ser utilizadas como precursores para a síntese de vários produtos importantes. Devido a essa diversidade de produtos existentes, estas exercem funções importantes em vários ramos, por exemplo, nos ambientes em que ocorrem, formam a base energética da cadeia alimentar de todos os organismos aquáticos; melhoram a acidificação oceânica; provisão de habitat e proteção da costa. Também são usadas para produzir ração animal, produtos químicos, papel, fertilizantes, produtos farmacêuticos, tratamento de águas residuais, cogeração de energia (eletricidade e calor), biocombustíveis e outros produtos renováveis, e até mesmo para testar a toxicidade biológica para a saúde humana e ambiental, além de serem importantes na captura ou sequestro de carbono. Muitas partes da Ásia e nos países ocidentais as algas são valorizadas como alimento [97].

A principal vantagem das microalgas é que elas são capazes de tolerar condições extremas e florescer em quase todos os ambientes da Terra. Podem crescer tanto em lagos de água doce ou em oceanos, também podem suportar variações de temperatura, diferentes concentrações de oxigênio ou dióxido de carbono, acidez e turbidez. Algumas espécies podem prosperar em lama, pedras, tronco de árvores, terras degradadas, em outras algas e plantas. Além da capacidade de crescer em terras não produtivas e usar água de baixa qualidade, como águas residuais agrícolas, industriais e municipais, o cultivo é independente das estações do ano, e tem um impacto ambiental mínimo.

Como a maioria das algas tem elevado potencial fotossintético, apresentando alta eficiência no processamento de açúcares de fontes celulósicas, em comparação com outros organismos e por auxiliarem na remoção do dióxido de carbono de gases emitidos pela queima de combustíveis fósseis, sendo responsáveis por mais de 40% da fixação global de carbono [98], são uma excelente alternativa para a redução das emissões dos gases do efeito estufa e uma boa opção para sistemas de produção de bioenergia. As microalgas não competem com culturas alimentares por terras aráveis ou abastecimento de água, eliminando as discussões sobre alimentos versus combustíveis [96].

As microalgas são um dos candidatos mais promissores na substituição dos combustíveis fósseis, principalmente devido a sua maior taxa de crescimento, podendo duplicar de tamanho cerca de 1-3 vezes por dia [99], com eficiência fotossintética 50 vezes maior do que as plantas terrestres, podendo ser utilizadas na produção de uma infinidade de biocombustíveis, como etanol, bioquerosene, biodiesel, hidrogênio, bióleo, metano e na produção de gás de síntese (mistura de hidrogênio e dióxido de carbono) [100].

Todas as algas têm a capacidade de produzir óleos ricos em energia, além de sintetizarem e acumularem, de forma natural, quantidades significativas de lipídios, 20-50% do peso seco, mas sob certas condições algumas espécies podem atingir 90% [98], o teor de óleo é aproximadamente 30 vezes maior do que as matérias-primas convencionais utilizadas nos processos de 1G e 2G. E o óleo vegetal extraído das algas pode ser usado diretamente (óleo vegetal puro que é esterilizado em biodiesel) ou refinado de forma semelhante aos processos e tecnologias existentes usados para outras matérias-primas para a produção de biocombustíveis, cosméticos, plásticos e bioquímicos. [101].

Os biocombustíveis derivados de algas são considerados atóxicos e altamente biodegradáveis, com elevado retorno energético e atendem simultaneamente tanto as questões ambientais como de demanda e produção [101]. Além de que, são considerados combustíveis *drop-in*, ou seja, substituem diretamente os combustíveis à base de petróleo sem necessidade de modificação dos motores, já que apresentam propriedades análogas aos combustíveis fósseis, e atendem a todas as especificações necessárias para a substituição desses combustíveis.

Apesar das vantagens apresentadas, ainda não é possível alcançar a viabilidade econômica para a produção de biocombustíveis de microalgas como opção para a substituição dos combustíveis fósseis, principalmente devido ao elevado custo de produção, em função da falta de um processo econômico que integra as etapas associadas com a colheita, extração e conversão de biomassa proveniente das microalgas em biocombustíveis.

Vários métodos podem ser usados, dependendo do tipo de microalga e da natureza do

produto a ser obtido. Para a produção de biocombustíveis, lipídios e ácidos graxos devem ser extraídos da biomassa de microalgas. Métodos de extração como ultrassom e micro-ondas foram estudados por Cravotto et al. [102] para extração de óleo de origem vegetal, incluindo um tipo de microalga. Os autores compararam tempos de extração de óleo e rendimentos usando ultrassom e micro-ondas com aqueles resultantes de procedimentos convencionais. Os resultados indicaram que, em comparação com os métodos convencionais, esses novos métodos podem melhorar muito a extração de óleo com maior eficiência. Os tempos de extração foram reduzidos em até 10 vezes e os rendimentos aumentados em 50-500% com custos baixos ou moderados e com adição mínima de toxicidade.

Kumar et al. [103] estudaram a produção de biohidrogênio a partir de macroalgas marinhas por pré-tratamento de micro-ondas induzido por peróxido de hidrogênio ( $H_2O_2$ ). Os resultados mostraram que as micro-ondas combinado com  $H_2O_2$  em condições ácidas provou ser um processo viável para melhorar a liquefação e diminuir o período de desintegração e o consumo de energia de micro-ondas durante o processo de produção de biohidrogênio.

Patil et al. [104] estudaram o efeito da irradiação de micro-ondas na extração e transesterificação simultânea de óleos de algas para biodiesel a partir de biomassa seca de algas. Um alto grau de extração de óleo/lipídios da biomassa seca de algas e uma conversão eficiente dos óleos/lipídios em biodiesel foram demonstrados em um conjunto de execuções experimentais. Segundo os resultados apresentados, o método reduz os requisitos químicos, de energia, tempos de reação, o volume do solvente, extração e sedimentação, quando comparado ao método convencional, com etapas separadas de extração por solvente e transesterificação catalítica.

## 2.6 Biocombustíveis

Biocombustíveis, como o nome sugere, são os combustíveis derivados de fontes biológicas como plantas, animais, micróbios, que são biodegradáveis, não tóxicos e ambientalmente seguros. Os recursos de biomassa podem ser considerados como a matéria orgânica, incluindo algas, árvores e culturas, na qual a energia solar é armazenada durante a fotossíntese nas ligações químicas de carbono, oxigênio e hidrogênio nas moléculas da matéria-prima. Quando as ligações entre essas moléculas são quebradas, a energia armazenada é liberada [15].

Empregados em motores a combustão interna ou para a geração de energia elétrica, os biocombustíveis podem substituir parcial ou completamente a utilização de combustíveis derivados de petróleo e gás natural. Por serem biodegradáveis, e possuírem baixo teor de enxofre e compostos aromáticos, os biocombustíveis causam menos impactos ao meio ambiente e podem



trazer soluções alternativas para auxiliar na descarbonização do segmento do transporte, que é o responsável por uma grande parcela das emissões dos gases causadores do efeito estufa [105].

De acordo com a matéria-prima, os biocombustíveis podem se dividir em quatro grupos: biocombustíveis de primeira, segunda, terceira e quarta geração [14], ver Figura 2.7. Nos últimos trinta anos, o biocombustível de primeira geração (1G) tem sido amplamente utilizado. Esses biocombustíveis incluem óleo vegetal puro, biodiesel de esterificação de óleo vegetal ou óleos vegetais residuais, bioetanol de açúcar ou maturação de culturas de amido. Exemplos importantes de biomassa para a produção de bioetanol de 1G são: cana-de-açúcar, milho e beterraba sacarina. No entanto, essas fontes de matérias-primas não atendem à crescente demanda de energética mundial e podem competir com as culturas alimentares.

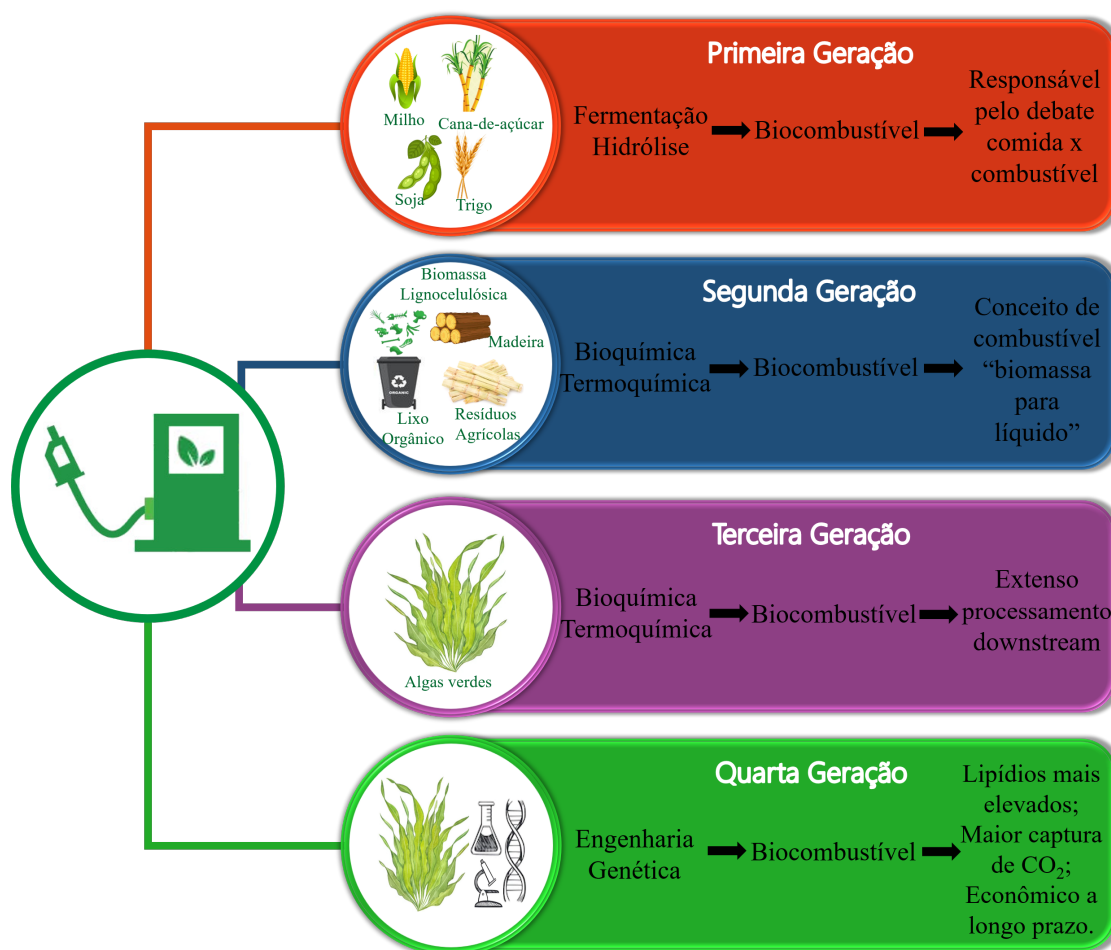


Figura 2.7: Gerações de biocombustíveis.

Entre os países que utilizam o bioetanol de 1G podemos citar o Brasil e os EUA. O Brasil desenvolveu o etanol de 1G a partir da fermentação do caldo de cana, enquanto os EUA utilizam o grão de milho para a produção de etanol, que é obtido após a hidrólise do amido, liberando as moléculas de açúcares que são transformados em álcool pelo processo de fermentação. Essas culturas primárias como matéria-prima para a produção de biocombustível

de 1G requerem um alto número de fertilizantes químicos e terras férteis para alcançarem o rendimento desejado. No que se refere ao mercado, a única matéria-prima da matriz energética com capacidade de competir com os combustíveis derivados do petróleo é a cana-de-açúcar, rica em sacarose.

A crescente crítica à sustentabilidade de muitos biocombustíveis de primeira geração chamou a atenção para o potencial dos chamados biocombustíveis de segunda geração (2G). Obtidos a partir de materiais lignocelulósicos (LCMs), como folhas, bagaço, gramíneas e palha, provenientes de resíduos agrícolas e florestais, bem como matérias-primas não alimentares, resíduos industriais, resíduos de óleo vegetal e culturas de biomassa ecológica. Estas matérias-primas não competem diretamente pelas matérias-primas básicas empregadas na alimentação e não requerem terras agrícolas adicionais, além de fornecerem uma proporção maior de biocombustível de forma sustentável e acessível, com maiores benefícios ambientais [106].

A biomassa lignocelulósica é a base para a produção de bioetanol de 2G, que é obtido por hidrólise e posterior fermentação, ou por processos termoquímicos, após os quais são utilizadas fermentação ou reações catalisadoras. A biomassa LCMs é uma das principais matérias-primas de carbono para fornecer energia ao setor de transporte para combustíveis leves e pesados. A sua utilização contribui para a melhoria da segurança energética, reduzindo a demanda por importações de petróleo, desenvolvimento agrícola e reduzindo as emissões de gases de efeito estufa [107]. Desta forma, os biocombustíveis de 2G podem oferecer um potencial considerável para promover o desenvolvimento rural e melhorar as condições econômicas em regiões emergentes e em desenvolvimento [106].

As limitações encontradas nos biocombustíveis 1G e 2G, como baixo retorno sobre os investimentos, levaram ao estabelecimento de biocombustíveis de terceira geração (3G). A matéria-prima dos biocombustíveis 3G são micróbios fotossintéticos como algas e cianobactérias.

Embora as algas sejam conhecidas por seus benefícios para a pele, que incluem proteção contra radiações UV e prevenção de textura áspera, rugas e flacidez [108], é a sua capacidade de produzir mais biomassa com menos recursos e por ser a fonte de biocombustível 3G que está chamando a atenção comunidade industrial e científica. Em contraste com as culturas usadas para biocombustíveis 1G ou 2G, elas têm uma densidade excepcionalmente baixa antes da colheita. As múltiplas vantagens das algas, como requisitos de baixa área e tolerância a condições adversas, as tornam uma boa opção para produção de biocombustíveis e mitigação de CO<sub>2</sub> [109]. A taxa de crescimento é cerca de 30 vezes mais rápida que as culturas que produzem alimentos e o teor de óleo é aproximadamente 30 vezes maior do que as matérias-primas convencionais de 1G e 2G [110].

Os três principais componentes das algas são lipídios (5-60%), proteínas (40-60%) e carboidratos (8-30%) em proporções variadas [111]. As algas podem ser uma fonte para a produção de bioetanol, uma vez que contêm uma boa quantidade de carboidratos na parede celular. Devido ao alto teor de lipídios de até 60% de seu peso, as algas também são uma boa fonte de biodiesel, produzido pela transesterificação de seus ácidos graxos [112]. A produção de bioquerosene é outro potencial e importante combustível obtido a partir de algas [113]. No entanto, o biocombustível de algas não compete hoje com as culturas alimentares em terras aráveis devido ao alto preço dessa tecnologia.

O biocombustível de quarta geração (4G) inclui organismos geneticamente modificados para aumentar a produção de biodiesel com a ajuda de um maior teor de lipídeos [114]. O objetivo é utilizar técnicas de bioengenharia para modificar o metabolismo e as propriedades das microalgas, macroalgas e cianobactérias para aumentar a eficiência fotossintética, melhorando a penetração da luz e reduzindo o número de etapas envolvidas na absorção e transformação da energia do sol no biocombustível, evitando processos de fermentação e grandes gastos com capital e processos operacionais. Esses processos visam simultaneamente produzir bioenergia e capturar e armazenar dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) durante as etapas de produção. Essa tecnologia de biocombustível 4G é um campo emergente e uma extensa pesquisa está sendo realizada para descobrir novas soluções para a conversão sustentável de algas em biocombustível [115].

Os dois principais biocombustíveis líquidos usados no Brasil são o etanol obtido a partir de cana-de-açúcar e o biodiesel, que é produzido a partir de óleos vegetais ou de gorduras animais [105]. O Brasil é o país com a maior experiência mundial no setor de biocombustíveis, sendo pioneiro no mundo na utilização do etanol em larga escala como combustível. A inserção do álcool e do biodiesel na matriz energética brasileira teve início da década de 1970, quando foi instituído pelo Governo Federal o Programa Nacional do Álcool – Proalcool [116].

### 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 3.1). 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.

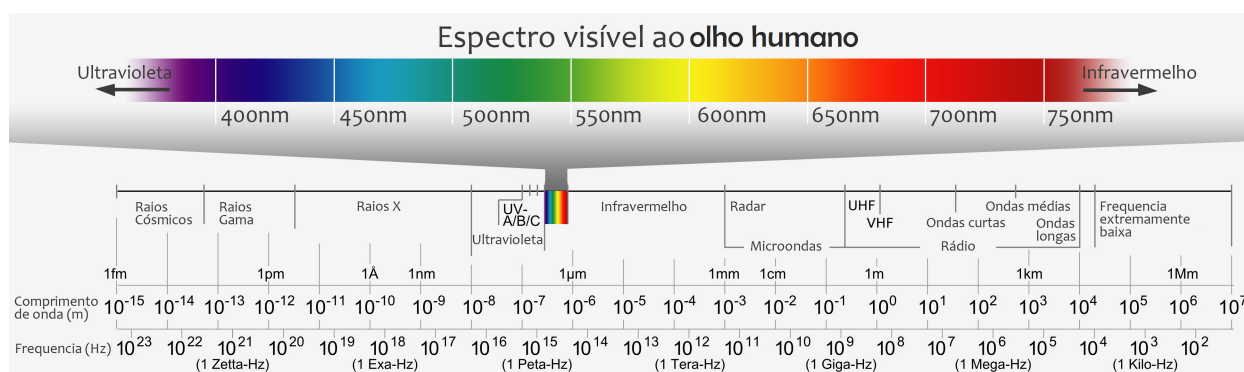


Figura 3.1: Espectro eletromagnético [117].

As ondas eletromagnéticas podem ser descritas pela sua frequência ( $f$ ), ou seu comprimento de onda ( $\lambda$ ), sendo relacionadas pela Equação (3.1):

$$c = \lambda \cdot f, \quad (3.1)$$

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

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 à agitação (Figura 3.2a).

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 3.2b) [117]. Na frequência de 2,45 GHz, o campo elétrico muda a orientação das moléculas de água  $10^9$  vezes a cada segundo, criando um calor intenso que pode aumentar tão rapidamente quanto  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  por segundo [118].

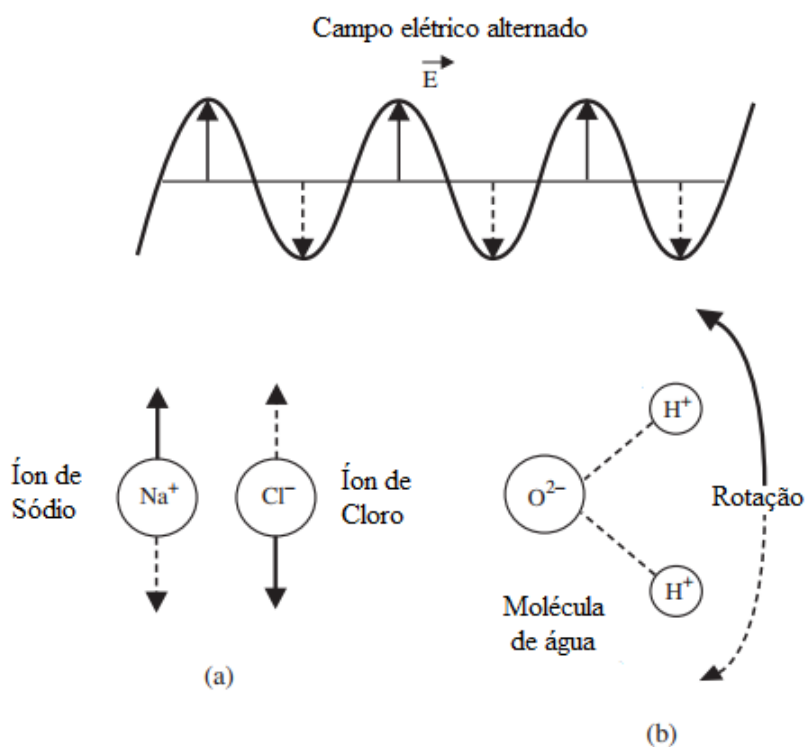


Figura 3.2: Interação das micro-ondas com os alimentos. (a) iônica. (b) dipolar. Fonte: traduzido de [118].

### 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 3.2 - 3.5):

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho, \quad (3.2)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0, \quad (3.3)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \quad (3.4)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial}{\partial t} \vec{D}, \quad (3.5)$$

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

As equações 3.2 e 3.3 descrevem a fonte de um campo elétrico ( $\rho$ ) sem um monopolo magnético como fonte do campo magnético. Por outro lado, as equações 3.4 e 3.5 mostram o acoplamento entre os campos elétrico e magnético.

Para incluir a interação do eletromagnetismo com a matéria as equações materiais ou relações constitutivas, descritas pelas Equações (3.6-3.8), devem ser adicionadas.

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \varepsilon \cdot \vec{E}, \quad (3.6)$$

$$\vec{B} = \mu_0 \mu \cdot \vec{H}, \quad (3.7)$$

$$\vec{j} = \sigma \cdot \vec{E}, \quad (3.8)$$

onde  $\varepsilon$  é a permissividade elétrica (interação da matéria não condutora com um campo elétrico) e  $\mu$  permeabilidade magnética (interação com um campo magnético) e  $\sigma$  a condutividade elétrica do meio. Os valores indexados a zero descrevem o comportamento do vácuo, de modo que  $\varepsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12}$  F/m é a permissividade elétrica no vácuo e  $\mu_0 = 1,257 \times 10^{-6}$  H/m é a permeabilidade magnética no vácuo. Em geral, todos esses parâmetros de materiais podem ser tensores complexos (com comportamento dependente da direção). No caso de substâncias alimentares, algumas simplificações são possíveis para a maioria dos usos práticos: como os alimentos se comportam de forma não magnética, a permeabilidade relativa pode ser definida como 1 e o tensor de permissividade pode ser reduzido a uma constante complexa com parte real ( $\varepsilon'$ ) e parte imaginária ( $\varepsilon''$ ), que pode incluir a condutividade  $\sigma$  [118].

As equações de onda correspondentes (para o campo elétrico ou magnético) podem ser facilmente derivadas, a partir das equações de Maxwell, com as seguintes simplificações: numa região em que há ausência de cargas ( $\rho = 0$ ) e densidade de correntes ( $\vec{j} = 0$ ). Aplicando o operador rotacional ( $\vec{\nabla} \times$ ) na equação 3.4, temos:

$$\vec{\nabla} \times (\vec{\nabla} \times \vec{E}) = -\vec{\nabla} \times \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial t} (\vec{\nabla} \times \vec{B}), \quad (3.9)$$

Utilizando a Equação (3.7) na Equação (3.5), temos:

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \mu \cdot \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}, \quad (3.10)$$

e substituindo na Equação 3.9:

$$\vec{\nabla} \times (\vec{\nabla} \times \vec{E}) = -\mu_0 \mu \cdot \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right). \quad (3.11)$$

Com base na identidade vetorial  $\vec{\nabla} \times (\vec{\nabla} \times \vec{X}) = \vec{\nabla}(\vec{\nabla} \cdot \vec{X}) - \nabla^2 \vec{X}$  e utilizando as Equações 3.6 e 3.2, temos:

$$\vec{\nabla}(\vec{\nabla} \cdot \vec{E}) - \nabla^2 \vec{E} = -\mu_0 \mu \varepsilon_0 \varepsilon \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right), \quad (3.12)$$

e sabendo que  $\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = 0$ , obtemos a equação de onda para o campo elétrico.

$$\nabla^2 \vec{E} - \mu_0 \mu \varepsilon_0 \varepsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0. \quad (3.13)$$

Analogamente, a equação de onda correspondente para o componente magnético pode ser obtido tomando o rotacional da Equação (3.10) juntamente com as Equações (3.7) e (3.2),

$$\vec{\nabla} \times (\vec{\nabla} \times \vec{B}) = \vec{\nabla} \times \left( \mu_0 \mu \varepsilon_0 \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) = \mu_0 \mu \varepsilon_0 \varepsilon \frac{\partial}{\partial t} (\vec{\nabla} \times \vec{E}), \quad (3.14)$$

Utilizando a identidade vetorial citada anteriormente e a Equação (3.4), obtemos a equação de onda para o campo magnético:

$$\nabla^2 \vec{B} - \mu_0 \mu \varepsilon_0 \varepsilon \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} = 0. \quad (3.15)$$

As Equações (3.13) e (3.15) podem ser comparadas com a equação de onda [118],

$$\nabla^2 f(\vec{r}, t) - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} f(\vec{r}, t) = 0. \quad (3.16)$$

de modo que, neste caso, a velocidade da onda pode ser descrita por:

$$c = \sqrt{\frac{1}{\mu_0 \mu \varepsilon_0 \varepsilon}} = \frac{c_0}{\sqrt{\mu \varepsilon}}, \quad (3.17)$$

onde  $c$  é a velocidade da luz no vácuo 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 natureza das possíveis soluções da Equação 3.13 pode ser ilustrada considerando o caso da chamada onda plana linearmente polarizada. Linearmente polarizada significa que, por exemplo, o campo elétrico consiste em apenas um componente, por exemplo, na direção  $z$  ( $E_z$ ). Se este componente depender apenas de uma coordenada local, por exemplo  $x$  (e o tempo), a onda é chamada de onda plana. Se os parâmetros do material forem adicionalmente independentes da frequência, então a Equação 3.13 se reduz a [118]:

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} E_z - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} E_z = 0. \quad (3.18)$$

Pode-se mostrar que todas as funções da forma  $f(kx \pm \omega t)$  resolve essa equação. Muitas vezes usadas como soluções também para o caso mais complexo (3.13) que são as funções harmônicas no tempo:

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \cos(\vec{k}\vec{x} - \omega t) \quad (3.19)$$

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \sin(\vec{k}\vec{x} - \omega t) \quad (3.20)$$

$$\vec{E} = \Re[\vec{E}_0 \exp(i(\vec{k}\vec{x} - \omega t))] \quad (3.21)$$

onde  $\vec{E}_0$  é a amplitude do campo,  $\vec{k}$  é o vetor de onda e aponta para a direção de propagação e  $\omega = 2\pi f$  é a frequência circular da onda, ambos estão relacionados por:

$$\vec{k}^2 = \frac{\omega^2}{c^2}. \quad (3.22)$$

Deve-se notar que as equações de onda separadas para os campos elétrico e magnético não podem substituir completamente as equações de Maxwell. Em vez disso, outras condições, listadas nas Equações 3.23 e 3.24, mostram a dependência entre os campos magnético e elétrico [118].

$$\vec{k} \cdot \vec{E}_0 = 0 \quad \vec{k} \times \vec{E}_0 = \omega \cdot \vec{B}_0 \quad (3.23)$$

$$\vec{k} \cdot \vec{B}_0 = 0 \quad \vec{k} \times \vec{B}_0 = -\omega \cdot \mu_0 \mu \cdot \varepsilon_0 \varepsilon \cdot \vec{E}_0 \quad (3.24)$$



Nesta teoria, a dispersão (a dependência da velocidade da luz sobre a frequência  $\omega$  nos materiais) está incluída. Para incluir a absorção dentro da matéria, uma permissividade complexa e com isso um vetor de onda complexo devem ser introduzidos. Quando adicionamos uma condutividade finita na Equação 3.11 é permitida, de modo que uma corrente ocorra  $\vec{j} = \sigma \vec{E}$ , em vez da equação de onda simples (Equação 3.13), a equação expandida 3.25 deve ser usada [118]:

$$\nabla^2 \vec{E} - \mu_0 \mu \sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} - \mu_0 \mu \varepsilon_0 \varepsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0. \quad (3.25)$$

Tomando as funções harmônicas de tempo para o campo elétrico como soluções acima, a Equação 3.25 se reduz a:

$$\nabla^2 \vec{E} + \omega^2 \mu_0 \mu \varepsilon_0 \left( \varepsilon - i \frac{\sigma}{\varepsilon_0 \omega} \right) \vec{E} = 0. \quad (3.26)$$

Esta equação mostra que uma condutividade finita é equivalente a um termo imaginário na permissividade. Considerando um exemplo de solução no caso de um material absorvente, onde a permissividade tem uma parte imaginária  $\varepsilon = \varepsilon' - i\varepsilon''_{total}$ , onde:

$$\varepsilon''_{total} = \varepsilon'' + \frac{\sigma}{\varepsilon_0 \omega}. \quad (3.27)$$

Então a onda plana harmônica no tempo tem que ser uma solução da equação a seguir:

$$\frac{\partial^2 \vec{E}_z}{\partial x^2} + \omega^2 \mu_0 \mu \varepsilon_0 (\varepsilon' - i\varepsilon''_{total}) \vec{E}_z = 0 \quad (3.28)$$

Para o componente magnético da onda plana  $H_y$  (que deve ser ortogonal ao campo elétrico  $E_z$ ), uma equação semelhante pode ser derivada, levando a uma solução geral com g, h, m e n constantes para satisfazer as condições de contorno:

$$E_z = g \cdot \exp[(ik + \kappa)x] + h \cdot \exp[-(ik + \kappa)x] \quad (3.29)$$

$$H_y = m \cdot \exp[(ik + \kappa)x] + n \cdot \exp[-(ik + \kappa)x] \quad (3.30)$$

A abordagem de solução das Equações 3.29 e 3.30 descrevem uma onda amortecida exponencialmente, com número de onda  $k$  e constante de amortecimento  $\kappa$ , ambas dependentes da permissividade  $\varepsilon$ . A comparação dos coeficientes resulta na Equação 3.31:

$$\omega^2 \mu_0 \mu \varepsilon_0 (\varepsilon' - i\varepsilon''^*) = (\kappa + ik)^2 \quad (3.31)$$

levando a

$$k = \omega \sqrt{\frac{\mu_0 \mu \varepsilon_0 \varepsilon'}{2}} \left[ \sqrt{\sqrt{1 + \left(\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}\right)^2} + 1} \right], \quad (3.32)$$

$$\kappa = \omega \sqrt{\frac{\mu_0 \mu \varepsilon_0 \varepsilon'}{2}} \left[ \sqrt{\sqrt{1 + \left(\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}\right)^2} - 1} \right]. \quad (3.33)$$

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% [119]. A profundidade de penetração é definida pela Equação (3.34):

$$D_p = \frac{1}{k} = \frac{1}{\omega} \cdot \sqrt{\frac{2}{\mu_0 \mu \varepsilon_0 \varepsilon' \left[ \sqrt{\sqrt{1 + \left(\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}\right)^2} - 1} \right]}}. \quad (3.34)$$

Com base na Equação (3.34) 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 ( $\vec{S}$ ),

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H} \quad (3.35)$$

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 (3.4) e (3.5) de Maxwell, temos:

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -i\omega\mu\vec{H}, \quad (3.36)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \sigma\vec{E} + i\omega\varepsilon\vec{E}. \quad (3.37)$$

A energia eletromagnética é convertida em calor quando interage com o material dielétrico. Esta conversão é governada pela quantidade de energia absorvida ( $P_{ab}$ ) no material, que é obtida tomando o divergente do vetor de Poynting médio ( $\vec{S} = \frac{1}{2}(\vec{E} \times \vec{H})$ ) e empregando as Equações (3.36) e (3.37) [31]:

$$P_{ab} = \frac{1}{2}\omega\varepsilon_0\varepsilon''|\vec{E}|^2. \quad (3.38)$$

Como não existe corrente de condução na cavidade de micro-ondas do forno e na amostra,  $\rho_e = 0$  e  $\vec{j} = 0$ . A equação de onda na cavidade de micro-ondas é dada por:

$$\vec{\nabla} \times \mu_r^{-1}(\vec{\nabla} \times \vec{E}) - k_0^2 \left( \varepsilon_r - \frac{i\sigma}{\omega\varepsilon_0} \right) \vec{E} = 0 \quad (3.39)$$

onde o número de onda no espaço livre  $k_0$  é definido por:

$$k_0 = \frac{\omega}{c}. \quad (3.40)$$

As biomassas, aqui tratadas como sólidas, interagem com o campo elétrico dentro do forno de micro-ondas e a energia é absorvida pelo material, ver Equação (3.38). Essa energia absorvida gera calor dentro da biomassa. Este calor é então transferido por condução para a região de baixa temperatura da amostra. Apenas a condução de calor na amostra foi considerada, e no entorno foi desprezada. Além disso, a evaporação da água da amostra também foi desprezada devido à baixa taxa de evaporação da água no período anterior à temperatura de transição de fase no ponto mais quente.

A equação da energia, utilizando a lei de Fourier de condução de calor ( $Q = -kA\frac{dt}{dx}$ ), pode ser expressa da seguinte forma [118]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \nabla^2 T + \frac{Q}{\rho C_p}, \quad (3.41)$$

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

$$Q = 2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon'' E^2 \quad (3.42)$$

Sabendo que a condutividade dielétrica  $\sigma = 2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon''$ , temos:

$$Q = \sigma E^2 = P_{ab} \quad (3.43)$$

Assim, a energia eletromagnética é a fonte de calor e seu acoplamento com a temperatura dentro da amostra é dado por:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + P_{ab}. \quad (3.44)$$

Se todos os parâmetros no termo da fonte de micro-ondas forem independentes da localização, esse termo é constante e sua contribuição é fazer com que a temperatura do material aumente linear e uniformemente com o tempo. É isso que dá origem à noção de aquecimento volumétrico. Se, além disso, a condição de contorno nas superfícies for representada por um coeficiente de transferência de calor por convecção e o meio circundante estiver na temperatura original do material, o material será mais quente no meio do que nas bordas. Isso dá origem à noção de que a energia das micro-ondas aquece de dentro para fora [118].

Da Equação (3.42), 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 (3.44), 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

As características eletromagnéticas de um material são os principais fatores na determinação do tratamento de aquecimento dielétrico e também são parâmetros essenciais para a simulação de computador do processo de aquecimento dielétrico. Para a maioria dos materiais dielétricos, a permeabilidade não apresenta nenhuma ou uma pequena contribuição para o aquecimento dielétrico e, portanto, geralmente não é considerada [120]. A permissividade é uma quantidade complexa usada para descrever as propriedades dielétricas relacionadas à reflexão das ondas eletromagnéticas nas interfaces e a atenuação da energia das ondas nos materiais. A expressão matemática para permissividade é:

$$\varepsilon = \varepsilon' - i\varepsilon'' , \quad (3.45)$$

onde  $\varepsilon'$  é a parte real conhecida como constante dielétrica e reflete a capacidade do material de armazenar energia elétrica, afetando a distribuição do campo elétrico e a fase das ondas que viajam através do material, enquanto  $\varepsilon''$  é a parte imaginária conhecida como fator de perda e está diretamente ligada na conversão de energia eletromagnética em calor, uma das propriedades mais importantes para o aquecimento por micro-ondas. A palavra “perda” é usada para indicar a quantidade de energia das micro-ondas que é dissipada para o aquecimento do material [120].

As propriedades dielétricas definem a interação dos materiais com o campo eletromagnético e essas interações podem acontecer de duas formas distintas: armazenamento de energia e dissipação de energia. O armazenamento de energia representa a troca de energia sem perdas entre o campo elétrico e o material, enquanto a dissipação de energia ocorre quando a energia é absorvida pelo material.

A relação  $\varepsilon''/\varepsilon'$  é chamada de tangente de perda (Equação 3.46):

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} , \quad (3.46)$$

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

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 gerado quando o material é submetido a radiação eletromagnética [118].

As propriedades dielétricas são as propriedades físicas mais importantes associadas ao aquecimento por micro-ondas, desta forma, é fundamental ter conhecimento das propriedades dielétricas dos materiais no desenvolvimento de produtos e processos e, especialmente, no aquecimento dielétrico. A necessidade de tal conhecimento torna-se ainda mais aparente com o avanço das ferramentas de modelagem computacional, que são cada vez mais utilizadas no projeto de sistemas de aplicação de micro-ondas e no desenvolvimento de processos de aquecimento [118].

Existem vários fatores que podem influenciar nas propriedades dielétricas, sendo a água

o componente predominante dos materiais biológicos, seu conteúdo influencia diretamente no aquecimento e juntamente com os sais, são os ingredientes mais importantes, apresentando as mais fortes interações com as micro-ondas. Portanto, as propriedades dielétricas são fortemente dependentes de suas concentrações. Outra propriedade importante no comportamento térmico de um alimento submetido à micro-ondas é o calor específico. Produtos com baixo calor específico podem aquecer rapidamente, e ainda mais rápido do que a água. Por exemplo, o óleo aquece mais rápido do que a água devido ao seu calor específico ser menos da metade do da água. Portanto, para materiais oleosos, a influência do calor específico torna-se o fator determinante no aquecimento por micro-ondas [118]. Outros fatores que podem influenciar nas propriedades dielétricas são a frequência, a temperatura e a porcentagem de umidade. A seguir, esses fatores são descritos com mais detalhes.

### 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 [121]. 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 3.3 mostra a variação das propriedades dielétricas ( $\epsilon'$  e  $\epsilon''$ ) da água em função da frequência [122]. 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

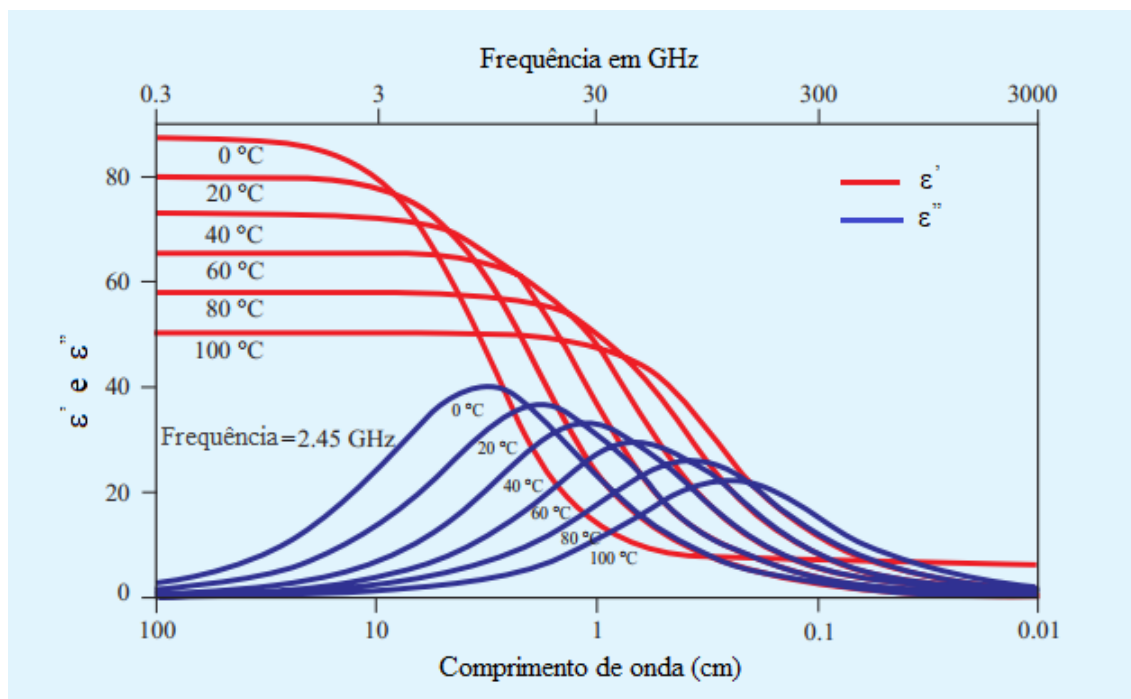


Figura 3.3: Variação das propriedades dielétricas da água em função da frequência. Fonte: traduzido de [126].

à queima, enquanto a superfície permanece mais fria [119]. 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) [118]. 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.

### 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 3.4, que mostra a variação de  $\epsilon'$  e  $\epsilon''$  em relação à porcentagem de umidade na amostra para o óleo de palma [74], 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 3.4, 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.

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 [118, 119].

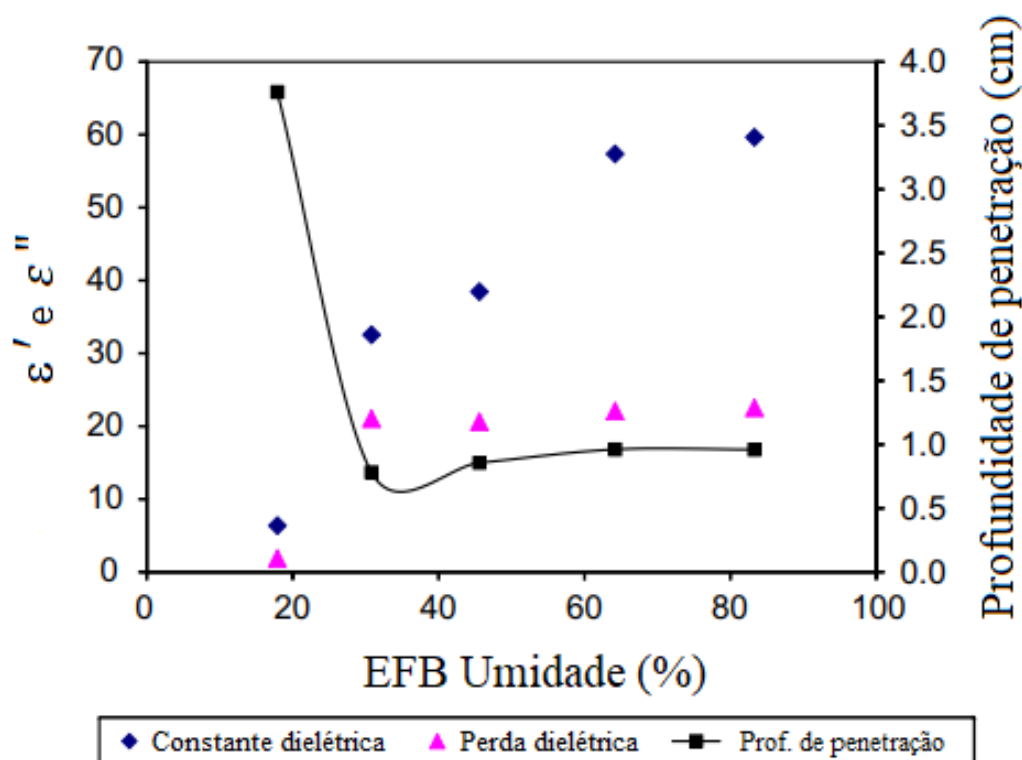


Figura 3.4: Constante dielétrica, fator de perda e profundidade de penetração em função do teor de umidade em 2.45 GHz. Fonte: traduzido de [74].



### 3.3.3 Temperatura

A Figura 3.5 mostra a influência da temperatura nas propriedades dielétricas  $\epsilon'$  e  $\epsilon''$  para diferentes alimentos na frequência de 2800 MHz [123].

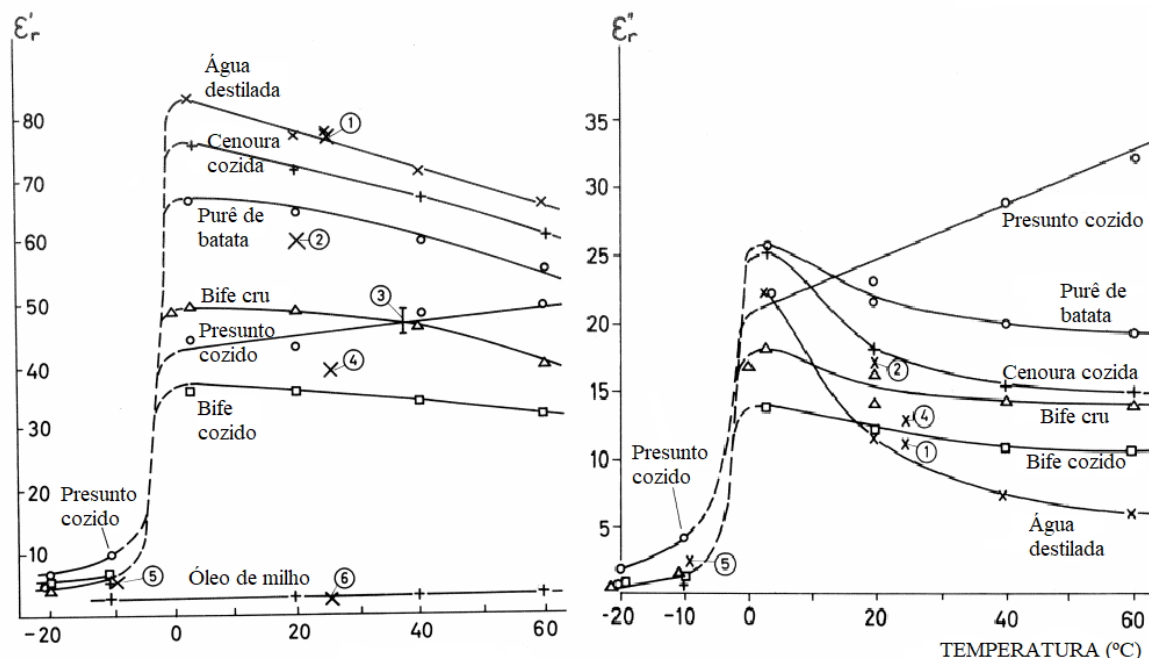


Figura 3.5: Constante dielétrica e fator de perda para diferentes alimentos em função da temperatura. Fonte: traduzido de [127].

Como pode ser observado na Figura 3.5, 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 [123].

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 [117].

### 3.4 Equipamento de Aquecimento de Micro-ondas

Os sistemas de aquecimento por micro-ondas consistem em três componentes principais e alguns acessórios para medição e controle. Os componentes principais são a fonte de energia de micro-ondas (gerador), o guia de ondas e o aplicador. A seguir, essas partes são descritas com mais detalhes.

#### 3.4.1 Magnetron

Os tipos de geradores de micro-ondas podem ser classificados em tubos de potência de micro-ondas, que incluem magnetrons e clístrons, e geradores de estado sólido. Em geral, o tubo magnetron é de longe a fonte de micro-ondas mais comumente usada para aplicações industriais e domésticas. O magnetron consiste em um tubo de vácuo com um catodo no centro e um anodo circular oco ao seu redor (Figura 3.6). 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 [118, 122].

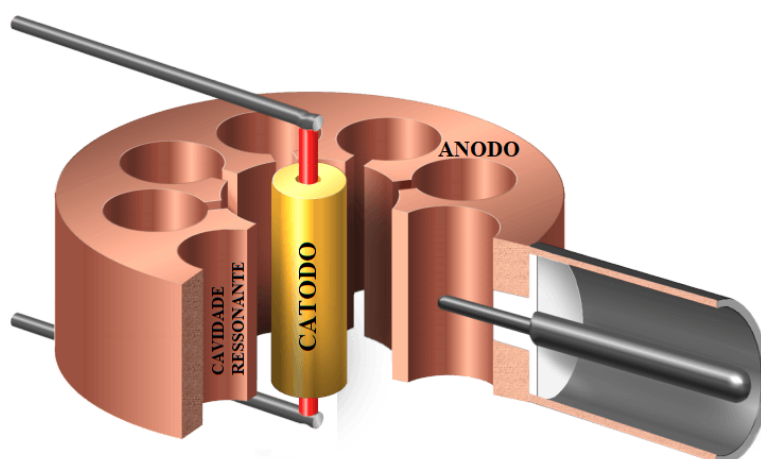


Figura 3.6: Diagrama esquemático do magnetron. Fonte: modificado de [128].

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 nuvem de elétrons (na faixa de frequência das micro-ondas) que por sua vez, leva a oscilações autossustentadas nas cavidades ressonantes [118, 122]. Se as cavidades ressonantes do magnetron forem ampliadas, a frequência emitida pelo magnetron será menor, já que a frequência de ressonância das cavidades diminuirá [124].

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 [121].

### 3.4.2 Guia de ondas

Um guia de ondas é uma estrutura capaz de conduzir energia eletromagnética ao longo de um determinado caminho. Os guias de ondas são condutores ocos de seção transversal normalmente constante, sendo as formas retangulares e circulares as mais utilizadas. Dentro do guia de ondas, a onda pode se espalhar nos chamados modos, que descrevem a direção do campo elétrico e magnético no sentido de propagação. Esses modos podem ser divididos em elétricos transversais ( $TE_{mn}$ ), onde apenas o campo elétrico transversal (perpendicular à direção de propagação) existe e não há componente longitudinal (ao longo da direção de propagação  $E_z = 0$ ) e magnéticos transversais ( $TM_{mn}$ ), em que o campo magnético na direção de propagação é zero ( $H_z = 0$ ) e o campo elétrico existe em todas as direções. Os sufixos  $m$  e  $n$  representam o número de semiciclos ao longo das direções das coordenadas normais à direção de propagação. O guia de ondas mais comum é de seção transversal retangular, geralmente projetados para suportar um modo  $TE_{10}$ , que é o modo de ordem mais baixa para guias de ondas retangulares [118, 125, 126].

Deve-se notar que para uma dada dimensão de guia de onda e modo de guia de onda (índices  $m$ ,  $n$ ), a propagação ao longo do guia de onda será possível apenas em uma faixa de frequência específica. A frequência mais baixa desse intervalo é chamada de frequência de corte, abaixo da qual as ondas não se propagam. Por exemplo, para o modo  $TE_{10}$  se propagar em um guia de ondas retangular sem atenuação, a largura deve ser de pelo menos metade do

comprimento de onda do espaço livre [126].

### 3.4.3 Aplicadores de micro-ondas

Existem três classes principais de aplicadores: ondas viajantes, aplicadores de campo próximo e ressonantes. Os aplicadores de ondas viajantes são simplesmente guias de ondas conectados a um gerador de micro-ondas de um lado e a uma carga de terminação do outro lado. No caso de aplicadores de campo próximo, as micro-ondas originadas de uma antena em forma de chifre ou matrizes de fenda 'atingem' diretamente o produto a ser aquecido. Aplicadores ressonantes (ou cavidades) são os tipos de aplicadores mais comumente usados. As cavidades ressonantes podem ser monomodo ou multimodo. Os aplicadores de modo único consistem geralmente em um guia de onda de alimentação e um ressonador de micro-ondas relativamente pequeno com dimensões na faixa do comprimento de onda. Cavidades multimodo são projetadas para suportar vários modos  $TE_{mn}$  e  $TM_{mn}$  simultaneamente. Os fornos de micro-ondas domésticos são um exemplo de cavidades multimodo. Apesar do alto número de modos estimulados, frequentemente se desenvolverá uma distribuição de campo não homogênea que é constante no tempo. Esta distribuição de campo depende principalmente da cavidade, da geometria do produto e das propriedades dielétricas do material a ser processado, normalmente é essa distribuição de campo não homogênea que resulta em um padrão de aquecimento não homogêneo, e conseqüentemente a formação de pontos quentes e frios nas amostras [118, 125].

## 3.5 Modelo Físico

Simulações numéricas e modelagem computacional são ferramentas poderosas para prever a distribuição do campo eletromagnético na cavidade e o comportamento de aquecimento de um material. Assim, essas ferramentas podem ser usadas para otimizar e desenvolver sistemas de aquecimento por micro-ondas mais eficientes. Neste trabalho, a plataforma COMSOL Multiphysics versão 4.3b Academic Class kit License (COMSOL Inc., Burlington, MA, EUA) foi usada para resolver as equações eletromagnéticas e de transferência de calor simultaneamente.

O COMSOL é um software de simulação interativo usado para modelar e resolver problemas científicos e de engenharia, que aplica o método dos elementos finitos para fornecer soluções numéricas para quantidades físicas e resolver equações diferenciais parciais em domínios com geometrias complexas. O método dos elementos finitos (FEM) é um método computacional em que um objeto é dividido em elementos pequenos, mas de tamanho finito. Cada elemento é tratado individualmente e a cada um é atribuída uma série de equações que representam

propriedades físicas, condições de contorno e forças impostas. Essas equações são então resolvidas simultaneamente para prever o comportamento do objeto em estudo [126].

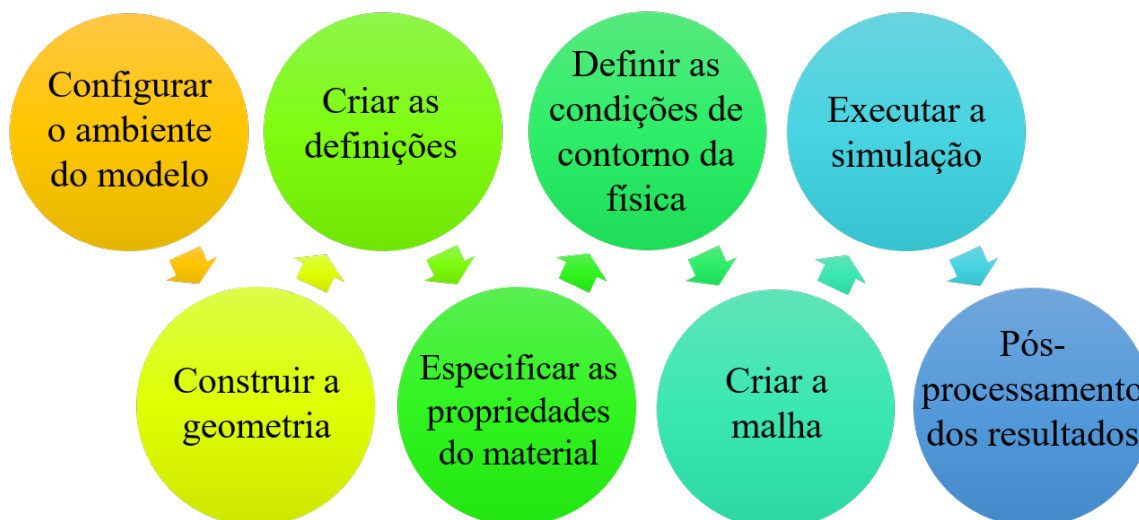


Figura 3.7: Processo de construção do modelo numérico no COMSOL Multiphysics.

A modelagem do processo de aquecimento por micro-ondas no COMSOL combina os recursos da interface de ondas eletromagnéticas com a interface de transferência de calor. A interação predefinida adiciona as perdas eletromagnéticas das ondas eletromagnéticas como uma fonte de calor. Essa interface é baseada na suposição de que o tempo do ciclo eletromagnético é curto em comparação com a escala de tempo térmico (suposição adiabática). A fonte de calor distribuída é calculada em uma análise eletromagnética estacionária no domínio da frequência (ondas eletromagnéticas harmônicas com o tempo e transferência de calor estacionária), seguida por uma simulação de transferência de calor transiente (ondas eletromagnéticas harmônicas de tempo e transferência de calor transiente) [127]. O processo de construção do modelo numérico é mostrado na Figura 3.7.

Vários estudos têm mostrado boa concordância entre os resultados obtidos usando a modelagem COMSOL e aqueles obtidos experimentalmente para processos envolvendo aquecimento por micro-ondas.

Salema e Afzal [31] simularam o aquecimento por micro-ondas de amostras de biomassa em forno de micro-ondas multimodo e validado com estudos experimentais. Foi demonstrado que a temperatura e o comportamento térmico das amostras são afetados pela altura da biomassa e capacidade térmica específica. Além disso, o modelo pode ser usado com sucesso para identificar pontos quentes e frios nas amostras durante o processo de aquecimento, permitindo a possibilidade de otimizar o projeto dos sistemas de aquecimento por micro-ondas quanto à uniformidade.

A investigação experimental da pirólise assistida por micro-ondas foi realizada com

sucesso usando um forno de micro-ondas doméstico especialmente modificado por Halim e Swithenbank [128]. Uma simulação usando o software COMSOL foi aplicada para prever como o campo eletromagnético se distribui dentro da cavidade e para estudar diferentes parâmetros que influenciam na distribuição de aquecimento dentro do forno de micro-ondas. O trabalho de simulação comprovou que a modelagem COMSOL, no aquecimento por micro-ondas, tem se mostrado simples e prática para uso como uma estrutura na previsão do perfil de temperatura da biomassa e intensidade do campo elétrico.

Lin et al. [129] estudaram o comportamento de aquecimento da amostra de carvão pelo software COMSOL. Os efeitos da frequência de micro-ondas, potência e posição da amostra em perfis de temperatura e distribuições de campo elétrico foram examinados. Mokhta et al. [130] utilizaram o COMSOL para estudar os efeitos da posição do guia de ondas e da unidade (alimentação única versus alimentação dupla) no campo eletromagnético e no perfil de distribuição de calor dentro da amostra.

A Figura 3.8 mostra o esquema do forno de micro-ondas utilizado no modelo físico. O modelo consiste em uma cavidade de forno de micro-ondas, um guia de ondas, uma bandeja de vidro e uma amostra de biomassa (com tamanhos e formas diferentes do mostrado). A cavidade e o guia de ondas retangular foram feitos de cobre e o tamanho da cavidade tem comprimento  $W_0 = 0,267$  m, largura  $D_0 = 0,270$  m e altura  $H_0 = 0,188$  m. O guia de ondas retangular tem comprimento  $W_g = 0,05$  m, largura  $D_g = 0,078$  m e altura  $H_g = 0,018$  m. A bandeja de vidro ( $R_p = 0,1135$  m) foi considerada um meio transparente para o campo eletromagnético de micro-ondas e, portanto, não absorve calor.

A geração de malhas é uma etapa importante na simulação, é ela que permite a discretização da geometria em pequenas unidades de formas simples. O valor da qualidade dos elementos da malha, que garantem a convergência da simulação e a obtenção de resultados precisos, é dado entre 0 e 1, onde 0,0 representa um elemento degenerado e 1 representa um elemento perfeitamente regular [131]. Neste modelo, todas as configurações de geometria apresentaram qualidade de malha de aproximadamente 0,64, o que é suficiente para obter resultados satisfatórios, levando-se em consideração o custo computacional [129]. A avaliação da qualidade do elemento de malha é mostrada na Figura 3.9.

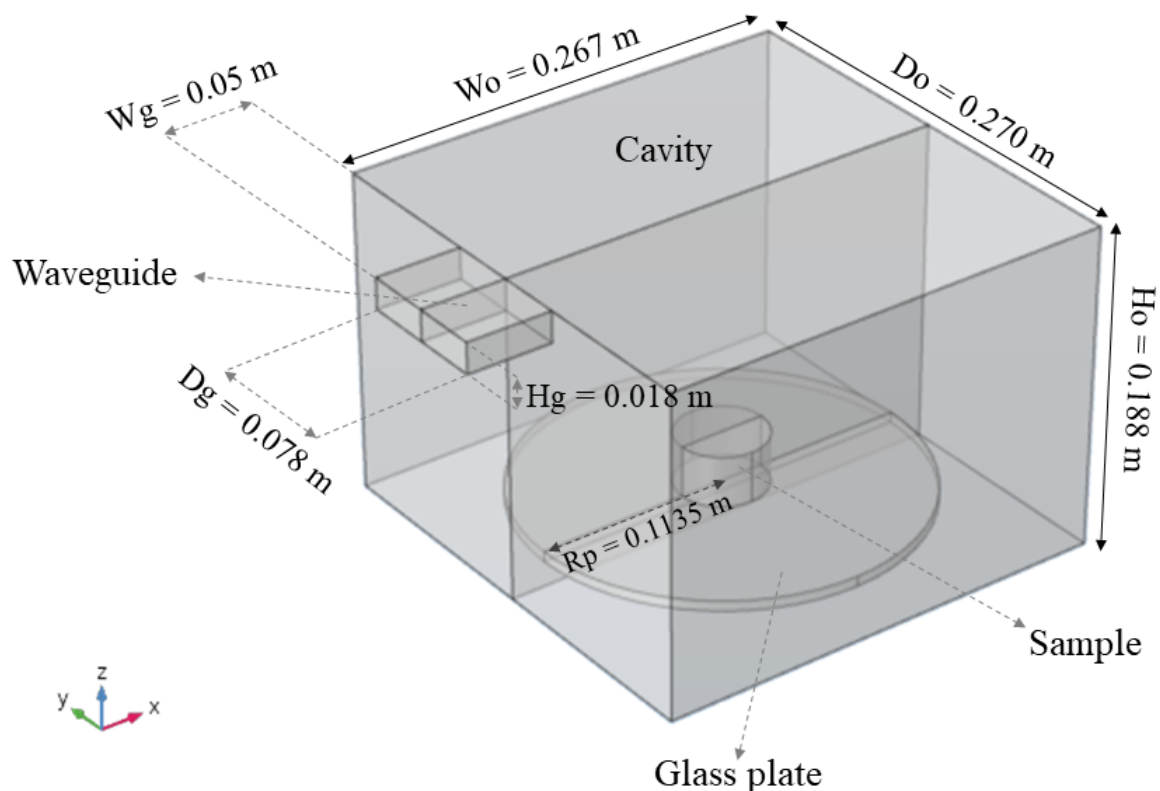


Figura 3.8: Esquema do forno de micro-ondas utilizado no modelo físico.

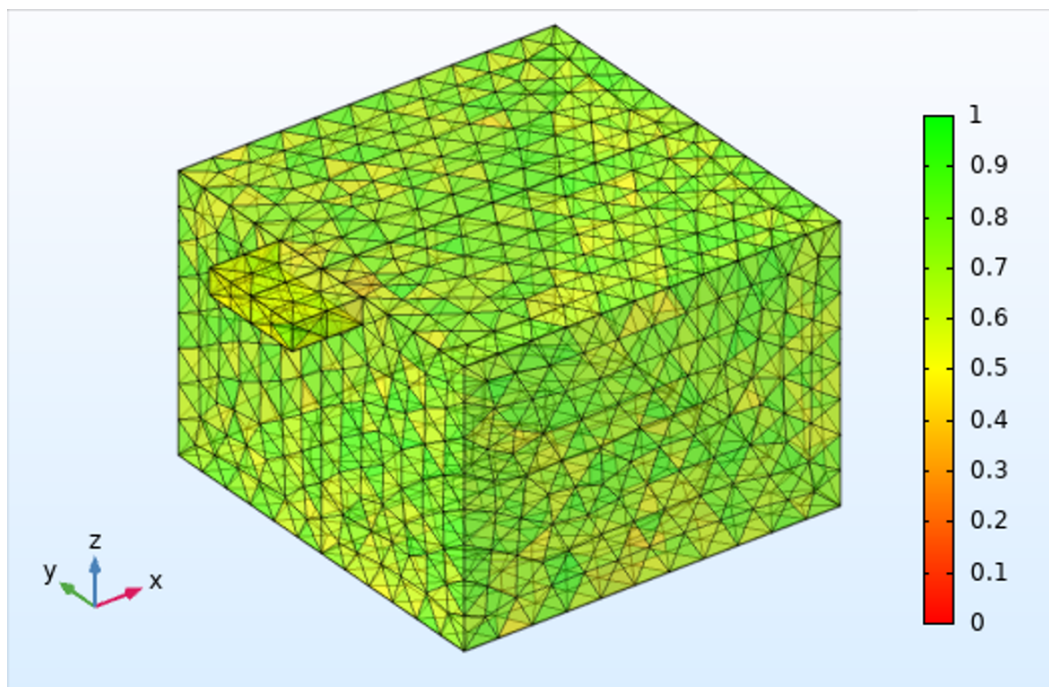


Figura 3.9: Avaliação da qualidade da malha para casca de laranja, cilindro 2, volume 2.

A malha foi controlada pelo gerador de malha livre disponível no COMSOL, o modelo é construído por malhas tetraédricas livres com elementos de tamanho normal. Por exemplo, para a casca de laranja, cilindro 2, volume 2, a malha completa consiste em 44669 elementos de domínio, 5914 elementos de contorno e 498 elementos de fronteira. Para outras biomassas

de tamanhos e formatos variados, a malha variou de 20000 a 240000 elementos de domínio.

### 3.5.1 Condições de contorno

Como condição limite para o problema estudado, ou seja, o forno de micro-ondas, foi definido como condição de contorno que as paredes da cavidade e o guia de ondas devem se comportar como um condutor elétrico perfeito ( $n \times E = 0$ ) e um condutor magnético perfeito ( $n \times B = 0$ ) nos limites de simetria. Não há fluxo de calor através do limite  $n \cdot (K \nabla T) = 0$  e os limites são termicamente bem isolados. Esta condição afirma que a temperatura de um lado do limite deve ser igual à do outro lado [118]. A cavidade e o guia de onda são considerados como uma perda de resistência da parede metálica. Esta condição de limite de impedância é conhecida por penetrar apenas uma curta distância fora do limite e é dada por:

$$\sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r}{\varepsilon_0 \varepsilon_r - j \frac{\sigma}{\omega}}} n \times H + E - (n \cdot E) n = (n \cdot E_s) n - E_s \quad (3.47)$$

onde  $E_s$  é a fonte do campo elétrico.

A porta retangular do forno de micro-ondas é excitada por uma onda elétrica transversal (modo  $TE_{10}$ ) a uma frequência de excitação de 2,45 GHz. A condição da porta requer uma constante de propagação  $\beta$ , que é dada por:

$$\beta = \frac{2\pi}{c} \sqrt{f^2 - \frac{c^2}{4(D_g)^2}} \quad (3.48)$$

onde  $f$  é a frequência de excitação, ou seja, 2,45 GHz e  $\frac{c}{4(D_g)}$  é a frequência de corte. As simulações foram feitas à pressão atmosférica.

A próxima seção discute os resultados obtidos após a simulação do campo elétrico e a distribuição de temperatura nas amostras de madeira, casca de laranja, bagaço de cana-de-açúcar e óleo de palma em diferentes formatos, tamanhos e utilizando forno de micro-ondas doméstico.



## 4 Resultados

Embora o software computacional tenha sido desenvolvido para fornecer resultados precisos e ser processado em casos reais, ainda não é possível evitar erros numéricos decorrentes da pobre discretização do domínio do tempo e do espaço [31]. Portanto, as seguintes suposições foram feitas para simplificar o problema e reduzir o tempo computacional:

- As amostras são consideradas homogêneas e isotrópicas;
- A transferência de calor não foi resolvida espacialmente nos domínios do ar ou do vidro;
- As equações de transferência de calor foram resolvidas com propriedades dielétricas e de condutividade térmica constantes. Durante o intervalo de tempo, os valores não são atualizados, o que significa que ambas as propriedades são consideradas independentes da temperatura;
- A temperatura inicial da biomassa e do ar foi considerada homogênea;
- A transferência de massa e a mudança de fases no processo foram ignoradas. A distribuição da temperatura durante o aquecimento ocorreu até que a temperatura máxima dos pontos quentes atingisse a temperatura de transição de fase à pressão atmosférica;
- O tempo considerado nessas simulações é curto e a condutividade térmica do ar dentro do forno é menor do que a condutividade das biomassas em estudo.

Este capítulo será dividido em duas partes, em ambas as partes as análises das biomassas em estudo foram feitas com base na distribuição do campo elétrico no interior da cavidade e nas amostras e na distribuição da temperatura, somente nas amostras, com o auxílio das imagens obtidas. A Parte 1 se destina ao estudo das biomassas de madeira, casca de laranja, bagaço de cana-de-açúcar e óleo de palma com o intuito de estudarmos os efeitos das geometrias e volumes no aquecimento por micro-ondas. Os dados apresentados nesta primeira parte foram publicados na revista "Energy", intitulado: "Heating of biomass in microwave household oven - A numerical study" [132]. Já na Parte 2, as biomassas estudadas foram: bagaço de cana-de-açúcar, óleo de palma e algas verdes em função da umidade. Os resultados desta segunda parte foram publicados na revista "Journal of the Energy Institute", intitulado: "Microwave pretreatment of biomass for conversion of lignocellulosic materials into renewable biofuels" [133].

## 4.1 Variação da Geometria

Nesta primeira parte do trabalho, estudamos a distribuição dos campos de temperatura de amostras de madeira, casca de laranja, bagaço de cana-de-açúcar e óleo de palma em diferentes formatos e tamanhos, utilizando um forno de micro-ondas doméstico com frequência de 2,45 GHz. O modelo físico empregado é o "Forno Micro-ondas" incluído nos exemplos do software COMSOL Multiphysics, mas a forma e o tamanho das amostras de biomassa variam amplamente. A distribuição da temperatura e do campo elétrico em várias amostras e momentos diferentes foi desenhada intuitivamente do ponto de vista qualitativo com o auxílio de imagens obtidas. Para inferir quantitativamente a capacidade de uma determinada amostra de absorver a energia de micro-ondas, foi utilizada a razão entre a potência absorvida e a potência de entrada, denominada eficiência de absorção de potência (PAE). Para verificar a uniformidade de distribuição da temperatura de uma amostra em um determinado momento foi utilizado a razão do desvio padrão da temperatura interna e seu valor médio, ou seja, coeficiente de variação (COV) [43–45]. Outro parâmetro importante que foi analisado é o coeficiente de avaliação abrangente (CEC) [46], que é a razão entre PAE e COV, que é o coeficiente responsável por medir a usabilidade das amostras em uma determinada condição.

Tabela 4.1: Propriedades das biomassas utilizadas nas simulações

PROPRIEDADE DAS BIOMASSAS	BIOMASSAS (continua)		
	Madeira	Casca de Laranja [134]	Bagaço de Cana-de-açúcar
Constante dielétrica ( $\epsilon'$ )	1,591 [135]	35,82	2,00 [136]
Fator de perda ( $\epsilon''$ )	0,033 [135]	8,78	0,30 [136]
Condutividade térmica (W/mK)	0,259 [137]	0,4	0,059 [138]
Densidade (Kg/m <sup>3</sup> )	721 [135]	800	80 [139]
Calor específico (J/kgK)	1126,8 [135]	3300	3648,9 [136]
Permeabilidade relativa	1	1	1
Condutividade elétrica	0	0	0

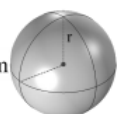
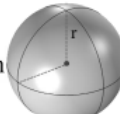
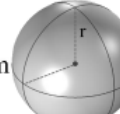
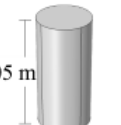
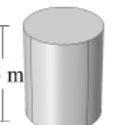
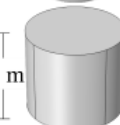
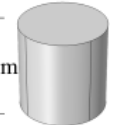
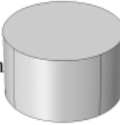
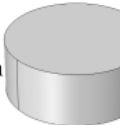
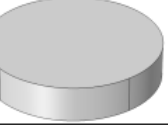


PROPRIEDADE DAS BIOMASSAS	BIOMASSAS (conclusão)		
	Óleo de Palma 18% [31]	Óleo de Palma 45%	Óleo de Palma 64%
Constante dielétrica ( $\epsilon'$ )	6,4	38,5 [74]	57,4 [74]
Fator de perda ( $\epsilon''$ )	1,9	20,6 [74]	18,6 [74]
Condutividade térmica (W/mK)	0,03	0,03 [31]	0,03 [31]
Densidade (Kg/m <sup>3</sup> )	1420	1420 [31]	1420 [31]
Calor específico (J/kgK)	1150	1150 [31]	1150 [31]
Permeabilidade relativa	1	1	1
Condutividade elétrica	0	0	0

As propriedades das biomassas empregadas nesta parte, como constante dielétrica ( $\epsilon'$ ),

fator de perda ( $\varepsilon''$ ), condutividade térmica (W/mK), densidade (Kg/m<sup>3</sup>), calor específico (J/kgK), permeabilidade relativa e a condutividade elétrica são mostradas na Tabela 4.1. As propriedades da madeira, da casca de laranja e da cana-de-açúcar são dadas para uma umidade de 10%. A permeabilidade relativa e a condutividade elétrica utilizadas neste trabalho foram supostas iguais a 1 e 0, respectivamente [34]. Deve-se citar que as propriedades dielétricas são, em geral, funções da frequência de radiação e das propriedades físico-químicas do material, tais como: temperatura, composição química e teor de umidade, sendo que os valores aqui informados são representativos de cada material sobre uma ampla gama de parâmetros empregados nas simulações feitas neste trabalho.

A Tabela 4.2 mostra os tamanhos e formas das amostras utilizadas na simulação. Um modelo de esfera e três modelos de cilindros foram empregados para verificar a importância da geometria na absorção de micro-ondas.

Tabela 4.2: Formas e tamanhos das amostras utilizadas nas simulações.

VOLUME	$2,00 \times 10^{-5} \text{ m}^3$	$6,25 \times 10^{-5} \text{ m}^3$	$13,11 \times 10^{-5} \text{ m}^3$
Esfera	$r = 0,017 \text{ m}$ 	$r = 0,025 \text{ m}$ 	$r = 0,031 \text{ m}$ 
Cilindro 1	$h = 0,05 \text{ m}$ 	$h = 0,05 \text{ m}$ 	$h = 0,05 \text{ m}$ 
Cilindro 2	$h = 0,03 \text{ m}$ 	$h = 0,03 \text{ m}$ 	$h = 0,03 \text{ m}$ 
Cilindro 3	$h = 0,0102 \text{ m}$ 	$h = 0,0102 \text{ m}$ 	$h = 0,0102 \text{ m}$ 

Os resultados das simulações foram analisados com base na distribuição do campo elétrico no interior da cavidade e na distribuição da temperatura em várias amostras de biomassa em diferentes momentos do ponto de vista qualitativo e quantitativo com o auxílio das imagens obtidas.

Para interpretar os resultados quantitativamente, foi utilizada a capacidade de uma dada amostra de absorver a energia de micro-ondas, a razão entre a potência absorvida e a potência de entrada chamada eficiência de absorção de potência (*PAE*):

$$PAE = \frac{P_{ab}}{P_{in}}, \quad (4.1)$$

onde  $P_{ab}$  é a potência absorvida e  $P_{in}$  a potência de entrada.

A razão do desvio padrão da temperatura interna ( $SD$ ) e seu valor médio, ou seja, coeficiente de variação ( $COV$ ), é uma medida da uniformidade da temperatura dentro da amostra. Considere que o desvio padrão é apropriado apenas se as médias forem iguais. O  $COV$  normaliza o desvio padrão pela temperatura média e é uma medida mais eficaz de não uniformidade, removendo o efeito da variação média. Valores mais altos de  $COV$  significariam uma maior não uniformidade de aquecimento. O coeficiente de variação ( $COV$ ) é dado por [43–45]:

$$SD = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (T_i - \overline{T(t)})^2}, \quad (4.2)$$

$$COV = \frac{SD}{\overline{T(t)}}, \quad (4.3)$$

onde  $N$  é o número de pontos do conjunto de dados, que ao longo deste trabalho foi considerado 200,  $T_i$  é a temperatura em um dado instante de tempo e  $\overline{T(t)}$  é a temperatura média do objeto em estudo.

O coeficiente de avaliação abrangente ( $CEC$ ) é a relação entre a eficiência de absorção de energia ( $PAE$ ) e o valor  $COV$  da temperatura. O valor  $CEC$  pode medir a usabilidade das amostras em uma determinada condição, e um valor de  $CEC$  mais alto representa uma amostra com um alto  $PAE$  e/ou baixo  $COV$ , que pode ser escolhido de acordo com as necessidades específicas de um processo de micro-ondas [46].

O tempo para a amostra atingir a temperatura de 373 K em função da potência de entrada é mostrado na Figura 4.1. Pode-se observar que as curvas do bagaço da cana, da casca da laranja e do óleo de palma estão agrupadas, sendo que a curva da madeira apresenta comportamento distinto devido ao seu fator de perda ( $\epsilon''$ ), ou seja, a capacidade do material de converter a energia armazenada no campo eletromagnético em calor, é menor do que as outras biomassas. A figura está dividida nas regiões I, II e III. Na região I, para bagaço de cana, casca de laranja e óleo de palma quando a potência de entrada é baixa, o tempo de aquecimento da amostra é relativamente longo, ou seja, o calor gerado na profundidade de penetração é conduzido para os locais de menor temperatura mantendo uma uniformidade de temperatura na biomassa. Para potências de entrada maiores, região II, o calor gerado na profundidade de penetração não pode ser conduzido adequadamente para os locais de menor temperatura devido ao curto tempo, caracterizando a temperatura de transição de fase para bagaço, casca de laranja e óleo de palma. Nesses locais, pontos quentes começam a aparecer

dentro das amostras, resultando em pior uniformidade de temperatura. Os pontos quentes são as posições onde a temperatura atinge a temperatura de transição de fase, o tempo de elevação da temperatura é menor do que aquele necessário para a condução de calor no interior da amostra e o calor gerado fica ao redor da área de profundidade de penetração. Observando a Figura 4.1 pode-se perceber que este ponto, região de transição I para região II, está a 80 W e tempo de 10 s para bagaço de cana, casca de laranja e óleo de palma. Quando a potência de entrada é maior do que 80 W, o tempo para o aumento da temperatura é menor do que o usado para a condução do calor, de modo que o calor gerado (quase) permanece dentro da área de profundidade de penetração.

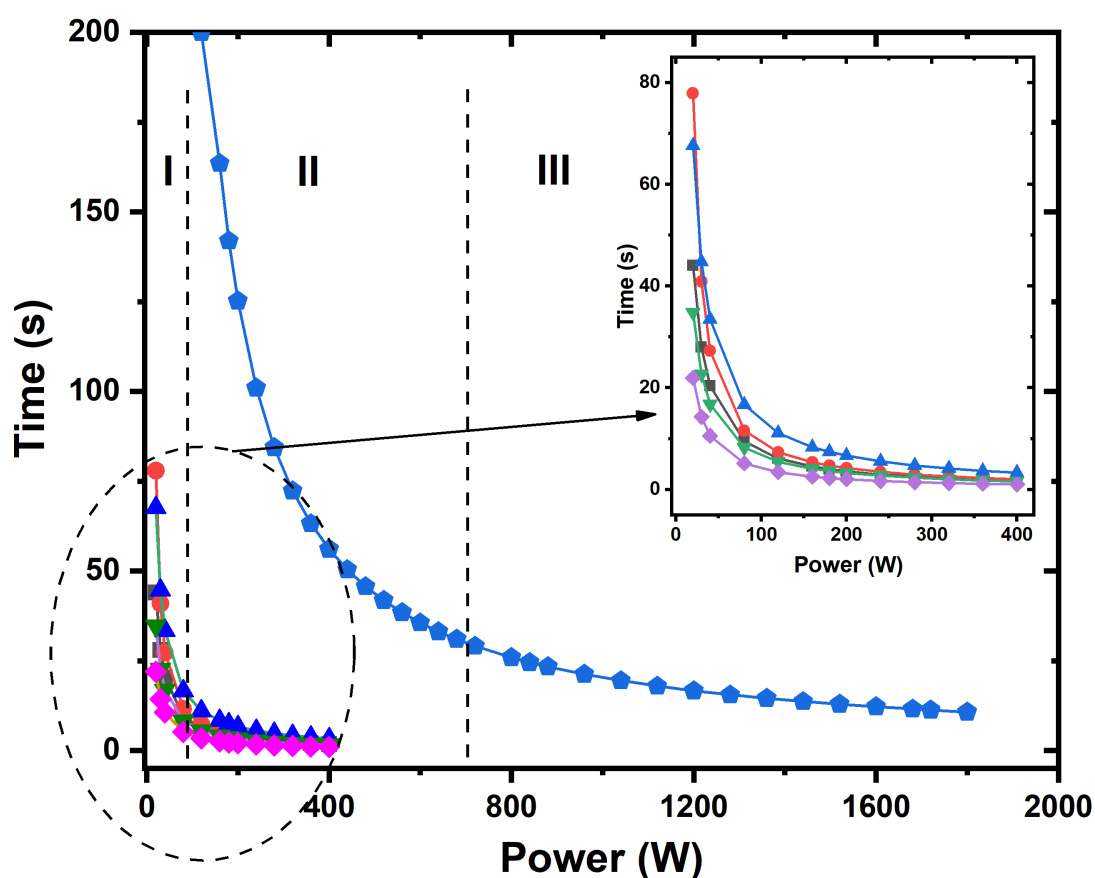


Figura 4.1: Tempo para atingir a temperatura de  $373K$  em função da potência de entrada para diferentes biomassas. Madeira ( $\diamond$ ), bagaço ( $\square$ ), casca de laranja ( $\circ$ ), óleo de palma 18% ( $\triangle$ ), óleo de palma 45% ( $\nabla$ ) e óleo de palma 64% ( $\diamond$ ). Regiões I, II e III ver no texto. Cálculos para o cilindro 1 e o volume 1.

No caso da madeira, as regiões I e II são aquelas onde o calor gerado na profundidade de penetração é conduzido para os locais de menor temperatura e a região III a partir de 700 W e tempo de 30 s aquela onde o calor não pode mais ser conduzido para as regiões internas e o calor gerado na profundidade de penetração não pode ser conduzido adequadamente para os locais de menor temperatura, caracterizando a temperatura de transição de fase para a

madeira e formação de pontos quentes. Neste ponto, o consumo de energia tende a ser estável, consulte a Figura 4.1.

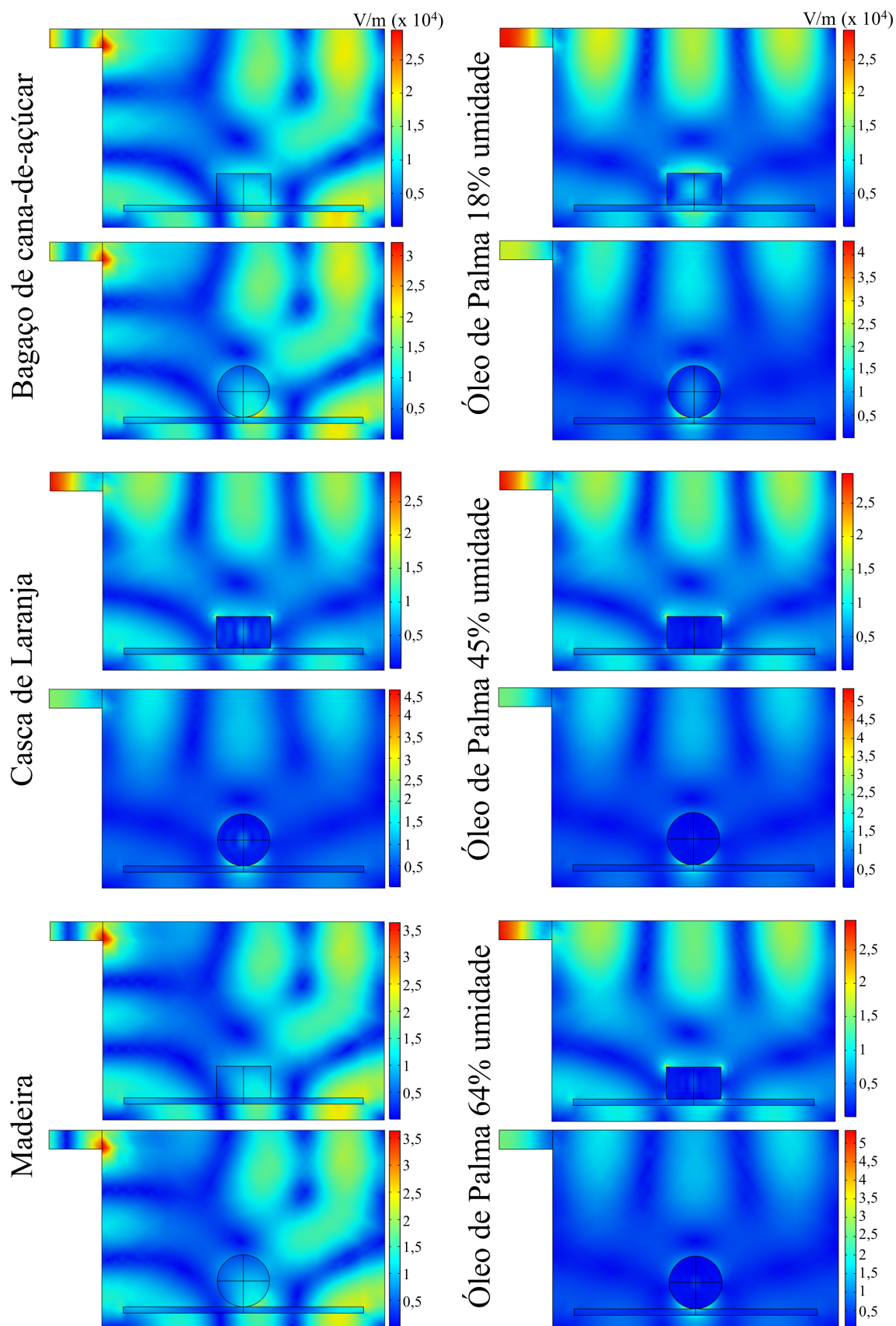


Figura 4.2: Distribuição do campo elétrico para o bagaço de cana-de-açúcar, casca de laranja, madeira e óleo de palma. Volume de  $6,25 \times 10^{-5} m^3$ ; esfera e cilindro 2. Potência de 180 W.

A Figura 4.2 mostra a distribuição do campo elétrico na cavidade de micro-ondas com a amostra de biomassa para o bagaço de cana-de-açúcar, casca de laranja, madeira e óleo de palma com umidade de 18%, 45% e 64%, potência de entrada de 180 W para as geometrias cilíndricas e esféricas. Como pode ser visto claramente na Figura 4.2, áreas de baixa e alta intensidade de campo elétrico são encontradas na cavidade e dentro da amostra. A geometria da cavidade de micro-ondas, a geometria e tamanho da amostra de biomassa e suas propriedades dielétricas e térmicas determinam como a amostra é aquecida pela exposição à radiação de micro-ondas. A taxa e a intensidade da densidade de perda de energia eletromagnética são amplamente dependentes da permissividade complexa e da tangente de perda da amostra. Maior perda de calor representa uma maior conversão de energia eletromagnética em térmica. A absorção de energia de micro-ondas pela amostra e as reflexões das paredes da cavidade de micro-ondas redistribuem o campo eletromagnético. Este resultado relaciona-se com a importância da posição de qualquer amostra dentro da cavidade, pois nem todas as regiões estão expostas à mesma intensidade do campo eletromagnético [140].

Em todas as biomassas observou-se que o perfil eletromagnético não é homogêneo, formando pontos quentes em diferentes posições e com diferentes intensidades. A maior intensidade de campo elétrico está focada em torno da guia de onda e o óleo de palma é a biomassa com maior intensidade de campo elétrico, cerca de  $5,6 \times 10^4$  V/m, para a geometria esférica, que é a geometria que apresentou maior intensidade de campo elétrico em todas as biomassas.

Quando comparamos o perfil eletromagnético do óleo de palma em diferentes porcentagens de umidade, percebemos que a distribuição do campo elétrico é semelhante em todos os casos e quanto maior a porcentagem de umidade maior será a intensidade do campo elétrico. Em relação as outras biomassas, a distribuição e a intensidade do campo elétrico do bagaço de cana é semelhante ao da madeira, para ambas as geometrias, enquanto a casca de laranja apresenta perfil semelhante ao óleo de palma.

A Figura 4.3 mostra a distribuição de temperatura 2D, para a esfera e o cilindro 2, em função do tempo para o bagaço de cana-de-açúcar, casca de laranja, madeira e óleo de palma com umidade de 18%, 45% e 64%. Pode-se observar nestas figuras ilustrativas que a temperatura evolui até a formação do ponto quente. A cor vermelha indica as zonas de temperatura mais baixas e o branco as zonas de temperatura mais alta.

Os formatos do bagaço da cana-de-açúcar possuem distribuição de temperatura não uniforme e o fenômeno de transição de fase pode ser facilmente visto no plano x-y nas formas de esfera e cilindro. A casca de laranja apresenta um aquecimento mais homogêneo com

ponto quente no centro e pode-se notar a presença de ressonâncias. Na madeira e no bagaço da cana, o ponto quente está descentralizado. As distribuições de temperatura da madeira no plano z-x para a esfera apresentam temperaturas de 373 K para  $t = 170$  s, enquanto na forma de cilindro são 180 s. Ressonâncias não são observadas nas imagens para madeira. As distribuições de temperatura do óleo de palma são simétricas para as geometrias. Ressalta-se a zona fria próxima à fronteira e um ponto quente no centro.

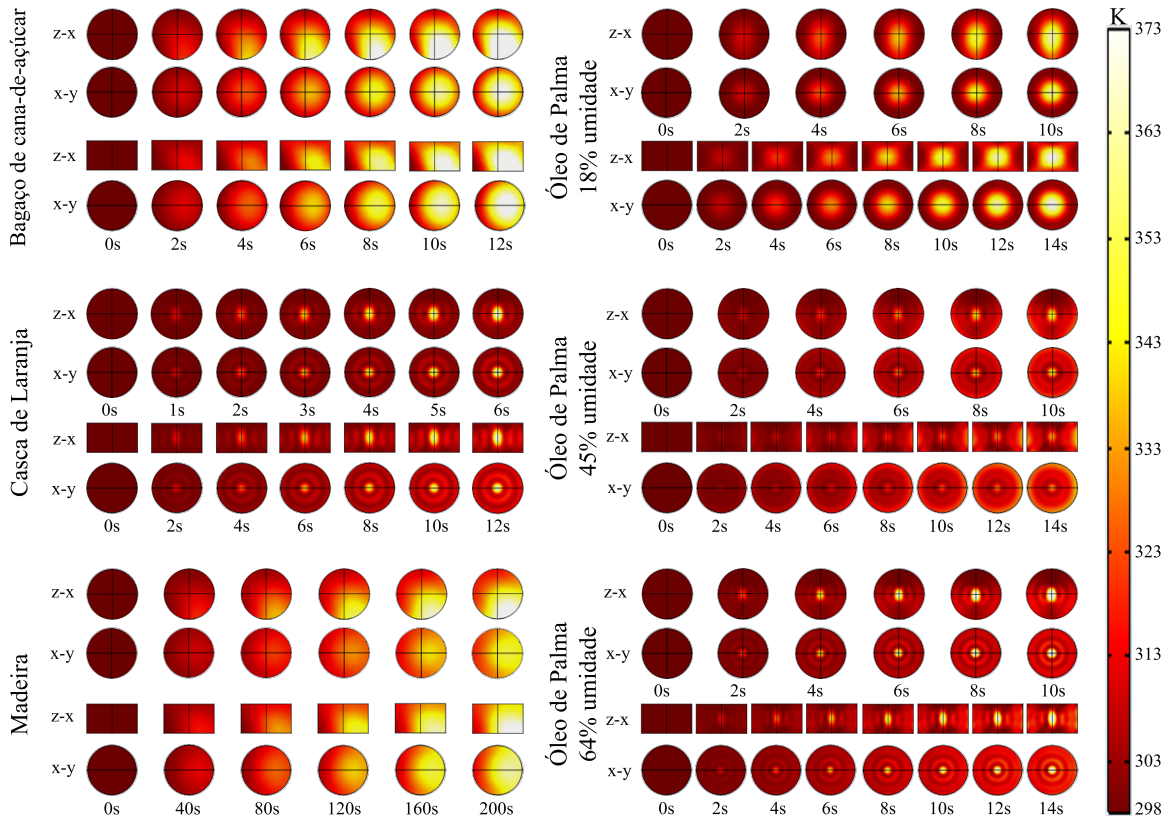


Figura 4.3: Evolução da temperatura em função do tempo para o bagaço de cana-de-açúcar, casca de laranja, madeira e óleo de palma. Volume de  $6,25 \times 10^{-5} \text{ m}^3$ ; esfera e cilindro 2. Potência de 180 W.

A teoria desenvolvida por Bhattacharya et al. [141] é empregada como uma tentativa de explicar a distribuição de temperatura das biomassas mostradas na Figura 4.3. Os autores consideraram as amostras circulares a serem expostas a ondas planas uniformes polarizadas  $\text{TE}_{10}$  e resolveram a equação bidimensional de Helmholtz correspondente para determinar a potência absorção de micro-ondas para incidência lateral e radial de radiação nas amostras. No nosso caso a biomassa é colocada dentro da cavidade de micro-ondas do forno, portanto o estudo de Bhattacharya et al. [141] é apenas uma referência para interpretar nossos resultados.

A solução da equação de Helmholtz pode ser escrita em termos de duas escalas de comprimento características associadas à propagação da onda eletromagnética dentro da amostra, o comprimento de onda ( $\lambda_m$ ) e a profundidade de penetração ( $D_p$ ):



$$\lambda_m = \frac{c\sqrt{2}}{f} \frac{1}{[\sqrt{\varepsilon'^2 + \varepsilon''^2} + \varepsilon']^{1/2}}, \quad (4.4)$$

$$D_p = \frac{c}{\sqrt{2}\pi f} \frac{1}{[\sqrt{\varepsilon'^2 + \varepsilon''^2} - \varepsilon']^{1/2}}, \quad (4.5)$$

onde  $c$  é a velocidade da luz e  $f$  a frequência da radiação. O comprimento de onda  $\lambda_m$  é o comprimento de onda da radiação dentro da amostra, enquanto a profundidade de penetração  $D_p$  determina a distância na qual as micro-ondas penetram na amostra, distância onde o campo elétrico cai 1/3 do valor máximo.

A análise foi realizada com base em três parâmetros adimensionais,  $N_w$ ,  $f_p$  e  $f_w$ , onde  $f_p$  e  $f_w$  capturam o efeito das propriedades dielétricas do material da amostra, e  $N_w$  e  $N_p$  capturam o efeito da dimensão da amostra:

$$N_w = \frac{2R}{\lambda_m}; \quad f_p = \frac{\lambda_m}{2\pi D_p}; \quad f_w = \frac{\lambda_m}{\lambda_0}; \quad N_p = 2\pi f_p N_w = \frac{2R}{D_p}, \quad (4.6)$$

$\lambda_0$  é o comprimento de onda de micro-ondas dentro do espaço livre e  $N_p$  é uma magnitude relativa da dimensão da amostra em relação à profundidade de penetração. Os parâmetros  $f_p$  e  $f_w$  estão relacionados às constantes dielétricas do material. Eles sempre permanecem limitados entre 0 e 1, independentemente da magnitude das propriedades dielétricas. O número de penetração ou  $N_p = 2R/D_p$ , às vezes tem sido preferido na literatura para caracterizar a absorção de energia de micro-ondas em grandes amostras.

Os parâmetros  $N_w$  e  $f_w$  influenciam principalmente as características de ressonância da absorção de potência. As ressonâncias ocorrem devido às interferências construtivas entre as ondas viajantes, que são formadas pela transmissão e reflexão das micro-ondas no contorno da amostra, levando ao ponto quente térmico durante o processamento dos materiais na presença da radiação de micro-ondas.

Madeira, casca de laranja, cana-de-açúcar e óleo de palma (umidade de 18%, 45% e 64%) são as biomassas escolhidas porque apresentam grandes variações de  $\varepsilon'$  ( $1,6 < \varepsilon' < 57,4$ ) e  $\varepsilon''$  ( $3,3 \times 10^{-2} < \varepsilon'' < 20,6$ ) levando a um grande intervalo para  $f_p$  e  $f_w$  (consulte as Tabelas 1 e 3). Levando em consideração esses dados,  $\lambda_m$ ,  $D_p$ ,  $N_w$ ,  $N_p$ ,  $f_w$  e  $f_p$  foram calculados para as biomassas e são mostrados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3:  $\lambda_m, D_p, N_w, N_p, f_w$  e  $f_p$  calculado para as biomassas

<b>Madeira</b>							
	$\lambda_m(m)$	$D_p(m)$	$N_w$	$N_p$	$f_w$	$f_p$	
Esfera	$9,7 \times 10^{-2}$	1,49	$3,5 \times 10^{-1} - 6,4 \times 10^{-1}$	$2,3 \times 10^{-2} - 4,2 \times 10^{-2}$	0,79	0,01	
Cilindro 1	$9,7 \times 10^{-2}$	1,49	$1,3 \times 10^{-3} - 8,6 \times 10^{-3}$	$8,5 \times 10^{-5} - 5,6 \times 10^{-4}$	0,79	0,01	
Cilindro 2	$9,7 \times 10^{-2}$	1,49	$2,2 \times 10^{-3} - 1,4 \times 10^{-2}$	$1,4 \times 10^{-4} - 9,3 \times 10^{-4}$	0,79	0,01	
Cilindro 3	$9,7 \times 10^{-2}$	1,49	$6,4 \times 10^{-3} - 4,2 \times 10^{-2}$	$4,2 \times 10^{-4} - 2,7 \times 10^{-3}$	0,79	0,01	
<b>Casca de Laranja</b>							
	$\lambda_m(m)$	$D_p(m)$	$N_w$	$N_p$	$f_w$	$f_p$	
Esfera	$2,0 \times 10^{-2}$	$2,7 \times 10^{-2}$	1,7 - 3,1	1,3 - 2,3	0,17	0,12	
Cilindro 1	$2,0 \times 10^{-2}$	$2,7 \times 10^{-2}$	$6,3 \times 10^{-3} - 4,1 \times 10^{-2}$	$4,7 \times 10^{-3} - 3,1 \times 10^{-2}$	0,17	0,12	
Cilindro 2	$2,0 \times 10^{-2}$	$2,7 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-2} - 6,8 \times 10^{-2}$	$7,9 \times 10^{-3} - 5,2 \times 10^{-2}$	0,17	0,12	
Cilindro 3	$2,0 \times 10^{-2}$	$2,7 \times 10^{-2}$	$3,0 \times 10^{-2} - 2,0 \times 10^{-1}$	$2,3 \times 10^{-2} - 1,5 \times 10^{-1}$	0,17	0,12	
<b>Bagaço de cana-de-açúcar</b>							
	$\lambda_m(m)$	$D_p(m)$	$N_w$	$N_p$	$f_w$	$f_p$	
Esfera	$8,6 \times 10^{-2}$	$1,8 \times 10^{-1}$	$3,9 \times 10^{-1} - 7,2 \times 10^{-1}$	$1,8 \times 10^{-1} - 3,4 \times 10^{-1}$	0,71	0,075	
Cilindro 1	$8,6 \times 10^{-2}$	$1,8 \times 10^{-1}$	$1,5 \times 10^{-3} - 9,7 \times 10^{-3}$	$6,9 \times 10^{-4} - 4,5 \times 10^{-3}$	0,71	0,075	
Cilindro 2	$8,6 \times 10^{-2}$	$1,8 \times 10^{-1}$	$2,5 \times 10^{-3} - 1,6 \times 10^{-2}$	$1,2 \times 10^{-3} - 7,5 \times 10^{-3}$	0,71	0,075	
Cilindro 3	$8,6 \times 10^{-2}$	$1,8 \times 10^{-1}$	$7,2 \times 10^{-3} - 4,7 \times 10^{-2}$	$3,4 \times 10^{-3} - 2,2 \times 10^{-2}$	0,71	0,075	
<b>Óleo de Palma 18%</b>							
	$\lambda_m(m)$	$D_p(m)$	$N_w$	$N_p$	$f_w$	$f_p$	
Esfera	$4,8 \times 10^{-2}$	$5,2 \times 10^{-2}$	0,7 - 1,3	0,7 - 1,2	0,39	0,15	
Cilindro 1	$4,8 \times 10^{-2}$	$5,2 \times 10^{-2}$	$2,7 \times 10^{-3} - 1,7 \times 10^{-2}$	$2,4 \times 10^{-3} - 1,6 \times 10^{-2}$	0,39	0,15	
Cilindro 2	$4,8 \times 10^{-2}$	$5,2 \times 10^{-2}$	$4,4 \times 10^{-3} - 2,9 \times 10^{-2}$	$4,0 \times 10^{-3} - 2,7 \times 10^{-2}$	0,39	0,15	
Cilindro 3	$4,8 \times 10^{-2}$	$5,2 \times 10^{-2}$	$1,3 \times 10^{-2} - 8,5 \times 10^{-2}$	$1,2 \times 10^{-2} - 7,8 \times 10^{-2}$	0,39	0,15	
<b>Óleo de Palma 45%</b>							
	$\lambda_m(m)$	$D_p(m)$	$N_w$	$N_p$	$f_w$	$f_p$	
Esfera	$1,9 \times 10^{-2}$	$1,2 \times 10^{-2}$	1,8 - 3,2	2,8 - 5,1	0,16	0,25	
Cilindro 1	$1,9 \times 10^{-2}$	$1,2 \times 10^{-2}$	$6,6 \times 10^{-3} - 4,4 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-2} - 6,9 \times 10^{-2}$	0,16	0,25	
Cilindro 2	$1,9 \times 10^{-2}$	$1,2 \times 10^{-2}$	$1,1 \times 10^{-2} - 7,3 \times 10^{-2}$	$1,7 \times 10^{-2} - 1,1 \times 10^{-1}$	0,16	0,25	
Cilindro 3	$1,9 \times 10^{-2}$	$1,2 \times 10^{-2}$	$3,3 \times 10^{-2} - 2,1 \times 10^{-1}$	$5,1 \times 10^{-1} - 3,4 \times 10^{-1}$	0,16	0,25	
<b>Óleo de Palma 64%</b>							
	$\lambda_m(m)$	$D_p(m)$	$N_w$	$N_p$	$f_w$	$f_p$	
Esfera	$1,6 \times 10^{-2}$	$1,6 \times 10^{-2}$	2,1 - 3,9	2,1 - 3,9	0,13	0,16	
Cilindro 1	$1,6 \times 10^{-2}$	$1,6 \times 10^{-2}$	$8,0 \times 10^{-3} - 5,2 \times 10^{-2}$	$7,9 \times 10^{-3} - 5,2 \times 10^{-2}$	0,13	0,16	
Cilindro 2	$1,6 \times 10^{-2}$	$1,6 \times 10^{-2}$	$1,3 \times 10^{-2} - 8,7 \times 10^{-2}$	$1,3 \times 10^{-2} - 8,6 \times 10^{-2}$	0,13	0,16	
Cilindro 3	$1,6 \times 10^{-2}$	$1,6 \times 10^{-2}$	$3,9 \times 10^{-2} - 2,6 \times 10^{-1}$	$3,9 \times 10^{-2} - 2,5 \times 10^{-1}$	0,13	0,16	

Pode-se notar que  $f_p$  varia de 0,01 a 0,25 para os materiais selecionados, onde a madeira tem o menor  $f_p$  e o óleo de palma com 45% de umidade o maior.

Por outro lado,  $f_w$  é da mesma ordem de magnitude (0,13 - 0,79) para todos os materiais selecionados, com a madeira apresentando o maior  $f_w = 0,79$  e o óleo de palma com 64% de umidade o menor  $f_w = 0,13$ . Para os materiais com  $f_w$  mais baixos, espera-se que a absorção de energia de micro-ondas exiba fortes ressonâncias, como a casca de laranja e óleo de palma, e aqueles com maior magnitude de  $f_w$  muito fracos ou sem ressonâncias, por exemplo, a madeira e bagaço de cana-de-açúcar.

Bhattacharya et al. [141] classificou os materiais e suas dimensões em três classes distintas: fino (dimensão da amostra  $\ll$  comprimento de onda de micro-ondas dentro da amostra), espesso (dimensão da amostra  $\gg$  profundidade de penetração) e intermediário (dimensão da amostra entre fino e espesso). Os regimes de absorção de potência, para formatos cilíndricos, podem ser definidos como:

$$N_w \ll 1 \quad \text{Fino}, \quad (4.7)$$

$$0,1 < N_w < \frac{3}{2\pi f_p} \left(3 \frac{N_w}{N_p}\right) \quad \text{Intermediário}, \quad (4.8)$$

$$N_p \gtrsim 3 \quad \text{Espesso}, \quad (4.9)$$

No regime fino, as dimensões da amostra são muito menores do que o comprimento de onda de micro-ondas ( $2R \ll \lambda_m$  ou  $N_w \ll 1$ ). O regime fino é caracterizado pela absorção de potência uniforme e a variação da temperatura média com o tempo é linear, que é função de  $f_p$  e  $f_w$ .

Amostras espessas têm dimensões que são muito maiores do que a profundidade de penetração de micro-ondas ( $2R \gg D_p$  ou  $N_p \gg 1$ ), onde  $N_p \gtrsim 3$ .

Para certos materiais, existe uma gama de amostras de dimensões entre os regimes fino e espesso, onde  $f_p < 0,5$ . Este intervalo de dimensões das amostras, será referido por  $0,1 < N_w < 3/2\pi f_p$ , que é o regime intermediário, onde as dimensões da amostra não são nem muito menores do que o comprimento de onda de micro-ondas na biomassa e nem muito maiores do que a profundidade de penetração de micro-ondas. A absorção de potência no regime intermediário é regida pela ocorrência de interferências construtivas e destrutivas entre as ondas viajantes.

Com o auxílio da Tabela 4.3 é possível explicar as imagens mostradas na Figura 4.3. O bagaço de cana-de-açúcar,  $1,5 \times 10^{-3} < N_w < 7,2 \times 10^{-1}$ , é caracterizado pelo regime fino para o

cilindro e regime intermediário para a esfera. Pode-se observar que o ponto quente aparece deslocado do centro no tempo de 8s, como pode ser visto no plano  $x - y$ .

De acordo com Basak et al. [142], além da classificação dos regimes de absorção de energia, todos os materiais alimentares podem ser classificados em quatro grupos: (i) baixo  $f_p$ , baixo  $f_w$  ( $f_p \leq 0,1$ ,  $f_w \leq 0,1$ ), (ii) baixo  $f_p$ , alto  $f_w$  ( $f_p \leq 0,1$ ,  $f_w \gg 0,1$ ), (iii) alto  $f_p$  baixo  $f_w$  ( $f_p \gg 0,1$ ,  $f_w \leq 0,1$ ) e (iv) alto  $f_p$ , alto  $f_w$  ( $f_p \gg 0,1$ ,  $f_w \gg 0,1$ ).

O bagaço de cana-de-açúcar é um exemplo do grupo (ii) com  $f_p$  baixo e  $f_w$  alto, ver Tabela 4.3, com taxa de aquecimento superior à da casca de laranja que pertence ao grupo (iv),  $f_p$  alto,  $f_w$  alto.

A casca da laranja tem distribuição simétrica de temperatura em relação ao centro nas formas esférica e cilíndrica. Nota-se a presença de ressonâncias devido ao alto  $f_p$ , com maior temperatura no centro.

A madeira tem uma evolução de temperatura ao longo do tempo bastante diferente das demais biomassas. Devido à baixa constante dielétrica  $\varepsilon'$  e fator de perda  $\varepsilon''$ , o tempo para absorver energia do campo eletromagnético e sua conversão em calor é maior, ou seja, a madeira possui menor potência de absorção devido ao baixo  $f_p$  e alto  $f_w$ , resultando em maior tempo de processamento. A formação de pontos quentes para a esfera e o cilindro é de 160 s.

O óleo de palma tem tempos de aquecimento comparáveis ao bagaço da cana-de-açúcar. Pode-se observar a formação de pontos quentes no centro da esfera e no cilindro por 10s e a presença de ressonâncias.

A zona de operação mais interessante, porém complexa, é o regime intermediário, onde os locais, bem como as intensidades dos pontos quentes, variam com as dimensões da amostra ou propriedades do material de uma maneira altamente não linear. Na Tabela 4.3 para o óleo de palma com 45% e 64% de umidade, volume do cilindro 3 de  $6,25 \times 10^{-5} m^3$ , os valores de  $N_w$  são maiores que 0,1 e os regimes de absorção de energia mudam para intermediários. O regime intermediário também pode ser observado na casca de laranja com  $N_w = 0,2$  para o cilindro 3 e volume de  $13,11 \times 10^{-5} m^3$ . Todas as formas esféricas encontram-se no regime intermediário para os três volumes empregados neste trabalho.

As localizações dos primeiros picos ressonantes, tomando como referência o centro das imagens mostradas na Figura 4.3, em função do número de picos é mostrado na Figura 4.4 para a casca de laranja, óleo de palma 18%, óleo de palma 45% e óleo de palma 64% . A madeira e o bagaço da cana-de-açúcar não apresentaram ressonâncias, como pode ser visto na Figura 4.3.

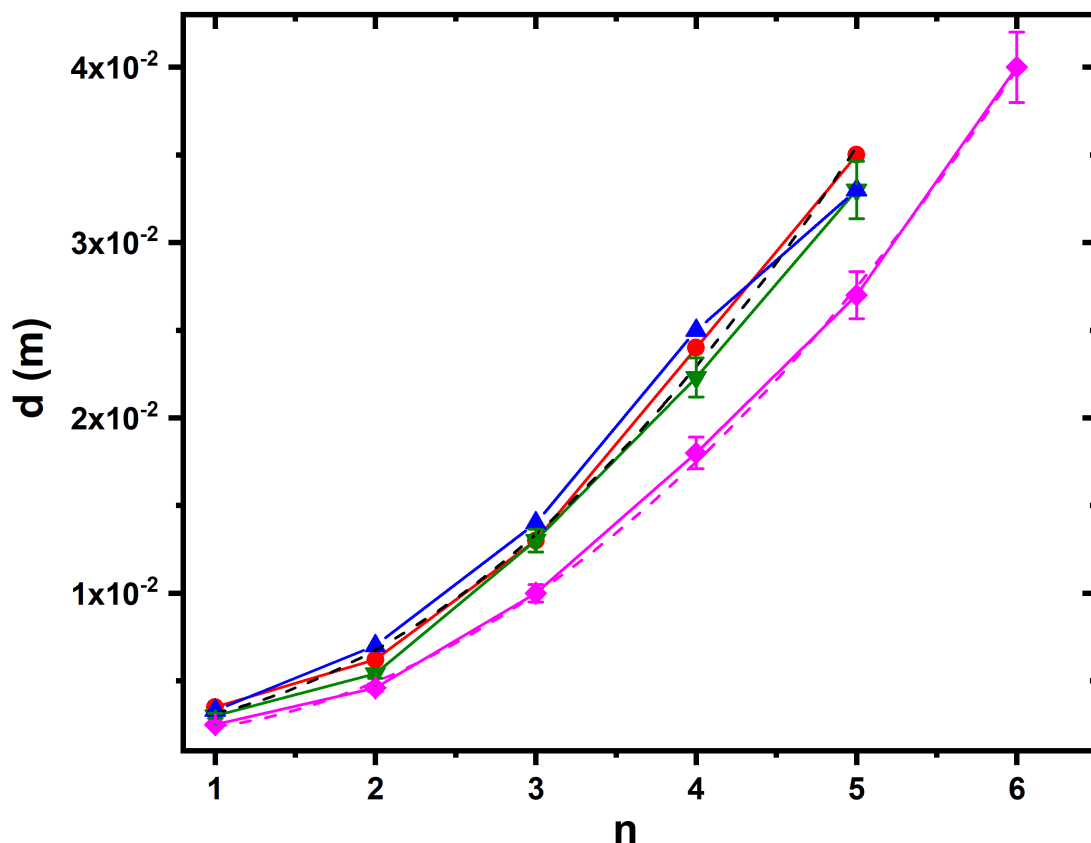


Figura 4.4: Localizações dos picos ressonantes em função do número de picos, para o cilindro 2, volume 2 e potência de 180 W. Casca de laranja (○), óleo de palma 18% (△), óleo de palma 45% (▽) e óleo de palma 64% (◇).

Pode-se observar o crescimento polinomial das curvas onde os pontos para a casca de laranja, óleo de palma 18% e 45% estão agrupados. A curva, neste caso, é representada pela expressão:  $d(m) = 2,5 \times 10^{-3} - 8,3 \times 10^{-4}n + 1,5 \times 10^{-3}n^2$  (linha preta tracejada). A curva para óleo de palma 64% é deslocada, sendo representada por  $d(m) = 2,2 \times 10^{-3} - 1,1 \times 10^{-3}n + 1,2 \times 10^{-3}n^2$  (linha rosa tracejada). O óleo de palma 64% tem a maior constante dielétrica, ou seja, maior capacidade de armazenar a energia do campo elétrico do que as outras biomassas estudadas, apresentando picos de ressonância sucessivos mais próximos do que as outras.

A eficiência térmica de uma dada biomassa pode ser representada pela Figura 4.5. No lado esquerdo da Figura 4.5 é mostrado o grau de fuga térmica [141], que está relacionado ao aquecimento não uniforme da biomassa, com  $T_{max}$  e  $T_{min}$  denotando a temperatura máxima e mínima dentro da amostra, respectivamente. Pode-se observar que o bagaço de cana-de-açúcar, casca de laranja e óleo de palma com diferentes níveis de umidade possuem  $\frac{\Delta T}{t} \cong \frac{7K}{s}$ . Por outro lado, a madeira tem um valor muito menor,  $\frac{\Delta T}{t} \cong \frac{0,4K}{s}$ . A diferença entre  $T_{max}$  e  $T_{min}$  cresce linearmente para as biomassas, exceto para a madeira. No caso da madeira, aumento de  $\Delta T$  mais baixo afeta o coeficiente de variação, como será discutido mais tarde. Outro tópico importante a ser analisado é a eficiência de aquecimento das biomassas considerando

a evolução temporal da temperatura média  $\bar{T}$  que é mostrado no lado direito da Figura 4.5. Todas as biomassas têm uma evolução linear de  $\bar{T}$  com o tempo. O bagaço da cana-de-açúcar aquece rápido, com coeficiente angular mais alto, enquanto a madeira é menos eficiente no aquecimento. A temperatura média  $\bar{T}$  está ligada com a energia absorvida pela biomassa, enquanto o grau de fuga térmica  $\Delta T$ , é um indicador da não homogeneidade da temperatura dentro da amostra e está relacionado ao coeficiente de variação COV, ver Figura 4.7 e Figura 4.10.

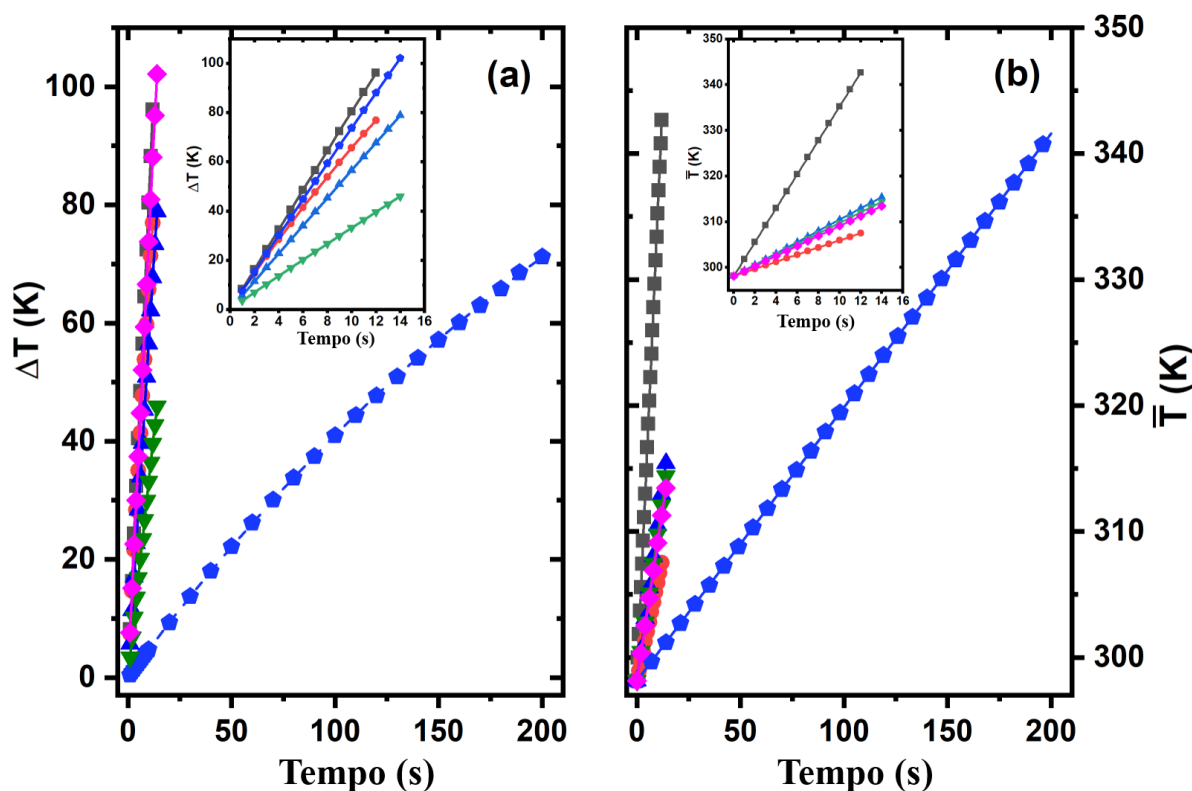


Figura 4.5: Grau de fuga térmica ( $\Delta T = T_{max} - T_{min}$ ) (a), e a evolução da temperatura média ( $\bar{T}$ ) (b), em função do tempo, para o cilindro 2, volume 2 e potência de 180 W. Madeira ( $\diamond$ ), bagaço ( $\square$ ), casca de laranja ( $\circ$ ), óleo de palma 18% ( $\triangle$ ), óleo de palma 45% ( $\nabla$ ) e óleo de palma 64% ( $\diamond$ ).

Em um processo de produção, o consumo de energia é uma questão importante. O consumo de energia antes da temperatura de transição de fase precisa ser minimizado para reduzir custos e tornar o processo eficiente. A Figura 4.6 mostra a energia absorvida em função da potência, para o cilindro 2 (a) e esfera (b), quando as simulações são feitas para o volume 2. Quando os pontos quentes internos atingem a temperatura de transição de fase, a energia absorvida diminui de 657 J a 434 J para a casca de laranja e de 1079 J a 1040 J para o óleo de palma 18%, no formato cilíndrico, a potência de entrada aumentando de 20 W para 400 W em ambos os casos.

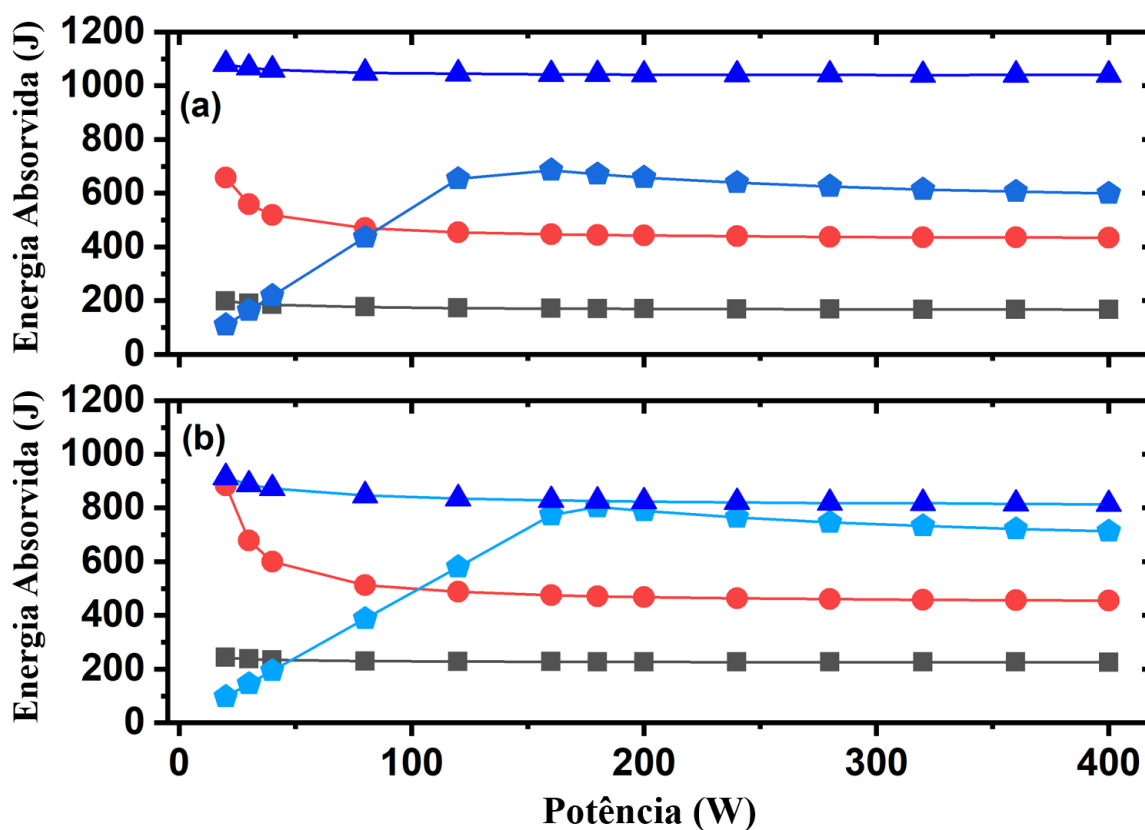


Figura 4.6: Energia absorvida em função da potência, para o cilindro 2 (a) e esfera (b), considerando o volume 2. Madeira ( $\diamond$ ), bagaço ( $\square$ ), casca de laranja ( $\circ$ ) e óleo de palma 18% ( $\triangle$ ).

Além disso, quando a potência de entrada é maior que 80 W o consumo total de energia tende a ser estável conforme a Figura 4.1. O óleo de palma é a biomassa que mais absorve energia entre as apresentadas e o bagaço de cana a menor. Interessante nesta figura é o comportamento da madeira. Como já foi mencionado, a madeira é a biomassa mais difícil de aquecer, dentre as estudadas neste trabalho, devido ao seu baixo valor de constante dielétrica e fator de perda. A energia absorvida pela madeira aumenta de 108 J a 20 W de potência de entrada, para 685 J a 160 W, para a geometria cilíndrica. Após este ponto, ele tende a se estabilizar. O mesmo comportamento é observado para a esfera. A temperatura média está relacionada à energia absorvida pela amostra. Como pode ser visto na Figura 4.7, a temperatura média ( $\bar{T}$ ) e a energia absorvida têm a mesma tendência quando a potência é variada.

A eficiência de absorção de energia (PAE) é o parâmetro que representa a capacidade das amostras em absorver energia de micro-ondas. A Figura 4.8 apresenta o PAE em função da potência para as biomassas estudadas neste trabalho. A madeira é a biomassa que possui menor capacidade de absorção de energia do campo eletromagnético, devido ao seu baixíssimo fator de perda. A casca de laranja e o óleo de palma têm PAE em torno de 0,7 para o cilindro

e 0,8 para a esfera e são constantes em função da potência.

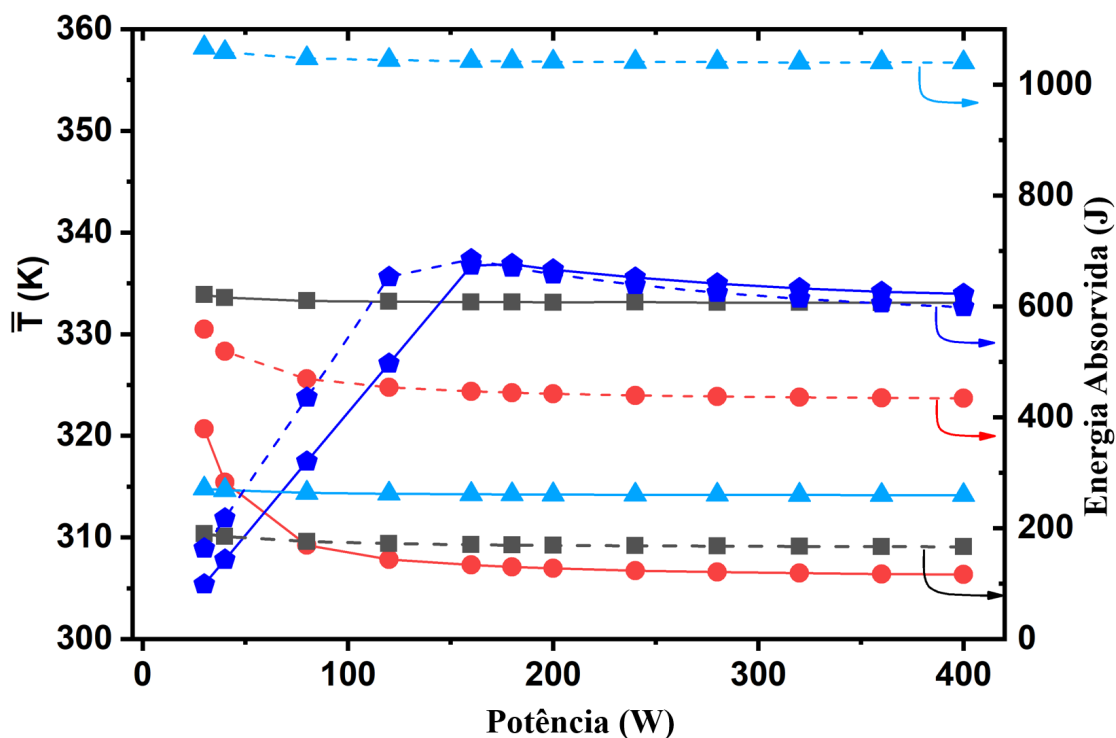


Figura 4.7: Evolução da temperatura média ( $\bar{T}$ ) (linhas contínuas) e energia absorvida (linhas tracejadas) em função da potência para o cilindro 2 e volume 2. Madeira ( $\diamond$ ), bagaço ( $\square$ ), casca de laranja ( $\circ$ ) e óleo de palma 18% ( $\triangle$ ).

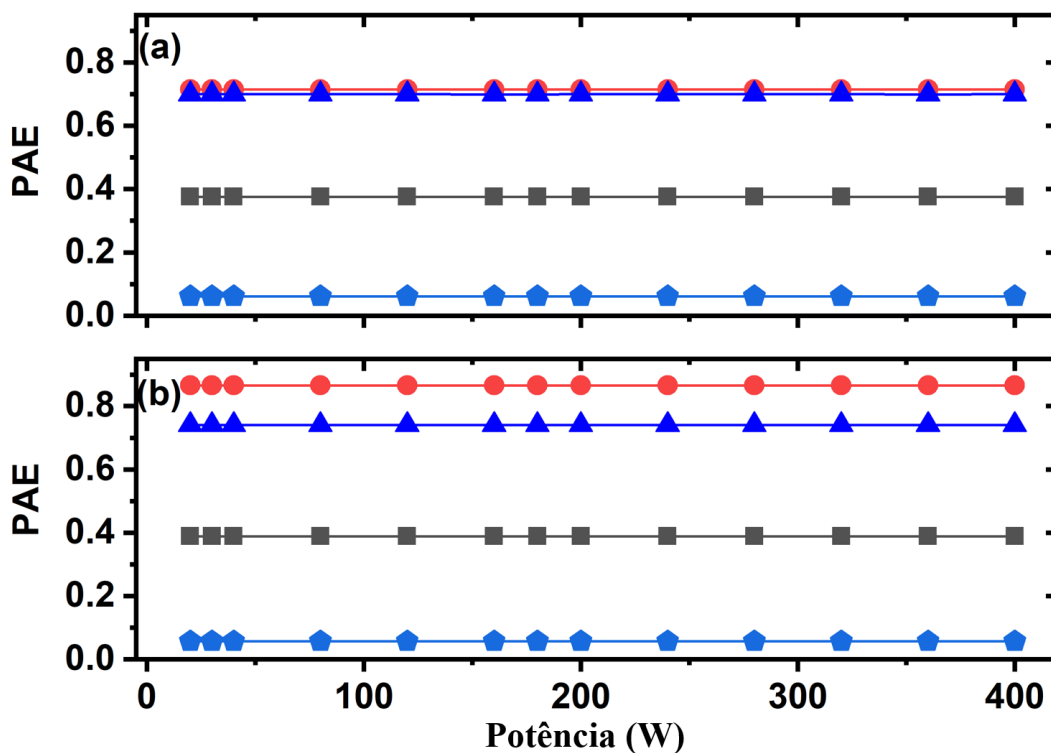


Figura 4.8: Eficiência de absorção de potência (PAE) em função da potência, para o cilindro 2 e esfera no volume 2. Madeira ( $\diamond$ ), bagaço ( $\square$ ), casca de laranja ( $\circ$ ) e óleo de palma 18% ( $\triangle$ ). (a) cilindro e (b) esfera.



A Figura 4.9 representa a uniformidade da temperatura das amostras usando a razão do desvio padrão da temperatura interna e o valor médio, ou seja, o coeficiente de variação (COV) com a potência de entrada, que é usado para avaliar a temperatura interna da amostra. COV baixo indica uma melhor uniformidade de temperatura, ou seja, baixo grau de fuga térmica  $\Delta T$ , consulte a Figura 4.5. Para baixas potências, o tempo para atingir a transição de fase é relativamente longo e o calor gerado na profundidade de penetração é conduzido para regiões de menor temperatura, gerando uniformidade de temperatura, ou seja, baixo COV. Com o aumento da potência, o ponto quente e a temperatura de transição de fase são atingidos em um curto período de tempo. Neste caso, o calor gerado na profundidade de penetração não pode ser conduzido adequadamente para os locais de menor temperatura; portanto, a uniformidade da temperatura é pior sob essas circunstâncias, ou seja, alto COV. A biomassa com a pior uniformidade de temperatura é a casca de laranja, como pode ser visto na Figura 4.8a e a madeira a melhor, veja a Figura 4.5. Para a geometria cilíndrica, os COVs para o bagaço de cana são maiores do que para o óleo de palma e na esfera é o inverso. O bagaço da cana-de-açúcar no formato esférico apresenta baixos valores de COV, próximos aos da madeira, para potências superiores a 300 W.

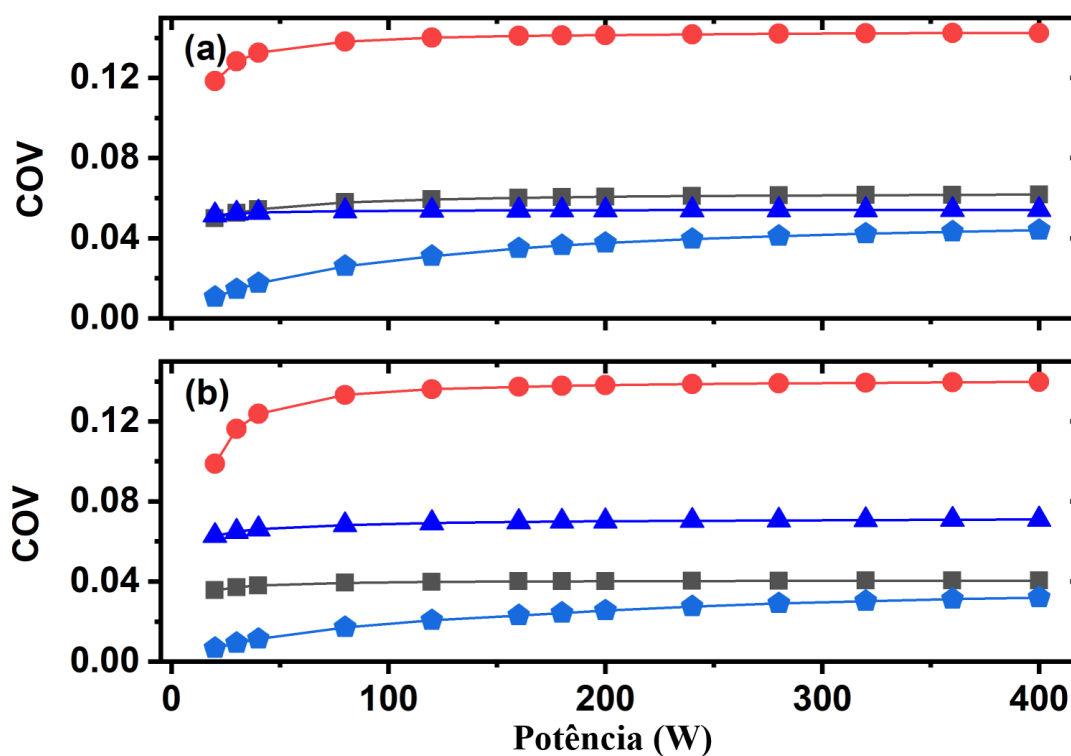


Figura 4.9: Coeficiente de variação (COV) em função da potência, para o cilindro 2, esfera, volume 2 e potência de 180 W. Madeira (◇), bagaço (□), casca de laranja (○) e óleo de palma 18% (△). (a) cilindro e (b) esfera.

O grau de fuga térmica que é a diferença da temperatura máxima e mínima dentro da

amostra tem o mesmo comportamento de COV quando a potência é variada, como pode ser visto na Figura 4.10. Ambos os parâmetros são importantes e revelam a não homogeneidade térmica dentro da amostra durante o aquecimento.

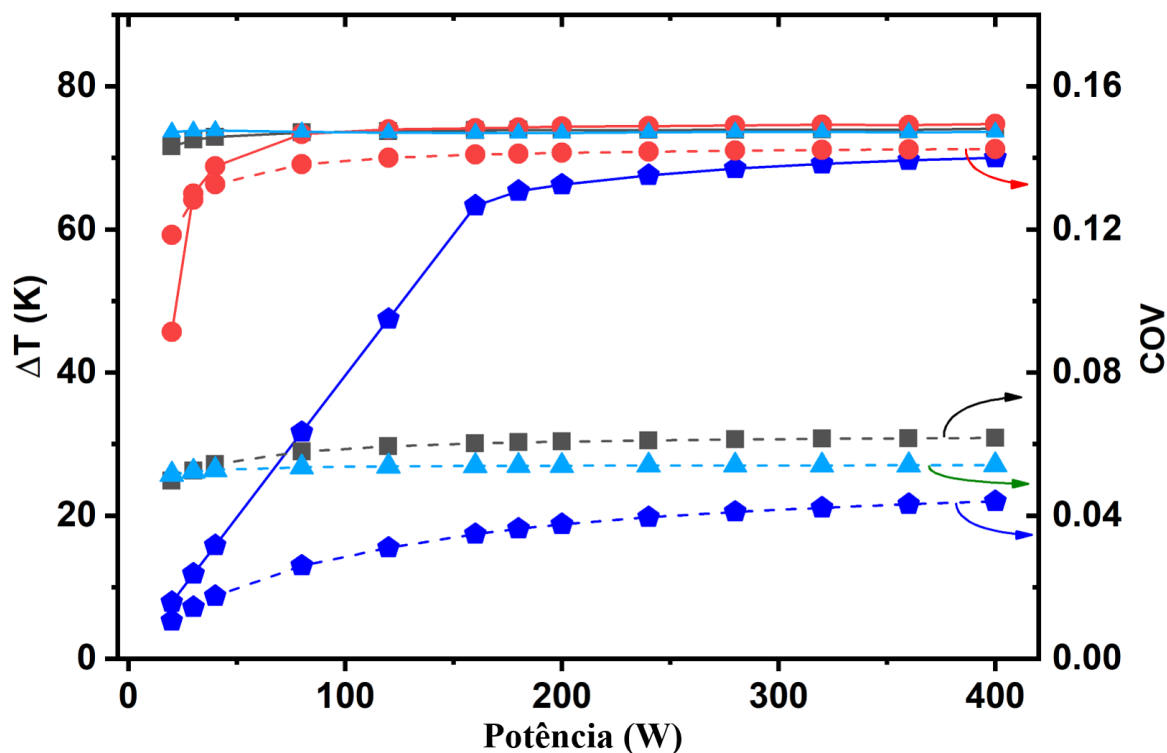


Figura 4.10: Grau de fuga térmica ( $\Delta T$ ) (linhas contínuas) e COV (linhas tracejadas) em função da potência, para o cilindro 2 e volume 2. Madeira ( $\diamond$ ), bagaço ( $\square$ ), casca de laranja ( $\circ$ ) e óleo de palma 18% ( $\triangle$ ).

A eficiência de absorção de energia (PAE) é o parâmetro que representa a capacidade das amostras em absorver energia de micro-ondas. Em aplicações industriais, uma amostra ideal deve ter alta eficiência de absorção de energia (PAE) e baixo valor de coeficiente de variação (COV), garantindo alta absorção de energia e distribuição uniforme da temperatura dentro da amostra. Assim, altos valores de coeficiente de avaliação abrangente (CEC) são desejados, indicando a usabilidade da amostra em cada aplicação. A Figura 4.11 mostra a CEC em função da energia para madeira, bagaço, casca de laranja e óleo de palma. O óleo de palma tem o CEC mais alto, enquanto a madeira tem o mais baixo em ambas as geometrias estudadas. Para potências inferiores a 40 W os CECs da madeira e da casca de laranja são próximos, mas à medida que a potência aumenta esta diferença aumenta. Quando a amostra usada é um cilindro, o bagaço e a casca de laranja têm CECs próximos para todos os valores de potência de micro-ondas analisados, enquanto que, se a amostra for uma esfera os CECs do bagaço e do óleo de palma não estão tão próximos. Pode-se observar também que a geometria cilíndrica apresenta valores de CEC ligeiramente maiores do que os esféricos para o óleo de

palma, indicando que essa geometria é mais adequada para aplicações industriais, enquanto para o bagaço de cana, casca de laranja e madeira a geometria esférica é preferida.

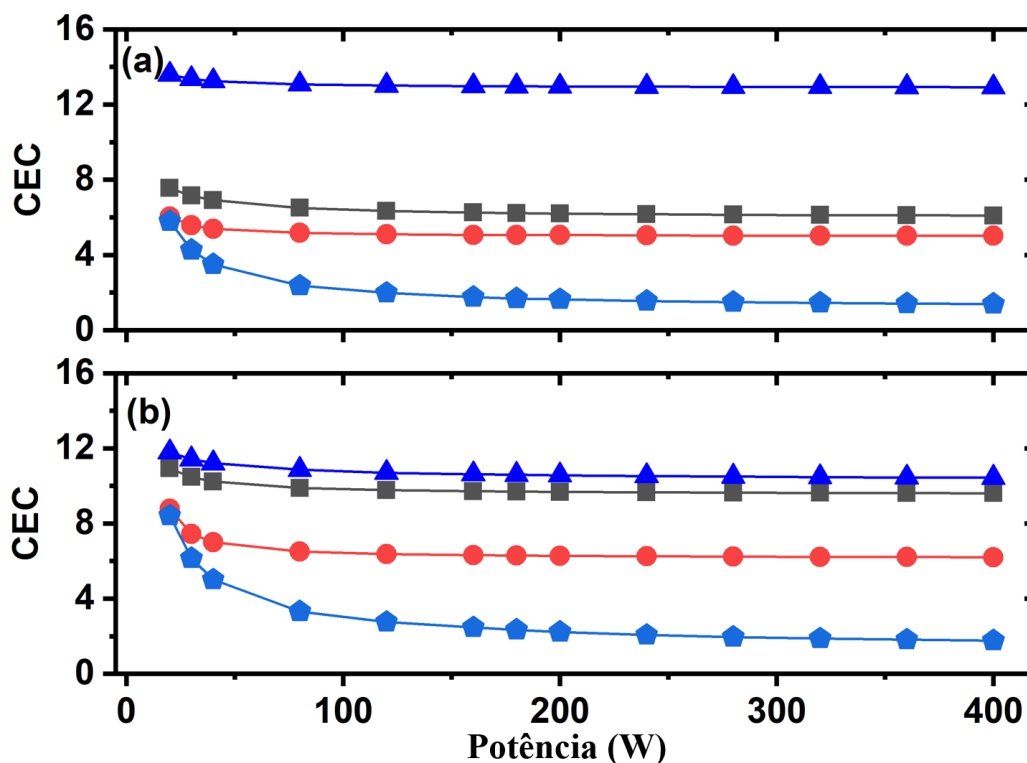


Figura 4.11: Coeficiente de avaliação abrangente (CEC) em função da potência, para o cilindro 2 (a), esfera (b), volume 2 e potência de 180 W. Madeira (◇), bagaço (□), casca de laranja (○) e óleo de palma 18% (△).

## 4.2 Efeito da Umidade

Nesta segunda parte do trabalho estudamos o uso de micro-ondas como método de pré-tratamento para aquecer amostras de materiais derivados de cana-de-açúcar, óleo de palma e algas verdes quando são colocados em um forno de micro-ondas doméstico. Determinou-se a evolução do campo elétrico e da temperatura em função do tempo em amostras cilíndricas e esféricas, com volumes variando de  $10^{-5} \text{ m}^3$  a  $100 \times 10^{-5} \text{ m}^3$  e para umidades diferentes (de 20% a 80%).

As propriedades das biomassas empregadas nestas simulações, como condutividade térmica ( $\text{W/mK}$ ), densidade ( $\text{Kg/m}^3$ ), calor específico ( $\text{J/kgK}$ ), permeabilidade relativa e a condutividade elétrica são mostradas na Tabela 4.4. A permeabilidade relativa e a condutividade elétrica utilizadas neste trabalho foram supostas iguais a 1 e 0, respectivamente [34].

Tabela 4.4: Propriedades das biomassas utilizadas nas simulações

PROPRIEDADE DAS BIOMASSAS	BIOMASSAS		
	Bagaço de Cana-de-açúcar	Óleo de Palma	Algas Verdes
Condutividade térmica (W/mK)	0,059 [143]	0,03 [74]	0,61 [144]
Densidade (Kg/m <sup>3</sup> )	80 [145]	1420 [74]	1000 [144]
Calor específico (J/kgK)	3648,9 [136]	1150 [31]	4200 [144]
Permeabilidade relativa	1	1	1
Condutividade elétrica	0	0	0



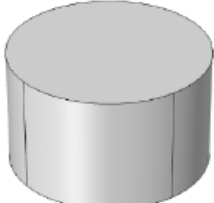
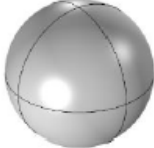
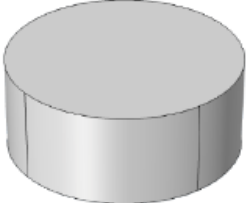
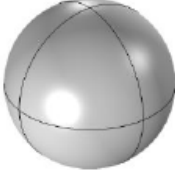
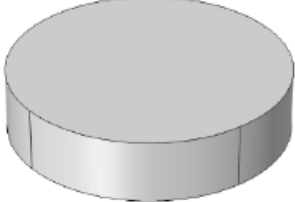

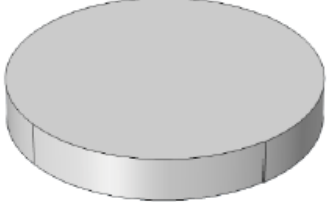
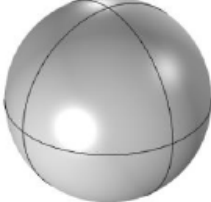
A Tabela 4.5 mostra os tamanhos e formas das amostras utilizadas nas simulações. Um modelo de esfera e três modelos de cilindros foram empregados para verificar a importância da geometria na absorção de micro-ondas quando a umidade é variada.

Os resultados das simulações foram analisados com base nos regimes de absorção, campo elétrico e distribuição de temperatura na cavidade quando as amostras de LCM de cana-de-açúcar, óleo de palma e algas verdes são colocadas em um forno de micro-ondas doméstico. As biomassas foram investigadas em função do tempo de aquecimento e umidade do ponto de vista qualitativo e quantitativo por meio de imagens obtidas para as geometrias cilíndricas e esféricas.

Para determinar  $\lambda_m$ ,  $D_p$ ,  $N_w$ ,  $N_p$ ,  $f_w$  e  $f_p$  para as biomassas bagaço de cana-de-açúcar, óleo de palma e algas verdes é necessário conhecer os parâmetros que caracterizam os materiais dielétricos, ou seja, a permissividade relativa  $\varepsilon'$  e o fator de perda relativo  $\varepsilon''$ .

O comportamento da permissividade relativa e do fator de perda relativa para bagaço de cana, óleo de palma e algas verdes são mostrados na Figura 4.12. Como pode ser visto, a permissividade relativa em função da umidade para as três biomassas investigadas neste trabalho são muito distintas, veja a Figura 4.12 (A). Menores valores de permissividade relativa são encontrados para o bagaço de cana-de-açúcar, revelando sua baixa capacidade de polarização na presença de um campo elétrico, ou seja, baixa capacidade do material em armazenar a energia. As algas verdes e as moléculas do óleo de palma são mais polarizadas pelo campo elétrico de micro-ondas. A permissividade relativa ( $\varepsilon'$ ) do óleo de palma é maior que a das algas verdes para umidades superiores a 50%, e nessa região é mais dipolar, apresentando mais perdas dielétricas e, portanto, mais calor é gerado em seu interior.

Tabela 4.5: Formas e tamanhos das amostras utilizadas nas simulações.

<b>VOLUME</b>	<b>CILINDRO (h = 0,03 m)</b>	<b>ESFERA</b>
$V1 = 2,00 * 10^{-5} \text{ m}^3$	 R1 = 0,015 m	 R1 = 0,017 m
$V2 = 6,25 * 10^{-5} \text{ m}^3$	 R2 = 0,026 m	 R2 = 0,025 m
$V3 = 13,11 * 10^{-5} \text{ m}^3$	 R3 = 0,037 m	 R3 = 0,031 m
$V4 = 40,77 * 10^{-5} \text{ m}^3$	 R4 = 0,066 m	 R4 = 0,046 m
$V5 = 100,00 * 10^{-5} \text{ m}^3$	 R5 = 0,103 m	 R5 = 0,062 m

Os fatores de perda relativa  $\varepsilon''$  em função da umidade são mostrados na Figura 4.12 (B). Pode-se notar que as algas verdes convertem menor quantidade de energia em calor do que o bagaço de cana e o óleo de palma. Na mesma figura pode-se observar que o óleo de palma é mais eficaz na transformação da energia recebida do campo elétrico em calor, sendo mais suscetível a ser tratado com micro-ondas.

Levando em consideração os valores de  $\varepsilon'$  e  $\varepsilon''$  da Figura 4.12,  $\lambda_m$ ,  $D_p$ ,  $N_w$ ,  $N_p$ ,  $f_w$  e  $f_p$  foram calculados para as biomassas em análise e são mostrados na Tabela 4.6.

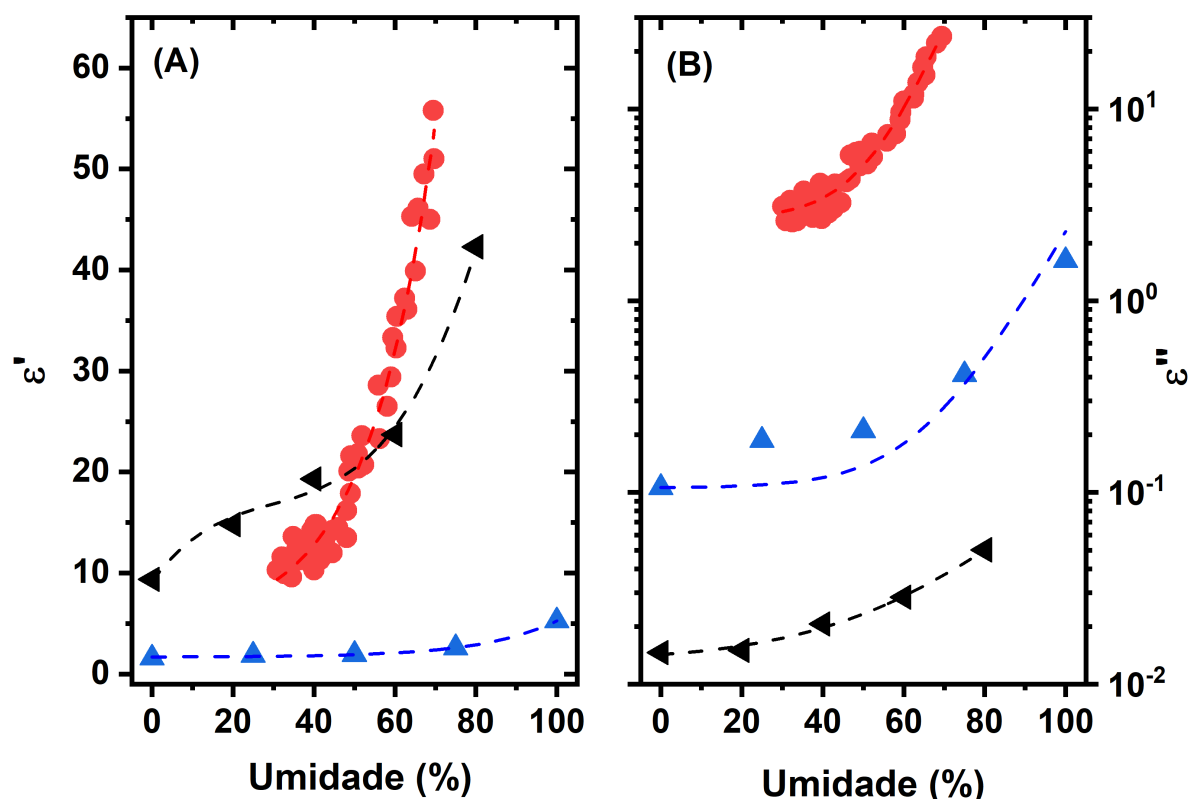


Figura 4.12: Permissividade relativa  $\epsilon'$  (A) e o fator de perda relativa  $\epsilon''$  (B) em função da umidade na amostra. Bagaço de cana-de-açúcar ( $\triangle$ ), óleo de palma ( $\circ$ ) e algas verdes ( $\blacktriangleleft$ ).

Com os valores calculados de  $\lambda_m$ ,  $D_p$ ,  $N_w$ ,  $N_p$ ,  $f_w$  e  $f_p$  para as biomassas, ver Tabela 4.6, pode-se encontrar os regimes de absorção de energia [141, 142]. Bagaço de cana-de-açúcar, óleo de palma e algas verdes foram escolhidos porque possuem amplas variações de  $\epsilon'$  ( $1,3 < \epsilon' < 56,0$ ) e  $\epsilon''$  ( $1,0 \times 10^{-2} < \epsilon'' < 24,0$ ) levando a um grande intervalo para  $f_p$  e  $f_w$ , e devido à sua importância como biomassa para conversão de materiais lignocelulósicos em biocombustíveis renováveis. Pode-se notar que  $f_p$  varia de  $5,1 \times 10^{-4}$  a  $3,3 \times 10^{-1}$  para os materiais selecionados com diferentes umidades.

Por outro lado,  $f_w$  encontra-se na faixa de  $0,09 < f_w < 0,76$  para todos os materiais selecionados, com a cana-de-açúcar apresentando o maior  $f_w = 0,76$  a 20% de umidade e o óleo de palma a 80% o menor  $f_w = 0,09$ . Para os materiais com menor  $f_w$ 's, espera-se que a absorção de energia de micro-ondas exiba fortes ressonâncias, como óleo de palma e algas, e para aquele com maior magnitude de  $f_w$ , espera-se ressonâncias muito fracas, por exemplo, bagaço de cana-de-açúcar, ver Figuras 4.14 e 4.15.

A profundidade de penetração ( $D_p$ ) é uma informação extremamente importante para o entendimento do aquecimento eletromagnético, sendo utilizada para dimensionar a cavidade de micro-ondas e investigar se o campo eletromagnético pode aquecer uniformemente uma determinada amostra. O valor de  $D_p$  está diretamente relacionado à propriedade dielétrica

do material que está sendo aquecido, bem como à frequência das micro-ondas. Para uma distribuição homogênea de temperatura no interior do material a profundidade de penetração precisa ser da mesma ordem de grandeza do material a ser aquecido.

Tabela 4.6:  $\lambda_m, D_p, N_w, N_p, f_w$  e  $f_p$  calculado para as biomassas. Raio da esfera  $R1 = 0,017$  m,  $R2 = 0,031$  m. Raio do cilindro  $R1 = 0,0146$  m,  $H = 0,031$  m;  $R2 = 0,0373$  m,  $H = 0,031$  m. Umidade de 20% e 80%.

<b>Bagaço de cana-de-açúcar</b>						
	$\lambda_m(m)$	$D_p(m)$	$N_w$	$N_p$	$f_w$	$f_p$
Esfera R1 - 20%	$9,3 \times 10^{-2}$	$3,2 \times 10^{-1}$	0,4	$1,0 \times 10^{-1}$	0,76	0,05
Esfera R1 - 80%	$7,1 \times 10^{-2}$	$1,3 \times 10^{-1}$	0,5	$2,6 \times 10^{-1}$	0,58	0,09
Esfera R2 - 20%	$9,3 \times 10^{-2}$	$3,2 \times 10^{-1}$	0,7	$1,9 \times 10^{-1}$	0,76	0,05
Esfera R2 - 80%	$7,1 \times 10^{-2}$	$1,3 \times 10^{-1}$	0,9	$4,8 \times 10^{-1}$	0,58	0,09
Cilindro R1 - 20%	$9,3 \times 10^{-2}$	$3,2 \times 10^{-1}$	0,3	$9,1 \times 10^{-1}$	0,76	0,05
Cilindro R1 - 80%	$7,1 \times 10^{-2}$	$1,2 \times 10^{-1}$	0,4	$2,3 \times 10^{-1}$	0,58	0,09
Cilindro R2 - 20%	$9,3 \times 10^{-2}$	$3,2 \times 10^{-1}$	0,8	$2,3 \times 10^{-1}$	0,76	0,05
Cilindro R2 - 80%	$7,1 \times 10^{-2}$	$1,2 \times 10^{-1}$	1,0	$5,8 \times 10^{-1}$	0,58	0,09

<b>Óleo de Palma</b>						
	$\lambda_m(m)$	$D_p(m)$	$N_w$	$N_p$	$f_w$	$f_p$
Esfera R1 - 20%	$4,2 \times 10^{-2}$	$4,1 \times 10^{-2}$	0,8	0,8	0,34	0,16
Esfera R1 - 80%	$1,2 \times 10^{-2}$	$5,6 \times 10^{-3}$	2,9	6,1	0,09	0,33
Esfera R2 - 20%	$4,2 \times 10^{-2}$	$4,1 \times 10^{-2}$	1,5	1,5	0,34	0,16
Esfera R2 - 80%	$1,2 \times 10^{-2}$	$5,6 \times 10^{-3}$	5,4	11,0	0,09	0,33
Cilindro R1 - 20%	$4,2 \times 10^{-2}$	$4,1 \times 10^{-2}$	0,7	0,7	0,34	0,16
Cilindro R1 - 80%	$1,1 \times 10^{-2}$	$5,6 \times 10^{-3}$	2,5	5,2	0,09	0,33
Cilindro R2 - 20%	$4,2 \times 10^{-2}$	$4,1 \times 10^{-2}$	1,8	1,8	0,34	0,16
Cilindro R2 - 80%	$1,1 \times 10^{-2}$	$5,6 \times 10^{-3}$	6,5	13,3	0,09	0,33

<b>Algas Verdes</b>						
	$\lambda_m(m)$	$D_p(m)$	$N_w$	$N_p$	$f_w$	$f_p$
Esfera R1 - 20%	$3,2 \times 10^{-2}$	10,0	1,1	$3,4 \times 10^{-3}$	0,26	$5,1 \times 10^{-4}$
Esfera R1 - 80%	$1,9 \times 10^{-2}$	5,1	1,6	$5,8 \times 10^{-3}$	0,15	$5,9 \times 10^{-4}$
Esfera R2 - 20%	$3,2 \times 10^{-2}$	10,0	1,9	$6,2 \times 10^{-3}$	0,26	$5,1 \times 10^{-4}$
Esfera R2 - 80%	$1,9 \times 10^{-2}$	5,1	3,3	$1,2 \times 10^{-2}$	0,15	$5,9 \times 10^{-4}$
Cilindro R1 - 20%	$3,2 \times 10^{-2}$	10,0	0,9	$2,9 \times 10^{-3}$	0,26	$5,1 \times 10^{-4}$
Cilindro R1 - 80%	$1,9 \times 10^{-2}$	5,1	1,6	$5,8 \times 10^{-3}$	0,15	$5,9 \times 10^{-4}$
Cilindro R2 - 20%	$3,2 \times 10^{-2}$	10,0	2,3	$7,5 \times 10^{-3}$	0,26	$5,1 \times 10^{-4}$
Cilindro R2 - 80%	$1,9 \times 10^{-2}$	5,1	4,0	$1,5 \times 10^{-2}$	0,15	$5,9 \times 10^{-4}$

A influência da umidade em  $D_p$  e  $\tan\delta$  são mostradas na Figura 4.13. Uma vez que a constante dielétrica da água é 78 à temperatura ambiente, materiais com alto teor de água apresentam altos valores de  $\epsilon'$  reduzindo a profundidade de penetração da radiação de micro-ondas.

Como pode ser visto na Figura 4.13, à medida que a umidade aumenta, o  $D_p$  diminui para as algas verdes, mas apresenta valores elevados, por exemplo, para 20% de umidade, o  $D_p$  é de 10 m! Para o bagaço de cana-de-açúcar a profundidade de penetração é de 0,13 m

para 80% de umidade. O óleo de palma apresenta os menores valores de  $Dp$ , variando de 0,04 m a 0,006 m à medida que a umidade aumenta de 20% a 80%. No presente estudo, o  $Dp$  para o óleo de palma tem a mesma ordem de grandeza dos materiais usados nas simulações. A profundidade de penetração para o bagaço de cana-de-açúcar pode chegar a ser 30 vezes maior que as amostras utilizadas nas simulações, enquanto que para as algas verdes o  $Dp$  pode ter valores de 700 vezes as dimensões das amostras simuladas. Podemos esperar uma alta homogeneidade de temperatura para o óleo de palma.

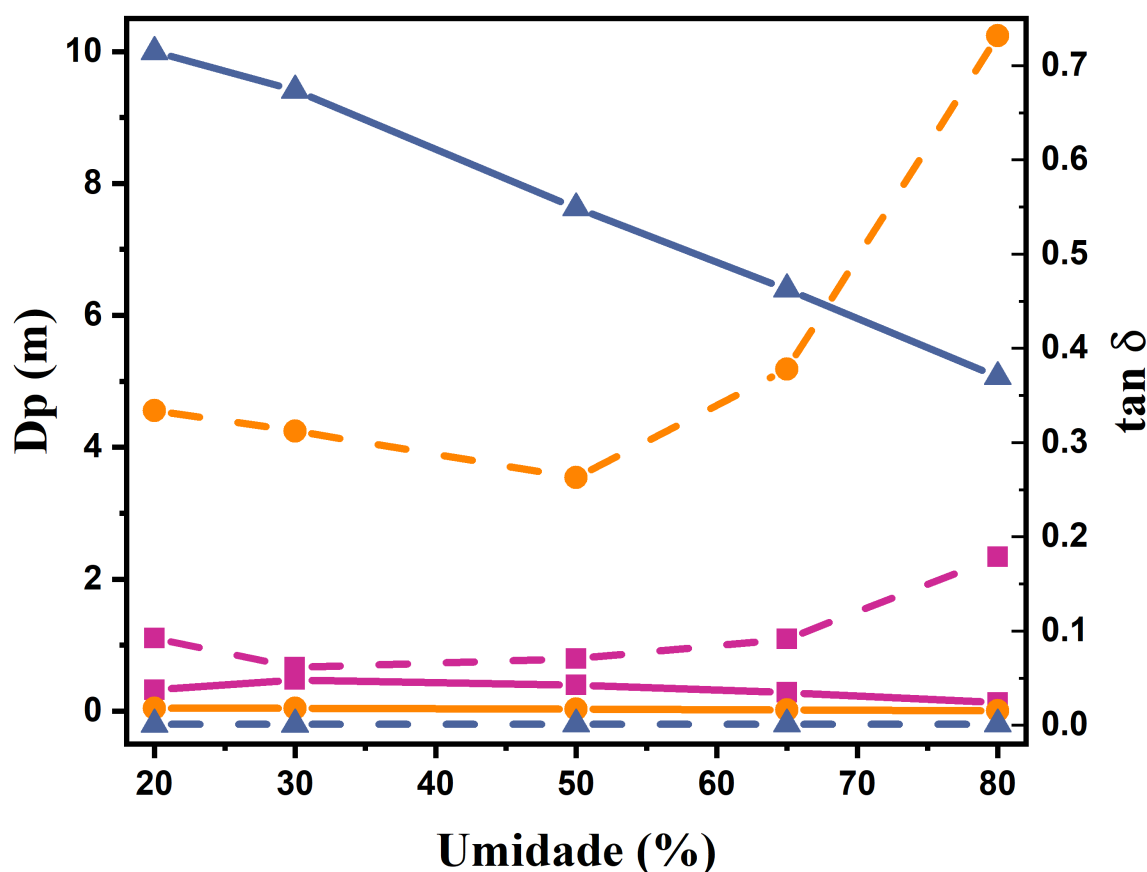


Figura 4.13: Profundidade de penetração ( $Dp$ , linhas contínuas) e  $\tan \delta$  (linhas tracejadas) em função da umidade nas amostras. Bagaço ( $\square$ ), óleo de palma ( $\circ$ ) e algas verdes ( $\triangle$ ).

A  $\tan \delta$  representa a energia absorvida pelas amostras. Valores mais altos indicam mais absorção de energia e aquecimento do material. Em geral, as biomassas possuem baixo  $\tan \delta$ , e para um aquecimento eficiente em aplicações industriais, é desejável a adição de materiais com altos valores de  $\tan \delta$  nas amostras a serem tratadas. Como pode ser visto na Figura 4.13, as algas verdes possuem  $\tan \delta \cong 0,001$ , valor que indica que o material é transparente a micro-ondas, necessitando de mais tempo para o aquecimento do material. O óleo de palma é a biomassa com maior  $0,3 < \tan \delta < 0,7$  e, portanto, é mais eficiente no aquecimento. O bagaço de cana-de-açúcar possui  $\tan \delta < 0,2$  e altos valores de  $Dp$  o que favorece um aquecimento não homogêneo e formação de pontos quentes.



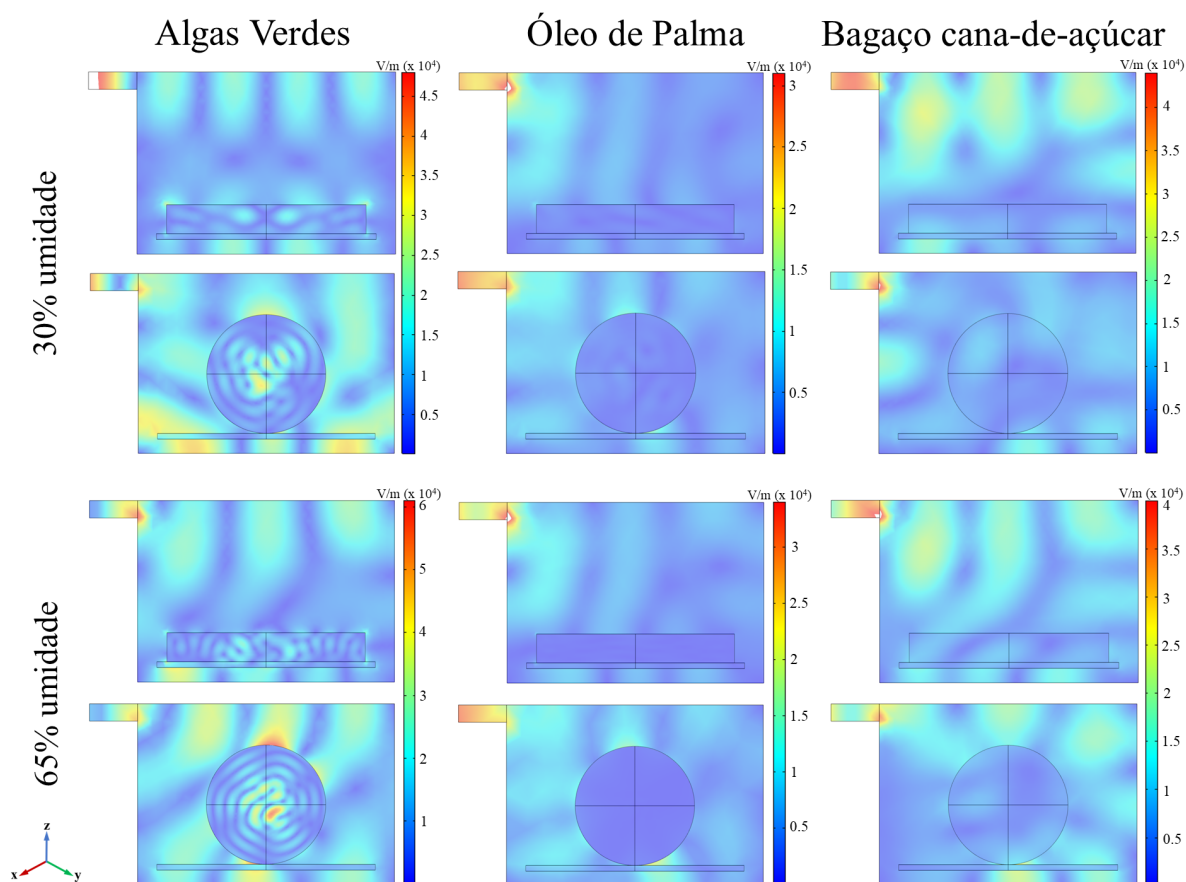


Figura 4.14: Distribuição do campo elétrico para algas verdes, óleo de palma e bagaço de cana-de-açúcar. Cilindro e esfera, volume de  $100 \times 10^{-5} \text{ m}^3$  com umidade de 30% e 65%.

A Figura 4.14 mostra a distribuição do campo elétrico no forno e nas amostras em função da geometria, para 30% e 65% de umidade. A distribuição do campo elétrico é diretamente afetada pela geometria da amostra, tipo de biomassa e umidade, como pode ser visto na Figura 4.14. Assim, podemos observar a não uniformidade da distribuição do campo elétrico, mostrando regiões de alta e baixa intensidade, nas algas verdes com 65% de umidade, a intensidade do campo elétrico chega a ser sessenta vezes maior ( $5,9 \times 10^4 \text{ V/m}$ ) do que regiões com baixas intensidades de campo elétrico ( $0,098 \times 10^{-5} \text{ V/m}$ ) e apresenta ressonâncias que não são observadas em outras biomassas. Esses fatores impactam diretamente na formação de pontos quentes e na evolução da distribuição não uniforme da temperatura.

Segundo Basak et al. [142], além da classificação dos regimes de absorção de energia, todos os materiais biológicos podem ser classificados em quatro grupos: (I) baixo  $f_p$  e baixo  $f_w$  ( $f_p \leq 0,1, f_w \leq 0,1$ ), (II) baixo  $f_p$  e alto  $f_w$  ( $f_p \leq 0,1, f_w \gg 0,1$ ), (III) alto  $f_p$  e baixo  $f_w$  ( $f_p \gg 0,1, f_w \leq 0,1$ ) e (IV) alto  $f_p$  e alto  $f_w$  ( $f_p \gg 0,1, f_w \gg 0,1$ ).

O bagaço de cana é um exemplo do grupo (II) com baixo  $f_p$  e alto  $f_w$ , ver Tabela 4.6, com taxa de aquecimento superior ao óleo de palma que pertence ao grupo (IV), alto  $f_p$  e alto  $f_w$ . As algas verdes pertencem ao grupo (II) com baixo  $f_p$  e alto  $f_w$ .

Na Figura 4.15 observa-se a distribuição de temperatura para algas verdes, óleo de palma e bagaço de cana-de-açúcar em função da geometria e tempo de aquecimento para 30% e 65% de umidade. O óleo de palma apresenta distribuições de temperatura simétricas em relação ao centro das amostras em ambas as geometrias. Nota-se a presença de ressonâncias devido ao alto  $f_p$  com maior temperatura no lado esquerdo, para tempos de aquecimento superiores a 30 s e 30% de umidade. Nessa situação, como pode ser visto na Figura 4.12, a permissividade relativa  $\varepsilon'$  e o fator de perda  $\varepsilon''$  possuem os menores valores. Por outro lado, para umidade de 65% não são observadas ressonâncias, onde  $\varepsilon'$  e  $\varepsilon''$  possuem os maiores valores.

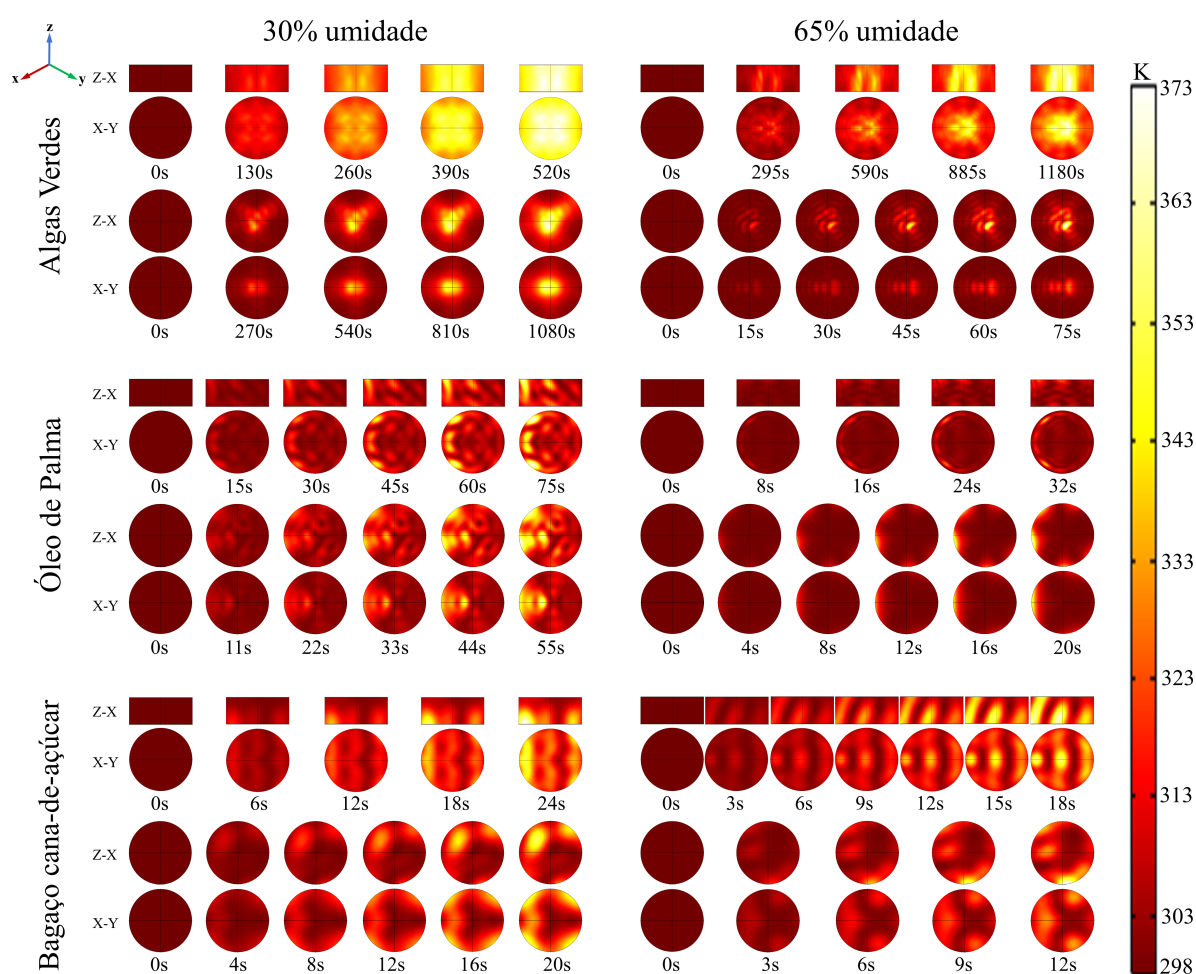


Figura 4.15: Distribuição da temperatura para algas verdes, óleo de palma e bagaço de cana-de-açúcar. Cilindro e esfera, volume de  $100 \times 10^{-5} m^3$  com umidade de 30% e 65%.

O óleo de palma apresenta tempo de aquecimento comparável ao do bagaço da cana-de-açúcar. A formação de pontos quentes pode ser observada no centro e no lado esquerdo das amostras cilíndricas e esféricas, para tempos superiores a 18 s e umidade de 30%. Pontos quentes são observados no bagaço de cana-de-açúcar para umidade de 65% e tempo de 12 s no lado esquerdo do cilindro e a partir 9 s na esfera, na parte inferior da amostra.

É possível observar ressonâncias tanto no perfil do campo elétrico (Fig. 4.14) e na temperatura (Fig. 4.15) com umidades de 30% e 65%, respectivamente, para as algas verdes, com baixo  $f_p$  e alto  $f_w$ . Porém, os tempos de aquecimento são consideravelmente maiores que os do óleo de palma e do bagaço de cana-de-açúcar, ver Figura 4.15, de 260 s na geometria cilíndrica com 30% de umidade é de 590 s para 65%. No caso da esfera, a partir de 270 s em 30% de umidade e a partir de 15 s para umidade de 65%. Esse comportamento tão diferente pode ser atribuído à variação de  $\varepsilon'$  e  $\varepsilon''$  com a umidade. Dentre as biomassas estudadas neste trabalho, as algas verdes possuem o menor fator de perda.

Pode-se observar na Figura 4.16 que o tempo para a amostra atingir 373 K diminui quando a potência aumenta para todas as biomassas, como é de se esperar. As algas verdes apresentam maior tempo de aquecimento e tendem a se estabilizar após 400 W de potência. A forma cilíndrica das algas verdes apresenta maior tempo de aquecimento do que a esfera. Já a cana-de-açúcar e o óleo de palma têm tempo de decaimento semelhantes, independente da configuração geométrica, e atingem um platô após 200 W.

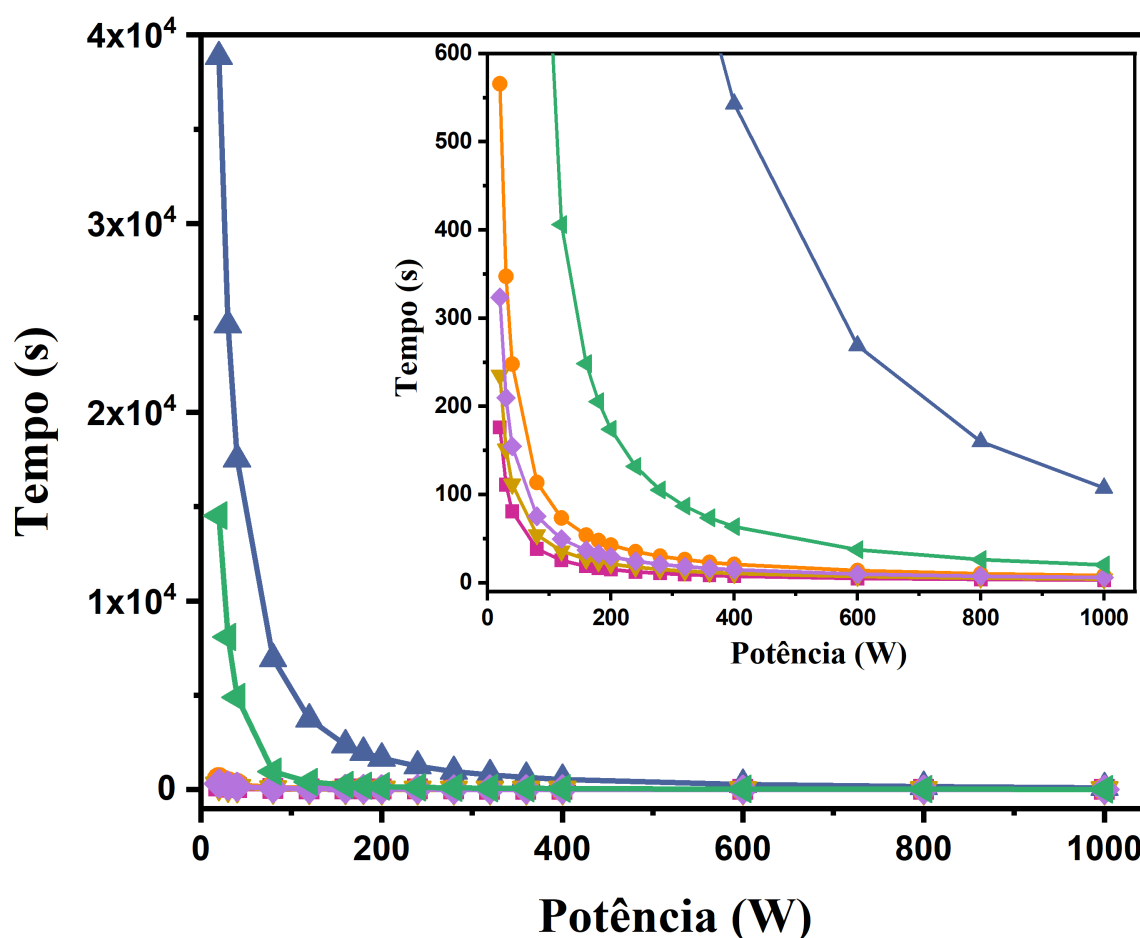


Figura 4.16: Tempo necessário para atingir 373 K em função da potência. Cilindro e esfera para o volume de  $40,77 \times 10^{-5} m^3$  e umidade de 65%. Bagaço (cilindro  $\square$ , esfera  $\nabla$ ), óleo de palma (cilindro  $\circ$ , esfera  $\diamond$ ) e algas verdes (cilindro  $\triangle$ , esfera  $\triangleleft$ ).

Pode-se observar na Figura 4.17 a temperatura média ( $\bar{T}$ ) (curvas contínuas) e a energia absorvida (curvas tracejadas) em função da potência para o cilindro (A) e a esfera (B), quando o volume de ambas as formas é de  $40,77 \times 10^{-5} m^3$  e umidade de 65%. A temperatura média ( $\bar{T}$ ) e a energia absorvida apresentam a mesma tendência quando a potência é variada. As algas verdes têm a maior temperatura média e energia absorvida para baixos valores de potência de tratamento, antes de 100 W, e diminui quando a potência aumenta. Ressalta-se que o tempo de aquecimento para atingir 373 K diminui com o aumento da potência, o que explica a diminuição de ( $\bar{T}$ ) e da energia absorvida com a potência. A forma geométrica das amostras influencia principalmente no bagaço de cana-de-açúcar. A geometria esférica apresenta maior ( $\bar{T}$ ) do que a geometria cilíndrica, mas a energia absorvida é baixa. Na verdade, o bagaço é a biomassa com menor energia absorvida, independente da forma. O óleo de palma tem energia absorvida constante em função da potência e apresenta valores próximos aos do bagaço de cana-de-açúcar.

O coeficiente de variação (COV) é uma medida da uniformidade da temperatura dentro da amostra, é um parâmetro útil para remover o efeito da variação média, sendo uma medida mais eficaz da não uniformidade da temperatura. Valores mais altos de COV significariam uma maior não uniformidade de aquecimento. O grau de fuga térmica, que é a diferença da temperatura máxima e mínima dentro da amostra, tem o mesmo comportamento do COV quando a potência é variada, como pode ser visto na Figura 4.18. Ambos os parâmetros são importantes e revelam a falta de homogeneidade térmica dentro da amostra durante o aquecimento. As algas verdes apresentam comportamento diferente do bagaço de cana e do óleo de palma, quando a potência é variada. Para a geometria cilíndrica e baixa potência, o  $\Delta T$ , para as algas verdes, é sempre menor que outras biomassas, assim como o COV até 700 W. Para a forma esférica o  $\Delta T$  é menor que outras biomassas até 50 W de potência. Para 120 W o grau de fuga térmica, para algas verdes, atinge o valor do óleo de palma a 75 K. O COV em geometria esférica é o mesmo do bagaço de cana na potência de 60 W e apresenta o maior valor após 280 W. Deve ser enfatizado que para uma boa uniformidade de temperatura dentro das amostras é desejável baixo COV. O bagaço de cana-de-açúcar e o óleo de palma apresentam  $\Delta T$  e COV constantes após 100 W, em ambas as geometrias. O bagaço de cana-de-açúcar, na forma esférica, tem baixo valor de COV (0,08).

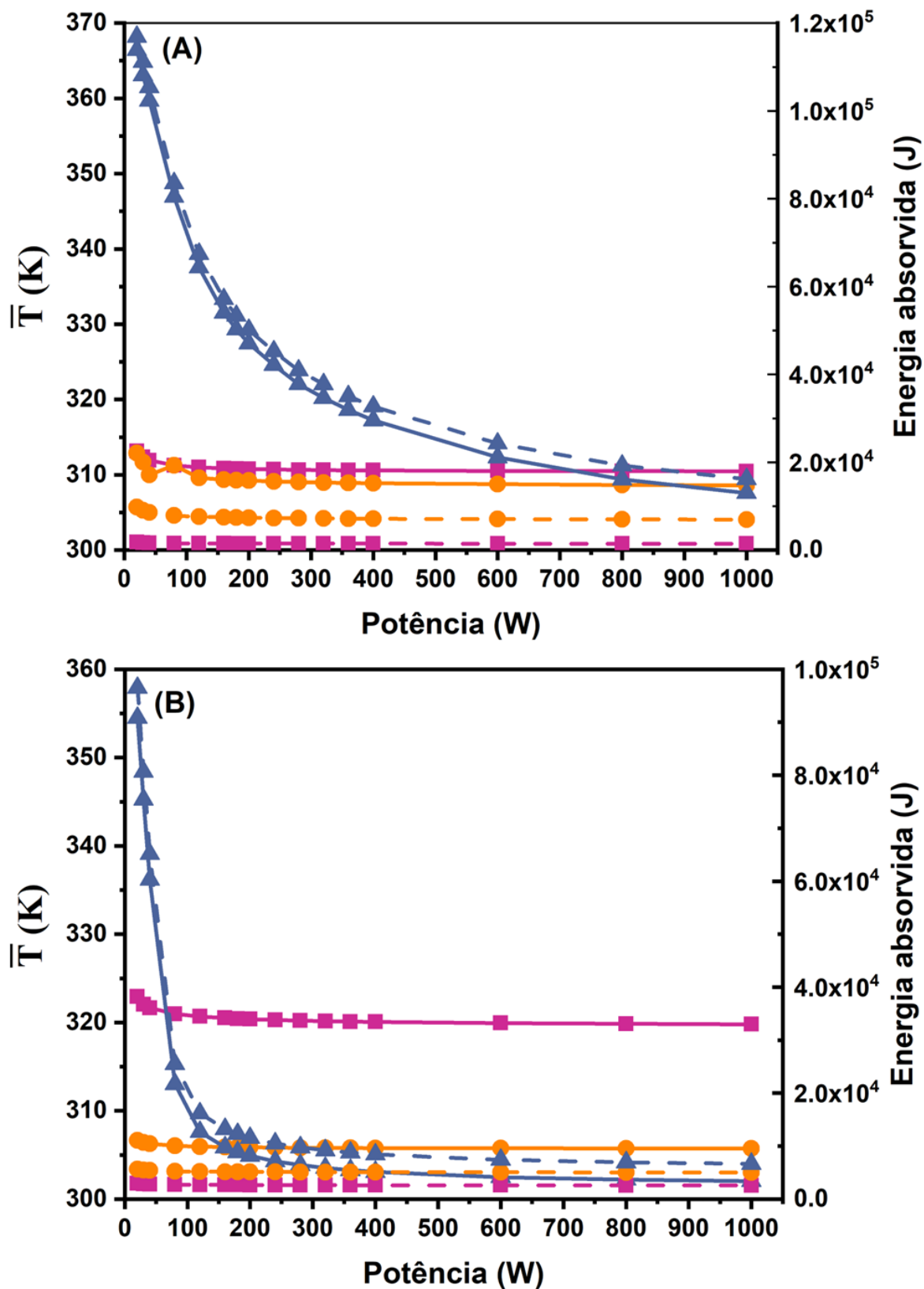


Figura 4.17: Temperatura média ( $\bar{T}$ ) (curvas contínuas) e energia absorvida (curvas tracejadas) em função da potência para o cilindro (A) e a esfera (B). Volume de  $40,77 \times 10^{-5} m^3$  e unidade de 65%. Bagaço ( $\square$ ), óleo de palma ( $\circ$ ) e algas verdes ( $\triangle$ ).

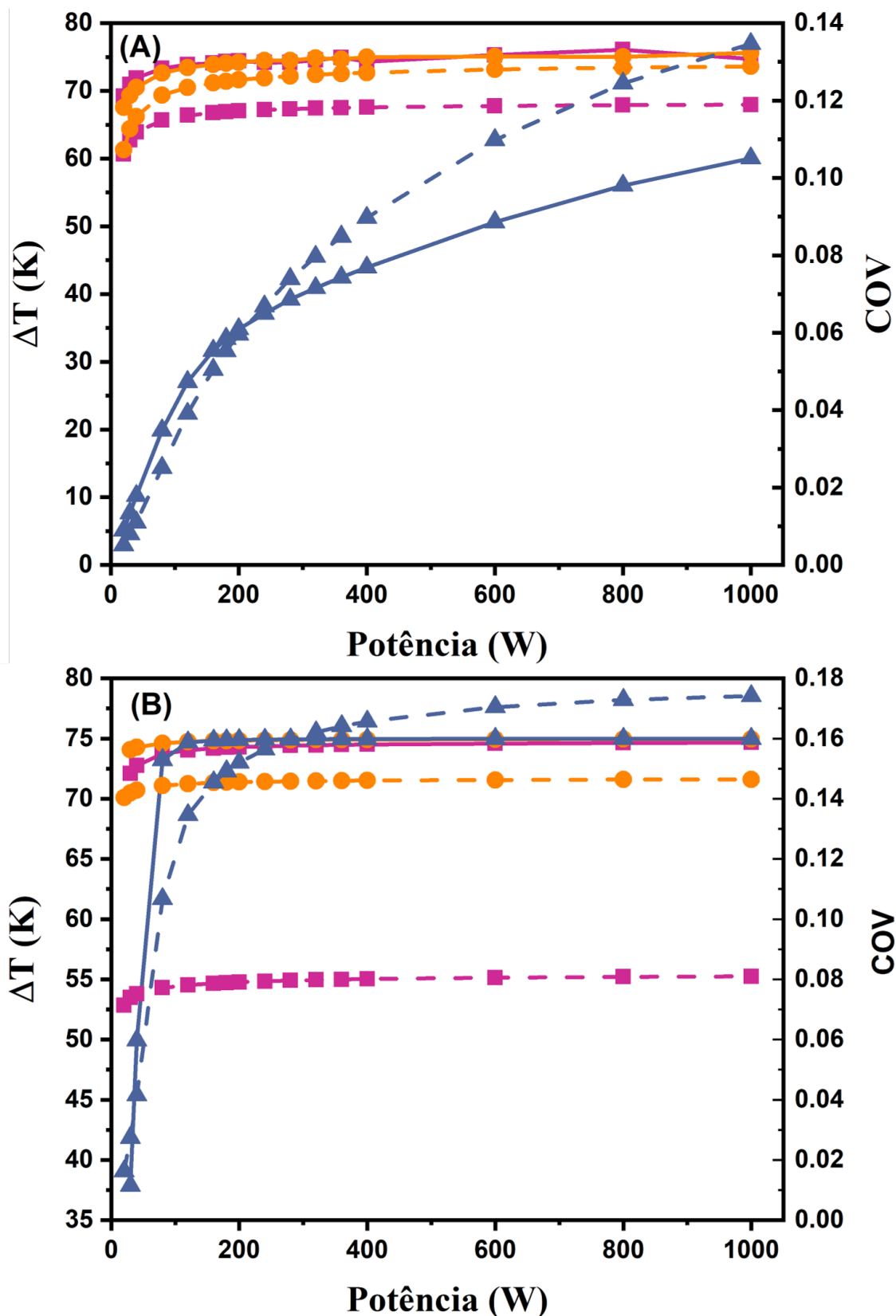


Figura 4.18: Grau de fuga térmica ( $\Delta T$ ) (curvas contínuas) e COV (curvas tracejadas) em função da potência para o cilindro (A) e a esfera (B). Volume de  $40,77 \times 10^{-5} m^3$  e umidade de 65%. Bagaço (□), óleo de palma (○) e algas verdes (△).

A capacidade de uma determinada amostra de absorver a energia de micro-ondas é expressa pela razão entre a potência absorvida e a potência de entrada, denominada eficiência

de absorção de energia (PAE):

O coeficiente de avaliação abrangente (CEC) é a razão entre o PAE e o valor de COV. O valor de CEC pode medir a usabilidade das amostras em uma determinada condição, uma vez que um valor maior de CEC apresenta uma amostra com alto PAE e/ou baixo COV, que pode ser escolhido de acordo com as necessidades específicas de um processo de aquecimento por micro-ondas.

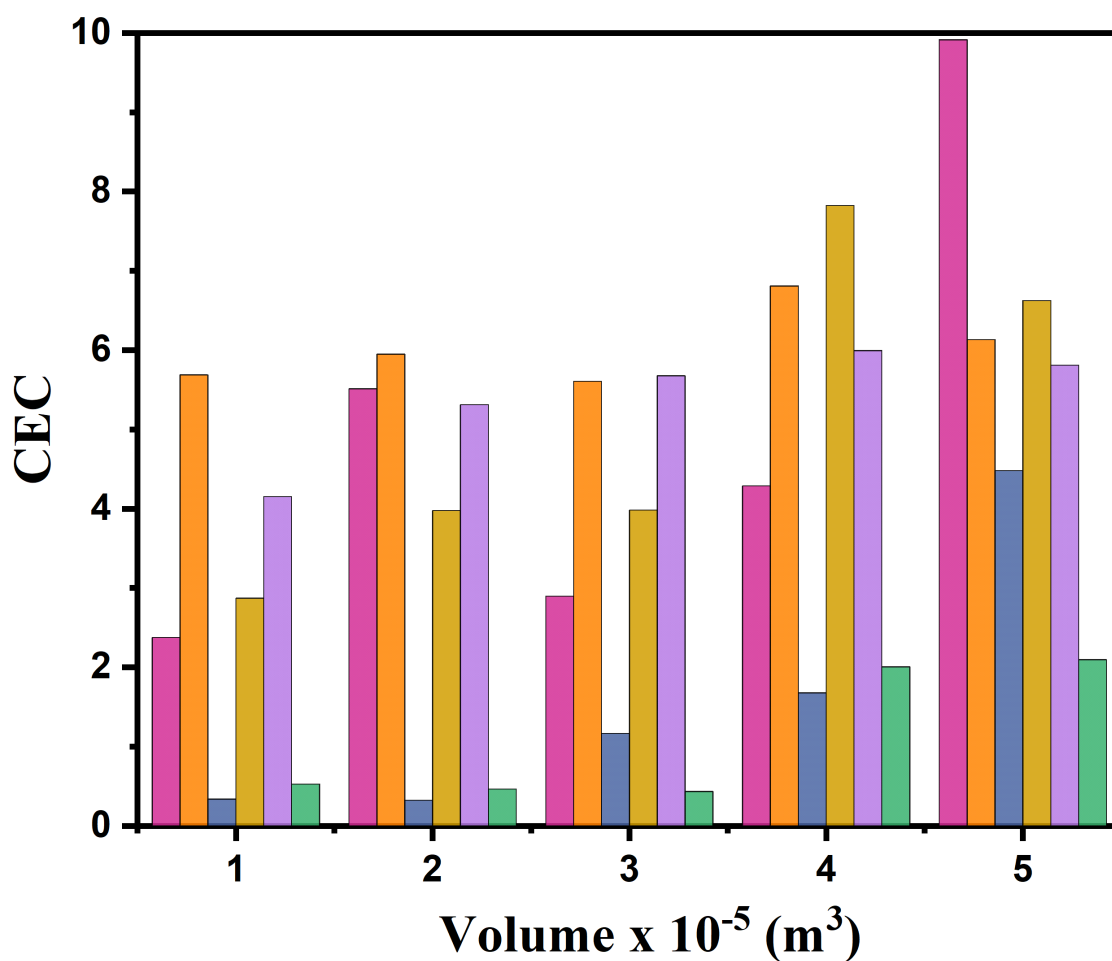


Figura 4.19: Coeficiente de avaliação abrangente (CEC) em função do volume, para o cilindro e a esfera. Umidade de 65% e potência de 400 W. Bagaço (cilindro  $\square$ , esfera  $\square$ ), óleo de palma (cilindro  $\square$ , esfera  $\square$ ) e algas verdes (cilindro  $\square$ , esfera  $\square$ ).

O coeficiente de avaliação abrangente (CEC) em função do volume para formas cilíndricas e esféricas é mostrado na Figura 4.19. Na indústria, um material ideal, sob tratamento de micro-ondas, deve ter alta eficiência de absorção de energia e baixo valor de coeficiente de variação, garantindo alta absorção de energia e distribuição uniforme de temperatura dentro da amostra. Assim, altos valores de coeficiente de avaliação abrangente são desejados, indicando a usabilidade da amostra em cada aplicação. No bagaço de cana-de-açúcar, a geometria cilíndrica e esférica apresentam um comportamento não uniforme à medida que o volume das amostras varia. Para o cilindro há um aumento do CEC do volume  $1 \times 10^{-5} \text{ m}^3$  para  $2 \times 10^{-5} \text{ m}^3$ , diminui

em  $3 \times 10^{-5} m^3$  e então aumenta até  $5 \times 10^{-5} m^3$ . Na geometria esférica, o CEC aumenta em função do volume. Para o óleo de palma, a geometria cilíndrica é aproximadamente constante, enquanto que para a geometria esférica, o CEC aumenta inicialmente e depois permanece constante com a variação do volume. Para as algas verdes o CEC apresenta o menor valor entre as biomassas, mas aumenta quando o volume aumenta para a geometria cilíndrica e a esfera diminui até o volume 3 e depois aumenta.

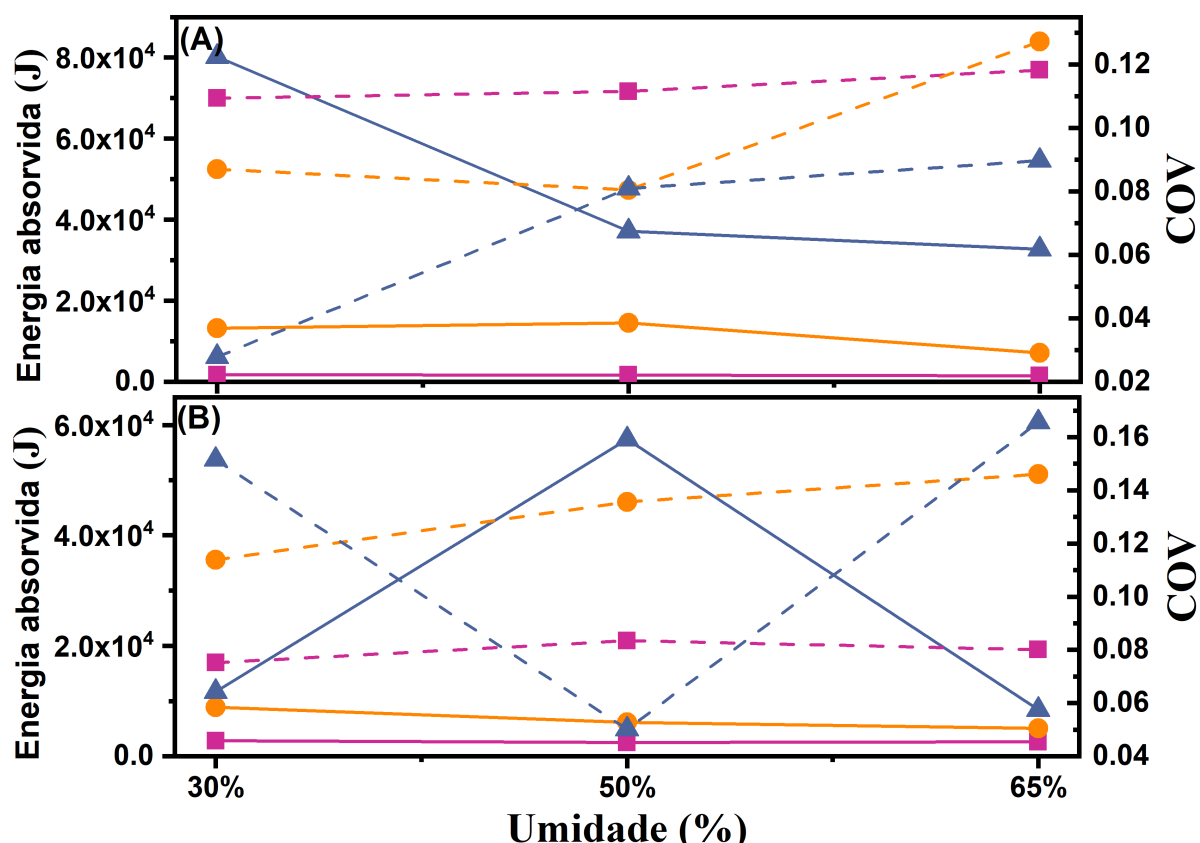


Figura 4.20: Energia absorvida (linhas contínuas) e coeficiente de variação (linhas tracejadas) em função da umidade para o cilindro (A) e a esfera (B). Volume de  $40,77 \times 10^{-5} m^3$  e potência de 400 W. Bagaço ( $\square$ ), óleo de palma ( $\circ$ ) e algas verdes ( $\triangle$ ).

A Figura 4.20 apresenta o resultado da energia absorvida e o COV em função da umidade. Como pode ser visto na Figura 4.20 (A), para a forma cilíndrica, a alga verde tem a maior absorção de energia, mas com altos valores de COVs, indicando baixa homogeneidade na distribuição de temperatura no interior das amostras, ver Figura 4.15. Quando a amostra é esférica, o COV das algas verdes diminui até 50% de umidade e aumenta após este valor, enquanto a energia absorvida apresenta comportamento contrário. Para a geometria cilíndrica o COV aumenta até 50% e depois é quase constante até 65%. A energia absorvida diminui acentuadamente até 50% e mais lentamente até 65%. O menor valor de energia absorvida é obtido para o bagaço de cana, independentemente da geometria ou umidade, mas com alto COV para geometria cilíndrica. O óleo de palma tem baixa energia absorvida e alto COV,



independente da geometria e umidade.

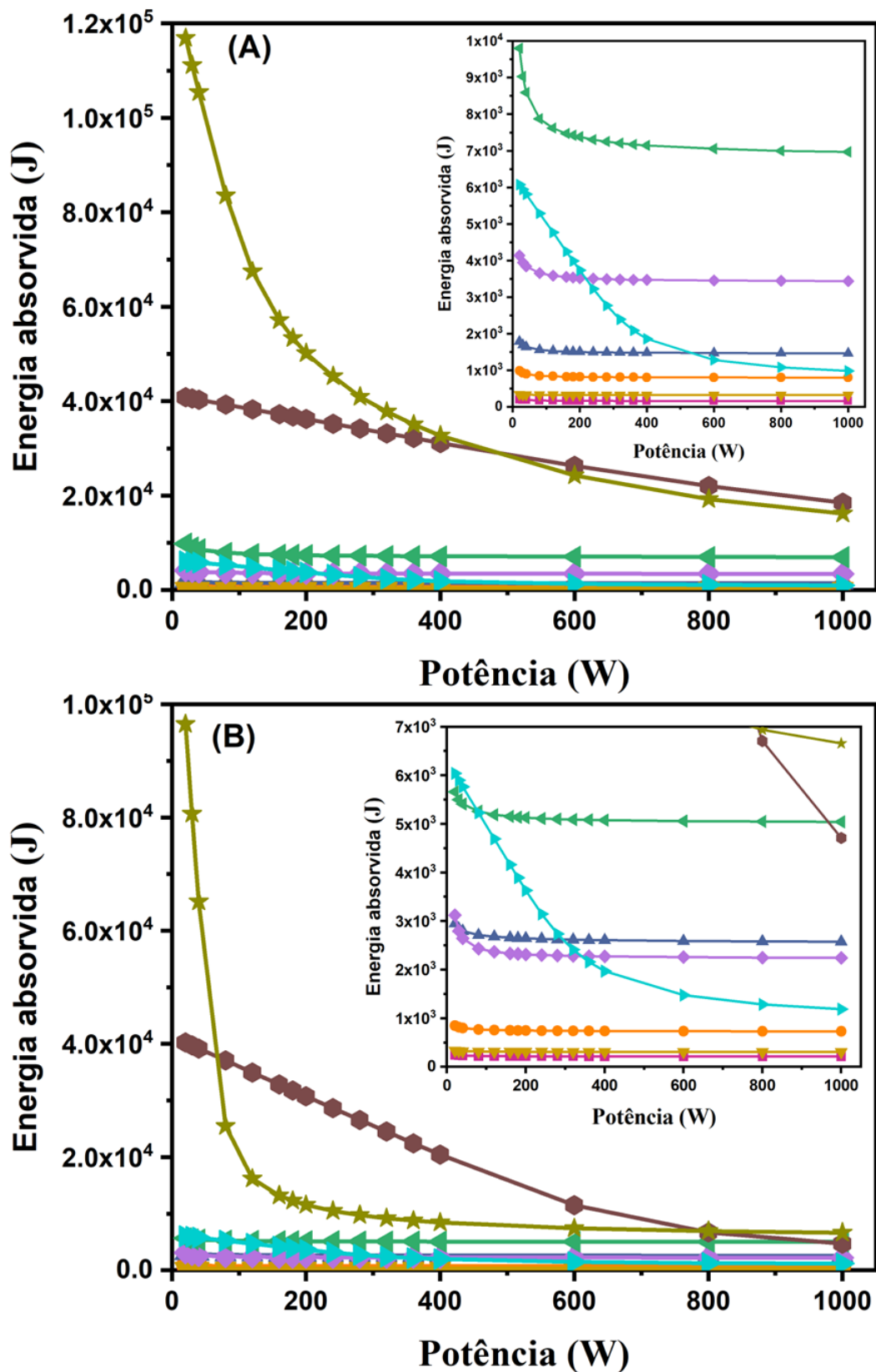


Figura 4.21: Energia absorvida em função da potência para cilindros (A) e esferas (B). Volumes de  $2 \times 10^{-5} m^3$  (1),  $13,11 \times 10^{-5} m^3$  (3) e  $40,77 \times 10^{-5} m^3$  (4). Umidade de 65%. Bagaço volume 1 ( $\square$ ), volume 3 ( $\circ$ ) e volume 4 ( $\triangle$ ); óleo de palma volume 1 ( $\nabla$ ), volume 3 ( $\diamond$ ) e volume 4 ( $\triangleleft$ ); algas verdes volume 1 ( $\triangleright$ ), volume 3 ( $\circ$ ) e volume 4 ( $\star$ ).

A energia absorvida pelas amostras nas formas cilíndrica e esférica, em função da potência, é apresentada na Figura 4.21, para os três volumes de bagaço de cana, óleo de palma e algas verdes para umidade de 65%. Pode-se observar, em ambas as geometrias, que a alga verde absorve melhor a energia para os volumes 3 e 4 para em ambas geometrias, e para o volume 1 a energia absorvida é menor que a absorvida pela cana-de-açúcar e óleo de palma, tanto na geometria cilíndrica quanto na esférica, o que é esperado para baixas potências no caso (B). A energia máxima absorvida é inferior a  $6 \times 10^3$  J a 15 W para o volume 1 enquanto para os volumes 3 e 4 a energia é em torno de  $10^5$  J.

O bagaço de cana e o óleo de palma apresentam aproximadamente um perfil de absorção constante para ambas as geometrias e volumes, exceto em potências menores que 100 W. Para a geometria cilíndrica, a energia absorvida pelo óleo de palma é duas vezes maior que a energia absorvida pelo bagaço de cana e para a geometria esférica, eles são aproximadamente os mesmos para os volumes 3 (óleo de palma) e 4 (bagaço de cana-de-açúcar). O óleo de palma, volume 4, é a biomassa com maior energia absorvida, esperada para potências menores que 100 W em geometria esférica.

A Figura 4.22 mostra a potência absorvida em função do volume e da razão superfície sobre volume ( $S/V$ ). O óleo de palma apresenta maior potência absorvida nos dois casos, enquanto as algas verdes a menor. A potência absorvida pelas amostras aumenta quando o volume da amostra aumenta devido a maior quantidade de massa disponível para absorção da radiação de micro-ondas. Quando se varia a relação  $S/V$ , observa-se a diminuição da absorção de potência pelas amostras, evidenciando a maior importância do aumento do volume do que da superfície das amostras.

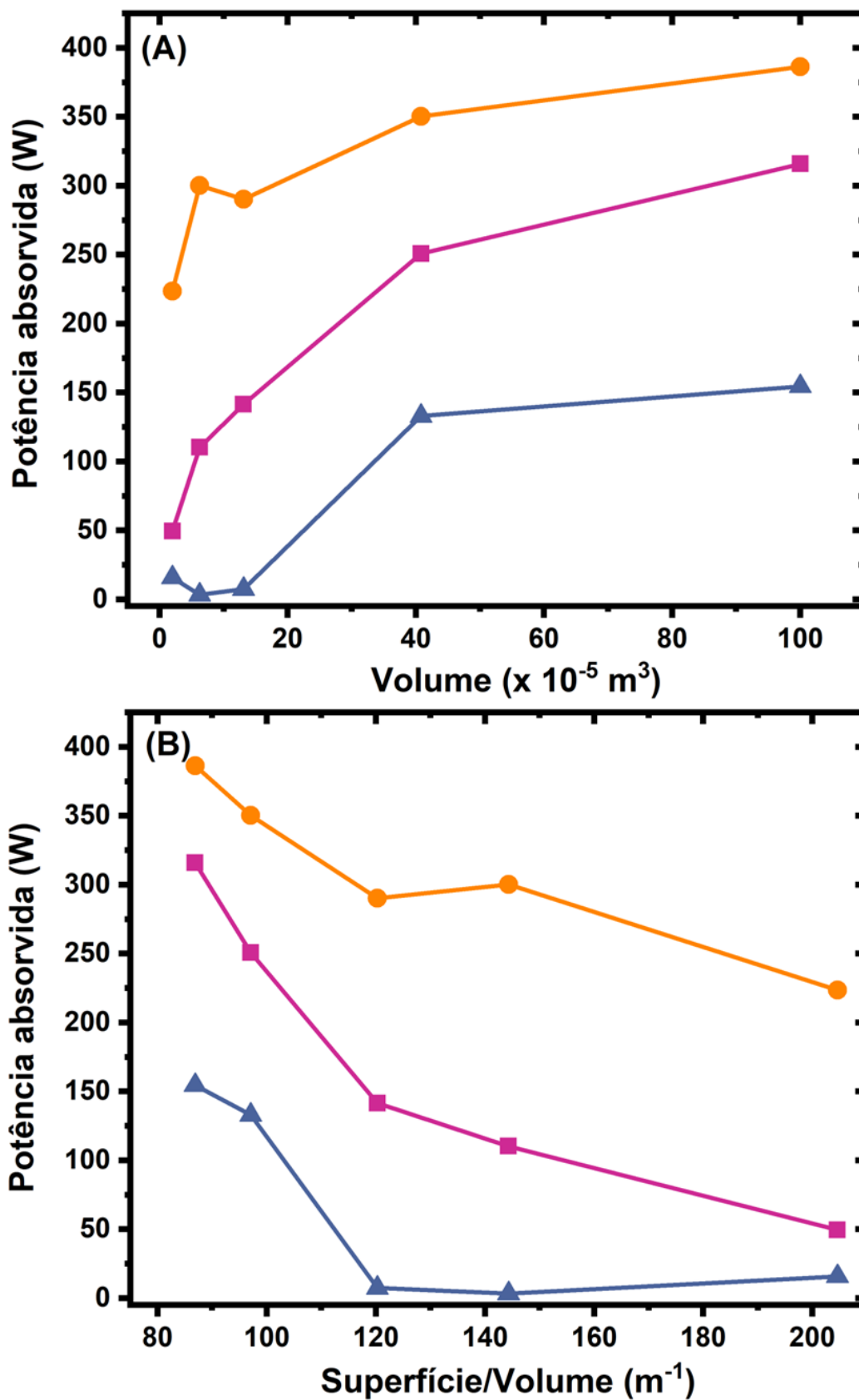


Figura 4.22: Potência absorvida em função do volume (A) e relação superfície sobre volume (B). Bagaço ( $\square$ ), óleo de palma ( $\circ$ ) e algas verdes ( $\triangle$ ).

## 5 Conclusão

O aquecimento por micro-ondas é percebido como uma tecnologia alternativa cada vez mais sustentável e energeticamente eficiente para a conversão efetiva de biomassa em biocombustíveis e produtos de maior valor agregado e que pode ser uma solução para a limitação existente nas tecnologias convencionais de tratamento de biomassa. No entanto, a falta de uma compreensão clara da interação do campo eletromagnético com a biomassa e os fatores que afetam o processo tem dificultado sua implementação.

O software COMSOL Multiphysics, implementado neste trabalho, demonstrou ser uma ferramenta muito poderosa para auxiliar na compreensão do processo de aquecimento por micro-ondas, já que descreveu com sucesso as soluções numéricas das equações eletromagnéticas acopladas com as de transferência de calor, além de ser uma ferramenta prática para a previsão do perfil de temperatura e do campo elétrico e na otimização dos parâmetros no processo de aquecimento por micro-ondas. Desta forma, o presente trabalho poderá ser utilizado como base para a compreensão das características que afetam o aquecimento por micro-ondas e na implementação de simulações mais complexas que incluam transferência de massa e reações químicas.

Neste trabalho, foi realizada uma simulação, na plataforma Comsol Multiphysics, de uma cavidade de um forno de micro-ondas doméstico para estudar o aquecimento da madeira, bagaço de cana-de-açúcar, casca de laranja, óleo de palma e algas verdes em função da temperatura, umidade, volumes e formatos diferentes (cilíndricos e esféricos) de amostras, com o objetivo de encontrar as melhores condições para o pré-tratamento por micro-ondas de biomassas.

A escolha da potência de entrada de micro-ondas é crucial para encontrar as situações de distribuição de alta temperatura e uniformidade com baixo consumo de energia. Para uma distribuição homogênea de temperatura no interior do material a profundidade de penetração precisa ser da mesma ordem de dimensão do material a ser aquecido. Materiais com altos  $\epsilon'$  e  $\epsilon''$  terão a menor profundidade de penetração ( $D_p$ ) do que materiais com baixa constante dielétrica e fator de perda. A energia absorvida pelas amostras, que é representada pelo parâmetro  $\tan \delta$ , é outro fator importante. Valores mais altos indicam mais absorção de energia e aquecimento do material. Para algas verdes com 20% de umidade o  $D_p$  é de 10 m! Para o bagaço de cana a profundidade de penetração é de 0,13 m e para o óleo de palma variou de 0,04 m a 0,006 m conforme a umidade aumenta de 20% a 80% tendo a mesma ordem de dimensão dos materiais utilizados nas simulações e apresentando a melhor condição de

aquecimento.

A distribuição do campo elétrico é diretamente afetada pela geometria da amostra, tipo de biomassa e umidade. A não uniformidade da distribuição do campo elétrico resulta em regiões de alta e baixa intensidade de campo elétrico, por exemplo, em algas verdes com 65% de umidade, onde a intensidade do campo elétrico pode ser sessenta vezes maior do que regiões com baixas intensidades. Esses fatores impactam diretamente na formação de pontos quentes e na evolução da distribuição não uniforme de temperatura.

Imagens da evolução da temperatura em função do tempo, dentro das amostras, foram geradas para explicar o comportamento de diferentes geometrias durante o aquecimento. O bagaço de cana-de-açúcar e a madeira apresentaram distribuição não uniforme de temperatura. Para a madeira, o tempo de absorção de energia e conversão em calor é maior. Em outras palavras, a madeira possui menor potência de absorção devido ao baixo  $f_p$  e alto  $f_w$  resultando em maior tempo de processamento, a formação de pontos quentes para a esfera e o cilindro foi de 160 s. O bagaço de cana apresenta taxa de aquecimento superior à da madeira e da casca de laranja.

O óleo de palma apresenta distribuições de temperatura simétricas em relação ao centro das amostras de esfera e cilindro. As ressonâncias foram encontradas e atribuídas ao alto  $f_p$  com maior temperatura no lado esquerdo para tempos de aquecimento superiores a 30 s para 30% de umidade. A alga verde apresenta ressonâncias para umidades de 30% e 65%. Dentre as biomassas estudadas neste trabalho as algas verdes possuem o menor fator de perda.

O tempo para as amostras atingirem 373 K diminui quando a potência aumenta para todas as biomassas. A madeira apresentou comportamento bastante distinto, devido à sua baixa constante dielétrica  $\varepsilon'$  e fator de perda  $\varepsilon''$ , e à condição de transição de fase foi obtido por um tempo de 30 s e potência de 700 W. As algas verdes também apresentaram uma escala de tempo mais longa para o aquecimento. Bagaço de cana-de-açúcar, casca de laranja e o óleo de palma apresentaram comportamentos semelhantes, independentemente da geometria.

A temperatura média ( $\bar{T}$ ) e a energia absorvida têm a mesma tendência quando a potência é variada. As biomassas apresentam valores maiores de temperatura média e energia absorvida para baixos valores de potência de entrada e diminui quando a potência aumenta, sendo a algas verdes a biomassa com a maior variação. O grau de fuga térmica apresenta o mesmo comportamento do parâmetro COV quando a potência é variada. As algas verdes apresentam comportamento diferente das demais biomassas.

Em aplicações industriais, uma amostra ideal deve ter alto PAE e baixo valor de COV garantindo alta absorção de energia e distribuição uniforme de temperatura dentro da amostra.

A proporção desses dois parâmetros é o coeficiente de avaliação (CEC). Assim, altos valores de CEC são desejáveis para os tratamentos. Os resultados da simulação indicam que ao variarmos o CEC em função da potência (Fig. 4.11) o óleo de palma apresenta o CEC mais alto, enquanto a madeira tem o menor em ambas as geometrias. Para potências inferiores a 40 W os CEC da madeira e da casca de laranja são próximos, mas à medida que a potência aumenta esta diferença aumenta. Já quando analisamos o CEC em função do volume das geometrias (Fig. 4.19), o bagaço de cana, em ambas geometrias, apresenta comportamento bastante diferente de outras biomassas. Para óleo de palma e algas verdes, o CEC aumenta quando o volume aumenta, independentemente da forma escolhida.

A potência absorvida pode variar em função do volume e da relação superfície/volume. O óleo de palma apresenta a maior potência absorvida, nos dois casos, enquanto as algas verdes o menor. A potência absorvida pelas amostras aumenta quando o volume da amostra aumenta devido a maior quantidade de massa disponível para absorção da radiação de micro-ondas e diminui em função da relação superfície sobre volume.

Trabalhos futuros poderão combinar abordagens teóricas e experimentais para desenvolver um modelo mais elaborado, incluindo, por exemplo, as equações eletromagnéticas de Maxwell acopladas a transferência de calor, transferência de massa e mecânica dos fluidos, para determinar os parâmetros adequados no processo de aquecimento e pré-tratamento por micro-ondas de diferentes biomassas. Além disso, um estudo completo das propriedades dielétricas e, especialmente, como elas variam com a temperatura durante o aquecimento é altamente recomendado, pois isso seria muito útil para prever a capacidade de absorção de micro-ondas da biomassa utilizada. Esses dados também permitirão uma melhor compreensão sobre a necessidade de adicionar agentes absorventes de micro-ondas antes do tratamento em um forno de micro-ondas.

## Referências

- [1] Kifayat Ullah, Mushtaq Ahmad, Vinod Kumar Sharma, Pengmei Lu, Adam Harvey, Muhammad Zafar, Shazia Sultana, et al. Assessing the potential of algal biomass opportunities for bioenergy industry: a review. *Fuel*, 143:414–423, 2015.
- [2] Hannah Ritchie, Max Roser, and Pablo Rosado. Energy. *Our World in Data*, 2022. <https://ourworldindata.org/energy>.
- [3] Haroon S Kheshgi, Roger C Prince, and Gregg Marland. The potential of biomass fuels in the context of global climate change: focus on transportation fuels. *Annual review of energy and the environment*, 25(1):199–244, 2000.
- [4] IPCC. *Framing and Context*, page 49–92. Cambridge University Press, 2022.
- [5] Union of Concerned Scientists. Car emissions and global warming. Disponível em: <<https://www.ucsusa.org/resources/car-emissions-global-warming>>. Acesso em: 25 mar. 2021.
- [6] European Parliament. Co<sub>2</sub> emissions from cars: facts and figures (infographics). Disponível em: <<https://www.europarl.europa.eu/news/en/headlines/society/20190313ST031218/co2-emissions-from-cars-facts-and-figures-infographics>>. Acesso em: 18 ago. 2022.
- [7] UCZAI P. et al. *Energias renováveis riqueza sustentável ao alcance da sociedade*. Brasília, DF: Câmara dos Deputados, Edições Câmara, 2012.
- [8] 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.
- [9] IEA. Bioenergy. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/bioenergy>>. Acesso em: 18 dez. 2022.
- [10] Svetlana Proskurina, Richard Sikkema, Jussi Heinimö, and Esa Vakkilainen. Five years left—how are the eu member states contributing to the 20% target for eu’s renewable energy consumption; the role of woody biomass. *Biomass and bioenergy*, 95:64–77, 2016.
- [11] Mario Lucio Lopes, Silene Cristina de Lima Paulillo, Alexandre Godoy, Rudimar Antonio Cherubin, Marcel Salmeron Lorenzi, Fernando Henrique Carvalho Giometti, Claude-

- mir Domingos Bernardino, Henrique Berbert de Amorim Neto, and Henrique Vianna de Amorim. Ethanol production in brazil: a bridge between science and industry. *brazilian journal of microbiology*, 47:64–76, 2016.
- [12] Poonam Singh Nigam and Anoop Singh. Production of liquid biofuels from renewable resources. *Progress in energy and combustion science*, 37(1):52–68, 2011.
- [13] Haroon S Kheshgi, Roger C Prince, and Gregg Marland. The potential of biomass fuels in the context of global climate change: focus on transportation fuels. *Annual review of energy and the environment*, 25(1):199–244, 2000.
- [14] Kifayat Ullah, Vinod Kumar Sharma, Mushtaq Ahmad, Pengmei Lv, Jurgen Krahl, Zhongming Wang, et al. The insight views of advanced technologies and its application in bio-origin fuel synthesis from lignocellulose biomasses waste, a review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 82:3992–4008, 2018.
- [15] Peter McKendry. Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. *Bioresource technology*, 83(1):37–46, 2002.
- [16] Fernando A Santos, José H de Queiróz, Jorge L Colodette, Sergio A Fernandes, Valéria M Guimarães, and Sebastião T Rezende. Potencial da palha de cana-de-açúcar para produção de etanol. *Química nova*, 35:1004–1010, 2012.
- [17] Danay Carrillo Nieves, Hector A Ruiz, Lourdes Zumalacárregui de Cárdenas, Georgina Michelena Alvarez, Cristobal N Aguilar, Anna Ilyina, and José L Martínez Hernández. Enzymatic hydrolysis of chemically pretreated mango stem bark residues at high solid loading. *Industrial Crops and Products*, 83:500–508, 2016.
- [18] Alejandra Aguilar-Reynosa, Aloia Romaní, Rosa Ma Rodríguez-Jasso, Cristóbal N Aguilar, Gil Garrote, and Héctor A Ruiz. Microwave heating processing as alternative of pretreatment in second-generation biorefinery: An overview. *Energy Conversion and Management*, 136:50–65, 2017.
- [19] Rahul Vijay Kapoore, Thomas O Butler, Jagroop Pandhal, and Seetharaman Vaidyanathan. Microwave-assisted extraction for microalgae: from biofuels to biorefinery. *Biology*, 7(1):18, 2018.
- [20] Jesus Velazquez, Rosa Rodriguez-Jasso, Luciane Colla, Aide Galindo, Daniela Cervantes, Cristobal Aguilar, Bruno Fernandes, and Héctor Ruiz. Microalgal biomass pretreatment for bioethanol production: A review. *Biofuel Research Journal*, 5, 03 2018.



- [21] Rajeev Ravindran and Amit Kumar Jaiswal. A comprehensive review on pre-treatment strategy for lignocellulosic food industry waste: challenges and opportunities. *Bioresource technology*, 199:92–102, 2016.
- [22] Jorge Loureiro and Jayr Amorim. *Kinetics and spectroscopy of low temperature plasmas*. Springer, 2016.
- [23] JA Souza-Corrêa, C Oliveira, LD Wolf, VM Nascimento, GJM Rocha, and J Amorim. Atmospheric pressure plasma pretreatment of sugarcane bagasse: the influence of moisture in the ozonation process. *Applied biochemistry and biotechnology*, 171:104–116, 2013.
- [24] JA Souza-Corrêa, C Oliveira, VM Nascimento, LD Wolf, EO Gómez, GJM Rocha, and J Amorim. Atmospheric pressure plasma pretreatment of sugarcane bagasse: the influence of biomass particle size in the ozonation process. *Applied biochemistry and biotechnology*, 172:1663–1672, 2014.
- [25] Chungeng Yin. Microwave-assisted pyrolysis of biomass for liquid biofuels production. *Bioresource technology*, 120:273–284, 2012.
- [26] Yu-Fong Huang, Pei-Te Chiueh, Wen-Hui Kuan, and Shang-Lien Lo. Microwave pyrolysis of lignocellulosic biomass: Heating performance and reaction kinetics. *Energy*, 100:137–144, 2016.
- [27] Anh Tuan Hoang, Sandro Nizetić, Hwai Chyuan Ong, M Mofijur, SF Ahmed, B Ashok, Minh Quang Chau, et al. Insight into the recent advances of microwave pretreatment technologies for the conversion of lignocellulosic biomass into sustainable biofuel. *Chemosphere*, 281:130878, 2021.
- [28] Giancarlo Cravotto, Luisa Boffa, Stefano Mantegna, Patrizia Perego, Milvio Avogadro, and Pedro Cintas. Improved extraction of vegetable oils under high-intensity ultrasound and/or microwaves. *Ultrasonics sonochemistry*, 15(5):898–902, 2008.
- [29] Hao Feng, Yun Yin, and Juming Tang. Microwave drying of food and agricultural materials: basics and heat and mass transfer modeling. *Food Engineering Reviews*, 4(2):89–106, 2012.
- [30] Absolute Reports. Global smart microwave oven market insights, forecast to 2025. Disponível em: <<https://www.absolutereports.com/global-smart-microwave-oven-market-13904476>>. Acesso em: 07 abr 2021.

- [31] Arshad Adam Salema and Muhammad T Afzal. Numerical simulation of heating behaviour in biomass bed and pellets under multimode microwave system. *International Journal of thermal sciences*, 91:12–24, 2015.
- [32] Zafri Mohd Mokhta, Mei Yin Ong, Bello Salman, Saifuddin Nomanbhay, Siti Fatihah Salleh, Kit Wayne Chew, Pau-Loke Show, and Wei-Hsin Chen. Simulation studies on microwave-assisted pyrolysis of biomass for bioenergy production with special attention on waveguide number and location. *Energy*, 190:116474, 2020.
- [33] John Robinson, Sam Kingman, Derek Irvine, Peter Licence, Alastair Smith, Georgios Dimitrakis, David Obermayer, and C Oliver Kappe. Understanding microwave heating effects in single mode type cavities—theory and experiment. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 12(18):4750–4758, 2010.
- [34] Marcia Maria de Souza Moretti, Daniela Alonso Bocchini-Martins, Christiane da Costa Carreira Nunes, Maria Arévalo Villena, Olavo Micali Perrone, Roberto da Silva, Maurício Boscolo, and Eleni Gomes. Pretreatment of sugarcane bagasse with microwaves irradiation and its effects on the structure and on enzymatic hydrolysis. *Applied Energy*, 122:189–195, 2014.
- [35] S Bradshaw, S Delport, and E van Wyk. Qualitative measurement of heating uniformity in a multimode microwave cavity. *Journal of microwave power and electromagnetic energy*, 32(2):87–95, 1997.
- [36] R Vadivambal and DS Jayas. Non-uniform temperature distribution during microwave heating of food materials—a review. *Food and bioprocess technology*, 3(2):161–171, 2010.
- [37] Flora-Glad Ekezie, Da-Wen Sun, Zhang Han, and Jun-Hu Cheng. Microwave-assisted food processing technologies for enhancing product quality and process efficiency: A review of recent developments. *Trends in Food Science & Technology*, 67, 06 2017.
- [38] Deepak Verma, Naveen Mahanti, Mamta Thakur, Subir Chakraborty, and Prem Srivastav. *Microwave Heating: Alternative Thermal Process Technology for Food Application*, pages 25–67. Taylor & Francis Group, 05 2020.
- [39] Arjay A Arpia, Wei-Hsin Chen, Su Shiung Lam, Patrick Rousset, and Mark Daniel G De Luna. Sustainable biofuel and bioenergy production from biomass waste residues using microwave-assisted heating: A comprehensive review. *Chemical Engineering Journal*, page 126233, 2020.

- [40] Michele Nehemy Berteli, E Rodier, and A Marsaioli Jr. Study of the microwave vacuum drying process for a granulated product. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 26(2):317–329, 2009.
- [41] Junling He, Yang Yang, Huacheng Zhu, Kang Li, Wei Yao, and Kama Huang. Microwave heating based on two rotary waveguides to improve efficiency and uniformity by gradient descent method. *Applied Thermal Engineering*, 178:115594, 2020.
- [42] Xin Gao, Xinshuang Liu, Peng Yan, Xingang Li, and Hong Li. Numerical analysis and optimization of the microwave inductive heating performance of water film. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 139:17–30, 2019.
- [43] Fangyuan Chen, Alexander D. Warning, Ashim K. Datta, and Xing Chen. Susceptors in microwave cavity heating: Modeling and experimentation with a frozen pie. *Journal of Food Engineering*, 195:191–205, 2017.
- [44] S.S.R. Geedipalli, V. Rakesh, and A.K. Datta. Modeling the heating uniformity contributed by a rotating turntable in microwave ovens. *Journal of Food Engineering*, 82(3):359–368, 2007.
- [45] Vineet Rakesh, Ashim Datta, M.H.G. AMIN, and L.D. HALL. Heating uniformity and rates in a domestic microwave combination oven. *Journal of Food Process Engineering*, 32:398–424, 06 2009.
- [46] Zhijun Zhang, Tianyi Su, and Shiwei Zhang. Shape effect on the temperature field during microwave heating process. *Journal of food quality*, 2018, 2018.
- [47] Andre Camara, Anderson Marafon, and Antônio Santiago. *Uso da Biomassa para a Geração de Energia*, 12 2016.
- [48] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Matriz por origem de combustível. Disponível em: <<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiaWJjc40GYyYjQtYWM2ZC00Yj11LWJlYmEtYzdkNTQ1MTc1NjM2IiwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYjYtYjYtNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBlMSIsImMiOjR9>>. Acesso em: 21 nov 2022.
- [49] Luís Augusto Barbosa Cortez; Electo Eduardo Silva Lora; Edgardo Oliveira Gómes. *Biomassa para energia*. Editora Unicamp, São Paulo, 2008.
- [50] Mauricio Tiomno (Coord.) Tolmasquim. *Energia renovável: hidráulica, biomassa, eólica, solar, oceânica*. EPE, Rio de Janeiro, 2016.

- [51] BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica. *Atlas de Energia Elétrica do Brasil*. ANEEL, 2. ed. Brasília, DF, 2005.
- [52] Ludger Dinkelbach, L Dinkelbach, J Prij, ECN Biomass, J Beesteheerde, and HJ Veringa. Thermochemical conversion of willow from short rotation forestry. *Energy Research Centre of the Netherlands*, 2000.
- [53] BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL (BRASIL). CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS. *Bioetanol de cana-de-açúcar: energia para o desenvolvimento sustentável*. 1 ed. Rio de Janeiro: Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 2008.
- [54] UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. Foreign agricultural service. sugar: world markets and trade. Disponível em: <<https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/Sugar.pdf>>. Acesso em: 25 out. 2022.
- [55] Companhia Nacional de Abastecimento (Conab). *Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar*. Brasília, v. 9 – Safra 2022-23, n.2 - Segundo levantamento, p. 1-58, 2022.
- [56] União Nacional da Bioenergia. Quais as diferenças entre o álcool de cana e o de milho? Disponível em: <<https://www.udop.com.br/noticia/2007/04/13/quais-as-diferencas-entre-o-alcool-de-cana-e-o-de-milho.html#:~:text=A%20cana%200tem%2054%25%20menos,rende%20407%20litros%20de%20etanol>>. Acesso em: 25 out. 2022.
- [57] NOVACANA. Curiosidades sobre o etanol. Disponível em: <<https://www.novacana.com/etanol/curiosidades>>. Acesso em: 25 out. 2022.
- [58] Propeq. Confira as diferenças entre etanol de milho e etanol de cana. Disponível em: <<https://propeq.com/diferencas-entre-etanol-de-milho-e-etanol-de-cana/>>. Acesso em: 25 out. 2022.
- [59] BERNARDO A; SILVA E; AMORIM J; ÁVILA M and CAPAZ R. Dendê no brasil: potencial para o sistema produtivo de óleo vegetal mais sustentável do planeta. *NOVACANA*, 2022.
- [60] Bo-Jhih Lin and Wei-Hsin Chen. Sugarcane bagasse pyrolysis in a carbon dioxide atmosphere with conventional and microwave-assisted heating. *Frontiers in Energy Research*, 3:4, 2015.

- [61] Dijan Supramono, Noor Fachrizal, and Yosephine Devina. Microwave pyrolysis of sugarcane bagasse for bio-oil production. In *Prosiding Seminar Nasional Teknik Kimia Indonesia*, 10 2015.
- [62] Yu-Fong Huang, Pei-Te Chiueh, and Shang-Lien Lo. A review on microwave pyrolysis of lignocellulosic biomass. *Sustainable Environment Research*, 26(3):103–109, 2016.
- [63] Julianne Cutrim NAZARENO, Gláucia Eliza Gama VIEIRA, and Guilherme Goulart OLIVEIRA. Aproveitamento do dendê para produção de biodiesel na região amazônica brasileira. *Bioenergia em Revista: Diálogos*, 5(2):8–17, 2015.
- [64] F. J. KALTNER, E. B. da FURLAN JÚNIOR, J. and SILVA, and J. B. da C VEIGA, A. S. and VAZ. 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.
- [65] 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.
- [66] SUSTAINABILITY POLICY TRANSPARENCY TOOLKIT. O que é óleo de palma? [s.l.], 2016. Disponível em: <<http://www.spott.org/palm-oil-resource-archive/what-is-palm-oil/>>. Acesso em: 14 fev. 2018.
- [67] UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. Foreign agricultural service. oilseeds: world market and trade 2022. Washington, DC, 2022. Disponível em: <<https://downloads.usda.library.cornell.edu/usda-esmis/files/tx31qh68h/0r968c130/34850r658/oilseeds.pdf>>. Acesso em: 02 nov. 2022.
- [68] UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. Palm oil explorer. Disponível em: <<https://ipad.fas.usda.gov/cropexplorer/cropview/commodityView.aspx?cropid=4243000>>. Acesso em: 27 nov. 2022.
- [69] GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO. Boletim mensal do biodiesel. Brasília, DF, 2022. Disponível em: <<https://www.gov.br>>

- /anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/boletins-anp/boletins/arquivos-bmppgn/2022/boletim-setembro.pdf>. Acesso em: 27 nov. 2022.
- [70] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE ÓLEO DE PALMA. A palma no brasil e no mundo. [s.1.], 2015a. Disponível em: <<http://www.abrapalma.org/pt/a-palma-no-brasil-e-no-mundo/>>. Acesso em: 27 fev. 2018.
- [71] Hannah Ritchie and Max Roser. Forests and deforestation. *Our World in Data*, 2021. <https://ourworldindata.org/forests-and-deforestation>.
- [72] Daniel Aparecida do Amaral TELES. Características físicas e rendimento mensal em óleo de cachos de duas cultivares de dendezeiro cultivadas, sob irrigação, no cerrado do distrito federal. Master's thesis, Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2014.
- [73] Sumiani Yusoff. Renewable energy from palm oil–innovation on effective utilization of waste. *Journal of cleaner production*, 14(1):87–93, 2006.
- [74] Rozita Omar, A Idris, R Yunus, K Khalid, and MI Aida Isma. Characterization of empty fruit bunch for microwave-assisted pyrolysis. *Fuel*, 90(4):1536–1544, 2011.
- [75] Arshad Adam Salema and Farid Nasir Ani. Microwave induced pyrolysis of oil palm biomass. *Bioresource technology*, 102(3):3388–3395, 2011.
- [76] A. S. de OLIVEIRA and et al. *Florestas*. In: IBAMA. Relatório de qualidade do meio ambiente: RQMA: Brasil 2020. Brasília, DF, cap. 5, 2022.
- [77] IBÁ. INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. Relatório anual ibÁ 2021. são paulo: Brasília, df, [2021]. 176 p. bilíngue. Disponível em: <<https://www.iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorioiba2021-compactado.pdf>>. Acesso em: 01 nov. 2022.
- [78] B. M. CARDOSO. Uso da biomassa como alternativa energética. Master's thesis, Projeto de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.
- [79] BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. *Balanco Energético Nacional 2022*. Rio de Janeiro, 2022.

- [80] Luciana Deotti RODRIGUES. A cana-de-açúcar como matéria-prima para a produção de biocombustíveis: impactos ambientais e o zoneamento agroecológico como ferramenta para mitigação. Master's thesis, 64 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Análise Ambiental) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2010.
- [81] Chungen Yin. Microwave-assisted pyrolysis of biomass for liquid biofuels production. *Bioresource technology*, 120:273–284, 2012.
- [82] Masakatsu Miura, Harumi Kaga, Akihiko Sakurai, Toyoji Kakuchi, and Kenji Takahashi. Rapid pyrolysis of wood block by microwave heating. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 71(1):187–199, 2004.
- [83] Jing Li, Jianjun Dai, Guangqing Liu, Hedong Zhang, Zuopeng Gao, Jie Fu, Yanfeng He, and Yan Huang. Biochar from microwave pyrolysis of biomass: A review. *Biomass and Bioenergy*, 94:228–244, 2016.
- [84] UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. Foreign agricultural service. citrus: world markets and trade. washington, dc, 2022. Disponível em: <<https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/citrus.pdf>>. Acesso em: 06 nov. 2022.
- [85] Fundecitrus. *SUMÁRIO EXECUTIVO - Estimativa da safra de laranja 2022/23 do cinturão citrícola de São Paulo e Triângulo/Sudoeste Mineiro*. Rio de Janeiro, 2022.
- [86] G. Dugo and A. Di Giacomo. *Citrus: The Genus Citrus*. (1st ed.). CRC Press, 2002.
- [87] Karine ZANELLA. Extração da pectina da casca da laranja-pera (*Citrus sinensis* L. Osbeck) com solução diluída de ácido cítrico. Master's thesis, 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas., 2013.
- [88] Lorena Coelho BENEVIDES. Pirólise do bagaço de laranja: análise cinética dos estágios de secagem e devolatização. Master's thesis, 80 f. Dissertação (Mestrado em Energia) – Universidade Federal do Espírito Santo, São Mateus., 2015.
- [89] Márcia Fani, editor. *PECTINAS propriedades e aplicações*, volume 29. Food Ingredients Brasil, São Paulo, 2014.
- [90] Beli R Thakur, Rakesh K Singh, Avtar K Handa, and MA Rao. Chemistry and uses of pectin—a review. *Critical Reviews in Food Science & Nutrition*, 37(1):47–73, 1997.

- [91] XianChun Yu, Delin Sun, et al. Microwave and enzymatic extraction of orange peel pectin. *Asian journal of Chemistry*, 25(10):5333–5336, 2013.
- [92] Seyed Saeid Hosseini, Faramarz Khodaiyan, and Mohammad Saeid Yarmand. Optimization of microwave assisted extraction of pectin from sour orange peel and its physicochemical properties. *Carbohydrate polymers*, 140:59–65, 2016.
- [93] J Prakash Maran, V Sivakumar, K Thirugnanasambandham, and R Sridhar. Optimization of microwave assisted extraction of pectin from orange peel. *Carbohydrate polymers*, 97(2):703–709, 2013.
- [94] Meryem Boukroufa, Chahrazed Boutekdjiret, Loïc Petigny, Njara Rakotomanomana, and Farid Chemat. 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*, 24:72–79, 2015.
- [95] Ralph A. Lewin and Robert A. Andersen. Algae. encyclopedia britannica. Disponível em: <<https://www.shutterstock.com/pt/image-photo/unicellular-green-algae-large-cells-1042159933>>. Acesso em: 13 nov. 2022.
- [96] Aparna Vidyasagar. What are algae? Disponível em: <<https://www.livescience.com/54979-what-are-algae.html>>. Acesso em: 13 nov. 2022.
- [97] Junning Cai, Alessandro Lovatelli, José Aguilar-Manjarrez, Lynn Cornish, Lionel Dabbadie, Anne Desrochers, Simon Diffey, Esther Garrido Gamarro, James Geehan, Anicia Hurtado, et al. Seaweeds and microalgae: an overview for unlocking their potential in global aquaculture development. *FAO Fisheries and Aquaculture Circular*, (1229), 2021.
- [98] Michael Hannon, Javier Gimpel, Miller Tran, Beth Rasala, and Stephen Mayfield. Biofuels from algae: challenges and potential. *Biofuels*, 1(5):763–784, 2010.
- [99] Mirela Assunção Simões, Suzan Diniz Santos, Danielli de Matias de Macedo Dantas, and Alfredo Oliveira Galvéz. Algas cultiváveis e sua aplicação biotecnológica. 2016.
- [100] Jayaseelan Arun, Kannappan Panchamoorthy Gopinath, Ramachandran Sivaramakrishnan, PanneerSelvam SundarRajan, Rajagopal Malolan, and Arivalagan Pugazhendhi. Technical insights into the production of green fuel from co2 sequestered algal biomass:



- A conceptual review on green energy. *Science of The Total Environment*, 755:142636, 2021.
- [101] Luís Celso Cardoso de Pina, Evandro Bernado de Lira, Maria Helena Juvito da Costa, Darlan Azevedo Pereira, Roberta Conceição Ribeiro Varandas, Patrícia de Moura Almeida, Nyelson da Silva Nonato, and Cristiane Francisca Costa-Sassi. Avaliação de um sistema de cultivo de microalgas com um mix de fotobiorreatores tubular e de placas paralelas, para produção de biomassa de microalgas em meios de cultura alternativos. *Brazilian Journal of Development*, 7(4):37734–37777, 2021.
- [102] Giancarlo Cravotto, Luisa Boffa, Stefano Mantegna, Patrizia Perego, Milvio Avogadro, and Pedro Cintas. Improved extraction of vegetable oils under high-intensity ultrasound and/or microwaves. *Ultrasonics Sonochemistry*, 15(5):898–902, 2008.
- [103] M Dinesh Kumar, S Kaliappan, S Gopikumar, Guangyin Zhen, and J Rajesh Banu. Synergetic pretreatment of algal biomass through h<sub>2</sub>o<sub>2</sub> induced microwave in acidic condition for biohydrogen production. *Fuel*, 253:833–839, 2019.
- [104] Prafulla D. Patil, Veera Gnaneswar Gude, Aravind Mannarswamy, Peter Cooke, Stuart Munson-McGee, Nagamany Nirmalakhandan, Peter Lammers, and Shuguang Deng. Optimization of microwave-assisted transesterification of dry algal biomass using response surface methodology. *Bioresource Technology*, 102(2):1399–1405, 2011.
- [105] Gás Natural e Biocombustíveis Agência Nacional do Petróleo. Produção e fornecimento de biocombustíveis. Disponível em: <<https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/producao-e-fornecimento-de-biocombustiveis>>. Acesso em: 13 out. 2022.
- [106] Svetlana Ladanai and Johan Vinterbäck. Biomass for energy versus food and feed, land use analyses and water supply. 2010.
- [107] Zygmunt Kowalski, Joanna Kulczycka, Roland Verhé, Luc Desender, Guy De Clercq, Agnieszka Makara, Natalia Generowicz, and Paulina Harazin. Second-generation biofuel production from the organic fraction of municipal solid waste. 2022.
- [108] Maíra Bueno Ariede, Thalita Marcílio Candido, Ana Lucia Morocho Jacome, Maria Valéria Robles Velasco, João Carlos M de Carvalho, and André Rolim Baby. Cosmetic attributes of algae-a review. *Algal research*, 25:483–487, 2017.

- [109] Xiaoning Liu, Kezhen Ying, Guangyao Chen, Canwei Zhou, Wen Zhang, Xihui Zhang, Zhonghua Cai, Thomas Holmes, and Yi Tao. Growth of *Chlorella vulgaris* and nutrient removal in the wastewater in response to intermittent carbon dioxide. *Chemosphere*, 186:977–985, 2017.
- [110] Kifayat Ullah, Mushtaq Ahmad, Vinod Kumar Sharma, Pengmei Lu, Adam Harvey, Muhammad Zafar, Shazia Sultana, et al. Assessing the potential of algal biomass opportunities for bioenergy industry: a review. *Fuel*, 143:414–423, 2015.
- [111] Anuj Kumar, Yuvraj Singh Negi, Veena Choudhary, and Nishi Kant Bhardwaj. Characterization of cellulose nanocrystals produced by acid-hydrolysis from sugarcane bagasse as agro-waste. *Journal of materials physics and chemistry*, 2(1):1–8, 2014.
- [112] Susaimanickam Anto, Subhra Sankha Mukherjee, Rhea Muthappa, Thangavel Mathimani, Garlapati Deviram, Smita S Kumar, Tikendra Nath Verma, and Arivalagan Pugazhendhi. Algae as green energy reserve: Technological outlook on biofuel production. *Chemosphere*, 242:125079, 2020.
- [113] Dominik Behrendt, Christina Schreiber, Christian Pfaff, Andreas Müller, Johan Grobelaar, and Ladislav Nedbal. *Algae as a Potential Source of Biokerosene and Diesel – Opportunities and Challenges*, pages 303–324. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2018.
- [114] Bawadi Abdullah, Syed Anuar Faua’ad Syed Muhammad, Zahra Shokravi, Shahrul Ismail, Khairul Anuar Kassim, Azmi Nik Mahmood, and Md Maniruzzaman A Aziz. Fourth generation biofuel: A review on risks and mitigation strategies. *Renewable and sustainable energy reviews*, 107:37–50, 2019.
- [115] Srinivasulu Ale, Pandara V Femeena, Sushant Mehan, and Raj Cibin. Environmental impacts of bioenergy crop production and benefits of multifunctional bioenergy systems. In *Bioenergy with carbon capture and storage*, pages 195–217. Elsevier, 2019.
- [116] Maria de Fátima VIDAL. *Produção e uso de biocombustíveis no brasil*. 2019.
- [117] Serpil Sahin and Servet Gülüm Sumnu. *Physical properties of foods*. Springer Science & Business Media, 2006.
- [118] Helmar Schubert and Marc Regier. *The Microwave Processing of Foods*. Woodhead Publishing Limited, 2005.

- [119] Arun S. MUJUMDAR. *Handbook of industrial drying*. Taylor & Francis, 2006.
- [120] George B Awuah, Hosahalli S Ramaswamy, and Juming Tang. *Radio-Frequency heating in food processing: Principles and applications*. CRC Press, 2014.
- [121] D Michael P áMingos et al. Tilden lecture. applications of microwave dielectric heating effects to synthetic problems in chemistry. *Chemical society reviews*, 20(1):1–47, 1991.
- [122] Michael Vollmer. Physics of the microwave oven. *Physics Education*, 39:74–81, 01 2004.
- [123] Nils E Bengtsson and Thomas Ohlsson. Microwave heating in the food industry. *Proceedings of the IEEE*, 62(1):44–55, 1974.
- [124] Louis A. Bloomfield. *How things work : the physics of everyday life*. Wiley, 2016.
- [125] Mohamed AB Adam. *Understanding microwave pyrolysis of biomass materials*. PhD thesis, University of Nottingham, 2017.
- [126] J. M. Mendes and José. Simulation of cement clinker process by of microwave heating. Master’s thesis, Técnico Lisboa, 2017.
- [127] COMSOL. Introduction to the rf module, version 5.4. Disponível em: <<https://doc.comsol.com/5.4/doc/com.comsol.help.rf/IntroductionToRFModule.pdf>>. Acesso em: 5 fev. 2021.
- [128] Siti Abdul Halim and Jim Swithenbank. Simulation study of parameters influencing microwave heating of biomass. *Journal of the Energy Institute*, 92(4):1191–1212, 2019.
- [129] Bai-quan Lin, He Li, Hua-ming Dai, Chuan-jie Zhu, Hao Yao, et al. Three-dimensional simulation of microwave heating coal sample with varying parameters. *Applied Thermal Engineering*, 93:1145–1154, 2016.
- [130] Zafri Mohd Mokhta, Mei Yin Ong, Bello Salman, Saifuddin Nomanbhay, Siti Fatimah Salleh, Kit Wayne Chew, Pau-Loke Show, and Wei-Hsin Chen. Simulation studies on microwave-assisted pyrolysis of biomass for bioenergy production with special attention on waveguide number and location. *Energy*, 190:116474, 2020.
- [131] Hanna Gothall. How to inspect your mesh in comsol multiphysics. Disponível em: <<https://www.comsol.com/blogs/how-to-inspect-your-mesh-in-comsol-multiphysics/>>. Acesso em: 24 nov 2020.

- [132] AZ Fia and J Amorim. Heating of biomass in microwave household oven-a numerical study. *Energy*, 218:119472, 2021.
- [133] AZ Fia and J Amorim. Microwave pretreatment of biomass for conversion of lignocellulosic materials into renewable biofuels. *Journal of the Energy Institute*, 106:101146, 2023.
- [134] SL Birla, S Wang, Juming Tang, and G Tiwari. Characterization of radio frequency heating of fresh fruits influenced by dielectric properties. *Journal of Food Engineering*, 89(4):390–398, 2008.
- [135] Phadungsak Rattanadecho. The simulation of microwave heating of wood using a rectangular wave guide: Influence of frequency and sample size. *Chemical Engineering Science*, 61(14):4798–4811, 2006.
- [136] Z Liyana, F Malek, EM Cheng, WW Liu, and YS Lee. Measurement of dielectric properties of sugarcane bagasse and rubber tire dust for microwave absorber performance. 2006.
- [137] Tommaso Ciacci, Antonio Galgano, and Colomba Di Blasi. Numerical simulation of the electromagnetic field and the heat and mass transfer processes during microwave-induced pyrolysis of a wood block. *Chemical Engineering Science*, 65(14):4117–4133, 2010.
- [138] Fernanda Perpétua Casciatori, Carmem Lúcia Laurentino, Karen Christine Magdaleno Lopes, André Gonçalves de Souza, and João Cláudio Thoméo. Stagnant effective thermal conductivity of agro-industrial residues for solid-state fermentation. *International Journal of Food Properties*, 16(7):1578–1593, 2013.
- [139] Paul Britton, EJen Teh, Donald Close, et al. Investigation of the efficiency of bagasse as a thermal insulator. In *Proceedings of the 2005 Conference of the Australian Society of Sugar Cane Technologists held at Bundaberg, Queensland, Australia, 3-6 May 2005*, pages 462–471. PK Editorial Services Pty Ltd, 2005.
- [140] Siddharth Gadkari, Beatriz Fidalgo, and Sai Gu. Numerical investigation of microwave-assisted pyrolysis of lignin. *Fuel processing technology*, 156:473–484, 2017.
- [141] Madhuchhanda Bhattacharya, Tanmay Basak, and Subramanian Sriram. Generalized characterization of microwave power absorption for processing of circular shaped materials. *Chemical Engineering Science*, 118:257–279, 2014.

- [142] Tanmay Basak, Madhuchhanda Bhattacharya, and Soumen Panda. A generalized approach on microwave processing for the lateral and radial irradiations of various groups of food materials. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 33:333–347, 2016.
- [143] Fernanda Perpétua Casciadori, Carmem Lúcia Laurentino, Karen Christine Magdaleno Lopes, André Gonçalves de Souza, and João Cláudio Thoméo. Stagnant effective thermal conductivity of agro-industrial residues for solid-state fermentation. *International Journal of Food Properties*, 16(7):1578–1593, 2013.
- [144] Thomas E Murphy and Halil Berberoğlu. Temperature fluctuation and evaporative loss rate in an algae biofilm photobioreactor. *Journal of solar energy engineering*, 134(1), 2012.
- [145] Paul Britton, EJen Teh, Donald Close, et al. Investigation of the efficiency of bagasse as a thermal insulator. In *Proceedings of the 2005 Conference of the Australian Society of Sugar Cane Technologists held at Bundaberg, Queensland, Australia, 3-6 May 2005*, pages 462–471. PK Editorial Services Pty Ltd, 2005.

## FOLHA DE REGISTRO DO DOCUMENTO

1. CLASSIFICAÇÃO/TIPO <p style="text-align: center;">TD</p>	2. DATA <p style="text-align: center;">25 de abril de 2023</p>	3. REGISTRO N° <p style="text-align: center;">DCTA/ITA/TD-010/2023</p>	4. N° DE PÁGINAS <p style="text-align: center;">121</p>
5. TÍTULO E SUBTÍTULO:  Pré-tratamento de biomassa em forno de micro-ondas doméstico para produção de biocombustíveis: um estudo numérico.			
6. AUTOR(ES):  <b>Angélica Zaneze Fia</b>			
7. INSTITUIÇÃO(ÕES)/ÓRGÃO(S) INTERNO(S)/DIVISÃO(ÕES):  Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA			
8. PALAVRAS-CHAVE SUGERIDAS PELO AUTOR:  Micro-ondas; Biomassa; Simulação.			
9. PALAVRAS-CHAVE RESULTANTES DE INDEXAÇÃO:  Micro-ondas; Biomassa; Simulação; Conversão de energia; Física.			
10. APRESENTAÇÃO: <span style="float: right;">( X ) Nacional    ( ) Internacional</span>  ITA, São José dos Campos. Curso de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Física. Área de Física Atômica e Molecular. Orientador: Prof. Dr. Jayr de Amorim Filho. Defesa em 24/04/2023. Publicada em 2023.			
11. RESUMO:  Na busca por maior autonomia e diversificação da matriz energética, 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 numérico do aquecimento da madeira, barço de cana-de-açúcar, casca de laranja, óleo de palma e algas verdes em um forno de micro-ondas doméstico, visto que, o aquecimento por micro-ondas de biomassas 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. O estudo se concentrou na avaliação da capacidade de absorção de energia das biomassas em formato cilíndrico e esférico. As equações de Maxwell foram utilizados para calcular a distribuição do campo eletromagnético de micro-ondas no interior da cavidade do forno de micro-ondas e nas amostras, juntamente com a equação de calor. Quantitativamente, a capacidade de absorção de potência e uniformidade da distribuição de temperatura foram, respectivamente, descritas pela eficiência de absorção de potência (PAE) e o coeficiente de variação (COV). Gráficos bidimensionais da evolução da temperatura e do campo elétrico em função do tempo foram usados para determinar as localizações dos picos ressonantes em função do número do pico. A taxa de eficiência de aquecimento foi avaliada através do grau de fuga térmica $\Delta T$ e evolução da temperatura média $\bar{T}$ e sua relação com a energia absorvida pelas amostras e COV, respectivamente. O coeficiente de avaliação abrangente (CEC), que descreve a usabilidade de uma amostra específica na indústria foi calculado para as formas e tamanhos das biomassas em função da potência e da umidade. As amostras foram classificadas de acordo com o comprimento de onda em cada amostra e os números de penetração em diferentes grupos.			
12. GRAU DE SIGILO:  <p style="text-align: center;">( X ) OSTENSIVO                      ( ) RESERVADO                      ( ) SECRETO</p>			